

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:

Božič, L., 2014. Utrjevanje poškodovanih zidov s steklenimi vrvicami in epoksidnimi smolami. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Bosiljkov, V., somentorica Kržan, M.): 57 str.

Datum arhiviranja:06-01-2015

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Božič, L., 2014. Utrjevanje poškodovanih zidov s steklenimi vrvicami in epoksidnimi smolami. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bosiljkov, V., co-supervisor Kržan, M.): 57 pp.

Archiving Date: 06-01-2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

**VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
KONSTRUKCIJSKA SMER**

Kandidat:

LUKA BOŽIČ

**UTRJEVANJE POŠKODOVANIH ZIDOV S
STEKLENIMI VRVICAMI IN EPOKSIDNIMI SMOLAMI**

Diplomska naloga št.: 507/KS

**RETROFITTING DAMAGED WALLS WITH GLASS
CHORDS AND EPOXY RESINS**

Graduation thesis No.: 507/KS

Mentor:

izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov

Predsednik komisije:

doc. dr. Tomo Cerovšek

Somentorica:

asist. Meta Kržan

Član komisije:

izr. prof. dr. Maruška Šubic-Kovač

doc. dr. Andrej Kryžanowski

Ljubljana, 22. 12. 2014

»Ta stran je namenoma prazna«

IZJAVE

Spodaj podpisani Luka Božič izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Utrjevanje poškodovanih zidov s steklenimi vrvicami in epoksidnimi smolami«.

Izjavljam, da je elektronska verzija v vsem enaka tiskani verziji.

Izjavljam, da dovljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 10.12.2014

Luka Božič

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAFSKA – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	691.2:692.2(043.2)
Avtor:	Luka Božič
Mentor:	izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov
Somentorica:	Meta Kržan, univ. dipl. inž. grad.
Naslov:	Utrjevanje poškodovanih zidov s steklenimi vrvicami in epoksidnimi smolami
Tip dokumenta:	diplomska naloga – visokošolski strokovni študij
Obseg in oprema:	57 str., 15 pregl., 51 sl., 11 graf., 5 en.,
Ključne besede:	utrjevanje kamnitega zidu, vrvica iz steklenih vlaken, epoksidna smola/malta, strižne preiskave, sprijemne trdnosti kamen-malta

Izвлеček

V diplomski nalogi sem s pomočjo vrvic iz steklenih vlaken utrdil kamniti zid, ki je bil uporabljen že v predhodnih preiskavah in v le-teh tudi delno poškodovan. Imel je tipične strižne poškodbe, ki so bile sanirane z injektiranjem cementne mešanice. V prvem delu diplomske naloge sem na dveh vrstah kamna testiral sprijemno trdnost treh različnih vrst malt, pri čemer sem zasnoval postopek in način testiranja. Vsi testi so se izvajali v laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani. Po nekaj neuspešnih poizkusih smo se odločili za določanje sprijemnih trdnosti med malto in kamnom po t.i. pull-out testu. Vse kamnite vzorce je bilo potrebno ustrezno pripraviti in vanje vgraditi stekleno vrvico premera 6 mm. Pri testu sem spremljal izvlečno silo, pomik in vrsto porušitve. Epoksidno malto, ki je izmed testiranih izkazala najboljšo sprijemno trdnost, sem nato uporabil v drugem delu diplomske naloge in sicer pri strižni utrditvi kamnitega zidu. Kamniti zid je bilo potrebno pred utrjevanjem ustrezno pripraviti. Prečno čez zid sem zvrtil luknje in na licih zidu do določene globine izpraznil horizontalne spojnice med posameznimi vrstami kamna. Za vgradnjo steklene vrvic smo izbrali epoksidni sistem, ki je vključeval epoksidni temeljno sprijemni premaz, epoksidno smolo za impregnacijo, srednje viskozno epoksidno smolo za zapolnjevanje izvrtin in epoksidno malto. Po cikličnem strižnem obremenjevanju zidu in obdelavi podatkov sem rezultate primerjal z rezultati testiranja dveh neutrjenih zidov. Pri utrjenem zidu so bili horizontalni pomiki bistveno večji kot pri neutrjenih zidih. Pri neutrjenih zidih je bila v nekem trenutku dosežena maksimalna sila, ki je nato začela upadati, pri utrjenem zidu pa je vseskozi naraščala. Oba neutrjena zida, ki sta bila testirana pod enakimi pogoji kot utrjeni zid, sta imela tipične strižne poškodbe (razpoke), medtem ko je utrjeni zid pri primerjalnem pomiku ostal praktično brez poškodb.

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION WITH ABSTRACT

UDC: 691.2:692.2(043.2)
Author: Luka Božič
Supervisor: Assoc. Prof. Vlatko Bosiljkov , PhD
Cosupervisor: Assist. Meta Kržan, Assoc.
Title: Retrofitting damaged walls with glass chord and epoxy resins
Document type: Graduation thesis – Higher professional studies
Scope and tools: 57 p., 15 tab., 51 fig., 11 graf., 5 eq.,
Keywords: retrofitting damaged wall, glass chord, epoxy resin/mortar, shear tests, bonding strength of stone-mortar

Abstract

For the purpose of my thesis I have used a glass chords for retrofitting stone masonry wall already damaged through previous testing campaigns. The wall had typical shear damages, which were first restored by linear grouting with cement mixture. In the first part of the diploma thesis I have studied appropriate test set-up for testing bond strength between glass chords and substrate. Later on I have tested two types of stone in combination with three types of mortar and determined different failure modes. All tests were conducted in a laboratory of the Faculty of civil and geodetic engineering in Ljubljana. Following couple of unsuccessful attempts a decision was made to determine bond strengths between mortar and stone by performing so called pull-out test. For this purpose stone samples needed adequate preparation and a glass chord with a diameter of 6 mm was built into them. During testing I have monitored pull-out force, movements and a type of fracture. Epoxy mortar, which showed the best bond strength among the tested ones, was then used in the second part of the diploma thesis, namely at shear retrofitting of a stone wall. Before retrofitting the wall, it needed adequate preparation. Perpendicular to a wall direction I have drilled holes and emptied horizontal joints between individual rows of stones to a certain depth. For placing in glass chords we have chosen epoxy system, which included basic epoxy primer, epoxy resin for impregnation, epoxy resin of middle viscosity for filling boreholes and epoxy mortar. Following cyclic shear loading of a wall and data processing, a comparison of obtained results with the test results of two non-retrofitted walls carried out through previous testing campaigns was made. For retrofitted wall maximal obtained horizontal movements were significantly bigger than for non-retrofitted ones. For non-retrofitted walls following the achieved a maximal force resistance started to decline, while for a retrofitted wall it was constantly increasing. Both non-retrofitted walls that were tested under the same boundary conditions as a retrofitted one had typical shear damages (cracks). On the other hand, a retrofitted wall at the same levels of displacement practically stayed intact.

»Ta stran je namenoma prazna«

ZAHVALA

Za vso pomoč pri praktičnem in teoretičnem delu diplomske naloge se zahvaljujem mentorju *izr. prof. Vlatku Bosiljkovu*.

Posebna zahvala gre *somentorici Meti Kržan*, ki me je spodbujala in mi pomagala tekom izdelave diplomske naloge. V ogromno pomoč mi je bila pri praktičnem delu v laboratoriju in kasneje pri pripravi gradiva ter pri samem pisanju diplomske naloge.

Pri praktičnem delu diplomske naloge mi je bil v veliko pomoč *Franci Čepon*, s katerim sva v laboratoriju preživela kar precej časa. Pomagal mi je pri pripravi vzorcev za testiranje in vodil vse moje preizkuse.

Za vso pomoč in spodbudo se zahvaljujem podjetju Mapei d.o.o., še posebej *direktorju Robertu Požarju* in *vodji tehnične službe Andražu Nedogu*.

Hvala *Morisi* in *moji družini*, ki ste me v času študija spodbujali in verjeli vame.

Študij je bilo zelo težko usklajevati s službenimi obveznostmi, vendar mi je z vašo pomočjo uspelo priti do konca. Pridobil sem ogromno teoretičnega in praktičnega znanja, ki ga bom pri svojem delu uspešno uporabljal še naprej.

Hvala vsem, ki ste mi kakorkoli pomagali!

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Večslojno zidane stavbe in njihova ranljivost pri potresih.....	1
1.2	FRP sistemi utrjevanja	2
1.3	Kamniti zid.....	5
1.4	Materiali uporabljeni pri preizkušanju različnih malt za vgradnjo steklenih vrvic	6
1.4.1	<i>Vrste kamna za preiskavo tipa pull-out</i>	6
1.4.2	<i>Vrste uporabljenih malt za pull-out preiskave</i>	6
1.4.3	<i>Epoksidni temeljno sprejemni premaz</i>	7
1.4.4	<i>Epoksidna smola za impregnacijo vrvice</i>	8
1.4.5	<i>Utrditvena vrvica iz steklenih vlaken</i>	8
1.4.6	<i>Srednje viskozna epoksidna smola za zapolnjevanje izvrtin v zidu</i>	8
2	LABORATORIJSKE PREISKAVE GRADNIKOV	9
2.1	Priprava gradnikov za pull-out teste.....	10
2.1.1	<i>Priprava kamnitih preizkušancev</i>	10
2.1.2	<i>Priprava vrvic in sistema vpetja za vgradnjo</i>	11
2.1.3	<i>Vgradnja vrvic v preizkušance</i>	13
2.2	Pull-out testi	15
2.2.1	<i>Vrste porušitev</i>	16
2.2.2	<i>Razlaga oznake posameznega preizkušanca</i>	18
2.2.3	<i>Rezultati in analiza preizkusov vzorcev z apnencem</i>	18
2.2.4	<i>Rezultati in analiza preizkusov vzorcev s peščenjakom</i>	21
2.2.5	<i>Primerjava maksimalnih doseženih trdnosti na peščenjaku in apnencu</i>	23
2.3	Tlačne in upogibne trdnosti malt.....	25
2.3.1	<i>Malta Mape-Antique Strutturale NHL</i>	25
2.3.2	<i>Podaljšana cementna malta</i>	27
3	LABORATORIJSKE PREISKAVE ZIDU	31
3.1	Utrditev zidu.....	31
3.1.1	<i>Priprava zidu</i>	31
3.1.2	<i>Postopek prečne utrditve zidu</i>	33
3.1.3	<i>Postopek vzdolžne utrditve zidu</i>	35
3.2	Ciklično strižno obremenjevanje utrjenega zidu	35
3.2.1	<i>Potek preiskave</i>	35
3.2.2	<i>Analiza rezultatov</i>	38
3.2.3	<i>Opis porušitev in razpok</i>	39
3.2.4	<i>Maksimalna dosežena sila in pomik</i>	41
3.2.5	<i>Analiza pomikov oziroma poškodb zidu, razvidnih iz ostalih merilnih mest</i>	42
4	POVZETEK REZULTATOV NEUTRJENIH ZIDOV	47
4.1	Predhodne preiskave na neutrjenih zidih.....	47
4.2	Analiza rezultatov	47
4.2.1	<i>Opis porušitev in razpok</i>	47
4.2.2	<i>Maksimalna dosežena sila in pomik</i>	47
5	PRIMERJAVA REZULTATOV NEUTRJENEGA IN UTRJENEGA ZIDU	51
5.1	Primerjava ovojníc sil.....	51
5.2	Primerjava sil in pomikov	51
6	ZAKLJUČEK	53
	VIRI	55

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Pomiki, maksimalne sile, tip porušitve ter izračunane povprečne vrednosti za preizkušance z apnencem ter standardni odklon sile in koeficient variacije sile	19
Preglednica 2: Globina izvrtine, maksimalne sile, površina oboda izvrtane luknje, izračunane trdnosti ter povprečne trdnosti za preizkušance z apnencem	20
Preglednica 3: Povprečne trdnosti in medsebojna primerjava	21
Preglednica 4: Pomiki, maksimalne sile, tip porušitve ter izračunane povprečne vrednosti za preizkušance s peščenjakom ter standardni odklon sile in koeficient variacije sile	22
Preglednica 5: Globina izvrtine, maksimalne sile, površina oboda izvrtane luknje, izračunane trdnosti ter povprečne trdnosti za preizkušance s peščenjakom	22
Preglednica 6: Povprečne trdnosti in medsebojna primerjava	23
Preglednica 7: Primerjava povprečnih maksimalnih trdnosti (5 vzorcev) na obeh vrstah kamna	24
Preglednica 8: Primerjava povprečnih maksimalnih trdnosti (3 vzorci) na obeh vrstah kamna	24
Preglednica 9: Rezultati preizkusov na strjeni malti (Mape-Antique Strutturale NHL)	26
Preglednica 10: Maksimalne sile in trdnosti, dosežene pri upogibnih in tlačnih preizkusih (podaljšana cementna malta)	29
Preglednica 11: Sile in pomiki v obeh smereh v karakterističnih točkah odziva	42
Preglednica 12: Povprečne sile in pomiki obeh smeri za karakteristične točke odziva	42
Preglednica 13: Sile in pomiki v obeh smereh za oba zidova v karakterističnih točkah odziva	48
Preglednica 14: Povprečne sile in pomiki obeh smeri za karakteristične točke odziva	49
Preglednica 15: Maksimalna sila in maksimalni pomik za neutrjena zidova 1 in 2 ter za utrjeni zid	52

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Protokol obremenjevanja za začetne amplitude; pomik H6 v odvisnosti od časa t	37
Grafikon 2: Sila F v odvisnosti od pomika H6	41
Grafikon 3: Pomika V1 in V2 v odvisnosti od sile F	43
Grafikon 4: Pomika V3 in V4 v odvisnosti od sile F	43
Grafikon 5: Pomika W2 in W4 v odvisnosti od sile F	44
Grafikon 6: Pomik W5 v odvisnosti od sile F	45
Grafikon 7: Pomika D1 in D2 v odvisnosti od sile F	45
Grafikon 8: Pomik I1 v odvisnosti od sile F	46
Grafikon 9: Neutrjeni zid 1; sila F v odvisnosti od pomika H6	48
Grafikon 10: Neutrjeni zid 2; sila F v odvisnosti od pomika H6	48
Grafikon 11: Ovojnice sil za Utrjeni zid, Neutrjeni zid 1 in Neutrjeni zid 2	51

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO SLIK

Slika 1: Cerkev v Christchurchu, Nova Zelandija, 2011 [4]	2
Slika 2: Utrjevanje stopniščne rame z lamelami iz ogljikovih vlaken [5]	2
Slika 3: Utrjevanje vozlišč s tkanino iz ogljikovih vlaken [6]	3
Slika 4: Dirkalno kolo za vožnjo na čas (kronometer) iz karbonskih vlaken [7]	3
Slika 5: Palice za smučarski tek iz karbonskih vlaken [8]	4
Slika 6: Kamniti zidaki [10]	5
Slika 7: a) Neutrjeni zid pred preizkušanjem, b) Po strižnem preizkusu [12]	6
Slika 8: Malta Mape-Antique – vgradnja v kalup za tlačni preizkus	7
Slika 9: Dvokomponentna epoksidna malta MapeWrap 12	7
Slika 10: Vrvica iz steklenih vlaken Mapewrap G Fiocco [18]	8
Slika 11: Vgradnja vrvice z epoksidno smolo na večji površini preizkušanca	9
Slika 12: Preizkušane z vrvice, vgrajeno z epoksidno smolo na površino utora (simulacija rege med dvema kamnitima blokoma)	10
Slika 13: Rezanje preizkušanca iz peščenjaka	11
Slika 14: Vrtanje preizkušanca iz peščenjaka	11
Slika 15: PVC čepi za sidranje vrvice iz steklenih vlaken z epoksidno malto	12
Slika 16: Impregnirana vrvica iz steklenih vlaken, posuta s suhim kremenčevim peskom	12
Slika 17: Sušenje impregnacijske epoksidne smole (utrjevanje) z vertikalnim položajem vrvice (prosto visenje)	13
Slika 18: Vgradnja impregniranih vrvic s posutjem in PVC čepi v kamnite preizkušance ter pričvrstitev na XPS panel v fazi sušenja malte	13
Slika 19: Nanos temeljno sprejemnega premaza MapeWrap Primer 1 na obodno površino izvrtine	14
Slika 20: Vgradnja impregnirane vrvice s posutjem v epoksidno malto MapeWrap 12	14
Slika 21: Preverjanje vertikalnosti vgrajenih impregniranih vrvic s posutjem	15
Slika 22: Naprava za testiranje s preizkušancem	15
Slika 23: Vpetje vrvice iz steklenih vlaken, sidrane v PVC čep, v bat	16
Slika 24: Tip porušitve A; porušitev malte	16
Slika 25: Tip porušitve B; porušitev na stiku malta-kamen	17
Slika 26: Tip porušitve D; pretrg vrvice	17
Slika 27: Preizkušanci po opravljenih preiskavah	18
Slika 28: Vgradnja malte Mape-Antique Strutturale NHL v kalup iz kocke	25
Slika 29: Test tlačne trdnosti malte Mape-Antique Strutturale NHL	26
Slika 30: Priprava (mešanje) podaljšane cementne malte	27
Slika 31: Merjenje razleza podaljšane cementne malte	27
Slika 32: Vgradnja podaljšane cementne malte v kalupa	28
Slika 33: Ponazoritev upogibnega in tlačnega preizkusa [26]	28
Slika 34: Testiranje upogibne trdnosti na prizmi iz cementne malte	28
Slika 35: Testiranje tlačne trdnosti cementne malte	29
Slika 36: Linijsko injektiran zid pred utrditvijo s steklenimi vrvicami [28]	31
Slika 37: Poglobitev spojnic s pnevmatskim kladivom	32
Slika 38: Sesanje spojnic z industrijskim sesalcem	32
Slika 39: Prečno vrtanje zidu z udarnim vrtnikom z označenimi izvrtinami	33
Slika 40: Vgrajena impregnirana vrvica prečno skozi zid (izvrtine)	34
Slika 41: Razprostiranje vrvice, ki je bila vgrajena prečno skozi zid, v horizontalno spojnico, ki poteka vzdolž zidu	34
Slika 42: Vrvica, ki je z epoksidno malto vgrajena v spojnice zidu	35
Slika 43: Prikaz razporeditve induktivnih merilcev po zidu [29]	36
Slika 44: Pozicija merilnikov	36
Slika 45: Preizkuševalna naprava [30]	38
Slika 46: Vpetje zidu v napravo	38
Slika 47: Izsek rezultatov, zapisanih v stolpcih Excel-ove datoteke	39
Slika 48: Zid med obremenjevanjem brez poškodb	40
Slika 49: Odpiranje zidu ob merilcu V3	40

Slika 50: Odpiranje zidu zgoraj pri horizontalnem pomiku + 35 mm	41
Slika 51: a) Strižne razpoke, ki potekajo diagonalno preko zidu b) Razpoke v malti in kamnu c) Strižne razpoke in razslojevanje zidu [32]	47

1 UVOD

Kamniti zidovi so pri horizontalnih pomikih, ki so večinoma posledica delovanja potresov, izredno ranljivi. Zidovi, ki so zidani iz kamnitih zidakov, običajno nimajo vertikalnih in horizontalnih vezi, ki bi omejile pomike, ki jih povzroči npr. potresno delovanje. Zaradi velike občutljivosti tovrstnih zidov se pojavljajo različne vrste utrjevanja. Ena izmed njih je utrjevanje s kompozitnimi materiali, ki zidovom pri pravilni vgradnji izredno povečajo nosilnost in/ali duktilnost. [1]

Bistvo moje diplomske naloge je bilo preizkusiti različne tipe malt za vgradnjo steklene vrvice v maltne spojnice pri utrjevanju kamnitega zidu (refugiranje), ki so ga sezidali in predhodno testirali moji predhodniki [2] ter nato na samem zidu s strižnim testom preizkusiti učinkovitost utrditve z vrvicami, vgrajenimi z izbrano malto. Pri predhodnih preiskavah je bil obravnavani zid poškodovan, zato so bile nastale razpoke predhodno tudi linijsko injektirane [1]. V svoji diplomski nalogi sem v prvem delu primerjal sprijemno trdnost stika treh vrst malt (podaljšano cementno malto, malto na osnovi naravnega hidravličnega apna Mape-Antique Strutturale NHL in epoksidno malto MapeWrap 12), z dvema vrstama kamnin, in sicer z apnencem in peščenjakom ter s stekleno vrvico. Za tovrstne preiskave sem moral pripraviti vzorce obeh vrst kamna, ki sem ju pripravil z rezanjem in vrтанjem. Precejšen obseg dela je predstavljal iskanje primernega načina preizkušanja trdnosti omenjenega stika. Po nekaj neuspešnih preizkusih smo se odločili za t.i. preizkušanje pull-out. V posamezni kamniti preizkušanelec sem vgradil impregnirano vrvico iz steklenih vlaken MapeWrap G Fiocco, ki je bila zaradi boljšega sprijema posuta s suhim kremenčevim peskom. Za sidranje v napravo za testiranje smo vrvico vgradili v PVC čepe in jih zapolnili z epoksidno malto MapeWrap 12. Malto z v prvem delu diplomske naloge ugotovljeno najvišjo sprijemno trdnostjo stika sem v nadaljevanju uporabil za utrditev kamnitega zidu. Po ustrezni pripravi zidu sem v horizontalnih regah med posameznimi vrstami kamnitih zidakov izvedel refugiranje z vrvico iz steklenih vlaken. Posamezne plasti zidu sem preko petih prečnih izvrtin z enako vrvico tudi prečno povezal. Rezultate cikličnega strižnega obremenjevanja kamnitega zidu, ki je bil utrjen z utrditveno vrvico, vgrajeno z malto z najvišjo sprijemno trdnostjo, sem primerjal z rezultati predhodnih preiskav dveh neutujenih kamnitih zidov, ki sta bila enakih dimenzij, zgrajena na enak način z enako zidarsko zvezo (smerniško) iz istih materialov in testirana pod enakimi pogoji.

1.1 Večslojno zidane stavbe in njihova ranljivost pri potresih

Zid je nehomogen material, sestavljen iz opečnih ali kamnitih zidakov raznovrstnih oblik, povezanih z vezivom. Pri zgodovinskih objektih je to vezivo pogosto apnena malta. Zaradi svoje raznovrstne sestave tako glede materiala, kot tudi oblike in zlaganja posameznih elementov, je napoved obnašanja zidov zahtevna naloga. Pri potresnih obremenitvah so zidovi poleg vertikalnih obremenitev izpostavljeni horizontalnim silam v oziroma izven svoje ravnine. Zidovi so najbolj ranljivi na obremenitve, ki potekajo pravokotno na njihovo ravnino, večslojni zidovi pa zaradi svoje slojevite strukture navadno še toliko bolj. Zaradi tega so poškodbe pri zidanih stavbah brez ustreznih vezi zelo pogoste. Poleg tega pa so pri več-slojnih zidovih tudi pri strižnih obremenitvah v ravnini pogoste porušitve izven ravnine. Na Sliki 1 se dobro vidi posledice delovanja potresa na visok del stavbe (zvonik), ki je bil sezidan iz kamnitih zidakov, brez ustreznih vezi. Za preprečevanje različnih poškodb in porušitev zidanih stavb se zidovje in celotno konstrukcijo utrjuje z različnimi utrditvenimi

sistemi. Nekateri so vezani na izboljšanje konstrukcijskega sistema (izboljšana prerazporeditev sil med posameznimi konstrukcijskimi sklopi), spet drugi pa na izboljšanje nosilnosti oziroma duktilnosti posameznih konstrukcijskih elementov. Eden izmed ukrepov so tudi t.i. FRP sistemi.

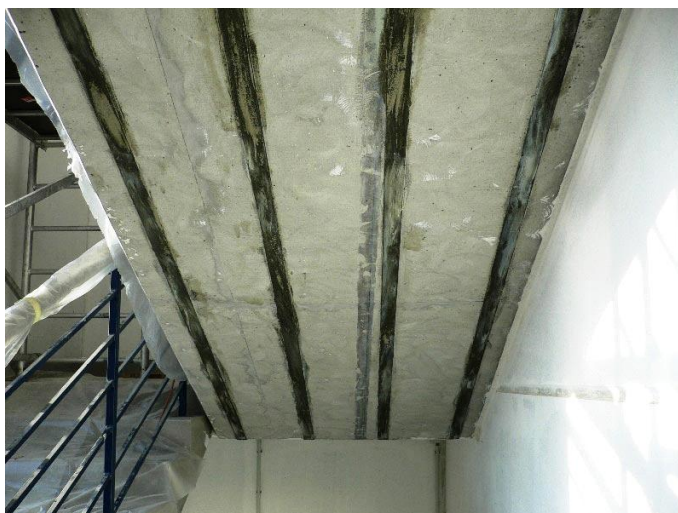


Slika 1: Cerkev v Christchurchu, Nova Zelandija, 2011 [3]

1.2 FRP sistemi utrjevanja

FRP (angl. "Fibre Reinforced Polymer") sistem je način utrjevanja posameznega elementa ali celotne konstrukcije, ki temelji na vgraditvi utrditvenih materialov različnih oblik (tkanine, lamele, palice, vrvice in cevi) in materialov z različnimi veznimi sredstvi, navadno na bazi epoksidnih smol. Običajno se uporabljajo kompoziti iz karbonskih (C – angl. "carbon"), steklenih (G – angl. "glass") ali aramidnih (A – angl. "aramid") vlaken. Pojavljajo pa se tudi novi sistemi, kot je npr. sistem z bazaltnimi (B – angl. "basalt") vlakni. Različna vezna sredstva (lepila, impregnacijske smole, temeljno prijemni premazi in injekcijske smole) pa so, kot že omenjeno, običajno narejena na osnovi epoksidnih smol.

Vgradnja FRP sistemov je navadno izredno enostavna, saj imajo izredno nizko maso, za konstrukcijo pa ne predstavljajo dodatne obtežbe v primerjavi z npr. jeklenimi utrjevalnimi elementi (vrvi, lamele, palice,...) in ne rabijo dodatnega vzdrževanja (aplikacija AKZ). FRP sistemi se pogosto uporabljajo za utrjevanje AB plošč (Slika 2) ali vozlišč AB okvirnih konstrukcij (Slika 3).



Slika 2: Utrjevanje stopniščne rame z lamelami iz ogljikovih vlaken [4]



Slika 3: Utrjevanje vozlišč s tkanino iz ogljikovih vlaken [5]

Tovrstne materiale in sisteme se poleg gradbeništva uporablja tudi v vojaški, vesoljski in letalski industriji. Ob vedno večji proizvodnji in uporabi tudi v športu (okvirji koles (Slika 4), čolni, vesla, smučarske palice (Slika 5), čevlji, smuči,...), avtomobilski industriji in drugih panogah so tovrstni sistemi vedno bolj dostopni in cenovno ugodni.



Slika 4: Dirkalno kolo za vožnjo na čas (kronometer) iz karbonskih vlaken [6]



Slika 5: Palice za smučarski tek iz karbonskih vlaken [7]

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.[8]

UPORABLJENI MATERIALI

1.3 Kamniti zid

Za zidanje zidu, na katerem sem preizkusil učinkovitost utrjevanja s stekleno vrvico, vgrajeno z v sklopu diplome izbrano malto, je bil uporabljen apnenec iz Bosne in Hercegovine (Slika 6).



Slika 6: Kamniti zidaki [9]

Zid je bil troslojno grajen iz pol obdelanih kamnitih zidakov z apneno malto z dodatkom tufa; zunanji plasti zidu sta zgrajeni s smerniško zidarsko zvezo, v notranjosti (srednja plast) pa so za polnilo uporabljeni ostanki, ki so nastali pri obdelavi kamnitih zidakov, ter apnena malta [10]. Zid je imel dimenzije $100 \times 40 \times 150 \text{ cm}^3$ (dolžina x širina x višina).

Kamniti zid je bil zaradi samega načina preizkušanja, opisanega v nadaljevanju diplome, zgoraj ter spodaj vpet v posebni armirano betonski nosilec (venec), ki je omogočal vpetje v napravo za strižne obremenitve in je hkrati služil za pomoč pri transportu po laboratoriju. Med obema armirano betonskima nosilcema na spodnji in zgornji strani so bile vgrajene kovinske navojne palice, ki so omogočale prednapetje in s tem preprečile poškodbe pri transportu (Slika 7).



Slika 7: a) Neutrjeni zid pred preizkušanjem, b) Po strižnem preizkusu [11]

1.4 Materiali uporabljeni pri preizkušanju različnih malt za vgradnjo steklenih vrvic

1.4.1 Vrste kamna za preiskavo tipa pull-out

Za potrebe preiskave stika malte z utrditveno vrvico ter s kamnom sem uporabil poleg apnenca iz Bosne in Hercegovine tudi domnevno bolj porozen peščenjak iz našega primorja, ob predpostavki da poroznost ugodno vpliva na sprijemno trdnost. Kosi peščenjaka so bili nabrani na obali v Strunjanu.

1.4.2 Vrste uporabljenih malt za pull-out preiskave

Za potrebe preiskave sem uporabil tri vrste malt. Poleg podaljšane cementne malte sem uporabil še malto brez vsebnosti cementa, ki je po informacijah proizvajalca sestavljena iz naravnega hidravličnega apna, imenovano Mape-Antique Strutturale NHL in epoksidno malto MapeWrap 12. Podaljšana cementna malta je bila pripravljena iz hidriranega apna (600 g), cementa 42,5 R (600 g) in peska 0-2 mm (3600 g), torej v masnem razmerju a:c:p = 1:1:6.

Mape-Antique Strutturale NHL (Slika 8) je po informacijah proizvajalca [12] visoko zmogljiva malta, ki se uporablja za utrjevanje zidov (skupaj z ustrežno armaturo, vrvicami ali palicami) in je sestavljena iz naravnega hidravličnega apna in posebnega eko-pucolana. Primerna je tudi za zidanje s kamnitimi, opečnimi ali drugimi zidaki in za zapolnjevanje reg med posameznimi zidaki. Suha mešanica malte vsebuje še naravni pesek (največji premer zrn je 2,5 mm), posebne dodatke in mikroarmaturo iz steklenih vlaken. Pripravljeni suhi mešanici je potrebno dodati le še ustrezno količino zamesne vode, da dobimo želeno konsistenco malte. Zagotovljena tlačna trdnost proizvajalca po 28 dnevnom zorenju je višja od 15 N/mm^2 (M 15, testiranje po metodi EN 1015-11 [13]), razred gorljivosti je E in difuzijska upornost vodni pari $\mu=60$.



Slika 8: Malta Mape-Antique – vgradnja v kalup za tlačni preizkus

MapeWrap 12 (Slika 9) je dvokomponentna tiksotropna epoksidna malta za izravnavo betonskih površin, primerna za utrjevanje skupaj s FRP tkaninami ali vrvicami [14]. Po informacijah proizvajalca malta vsebuje zelo fino polnilo (pesek) in posebne dodatke. Minimalna sprijemna trdnost z betonom je višja od 3 N/mm^2 (testiranje po sedmih dneh in pri $+ 23 \text{ }^\circ\text{C}$; do porušitve pride v betonu), natezna trdnost znaša 30 N/mm^2 (testiranje po metodi ASTM D 638 [15]), tlačna trdnost 70 N/mm^2 (testiranje po metodi ASTM C 579 [16]), upogibna trdnost pa 40 N/mm^2 (testiranje po metodi ISO 178 [17]). Njene končne lastnosti so dosežene po približno sedmih dneh.



Slika 9: Dvokomponentna epoksidna malta MapeWrap 12

1.4.3 Epoksidni temeljno sprijemni premaz

Pred vgradnjo epoksidne malte sem nanese na stično površino malta-kamen poseben dvokomponentni epoksidni temeljno sprijemni premaz MapeWrap Primer 1 [18]. Izdelek je po informacijah proizvajalca brez topil, izredno dobro penetrira, izboljša oprijem in medsebojno zveže fine delce-prah. Nadgradnjo z epoksidno smolo sem izvedel na sveži temeljno sprijemni premaz. Izdelek je zelo tekoč. Njegova sprijemna trdnost z betonom je višja od 3 N/mm^2 (testiranje po sedmih dneh in pri $+ 23 \text{ }^\circ\text{C}$; do porušitve pride v betonu).

1.4.4 Epoksidna smola za impregnacijo vrvic

Pred vgradnjo utrditvene vrvic sem vrvico impregniral s strani proizvajalca za ta namen priporočeno dvokomponentno tekočo epoksidno smolo MapeWrap 21 [19]. Vrvico sem impregniral (potopil) v pripravljeno impregnacijsko epoksidno smolo, odcedil in posul s suhim kremenčevim peskom. Sprijemna trdnost impregnacijske epoksidne smole je višja od 3 N/mm^2 (testiranje po 7-ih dneh in pri $+23 \text{ }^\circ\text{C}$; do porušitve pride v betonu), gostota pa je $1,1 \text{ g/m}^3$.

1.4.5 Utrditvena vrvica iz steklenih vlaken

Za utrditev zidu (strižno utrditev ter prečno povezavo slojev) in izdelavo vzorcev za preizkušanje stika pri uporabi različnih malt sem uporabil vrvico iz steklenih vlaken MapeWrap G Fiocco [20] s premerom $\phi 6 \text{ mm}$ (Slika 10). Vrvica je sestavljena iz enosno usmerjenih steklenih vlaken, ki so ovita s posebno povezovalno mrežico. Vrvica ima po celotnem prerezu enake lastnosti. Njena natezna trdnost je 2560 N/mm^2 , modul elastičnosti pa 80700 N/mm^2 . Podaljšanje ob pretrgu znaša nekaj več kot 3 %. Vrvica iz steklenih vlaken je zaradi svoje visoke natezne trdnosti, nizke gostote ($2,62 \text{ g/m}^3$), alkalne odpornosti, odpornosti na korozijo (v primerjavi s kovinsko armaturo) in zaradi odlične odpornosti na utrujanje zelo primerna za utrjevanje zidov.



Slika 10: Vrvica iz steklenih vlaken Mapewrap G Fiocco [1]

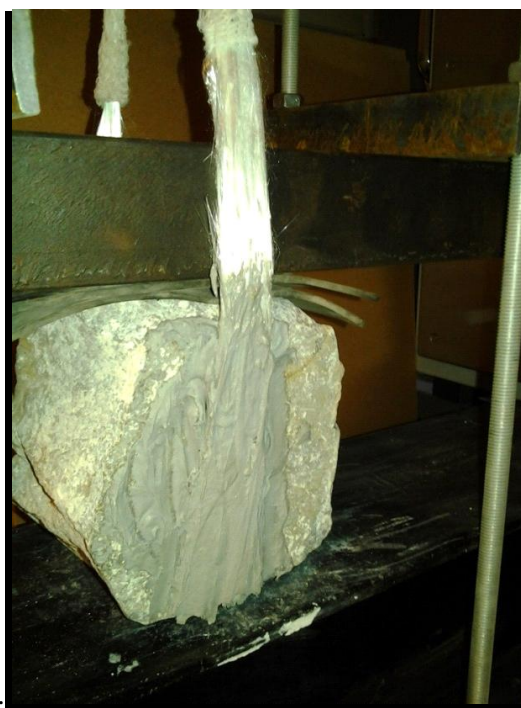
1.4.6 Srednje viskozna epoksidna smola za zapolnjevanje izvrtin v zidu

Za zapolnjevanje izvrtin, ki so potekale prečno čez zid, sem po vgradnji vrvic, s katero sem prečno povezal zunanja sloja zidu, uporabil srednje viskozno dvokomponentno epoksidno smolo MapeWrap 31 [21]. Smola je po medsebojnem mešanju obeh komponent želatinaste sestave in omogoča razmeroma enostavno vtiskanje skozi izvrtine, s čimer dosežemo zapolnjenost po celotnem prerezu in dober oprijem vrvic na površino zidu. Sprijemna trdnost z betonom je višja od 3 N/mm^2 (testiranje po sedmih dneh in pri $+23 \text{ }^\circ\text{C}$; do porušitve pride v betonu), natezna trdnost znaša 40 N/mm^2 (testiranje po metodi ASTM D 638 [15]), tlačna trdnost 70 N/mm^2 (testiranje po metodi ASTM C 579 [16]), upogibna trdnost pa 70 N/mm^2 (testiranje po metodi ISO 178 [17]). Njene končne lastnosti so dosežene po približno sedmih dneh.

2 LABORATORIJSKE PREISKAVE GRADNIKOV

Za testiranje stika posamezne malte s posamezno vrsto kamna in vrvico sem moral v odvisnosti od razpoložljive opreme in možnosti priprave preizkušancev poiskati primeren način. Pregledal sem precej virov [22], [23], [24], [25] in [26], vendar ustreznih preiskav nisem zasledil. Po posvetovanju z mentorjem in somentorico smo se odločili za preizkusno testiranje vrvic, ki je bila na kamniti blok prilepljena z epoksidno malto. Vrvico sem z epoksidno malto prilepil na dve stranici kamna in z njo naredil zanko (Slika 11), ki sem jo vstavil v napravo za preizkušanje nateznih trdnosti. Vrvica ni bila impregnirana z epoksidno smolo, saj bi s tem dobili togo vrvico/zanko (palico), ki je ne bi mogli vpeti v napravo za preizkušanje nateznih trdnosti.

Pri preizkusu se je izkazalo, da je prišlo do pretrga v vrvici in da ni popustil stik epoksidna malta-kamen oziroma malta-vrvica, kot smo želeli. Predvideval sem, da je bila stična površina med kamnom in epoksidno smolo, v kateri je bila vrvica nekoliko razprta v obliko pahljače, prevelika in je zaradi tega prišlo do pretrga v vrvici.



Slika 11: Vgradnja vrvic z epoksidno smolo na večji površini preizkušanca

Sledil je drugi preizkus, kjer sem na dveh stranicah kamna s kotno rezalko zarezal dva utora, ki sta ponazarjala fugo med dvema vrstama kamna na zidu. Fuga je bila globoka približno 1 cm in ravno toliko široka (Slika 12). Tudi ob ponovnem poizkusu se je izkazalo, da je epoksidna malta premočna oziroma stična površina prevelika, saj je spet prišlo do pretrga v sami vrvici.



Slika 12: Preizkušavec z vrvice, vgrajeno z epoksidno smolo na površino utora (simulacija rege med dvema kamnitima blokoma)

Po ponovnem posvetovanju smo se odločili, da poizkusimo testirati prijemne trdnosti malte s kamnom po analogiji pull-out (izvlečnih) testov za testiranje stikov armaturnih palic z betonom. Odločil sem se, da bom vse preizkušance narezal na enako debelino 5 cm in jih s svedom s premerom 30 mm prevrtal. Pri samem vrtnanju se je izkazalo, da mi pri zadnjem delu vrtnanja nikakor ne bo uspelo izvrtati luknje brez poškodbe (odkrušitve) spodnjega dela kamna, ki je bil seveda pri vsakem vzorcu različen, zaradi tega vzorci ne bi bili primerljivi med sabo.

Vnovično smo se skupaj posvetovali in odločili, da poizkusim vrtati v vsak vzorec do globine 30 mm in s tem zagotovim enako stično površino med malto in kamnom pri vseh vzorcih ter primerljivost testov. Ta način, ki je bolj podrobno predstavljen v nadaljevanju, se je izkazal za izvedljivega in primernega ter sem ga kasneje tudi uporabil za pripravo vseh preizkušancev.

2.1 Priprava gradnikov za pull-out teste

2.1.1 Priprava kamnitih preizkušancev

Priprava vzorcev je bila delovno zelo zahtevna. Iz vsake vrste kamna sem pripravil 17 preizkušancev, saj sem se za testiranje s posamezno vrsto malte zaradi raztrosa rezultatov odločil za 5 vzorcev. Dva dodatna sem imel za rezervo. Skupaj sem torej pripravil 34 vzorcev (tri različne malte na dveh kamninah). Vsakega posebej sem s pomočjo krožne žage za kamen z vodnim hlajenjem narezal na bloke s pravnimi vzporednimi stranicami na približno enaki višini (Slika 13).



Slika 13: Rezanje preizkušanca iz peščenjaka

V tako pripravljene vzorce sem z udarnim električnim vrtalnikom z različno debelimi svedri izvrtal luknje, ki so bile globoke 30 mm. Pri vrtanju sem najprej pričel z ožjimi svedri in jih nato postopoma menjal do končnega premera 30 mm. Brez postopnega povečevanja premera lukenj je v kamnu prišlo do poškodb; krušenja ali razpok.



Slika 14: Vrtanje preizkušanca iz peščenjaka

2.1.2 Priprava vrvic in sistema vpetja za vgradnjo

Vrvice iz steklenih vlaken sem narezal na približno 45 cm dolge kose. Vsak kos vrvic sem nato vgradil skozi luknjo v PVC čep od odtočne cevi (Slika 15). Čep mi je služil za pomoč pri vpetju v bat, s katerim smo izvajali pull-out teste. V čepu sem vrvico razprostrl v obliki pahljače in čep zapolnil z epoksidno malto. Na ta način sem ustrezno sidral vrvico v čepu, ki je bila tako pripravljena za vgradnjo v kamen.



Slika 15: PVC čepi za sidranje vrvic iz steklenih vlaken z epoksidno malto

Preden pa sem jo lahko vgradil v posamezni preizkušane (kamen), sem moral vrvico utrditi, da je dobila obliko trde palice. V ta namen sem, kot že rečeno, vrvico impregniral z impregnacijsko epoksidno smolo in jo še svežo posul s suhim kremenčevim peskom (Slika 16). Pesek se namreč delno vtisne v samo impregnacijsko smolo in kasneje nudi boljši oprijem vrvic z malto pri nadaljnji vgradnji.



Slika 16: Impregnirana vrvica iz steklenih vlaken, posuta s suhim kremenčevim peskom

Tako pripravljene impregnirane vrvic s posutjem iz suhega kremenčevega peska, ki so bile vgrajene v PVC čepce, sem obesil na posebej pripravljena stojala, ki so omogočala prosto vertikalno visenje vrvic

(Slika 17). Na ta način sem dosegel, da je bil čep, ki je služil za vpetje, pravokotno poravnani glede na impregnirano ter posuto vrvico, ki je po fazi vezave impregnacijske epoksidne smole prešla v obliko toge palice.



Slika 17: Sušenje impregnacijske epoksidne smole (utrjevanje) z vertikalnim položajem vrvice (prosto visenje)

2.1.3 Vgradnja vrvic v preizkušance

Impregnirano vrvico s čepom za vpetje sem vgradil v izvrtane luknje kamnitih preizkušancev. Vgrajene vrvice sem po posamezni vgradnji pričvrstil z žičniki na plošče XPS, ki so nudile ustrezno oporo v fazi sušenja (zorenja) posamezne malte (Slika 18).



Slika 18: Vgradnja impregniranih vrvic s posutjem in PVC čepi v kamnite preizkušance ter pričvrstitev na XPS panel v fazi sušenja malte

Pred vgradnjo malte Mape-Antique Strutturale NHL sem luknjo posameznega preizkušanca temeljito očistil in odprašil. Površino izvrtine sem rahlo navlažil in s tem izboljšal oprijem malte. Z malto primerne konsistence (po navodilih proizvajalca) sem zapolnil luknjo in vanjo vstavil impregnirano vrvico ter jo s krožnimi gibi vgradil do dna izvrtine.

Po istem postopku sem impregnirano vrvico vgradil tudi v podaljšano cementno malto.

Ravno tako kot v prejšnjih dveh primerih sem luknje preizkušancev odprašil in očistil. Površino izvrtine sem premazal s temeljno sprejemnim premazom MapeWrap Primer 1 (Slika 19) in nato vrvico vgradil v epoksidno malto MapeWrap 12 (Slika 20).



Slika 19: Nanos temeljno sprejemnega premaza MapeWrap Primer 1 na obodno površino izvrtine



Slika 20: Vgradnja impregnirane vrvice s posutjem v epoksidno malto MapeWrap 12

V vseh treh primerih vgradnje vrvice, sem pri vseh vzorcih kontroliral vertikalnost vrvice, kot je prikazano na Sliki 21.



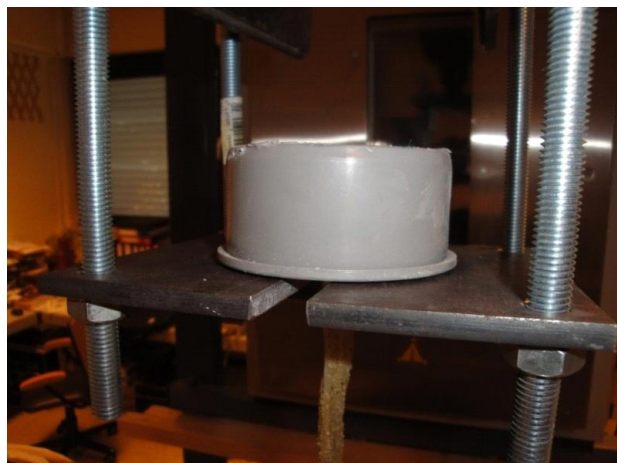
Slika 21: Preverjanje vertikalnosti vgrajenih impregniranih vrvic s posutjem

2.2 Pull-out testi

Testi so bili izvedeni na hidravličnem batu kapacitete 100 kN. Na Sliki 22 je prikazan sistem preizkusa, na Sliki 23 pa sistem vpetja preizkušancev na vrhu. Pri preizkusu smo preizkušance obremenjevali tako, da smo monotono povečevali pomik (s hitrostjo 0,040 mm/s) in spremljali pripadajočo silo do porušitve vzorca oz. do upadanja sile pri hkratnem povečevanju pomika.



Slika 22: Naprava za testiranje s preizkušancem



Slika 23: Vpetje vrvic iz steklenih vlaken, sidrane v PVC čep, v bat

2.2.1 Vrste porušitev

Pred samim pričetkom izvedbe pull-out preiskav sem predvidel 5 različnih načinov oziroma tipov porušitev (označeni A-E), ki so opisani v nadaljevanju. V nekaj primerih je prišlo do vmesnega tipa porušitve, ki sem ga opisal z deležem posamezne vrste porušitve. Na primer, delno porušitev v malti (porušitev tipa A) in delno porušitev na stiku malta-kamen (porušitev tipa B) sem opisal na naslednji način: 40 A / 60 B (40 % vzorca porušitev malte, 60 % stika malta-kamen).

Tip porušitve A (malta)

Pri tovrstni porušitvi je prišlo do loma v samem prerezu malte (Slika 24). Ostanke malte so bili tako na vrvici, kot tudi na sami površini izvrtine.



Slika 24: Tip porušitve A; porušitev malte

Tip porušitve B (stik malta-kamen)

Pri tipu porušitve B je prišlo do popuščanja na stiku malta-kamen. Polnilo (malta) je bilo skupaj z impregnirano palico izvlečeno iz izvrtine. Vidna je bila zelo gladka površina izvlečene malte na vrvici (Slika 25).



Slika 25: Tip porušitve B; porušitev na stiku malta-kamen

Tip porušitve C (kamen)

V tem primeru bi prišlo do porušitve v samem prerezu kamna, za kar pa se je kasneje izkazalo, da je bila vrvica za tovrstno porušitev prešibka. Domneval sem namreč, da bi v primeru izredno trdne epoksidne malte lahko prišlo do loma v samem kamnu.

Tip porušitve D (vrvice)

V to skupino porušitev spada pretrg vrvice, bodisi v sredinskem delu vrvice, bodisi ob vpetju vrvice (Slika 26). Ob preiskavah se je izkazalo, da je v vseh primerih pri tipu porušitve D prišlo do porušitve tik ob vpetju (PVC čep), saj je bil zaradi spremembe togosti tam najbolj kritični prerez.



Slika 26: Tip porušitve D; pretrg vrvice

Tip porušitve E (stik vrvica-malta)

V tem primeru bi prišlo do porušitve na stiku med vrvico in malto. Pričakovano je vrvica s posipom iz suhega kremenčevega peska nudila dovolj dober oprijem, da do tovrstne porušitve ni prišlo.

2.2.2 Razlaga oznake posameznega preizkušanca

Pred samo vgradnjo impregnirane vrvice v malto, sem vsak preizkušavec označil (Slika 27). Npr. 1-3 P pomeni, da je vrsta kamna apnenec (1), zaporedna številka vzorca 3 in da je vrvica vgrajena v podaljšano cementno malto (P). Oznaka M pomeni, da je vrvica vgrajena v malto Mape-Antique Strutturale NHL, oznaka E pa pomeni, da je vgrajena v epoksidno malto MapeWrap 12.

Pri peščenjaku pa so oznake naslednje. Npr. oznaka 4 E pomeni, da je vrsta kamna peščenjak, zaporedna številka vzorca 4 in da je malta, v katero je bila vgrajena vrvica epoksidna (MapeWrap 12). Oznaka M pomeni, da je vrvica vgrajena v malto MapeAntique Strutturale NHL in P, da je vgrajena v podaljšano cementno malto.



Slika 27: Preizkušanci po opravljenih preiskavah

2.2.3 Rezultati in analiza preizkusov vzorcev z apnencem

V spodnji tabeli (Preglednica 1) so za vse preizkušance iz apnenca zapisani pomiki pri največji sili, največja sila ter tip porušitve. Za ponovitve testov z enakimi preizkušanci so izračunane povprečne vrednosti pomikov in maksimalnih sil, poleg pa standardni odkloni ter koeficient variacije za maksimalne sile. Za posamezne preizkušance je v Preglednici 2 podana tudi izmerjena globina luknje, ki služi za izračun oboda površine izvrtine in nato trdnosti.

Preglednica 1: Pomiki, maksimalne sile, tip porušitve ter izračunane povprečne vrednosti za preizkušance z apnencem ter standardni odklon sile in koeficient variacije sile

Preizkušanec	Pomi k [mm]	Sila [kN]	Tip porušitve	Povp. pomik [mm]	Povp. sila [kN]	Stand. odklon sile [kN]	Koef. variacije sile [%]
1-1 P	5,97	0,98	A	3,50	0,89	0,257	29
1-2 P	2,24	0,61	A				
1-3 P	4,12	1,10	A				
1-4 P	2,23	0,57	50 A / 50 B				
1-5 P	2,92	1,20	70 A / 30 B				
1-1 E	4,73	6,43	D	7,21	8,58	2,269	27
1-2 E	9,67	12,49	D				
1-3 E	7,57	6,89	D				
1-4 E	7,36	9,76	D				
1-5 E	6,72	7,32	D				
1-1 M	6,17	0,34	A	3,31	0,55	0,150	27
1-2 M	2,01	0,55	90 A / 10 B				
1-3 M	2,81	0,67	A				
1-4 M	3,08	0,45	A				
1-5 M	2,49	0,76	B				

Površino oboda luknje sem izračunal po enačbi:

$$A = \pi r^2 + 2\pi r v \quad (1)$$

kjer je:

A...površina oboda luknje [mm²]

π ...konstanta [3,14]

r...polmer izvrtine [15 mm]

v ...globina izvrtine [mm]

Trdnost sem izračunal po enačbi:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

kjer je:

σ ...trdnost [kN/mm²]

F...sila [kN]

A...površina oboda luknje [mm²]

Preglednica 2: Globina izvrtine, maksimalne sile, površina oboda izvrtane luknje, izračunane trdnosti ter povprečne trdnosti za preizkušance z apnencem

Preizkušanec	Globina izvrtine [mm]	Sila [kN]	Površina oboda [mm ²]	Trdnost [N/mm ²]	Povpr. trdnost [N/mm ²]
1-1 P	34,5	0,98	3956	0,248	0,23
1-2 P	32,2	0,61	3739	0,163	
1-3 P	36,6	1,10	4154	0,265	
1-4 P	31,3	0,57	3654	0,156	
1-5 P	31,3	1,20	3654	0,328	
1-1 E	31,5	6,43	3673	1,750	2,31
1-2 E	32,2	12,49	3739	3,340	
1-3 E	30,2	6,89	3551	1,940	
1-4 E	31,5	9,76	3673	2,657	
1-5 E	34,2	7,32	3928	1,863	
1-1 M	30,0	0,34	3532	0,096	0,16
1-2 M	30,1	0,55	3541	0,155	
1-3 M	31,0	0,67	3626	0,185	
1-4 M	29,1	0,45	3447	0,131	
1-5 M	31,0	0,76	3626	0,210	

Kot vidimo v Preglednici 1, je pri podaljšanji cementni malti povprečni pomik znašal 3,50 mm in povprečna trdnost 0,23 N/mm² (Preglednica 2). Pri treh preizkušancih je prišlo do tipa porušitve A in pri dveh do tipa porušitve A in B. Prevladuje torej tip porušitve A.

Pri epoksidni malti je v vseh primerih popustila vrstica (tip porušitve D), zaradi česar nisem mogel določiti sprjemne trdnosti malte s kamnom. Povprečen pomik je znašal 7,21 mm (Preglednica 1), povprečna trdnost pa 2,31 N/mm² (Preglednica 2).

Pri preizkušancih, kjer je bila utrditvena vrstica vgrajena v malto Mape-Antique Strutturale NHL, je povprečni pomik znašal 3,31 mm (Preglednica 1), povprečna trdnost pa je znašala 0,16 N/mm² (Preglednica 2). Pri treh preizkušancih je bil tip porušitve A, eden A in B ter eden tipa B.

V spodnji tabeli sem medsebojno primerjal povprečne vrednosti trdnosti za posamezno vrsto malte. Za referenčno osnovo sem vzel povprečje petih preizkušancev, ki so bili vgrajeni v epoksidno malto, saj je v vseh primerih prišlo do porušitve v vrstici. Povprečje največjih trdnosti pri epoksidni malti sem določil kot najvišjo možno nosilnost (100 %) in jo označil z $\sigma_{E,povp}$ in to vrednost primerjal s podaljšano cementno malto in malto Mape-Antique Strutturale NHL, ki sem ju v Preglednici 3 označil z σ_{povp} .

Preglednica 3: Povprečne trdnosti in medsebojna primerjava

Vrsta malte	Pov. trdnost [kN/mm ²]	$\sigma_{povp} / \sigma_{E,povp}$ [%]
Podaljšana cementna	0,23	9,96
MapeWrap 12	2,31	100
Mape-Antique Strutturale NHL	0,16	6,93

Podaljšana cementna malta je dosegla 9,96 % največje nosilnosti preizkušancev, Mape-Antique Strutturale NHL pa 6,93 %. Iz te primerjave je mogoče razbrati, da je sprijemna trdnost epoksidne malte MapeWrap 12 bistveno višja od ostalih dveh. Pri primerjavi je potrebno upoštevati, da je pri epoksidni malti prišlo do porušitve v stekleni vrvici in zaradi tega ne morem oceniti, kakšna je dejanska sprijemna trdnost epoksidne malte.

2.2.4 Rezultati in analiza preizkusov vzorcev s peščenjakom

V spodnji tabeli (Preglednica 4) so za vse preizkušance iz peščenjaka zapisani pomiki pri največji sili, največja sila in tip porušitve. Izračunane so tudi povprečne vrednosti pomikov in maksimalnih sil z deviacijami in koeficienti variacije.

Preglednica 4: Pomiki, maksimalne sile, tip porušitve ter izračunane povprečne vrednosti za preizkušance s peščenjakom ter standardni odklon sile in koeficient variacije sile

Preizkušanec	Pomik [mm]	Sila [kN]	Tip porušitve	Povp. pomik [mm]	Povp. sila [kN]	Stand. odklon sile [kN]	Koef. variacije sile [%]
1 P	5,92	0,87	B	3,69	0,96	0,379	39
2 P	3,92	1,70	B				
3 P	2,27	0,68	20 A / 80 B				
4 P	3,43	0,68	B				
5 P	2,93	0,89	40 A / 60 B				
1 E	6,98	9,31	D	7,73	9,72	1,615	17
2 E	7,80	8,59	D				
3 E	7,83	10,99	D				
4 E	9,56	12,08	D				
5 E	6,47	7,62	D				
1 M	7,79	1,02	A	6,12	0,83	0,206	25
2 M	9,49	0,53	A				
3 M	4,71	0,73	A				
4 M	4,86	0,77	A				
5 M	3,74	1,10	70 A / 30 B				

Preglednica 5: Globina izvrtine, maksimalne sile, površina oboda izvrtane luknje, izračunane trdnosti ter povprečne trdnosti za preizkušance s peščenjakom

Preizkušanec	Globina izvrtine [mm]	Sila [kN]	Površina oboda [mm ²]	Trdnost [N/mm ²]	Povpr. trdnost [N/mm ²]
1 P	34,0	0,87	3909	0,223	0,26
2 P	32,3	1,70	3749	0,453	
3 P	32,2	0,68	3739	0,182	
4 P	32,0	0,68	3720	0,183	
5 P	32,5	0,89	3768	0,236	
1 E	37,0	9,31	4191	2,221	2,51
2 E	33,1	8,59	3824	2,246	
3 E	33,2	10,99	3833	2,867	
4 E	32,0	12,08	3720	3,247	
5 E	33,1	7,62	3824	1,992	
1 M	34,1	1,02	3918	0,260	0,21
2 M	33,2	0,53	3833	0,138	
3 M	34,3	0,73	3937	0,185	
4 M	33,4	0,77	3852	0,200	
5 M	35,1	1,10	4012	0,274	

Pri podaljšani cementni malti je povprečni pomik znašal 3,69 mm (Preglednica 4) povprečje največjih trdnosti pa 0,26 N/mm² (Preglednica 5). Pri treh preizkušancih je prišlo do tipa porušitve B v dveh primerih pa je bil tip porušitve A in B.

Pri epoksidni malti je v vseh primerih popustila vrvica (tip porušitve D), zaradi tega nisem mogel določiti sprijemne trdnosti malte. Povprečen pomik je znašal 7,73 mm (Preglednica 4), povprečje največjih trdnosti pa je znašalo 2,51 N/mm² (Preglednica 5).

Pri preizkušancih, kjer je bila utrditvena vrvica vgrajena v malto Mape-Antique Strutturale NHL je povprečni pomik znašal 6,12 mm (Preglednica 4), povprečna vrednost največjih trdnosti pa je znašala 0,21 N/mm² (Preglednica 5). V štirih primerih je prišlo do tipa porušitve A, v enem pa A in B.

V spodnji tabeli sem medsebojno primerjal povprečne vrednosti največjih trdnosti za posamezno vrsto malte. Za osnovo sem vzel povprečje petih preizkušancev, ki so bili vgrajeni v epoksidno malto, saj je v vseh primerih prišlo do porušitve v vrvici. Povprečje največjih trdnosti pri epoksidni malti sem določil kot najvišjo možno nosilnost (100 %) in jo označil z $\sigma_{E,povp}$ in to vrednost primerjal s podaljšano cementno malto in malto Mape-Antique Strutturale NHL, ki sem ju v Preglednici 6 označil z σ_{povp} .

Preglednica 6: Povprečne trdnosti in medsebojna primerjava

Vrsta malte	Pov. trdnost [kN/mm ²]	$\sigma_{povp} / \sigma_{E,povp}$ [%]
Podaljšana cementna	0,26	10,36
MapeWrap 12	2,51	100
Mape-Antique Strutturale NHL	0,21	8,37

Podaljšana cementna malta je dosegla 10,36 % največje trdnosti preizkušancev, Mape-Antique Strutturale NHL pa 8,37 % (Preglednica 6). Iz te primerjave je mogoče razbrati, da je sprijemna trdnost epoksidne malte MapeWrap 12 bistveno višja od ostalih dveh. Pri primerjavi je potrebno upoštevati, da je pri epoksidni malti prišlo do porušitve v stekleni vrvici in zaradi tega ne vem, kakšna je sprijemna trdnost epoksidne malte.

2.2.5 Primerjava maksimalnih doseženih trdnosti na peščenjaku in apnencu

Epoksidna malta je imela sprijemno trdnost z obema vrstama kamna odlično, saj je do pretrga prišlo v sami vrvici in sprijemnih trdnosti nisem mogel določiti.

Preglednica 7: Primerjava povprečnih maksimalnih trdnosti (5 vzorcev) na obeh vrstah kamna

Vrsta malte	Povprečna trdnost peščenjak [kN/mm²]	Povprečna trdnost apnenec [kN/mm²]
Podaljšana cementna	0,26	0,23
MapeWrap 12	2,51	2,31
Mape-Antique Strutturale NHL	0,21	0,16

V Preglednici 8 je podana tudi primerjava povprečnih maksimalnih trdnosti na peščenjaku in apnencu za različne malte, kjer za izračun povprečja niso upoštevane najvišje in najnižje izračunane trdnosti za ponovitve enakih testov, temveč torej le 3 vzorci.

Preglednica 8: Primerjava povprečnih maksimalnih trdnosti (3 vzorci) na obeh vrstah kamna

Vrsta malte	Povprečna trdnost peščenjak [kN/mm²]	Povprečna trdnost apnenec [kN/mm²]
Podaljšana cementna	0,21	0,23
MapeWrap 12	2,45	2,15
Mape-Antique Strutturale NHL	0,22	0,16

Zaradi raztrosa (odstopanj med najvišjo in najnižjo trdnostjo) sem za končno analizo uporabil podatke iz Preglednice 8.

Pri podaljšani cementni malti sem malenkost višjo trdnost dosegel na apnencu. Vrednost je bila višja za 0,02 N/mm² (oz. za 8,7 %) (Preglednica 8). Na apnencu je bil v večini primerov tip porušitve A (porušitev v malti), na peščenjaku pa je bila v večini primerov porušitev na stiku malta-kamen (tip B).

Mape-Antique Strutturale NHL je imela precej višje vrednosti na peščenjaku. Povprečna vrednost največjih trdnosti je bila višja za 0,06 N/mm² (oz. 27,3 %) (Preglednica 8). Tip porušitve na obeh vrstah kamnov je bil v večini primerov A (porušitev v samem prerezu malte).

Iz teh rezultatov in primerjav ni mogoče enoumno določiti, na kateri vrsti kamna imajo malte boljše sprijemno trdnost, saj je bila pri podaljšani cementni malti nekoliko višja na apnencu, pri malti Mape-Antique Strutturale NHL pa precej višja na peščenjaku.

2.3 Tlačne in upogibne trdnosti malt

Na malti Mape-Antique Strutturale NHL sem izvedel tlačni preizkus, brez upogibnega, saj vsebuje mikroarmaturo. Na podaljšani cementni malti pa sem poleg tlačnega opravil tudi upogibni preizkus. Obema maltama sem izmeril tudi razlez v svežem stanju. Za tlačni test epoksidne malte se nismo odločili, saj rezultati z ostalima maltama niti ne bi bili primerljivi, saj gre za drugi velikostni razred trdnosti. Pričakovana tlačna trdnost epoksidne malte znaša 70 N/mm^2 , upogibna pa 30 N/mm^2 .

2.3.1 Malta Mape-Antique Strutturale NHL

Malto sem pripravil po navodilih proizvajalca. Zmešal sem 4,0 kg suhe prašne mešanice Mape-Antique Strutturale NHL in 0,7 kg vode.

Na sveži mešanici sem opravil tudi meritev razleza (po standardu SIST EN 1015-3:1999 [27]). Standardizirani konus sem položil na stresalno mizo in vanj v dveh slojih vgradil malto. Vsak sloj sem zgostil s standardiziranim batom z 20 udarci. Nato sem odstranil konus in s petnajstimi obrati ročice (1 obrat na sekundo) povzročil razlez malte. Razlez je znašal v dveh pravokotnih smereh 160 mm.

Preostanek malte sem uporabil za vgradnjo v kalupa za izvedbo tlačnih testov. Vgradil sem jo v dva standardna kalupa dimenzij $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ (Slika 28).



Slika 28: Vgradnja malte Mape-Antique Strutturale NHL v kalup iz kocke

Zaradi vsebovane mikroarmature v malti smo se odločili, da izvedemo le tlačni preizkus na dveh standardnih kockah dimenzij $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$, brez upogibnega preizkusa. Strjene vzorce sem tudi stehal in izmeril, s čimer sem po Enačbi 3 določil tudi gostoto strjene malte; rezultati so podani v Preglednici 9. V Preglednici so podane tudi maksimalne sile, dosežene v tlačnem preizkusu za posamezni preizkušanelec (Slika 29), ter po Enačbi 4 izračunane tlačne trdnosti.

Izračun gostote:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

kjer je:

ρ ...gostota [g/dm³]

m...masa [g]

V...volumen [dm³]

$$f_c = \frac{F}{a^2} \quad (4)$$

kjer je:

f_c ...tlačna trdnost preizkušanca [N/mm²]

F...najvišja tlačna sila [kN]

a...širina preizkušanca [mm].

Preglednica 9: Rezultati preizkusov na strjeni malti (Mape-Antique Strutturale NHL)

Preizkušanec	Masa [g]	Gostota [g/dm ³]	Maksimalna sila [kN]	Tlačna trdnost [N/mm ²]
1	1810	1810	123	11,23
2	1785	1785	100	10,00
Povprečna vrednost	1797,5	1797,5	111,5	10,62

Povprečna tlačna trdnost malte znaša 10,62 N/mm², kar je nekoliko nižje od navedene tlačne trdnosti v tehničnem listu, kjer je navedeno, da je le-ta višja od 15 N/mm². Eden od razlogov je, da je bila malta pri testiranju tlačne trdnosti stara le 14 dni. Tlačni preizkus se običajno po standardih izvaja po 28 dneh. Vsekakor bi malta na trdnosti do potrebnih 28 dni še nekoliko pridobila. Preizkus sem bil zaradi zasedenosti laboratorija prisiljen opraviti prej kot po standardiziranih 28 dneh. Za bolj merodajne podatke glede ustreznosti tlačne trdnosti malte bi moral narediti tudi večje število meritev.



Slika 29: Test tlačne trdnosti malte Mape-Antique Strutturale NHL

2.3.2 Podaljšana cementna malta

Podaljšano cementno malto sem pripravil v masnem razmerju a:c:p=1:1:6, iz 600 g hidriranega apna, 600 g cementa (42,5 R) in 3600 g peska zrnivosti 0-2 mm (priprava malte je prikazana na Sliki 30). Vodo sem dodajal po občutku, dokler nisem dobil želene konsistence, ki sem jo kontroliral s preizkusom razleza (Slika 31).



Slika 30: Priprava (mešanje) podaljšane cementne malte

Razlez podaljšane cementne malte po standardnem postopku SIST EN 1015-3:1999 je znašal v obeh smereh 160 mm. Za testiranje upogibne in tlačne trdnosti sem pripravil 6 prizem dimenzij 160 x 40 x 40 mm³. Malto sem vgradil v dva standardna kalupa, ki imata vsak po tri predele za vgradnjo malte (Slika 32).

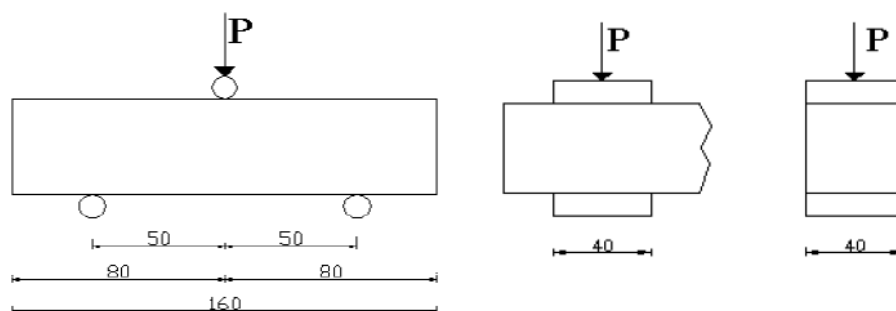


Slika 31: Merjenje razleza podaljšane cementne malte



Slika 32: Vgradnja podaljšane cementne malte v kalupa

Preizkusa sem naredil po petih tednih zorenja; najprej upogibni preizkus (Slika 34) in kasneje iz obeh polovic prizme še tlačni preizkus (Slika 35). Preizkusa s standardnimi razdaljami podpor sta prikazana na Sliki 33. Iz maksimalnih doseženih sil, ki so podane v Preglednici 10, sem po Enačbi 5 izračunal upogibne natezne trdnosti, po Enačbi 4 pa tlačne trdnosti.



Slika 33: Ponazoritev upogibnega in tlačnega preizkusa [28]



Slika 34: Testiranje upogibne trdnosti na prizmi iz cementne malte



Slika 35: Testiranje tlačne trdnosti cementne malte

$$f_t = \frac{1,5FL}{a^3} \quad (5)$$

Kjer je:

f_t ...upogibna natezna trdnost preizkušanca [N/mm²]

F...najvišja upogibna sila [kN]

L...razdalja med podporami [mm]

a...dimenzija prečnega prereza preizkušanca [mm].

Razdalja med podporami je znašala 100 mm, za dimenzijo prečnega prereza preizkušancev pa sem prevzel enake vrednosti, in sicer 40 mm.

Preglednica 10: Maksimalne sile in trdnosti, dosežene pri upogibnih in tlačnih preizkusih (podaljšana cementna malta)

Preizkuš.	Sila (upogib) [kN]	Sila (tlak) [kN]		Upogibna natezna trdnost [N/mm ²]	Povp. upog. nat. trd. [N/mm ²]	Tlačna trdnost [N/mm ²]		Povp. tlačna trdnost [N/mm ²]
1	0,94	15,3	14,3	2,20	2,43	9,56	8,94	9,64
2	1,06	15,4	14,8	2,48		9,63	9,25	
3	1,02	14,6	15,5	2,39		9,13	9,69	
4	1,00	16,0	15,8	2,34		10,00	9,88	
5	1,12	16,1	15,5	2,63		10,06	9,69	
6	1,09	15,3	16,5	2,55		9,56	10,31	

Povprečna upogibna natezna trdnost za podaljšano cementno malto je znašala 2,43 N/mm², povprečna tlačna trdnost pa 9,64 N/mm².

»Ta stran je namenoma prazna«

3 LABORATORIJSKE PREISKAVE ZIDU

Zaradi že omenjenih predhodnih preiskav in pri teh nastalih razpok (Slika 36) je bil zid linijsko injektiran in na ta način saniran. Za injektiranje je bila uporabljena komercialna cementna mešanica [1].



Slika 36: Linijsko injektiran zid pred utrditvijo s steklenimi vrvicami [29]

3.1 Utrditev zidu

3.1.1 Priprava zidu

Najprej sem moral vse horizontalne spojnice poglobiti za približno 4 cm. Pri delu mi je bilo v veliko pomoč električno udarno kladivo z ozkim nastavkom (Slika 37). Delo je bilo zelo dolgotrajno, saj je bilo potrebno paziti, da nisem poškodoval kamnitih blokov in celotnega zidu. Zid je imel 10 spojnic, ki jih je bilo potrebno poglobiti na obeh straneh, saj smo se odločili za shemo utrjevanja, kjer je vrvica vgrajena v vsako spojnico na obeh straneh zidu.



Slika 37: Poglobitev spojníc s pnevmatskim kladivom

Pri delu v laboratoriju, kjer je potrebno paziti na (ne)prašenje zaradi delovanja različnih naprav, nisem mogel uporabiti zračne pištole za izpihovanje, ampak sem moral vse spojnice temeljito posesati (Slika 38).



Slika 38: Sesanje spojníc z industrijskim sesalcem

Zaradi potreb po prečnem povezovanju zunanjih plasti zidu sem moral narediti 5 lukenj, ki so označene na spodnji sliki. Vrtati sem moral preko spojníc, saj sem želel čim bolj ohraniti videz

kamnitega zidu. Pri vrtnanju z električnim udarnim vrtnikom sem moral biti zelo pazljiv, da na drugi strani nisem poškodoval kamnitih zidakov. Vrtal sem s svedrom premera 20 mm.



Slika 39: Prečno vrtnanje zidu z udarnim vrtnikom z označenimi izvrtinami

Ostale luknje, ki so vidne na Sliki 39, so bile narejene za linijsko injektiranje cementne malte pri sanaciji razpok po predhodnih testiranjih. Te luknje so tudi ustrezno zapolnjene.

3.1.2 Postopek prečne utrditve zidu

Impregnacija vrvic

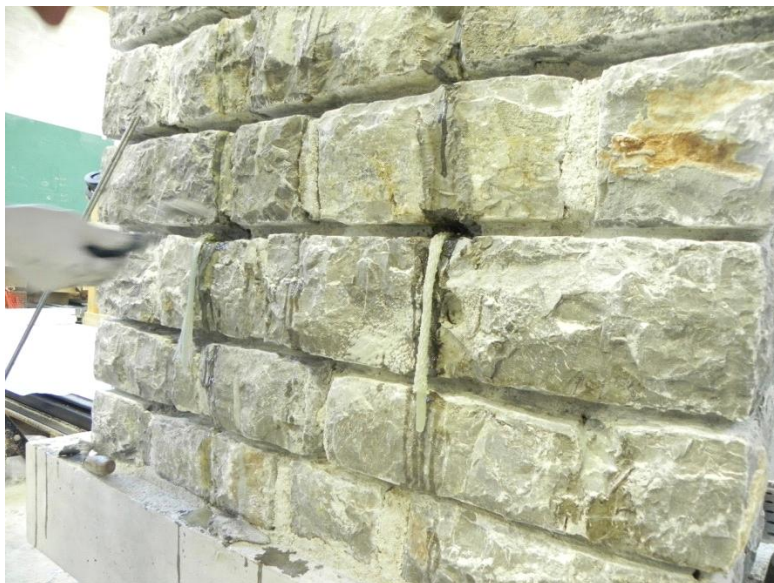
Vrvice sem odrezal na primerno dolžino (pribl. 75 cm) in jo prepojil z impregnacijsko epoksidno smolo. Vrvice sem odtisnil in odcedil.

Nanos temeljno sprijemnega epoksidnega premaza

Izvrtno ter površino spojnice levo in desno od izvrtine sem premazal s temeljno sprijemnim epoksidnim premazom. S tem sem izboljšal oprijem in medsebojno zvezal fine prašne delce ter utrdil podlago (malto in kamen).

Vstavljanje vrvic skozi izvrtino in injektiranje z injekcijsko epoksidno smolo

Vrvice sem s pomočjo kovinske zanke potegnil skozi izvrtino. Predel med površino izvrtine in vrvico sem impregniral z injekcijsko epoksidno smolo. S tem sem dosegel zapolnjenost in boljši oprijem vrvic z malto na kamnito podlago (Slika 40).



Slika 40: Vgrajena impregnirana vrvica prečno skozi zid (izvrtine)

Sidranje vrvice

Vrvico sem na vsakem koncu izvrtine razprostrl v predelu izdobljene spojnice v dolžini pribl. 15 cm na vsako stran (Slika 41). Pred tem sem to celotno območje impregniral s temeljnim sprijemnim epoksidnim premazom in čez nanese epoksidno malto. S slednjo sem v predelu spojnice vrvico tudi prekril.



Slika 41: Razprostiranje vrvice, ki je bila vgrajena prečno skozi zid, v horizontalno spojnico, ki poteka vzdolž zidu

3.1.3 Postopek vzdolžne utrditve zidu

Impregnacija vrvice

Vrvico sem odrezal na primerno dolžino (pribl. 130 cm) in jo prepojil z impregnacijsko epoksidno smolo. Vrvico sem odtisnil in odcedil.

Nanos temeljno sprijemnega epoksidnega premaza

Površino poglobljene spojnice sem premazal s temeljno sprijemnim epoksidnim premazom. S tem sem izboljšal oprijem in medsebojno zvezal fine prašne delce ter utrdil podlago (malto in kamen).

Vgradnja vrvice v epoksidno malto

Epoksidno malto sem s pomočjo ozke zidarske lopatice nanesel na poglobljeno površino spojnice. Vanjo sem vtisnil vrvico, ki je bila impregniрана z impregnacijsko epoksidno smolo. Preko vrvice sem nanesel sloj epoksidne malte in jo dobro skompaktiral, da je bilo čim manj votlih mest. Na obeh koncih zidu sem vrvico razprostrl v obliko pahljače in jo prekital (prekril) z epoksidno malto. S tem sem jo zelo učinkovito sidral (Slika 42).



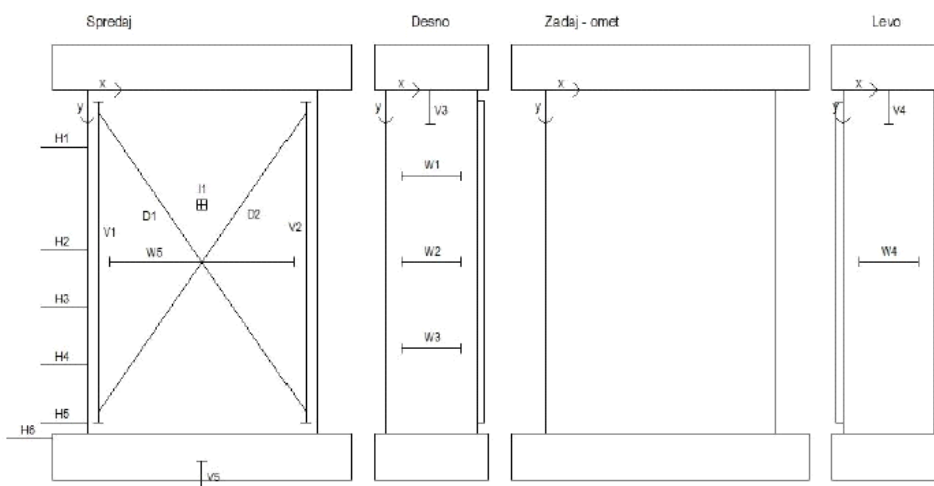
Slika 42: Vrvica, ki je z epoksidno malto vgrajena v spojnice zidu

3.2 Ciklično strižno obremenjevanje utrjenega zidu

3.2.1 Potek preiskave

Na tri stranice zidu smo namestili induktivne merilnike, ki so zaznavali pomike na 1/100 mm natančno. Na zadnji strani zidu so bili merilniki nameščeni diagonalno (D1 in D2), v sredinskem delu je bil merilnik, ki je meril pomike v horizontalni smeri (W5) in na levem in desnem robu še dva merilnika, ki sta merila pomike v vertikalni smeri (V1 in V2). Prečno na ravnino zidu (na levi in desni

strani) so bili nameščeni merilniki, ki so merili pomike pri morebitnem razslojevanju zidu (W1, W2, W3 in W4). Merilniki so bili vgrajeni tudi na stiku zid – AB nosilec (V3 in V4), ki je meril razpiranje / stiskanje zidu ob vpetju oziroma v spojnici med prvima vrstama kamnov (nameščen na kamnu v drugi vrsti). Izbočenost zidu je meril merilnik II. Pomike v horizontalni smeri pa so merili merilniki H1, H2, H3, H4, H5 in na temelju H6. Razpiranje med temeljem in podlago sta merila merilnika V5 in V6. Pozicija merilnih mest je prikazana na Sliki 43.



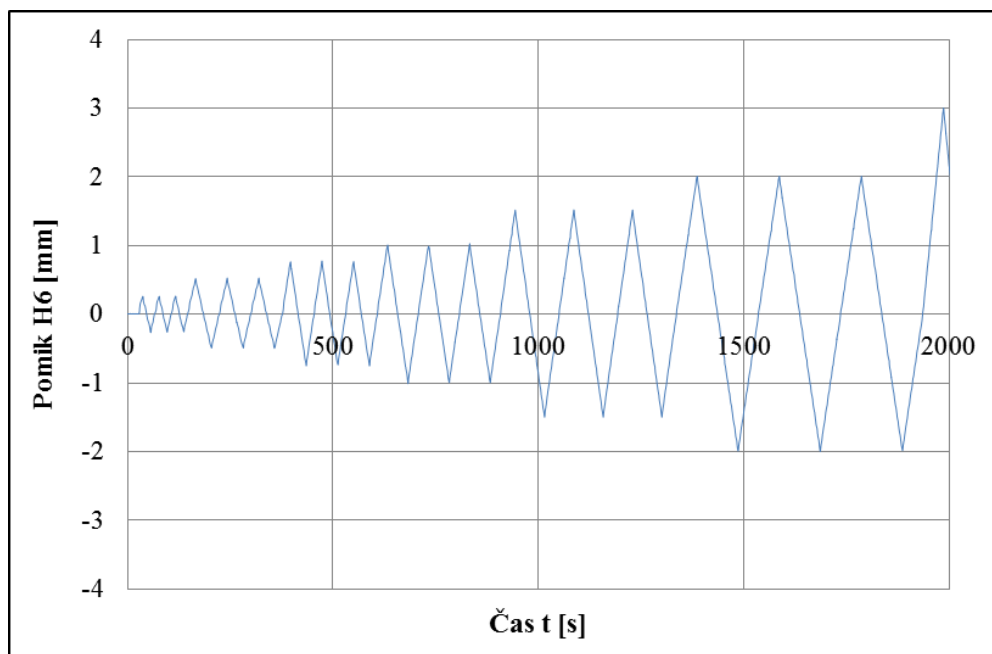
Slika 43: Prikaz razporeditve induktivnih merilcev po zidu [1]

V analizi v nadaljevanju sem prikazal rezultate induktivnih merilnikov II, V1, V2, V3, V4, H6, D1, D2, W2, W4 in W5. Njihova pozicija je vidna tudi na Sliki 44.



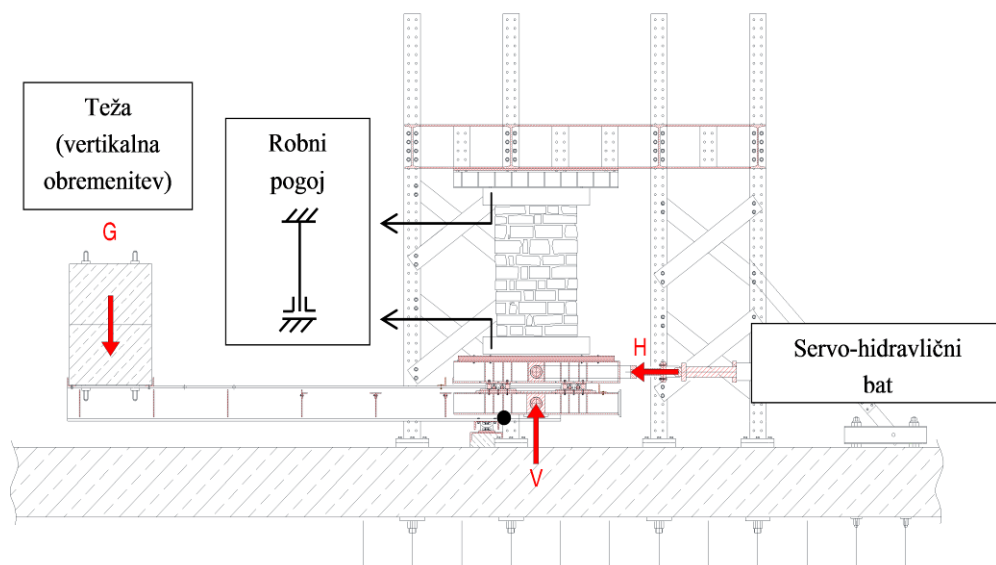
Slika 44: Pozicija merilnikov

Obremenjevanje je bilo vodeno z merilnikom pomikov H6, ki je bil nameščen na spodnjem delu zidu (temelju), in sicer se je obremenjevalo iz začetnega položaja v eno smer (pozitivno) do določenega pomika in nato v drugo smer (negativno). To je predstavljalo en cikel obremenjevanja, pri čemer se je pri vsaki amplitudi pomika omenjeni cikel ponovil trikrat (Grafikon 1).



Grafikon 1: Protokol obremenjevanja za začetne amplitude; pomik H6 v odvisnosti od časa t

Hkrati z omejitvijo pomika v vsakem ciklu je bila določena tudi hitrost obremenjevanja. Skozi celotno obremenjevanje so bili v odvisnosti od sile beleženi pomiki zgornjih merilnikov. Sama postavitev za preiskavo z vpetjem zidu v preizkuševalni sistem, s prikazom načina vertikalnega obremenjevanja in pozicijo servo-hidravličnega bata kapacitete 250 kN je prikazana na Sliki 45 in Sliki 46. Pri strižnem obremenjevanju je bil zid s tovorom preko ročice konstantno obremenjen s 380 kN vertikalne obremenitve.



Slika 45: Preizkuševalna naprava [1]



Slika 46: Vpetje zidu v napravo

3.2.2 Analiza rezultatov

Rezultate sem dobil v obliki zapisa vrednosti v stolpcih, in sicer v Excel izhodnih datotekah (Izsek rezultatov je viden na Sliki 47). S pomočjo Excel-a sem jih tudi obdelal. Dobil sem rezultate v skoraj 97.000 vrsticah. Za posamezne induktivne merilnike sem izrisal grafikone ter opisal in izpostavil bistvene oz. najpomembnejše vrednosti.

1	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
2	V4	W2	W1	W5	V2	D1	V6	K	H4	H3	H5	H1	V5	I1	H2
3	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
82377	-21,5127	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,1225	-4,25949	-29,2372	-19,944	-35,6813	-1,76508	-0,01274	-0,04062	-13,2182
82378	-21,465	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,1225	-4,25949	-29,1795	-19,9004	-35,6125	-1,75873	-0,01274	-0,04375	-13,1874
82379	-21,414	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,1225	-4,25949	-29,1218	-19,8568	-35,5438	-1,75238	-0,01274	-0,04687	-13,1566
82380	-21,3662	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,12375	-4,25949	-29,0577	-19,8132	-35,475	-1,74603	-0,01274	-0,05	-13,1258
82381	-21,3153	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,12375	-4,25949	-29	-19,7696	-35,4063	-1,73968	-0,01274	-0,05312	-13,0949
82382	-21,258	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,12375	-4,25949	-28,9359	-19,726	-35,3313	-1,72698	-0,01274	-0,05625	-13,0641
82383	-21,207	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,12375	-4,25949	-28,8718	-19,6824	-35,2625	-1,72063	-0,01274	-0,05937	-13,0333
82384	-21,1561	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,12375	-4,25949	-28,8141	-19,6389	-35,1938	-1,71429	-0,01274	-0,0625	-13,0025
82385	-21,1083	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,12375	-4,25949	-28,7564	-19,6015	-35,1313	-1,70794	-0,01274	-0,06562	-12,9716
82386	-21,0605	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,12375	-4,25949	-28,6987	-19,5579	-35,0625	-1,70159	-0,01274	-0,06875	-12,9408
82387	-21,0096	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,12375	-4,25949	-28,641	-19,5143	-34,9938	-1,69524	-0,01274	-0,06875	-12,9162
82388	-20,9618	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,12375	-4,25949	-28,5833	-19,4707	-34,925	-1,68889	-0,01274	-0,06875	-12,8853
82389	-20,9108	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,12375	-4,25949	-28,5192	-19,4271	-34,8563	-1,68254	-0,01274	-0,06875	-12,8545
82390	-20,8599	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,12375	-4,25949	-28,4615	-19,3898	-34,7875	-1,67619	-0,01274	-0,06875	-12,8237
82391	-20,8089	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,125	-4,25949	-28,4038	-19,3462	-34,7188	-1,66984	-0,01274	-0,06875	-12,7928
82392	-20,758	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,125	-4,25949	-28,3397	-19,3026	-34,6438	-1,66349	-0,01274	-0,07187	-12,762
82393	-20,7038	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,125	-4,25949	-28,2756	-19,2528	-34,575	-1,65709	-0,01274	-0,075	-12,7312
82394	-20,6529	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,125	-4,25949	-28,2179	-19,2092	-34,5063	-1,64444	-0,01274	-0,075	-12,7004
82395	-20,6051	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,125	-4,25949	-28,1603	-19,1719	-34,4375	-1,6381	-0,01274	-0,07813	-12,6695
82396	-20,5573	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,125	-4,25949	-28,1026	-19,1283	-34,3688	-1,63175	-0,01274	-0,08125	-12,6449
82397	-20,5064	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,125	-4,25949	-28,0449	-19,0847	-34,3	-1,6254	-0,01274	-0,08125	-12,6141
82398	-20,4554	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,125	-4,25949	-27,9808	-19,0411	-34,2313	-1,61905	-0,01274	-0,08437	-12,5832
82399	-20,4013	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,125	-4,25949	-27,9231	-18,9975	-34,1563	-1,6127	-0,01274	-0,08437	-12,5524
82400	-20,3503	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,125	-4,25949	-27,859	-18,9539	-34,0875	-1,60635	-0,01274	-0,0875	-12,5277
82401	-20,3025	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,125	-4,25949	-27,8013	-18,9166	-34,0188	-1,6	-0,01274	-0,09062	-12,4969
82402	-20,2516	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,125	-4,25949	-27,7436	-18,873	-33,95	-1,59365	-0,01274	-0,09375	-12,4661
82403	-20,2006	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,125	-4,25949	-27,6795	-18,8294	-33,8813	-1,5873	-0,01274	-0,09375	-12,4353
82404	-20,1497	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,125	-4,25316	-27,6218	-18,7858	-33,8125	-1,58095	-0,01274	-0,09687	-12,4044
82405	-20,0987	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,125	-4,25316	-27,5641	-18,7422	-33,7438	-1,5746	-0,01274	-0,09687	-12,3798
82406	-20,051	-0,09625	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,125	-4,25316	-27,5	-18,6986	-33,675	-1,56825	-0,01274	-0,09687	-12,349
82407	-20	-0,095	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,12625	-4,25316	-27,4423	-18,655	-33,6063	-1,5619	-0,01274	-0,09687	-12,3181
82408	-19,9459	-0,095	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,12625	-4,25316	-27,3782	-18,6115	-33,5313	-1,55556	-0,01274	-0,09687	-12,2873
82409	-19,8917	-0,095	-0,36671	-0,0125	-0,218477	0,21875	-1,12625	-4,25316	-27,3205	-18,5679	-33,4625	-1,54286	-0,01274	0	-12,2565

Slika 47: Izsek rezultatov, zapisanih v stolpcih Excel-ove datoteke

3.2.3 Opis porušitev in razpok

Pri utrjenemu zidu pri ciljnem pomiku do razpok in poškodb ni prišlo (Slika 48), kar potrjujejo tudi rezultati merilcev v nadaljevanju. Zid se ni razslojil in ni dobil strižnih poškodb. Zid se je »odpiral« ob zgornjem vpetju (Slika 49), na stiku z armirano betonskim nosilcem (venec). Na tem mestu sta bila nameščena induktivna merilca V3 in V4, ki sta izmerila »odpiranje« skoraj 33 mm na eni strani in ravno toliko na drugi strani (Slika 50). Prišlo je do t.i. upogibnega mehanizma, angleško »rocking«.



Slika 48: Zid med obremenjevanjem brez poškodb



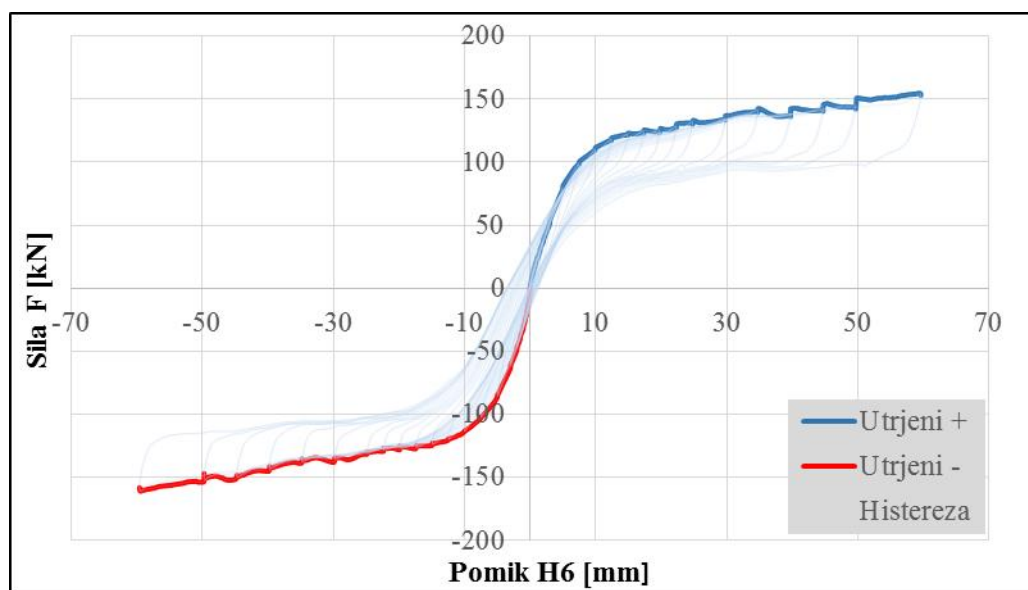
Slika 49: Odpiranje zidu ob merilcu V3



Slika 50: Odpiranje zidu zgoraj pri horizontalnem pomiku + 35 mm

3.2.4 *Maksimalna dosežena sila in pomik*

Najpomembnejši rezultat je sila v odvisnosti od horizontalnega pomika (Grafikon 2). Pri najvišji sili 154,8 kN je pomik znašal 59,59 mm, pri nasprotno usmerjeni sili -160,9 kN pa je pomik znašal -59,55 mm. Doseženi sili se v obeh smereh nista veliko razlikovali (manj kot 5 %).



Grafikon 2: Sila F v odvisnosti od pomika H6

V Preglednici 11 so podani rezultati za največjo doseženo silo v pozitivni smeri obremenjevanja (F_{\max}), največjo doseženo silo v nasprotni smeri (F_{\min}) ter pripadajoča pomika ($D_{F_{\max}}$) in ($D_{F_{\min}}$). V tabeli so podani rezultati tudi za največji doseženi pomik (D_{\max}) in pripadajočo silo ($F_{D_{\max}}$) ter največji pomik v nasprotni smeri obremenjevanja (D_{\min}) in pripadajoča sila ($F_{D_{\min}}$).

Preglednica 11: Sile in pomiki v obeh smereh v karakterističnih točkah odziva

Maksimalna sila				Maksimalni pomik			
$D_{F_{\max}}$ [mm]	$D_{F_{\min}}$ [mm]	F_{\max} [kN]	F_{\min} [kN]	D_{\max} [mm]	D_{\min} [mm]	$F_{D_{\max}}$ [kN]	$F_{D_{\min}}$ [kN]
59,3	-59,3	154,8	-160,9	59,6	-59,5	153,9	-159,6

V Preglednici 12 so navedene tudi povprečne vrednosti največjega pomika ($D_{\max, \text{povp}}$), največjih sil ($F_{\max, \text{povp}}$) ter pomikov pri največji sili ($D_{F_{\max, \text{povp}}}$) in sil pri največjih pomikih ($F_{D_{\max, \text{povp}}}$).

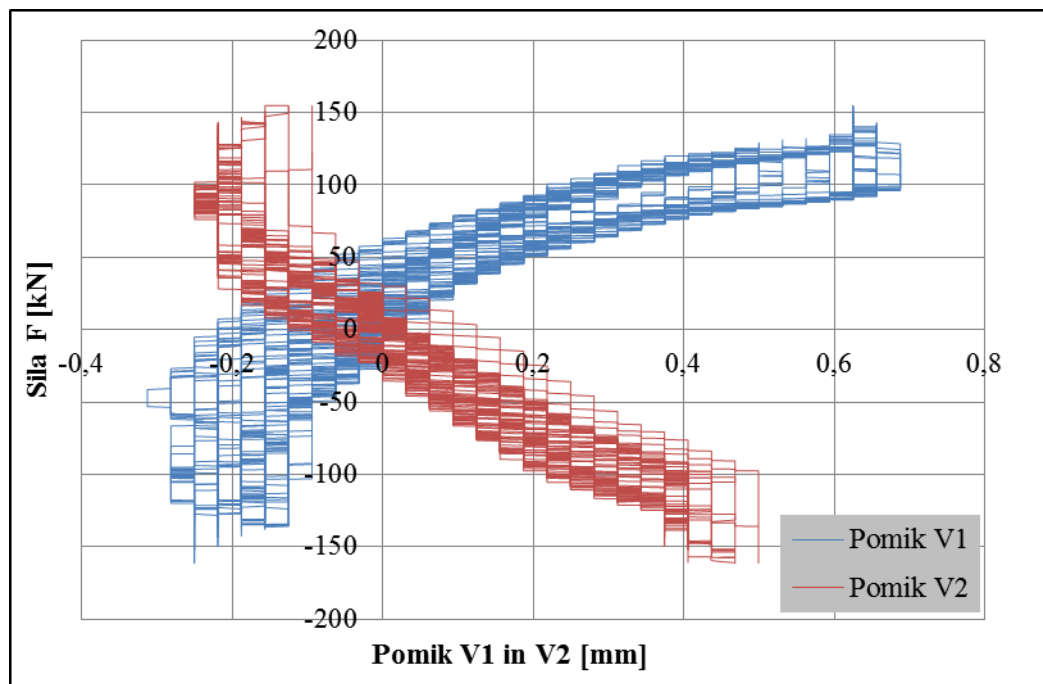
Preglednica 12: Povprečne sile in pomiki obeh smeri za karakteristične točke odziva

Maksimalna sila		Maksimalni pomik	
$D_{F_{\max, \text{povp}}}$ [mm]	$F_{\max, \text{povp}}$ [kN]	$D_{\max, \text{povp}}$ [mm]	$F_{D_{\max, \text{povp}}}$ [kN]
59,3	157,9	59,6	156,8

Povprečna vrednost največjega pomika je znašala 59,6 mm, povprečna vrednost največjih sil pa 157,9 kN. Povprečna sila pri povprečnem maksimalnem pomiku je znašala 156,8 kN, povprečni pomik pri povprečni maksimalni sili pa 59,3 mm. Do upadanja sile ni prišlo, saj smo test zaradi velikih pomikov in zaradi varnosti prej prekinili.

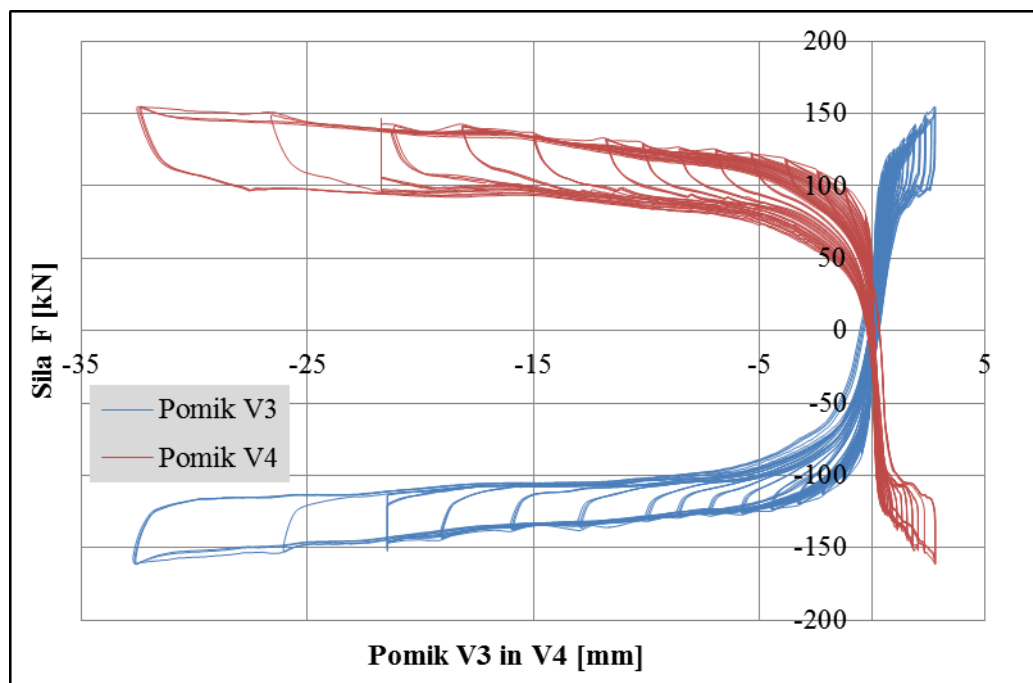
3.2.5 Analiza pomikov oziroma poškodb zidu, razvidnih iz ostalih merilnih mest

Na spodnji sliki (Grafikon 3) sta prikazana pomika V1 in V2 v odvisnosti od sile F. Pri najvišji sili 154,8 kN je pomik V1 znašal 0,69 mm, pomik V2 pa -0,25 mm. Pri nasprotno usmerjeni sili -160,9 kN pa je pomik V1 znašal -0,31 mm, pomik V2 pa 0,47 mm.



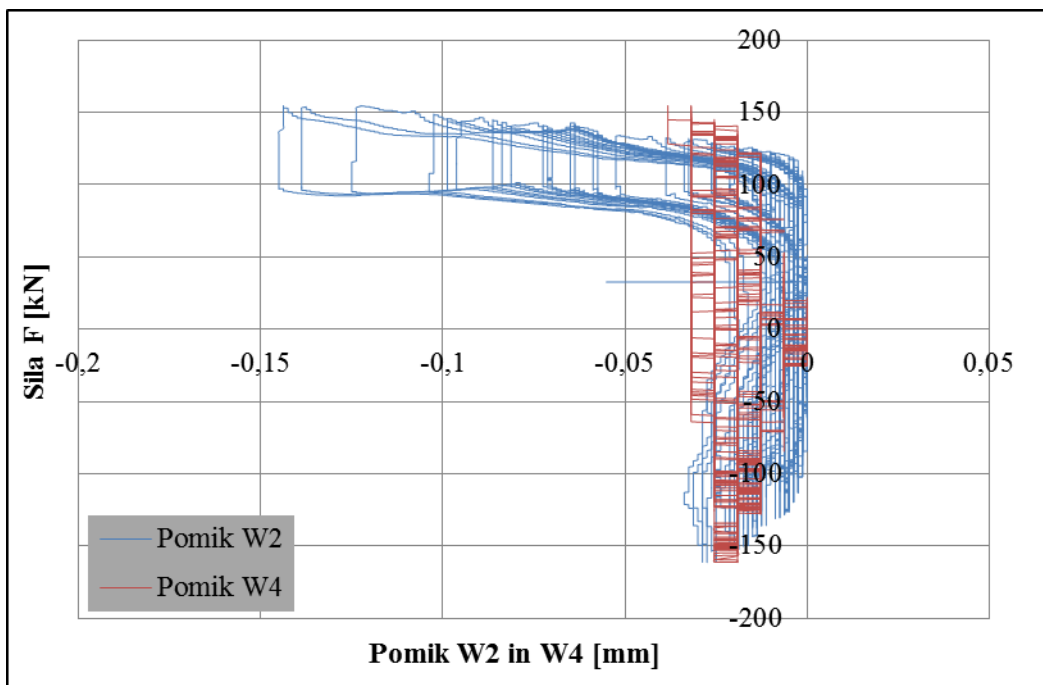
Grafikon 3: Pomika V1 in V2 v odvisnosti od sile F

Na Grafikonu 4 sta prikazana pomika V3 in V4 v odvisnosti od sile F. Pri najvišji sili 154,8 kN je pomik V3 znašal 2,74 mm, pomik V4 pa -32,39 mm. Pri nasprotno usmerjeni sili -160,9 kN pa je pomik V3 znašal -32,72 mm, pomik V4 pa 2,78 mm. Krčenje je bilo posledica drobnega kršenja robnega (vogalnega) kamna ter/ali malte. Odpiranje med kamnitim zidom in vpletjem je vidno na Sliki 49.



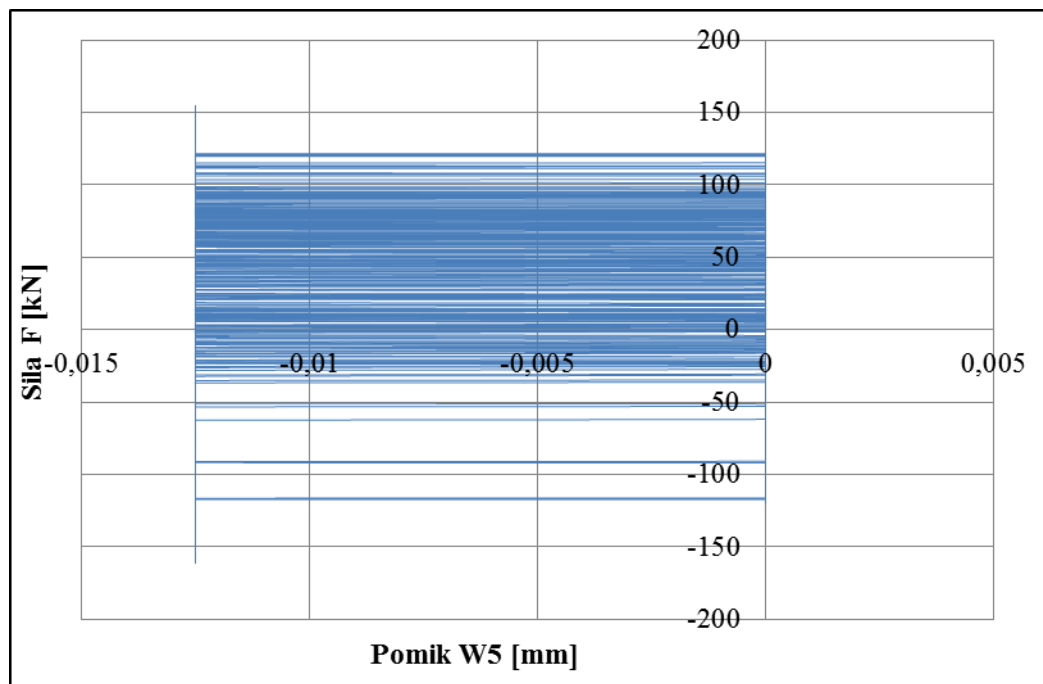
Grafikon 4: Pomika V3 in V4 v odvisnosti od sile F

Na spodnjem Grafikonu 5 sta prikazana pomika W2 in W4 v odvisnosti od sile F. Največji pomik induktivnega merilca W2 je znašal -0,15 mm, induktivnega merilca W4 pa -0,04 mm. Kot vidimo, do razslojevanja slojev zidu med preiskavo ni prišlo.

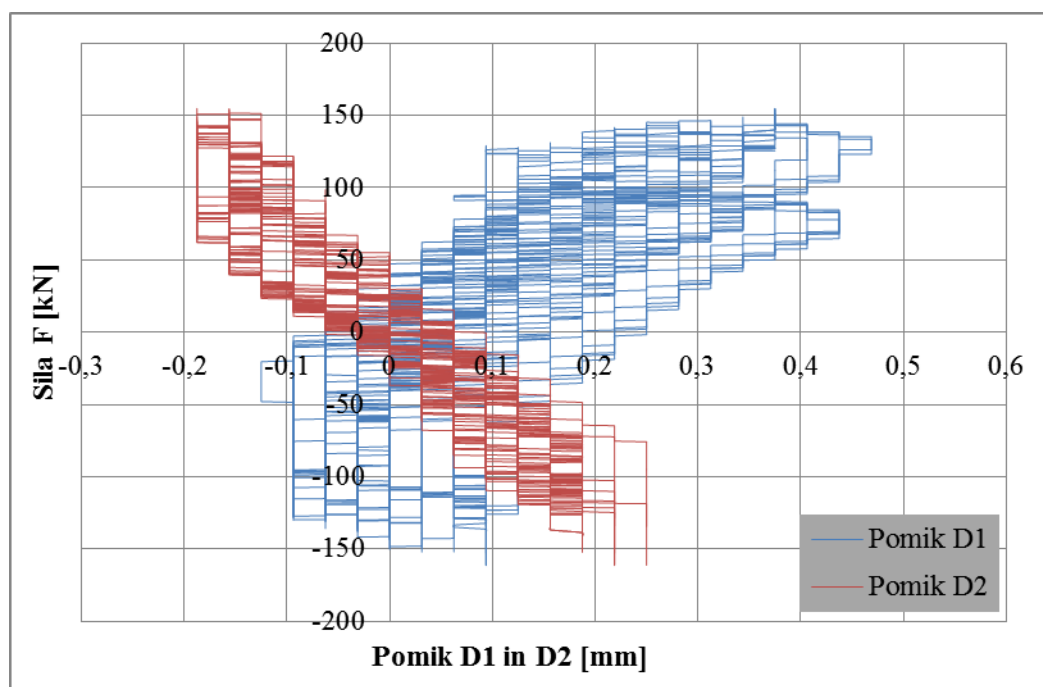


Grafikon 5: Pomika W2 in W4 v odvisnosti od sile F

Na Grafikonu 6 je prikazan pomik W5 v odvisnosti od sile F. Na zidu vzdolžno ni bilo zabeležiti pomikov, kar pomeni, da strižnih (diagonalnih) razpok ni bilo. Enako je razvidno tudi iz rezultatov merilnikov D1 in D2, katerih vrednosti so v odvisnosti od sile F prikazani na Grafikonu 7. Največji raztezek na induktivnem merilniku D1 je znašal 0,47 mm, na induktivnem merilniku D2 pa 0,25 mm. Merilnik D1 je imel največji skrček -0,13 mm, merilnik D2 pa -0,19 mm.

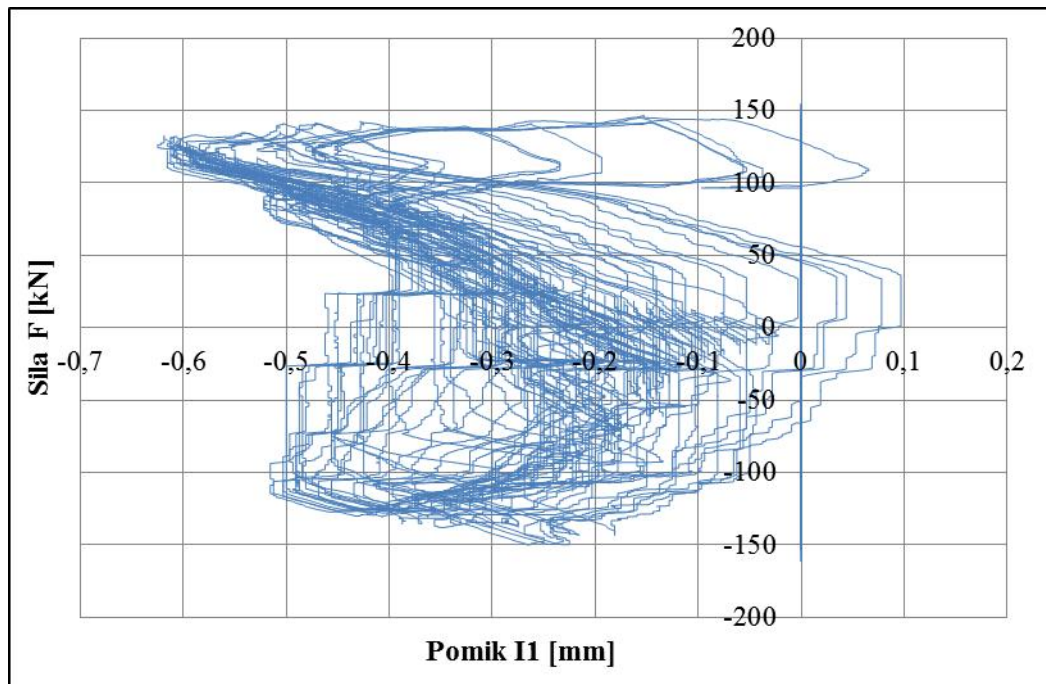


Grafikon 6: Pomik W5 v odvisnosti od sile F



Grafikon 7: Pomika D1 in D2 v odvisnosti od sile F

Na spodnji sliki (Grafikon 8) je prikazan pomik I1 v odvisnosti od sile F, ki je meril uklon zidu. Največji pomik je bil -0,63 mm. Uklon zidu je bil minimalen.



Grafikon 8: Pomik I1 v odvisnosti od sile F

4 POVZETEK REZULTATOV NEUTRJENIH ZIDOV

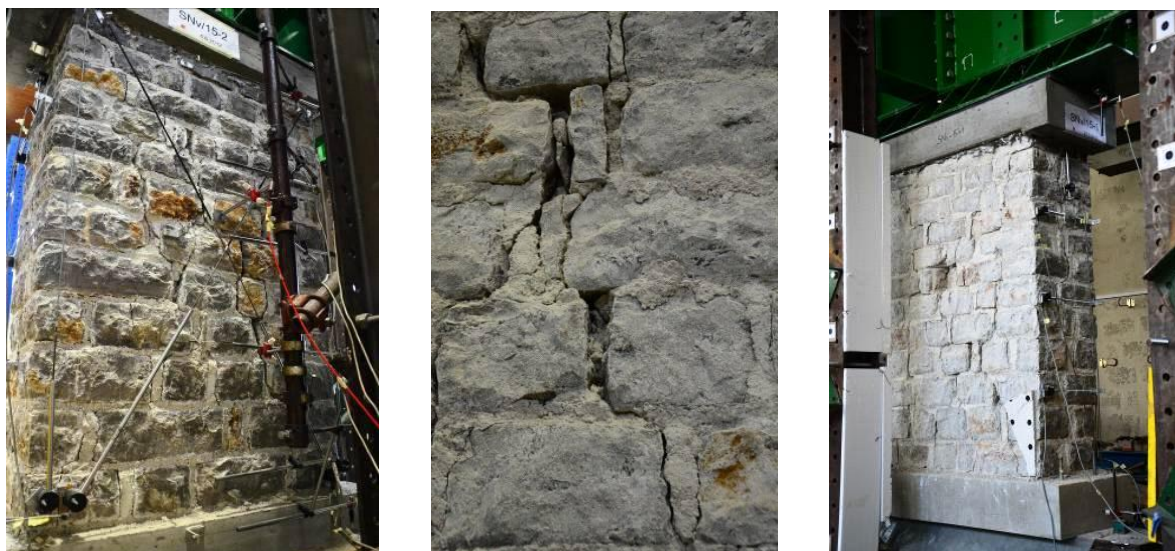
4.1 Predhodne preiskave na neutrjenih zidih

Za potrebe moje diplomske naloge sem dobil rezultate preiskav, ki so bile izvedene v okviru evropskega projekta Perpetuate [25] ter doktorskega dela Mete Kržan, dveh neutrjenih zidov, ki sta bila označena z 8_SNV_15_1 (v nadaljevanju: neutrjeni zid 1) in 10_SNV_15_2 (v nadaljevanju: neutrjeni zid 2) [30]. Gre za zidova, zgrajena z enakimi materiali, enake sestave po prerezu (morfologije) in teksture, testirana pod enakimi pogoji (enak nivo vertikalne obremenitve in enako vpetje), kot pri mojem strižnem preizkusu.

4.2 Analiza rezultatov

4.2.1 Opis porušitev in razpok

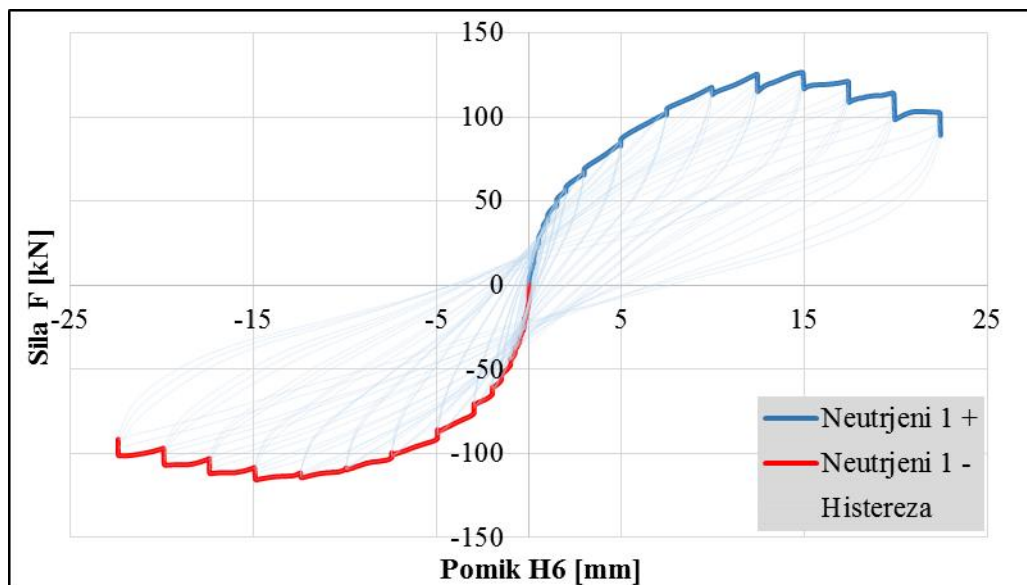
Na neutrjenih zidovih 1 in 2 so nastale tipične strižne poškodbe (razpoke), ki potekajo diagonalno preko zidu (Slika 51 a). Oba neutrjena zidova sta dobila poškodbe tudi v obliki razslojevanja, saj sta se zidova začela »odpirati« (izbočenje iz svoje ravnine posameznega sloja, Slika 51 c). Poškodbe so potekale preko malte in v nekaterih primerih tudi preko kamna, ki je razpokal (Slika 51 b). V obeh primerih neutrjenih zidov je prišlo do tipične strižne porušitve.



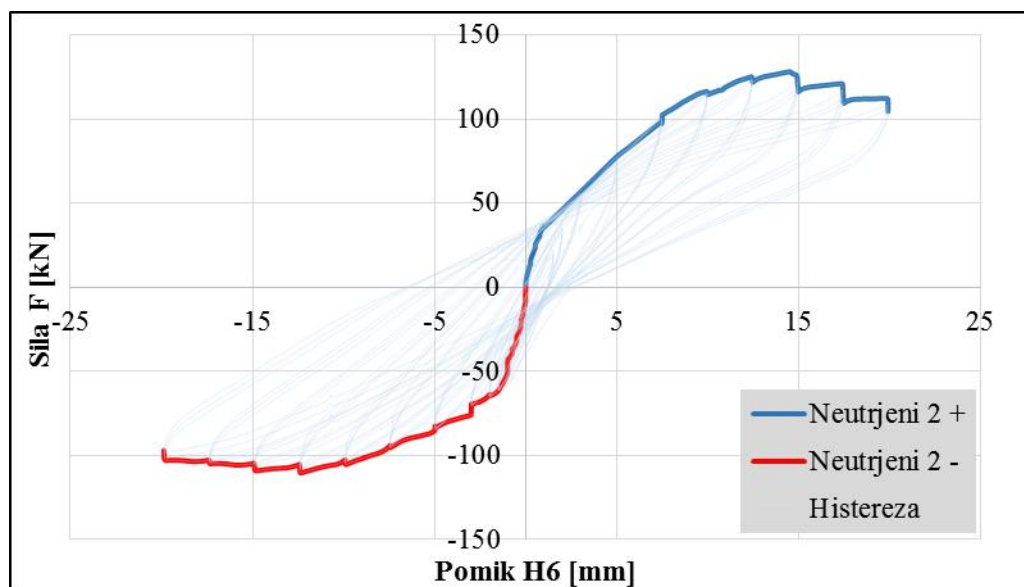
Slika 51: a) Strižne razpoke, ki potekajo diagonalno preko zidu b) Razpoke v malti in kamnu c) Strižne razpoke in razslojevanje zidu [11]

4.2.2 Maksimalna dosežena sila in pomik

Na Grafikonih 9 in 10 je prikazan histerezni odziv obeh zidov, in sicer dosežene sile v odvisnosti od pomikov.



Grafikon 9: Neutrjeni zid 1; sila F v odvisnosti od pomika H6



Grafikon 10: Neutrjeni zid 2; sila F v odvisnosti od pomika H6

V Preglednici 13 so povzete sile in pomiki za karakteristična stanja histereznega odziva (pri maksimalnih doseženih silah in pri maksimalnih pomikih) v obeh smereh obremenjevanja ter v Preglednici 14 njihove povprečne vrednosti.

Preglednica 13: Sile in pomiki v obeh smereh za oba zidova v karakterističnih točkah odziva

Preizkušanec	Maksimalna sila				Maksimalni pomik			
	D_{Fmax} [mm]	D_{Fmin} [mm]	F_{max} [kN]	F_{min} [kN]	D_{max} [mm]	D_{min} [mm]	F_{Dmax} [kN]	F_{Dmin} [kN]
neutrjeni zid 1	14,9	-14,8	126,7	-115,7	22,4	-22,4	89,1	-91,5
neutrjeni zid 2	14,5	-12,4	128,3	-110,5	19,9	-19,9	104,6	-97,1

Preglednica 14: Povprečne sile in pomiki obeh smeri za karakteristične točke odziva

Preizkušavec	Maksimalna sila		Maksimalni pomik	
	$D_{F_{max}}$ [mm]	F_{max} [kN]	D_{max} [mm]	$F_{D_{max}}$ [kN]
neutrjeni zid 1	14,9	121,2	22,4	90,3
neutrjeni zid 2	13,4	119,4	19,9	100,8

Povprečni pomik pri maksimalni sili je za neutrjeni zid 1 znašal 14,9 mm, za neutrjeni zid 2 pa 13,4 mm. Povprečna maksimalna sila za neutrjeni zid 1 je znašala 121,2 kN, za neutrjeni zid 2 pa 119,4 kN. Povprečni maksimalni pomik za neutrjeni zid 1 je znašal 22,4 mm, za neutrjeni zid 2 pa 19,9 mm. Povprečna sila pri maksimalnem pomiku je za neutrjeni zid 1 znašala 90,3 kN, za neutrjeni zid 2 pa 100,8 kN.

»Ta stran je namenoma prazna«

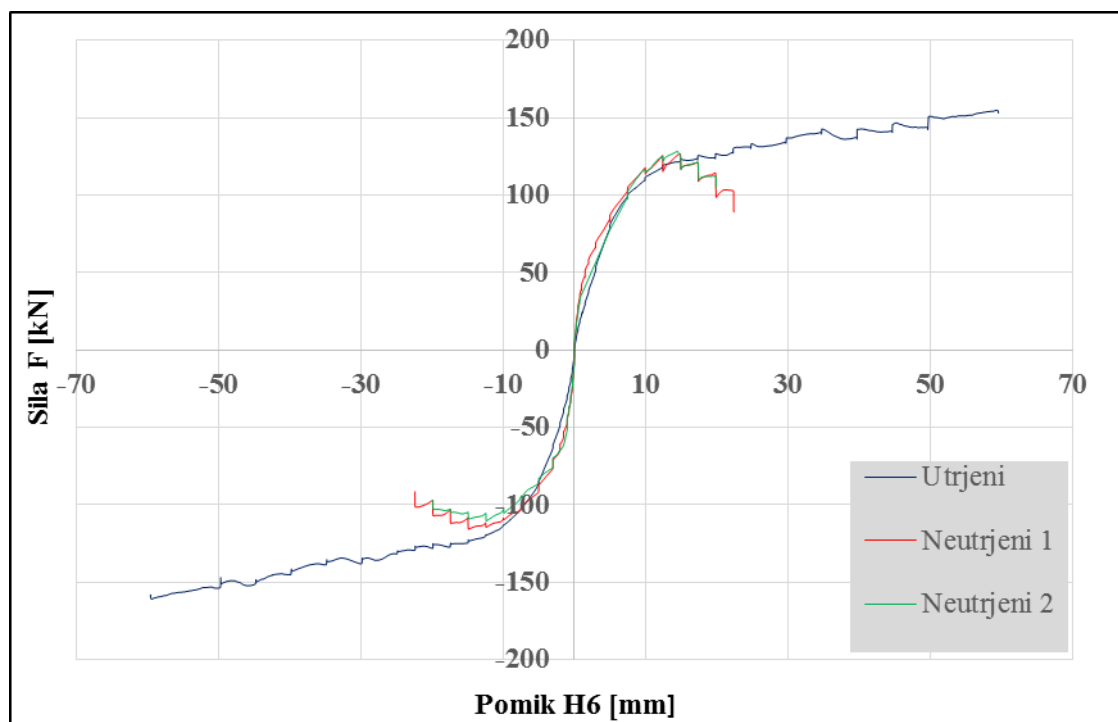
5 PRIMERJAVA REZULTATOV NEUTRJENEGA IN UTRJENEGA ZIDU

5.1 Primerjava ovojnic sil

Pri neutrnjenih zidovih je bila maksimalna sila dosežena in je potem začela upadati, medtem ko je pri utrjenemu zidu vseskozi naraščala. Maksimalna sila neutrnjenih zidov je bila v negativni smeri nekoliko manjša, kar je verjetno posledica tega, da so začeli zid obremenjevati v pozitivno smer in je bil zid že nekoliko poškodovan, ko je prišel v skrajno levo lego. Zid se je namreč vsak cikel nekoliko poškodoval, s tem pa se je togost zidu postopoma zmanjševala.

Ravno nasprotno pa se je dogajalo pri utrjenem zidu. Pri njem je bila absolutna vrednost negativne sile višja od pozitivne, kar gre verjetno pripisati ekscentričnosti obremenitev med samim testom ki so posledica velikih končnih pomikov. Zid je bil sicer po končani preiskavi praktično nepoškodovan.

Iz poteka ovojnic sil vseh treh zidov je razvidno, da je bil odziv utrjenega zidu veliko bolj duktilen, saj so bili neelastični pomiki veliko večji kot pomik na meji elastičnosti. Krivulja je pri neutrnjenih zidovih po dosegu maksimalne sile razmeroma hitro pričela upadati. Neutrjena zidova sta po dosegu maksimalne sile izkazala zmanjševanje nosilnosti, pri čemer so se pomiki še vedno nekoliko povečevali. Iz grafa je razvidno, da pri neutrnjenih zidovih ni prišlo do krhke porušitve.



Grafikon 11: Ovojnice sil za Utrjeni zid, Neutrjeni zid 1 in Neutrjeni zid 2

5.2 Primerjava sil in pomikov

V Preglednici 15 so za lažjo primerjavo zbrane povprečne vrednosti neutrnjenega zidu 1 in 2 ter vrednosti za utrjeni zid.

Preglednica 15: Maksimalna sila in maksimalni pomik za neutrjena zidova 1 in 2 ter za utrjeni zid

Preizkušane	Maksimalna sila		Maksimalni pomik	
	$D_{F_{max}}$ [mm]	F_{max} [kN]	D_{max} [mm]	$F_{D_{max}}$ [kN]
Utrjeni zid	59,3	157,9	59,6	156,8
neutrjeni zid 1 in 2	14,2	120,3	21,2	95,6

Utrjeni zid je dosegel za 45,1 mm večji pomik pri maksimalni sili, kot neutrjena zidova, maksimalna sila pa je bila višja za 37,6 kN, kar predstavlja izboljšanje za 31,3 %. Še pomembnejša pa je razlika doseženih maksimalnih pomikov utrjenega in neutrjenih zidov, ki je bila kar 38,4 mm. Maksimalni pomiki so se povečali kar za faktor 2,81. Ker pri utrjenem zidu do upadanja sile ni prišlo, so bile tudi sile pri najvišjem pomiku znatno višje, in sicer za 61,2 kN (164 % sile pri neutrjenih zidovih).

6 ZAKLJUČEK

V prvem delu diplomske naloge sem preizkušal nosilnosti stika vrvice s tremi različnimi vrstami malt na dve vrsti kamna. V ta namen sem moral pripraviti zadostno število vzorcev (kamnov), ki jih je bilo potrebno ustrezno obdelati (rezanje, vrtanje). Na te kamne sem na različne načine z malto vgradil stekleno vrvico. Po vseh uspešnih in tudi neuspešnih načinih preizkušanja, sem s tistim, ki se je najbolje obnesel, preizkusil stike s tremi različnimi maltami. Pričakovano se je najbolje odrezala epoksidna malta. Zanj sicer nisem mogel določiti sprijemnih trdnosti s kamnom, saj je do pretrga v vseh primerih prišlo ob vpetju v preiskuševalni stroj.

Ostali dve malti (komercialna brez cementa in podaljšana cementna) sta imeli precej nižjo sprijemno trdnost kot epoksidna malta. Poleg vpliva različnih malt na stik nas je zanimalo tudi, kakšne so razlike v nosilnosti pri uporabi dveh različnih vrst kamna. Izkazalo se je, da zaradi različnih načinov porušitve ne moremo enoznačno določiti, na katerem kamnu je boljši oprijem. Maltam smo preverili tudi tlačne in upogibne trdnosti ter razlez.

V drugem delu diplomske naloge sem izvedel ciklični strižni test na utrjenem zidu in rezultate primerjal z rezultati že opravljenih testiranj na neutrjenih zidih.

Na neutrjenih zidih 1 in 2 so nastale tipične strižne poškodbe (razpoke), ki so potekale diagonalno preko zidu. Poškodbe so potekale preko malte in v nekaterih primerih tudi preko kamna, ki je razpokal. Oba neutrjena zidova sta dobila poškodbe tudi v obliki razslojevanja, saj sta se zidova začela »odpirati« (izbočenje posameznega sloja izven svoje ravnine).

Zid, ki sem ga utrdil s pomočjo steklene vrvice in epoksidnih smol, je celotno testiranje preстал praktično brez poškodb. V zidu ni prišlo do razplastitve, prav tako pa ni prišlo skoraj do nikakršnih pomikov na merilcih v vertikalni, horizontalni in tudi diagonalni smeri, ki bi kazali na poškodbe preiskušanca.

Pri obema neutrjenima zidovima je prišlo do tipične strižne porušitve, medtem, ko je pri utrjenem zidu prišlo do t.i. upogibnega obnašanja, angleško »rocking«.

Utrjeni zid je glede na maksimalne dosežene pomike presegal neutrjena zidova za več kot 280 %. Maksimalna dosežena sila na utrjenem zidu pa je preseгла maksimalno silo na neutrjenih zidovih za več kot 130 %.

Z analizo rezultatov in smiselnosti utrjevanja sem prišel do zaključka, da se je utrjevalni sistem izkazal za zelo uspešnega in učinkovitega, vendar se moramo zavedati, da je njegova aplikacija omejena na objekte, ki niso domena kulturne dediščine. Pri slednjih se zahteva uporaba kompatibilnih materialov, ki so čimbolj primerni že vgrajenem materialu. Iz tega razloga bi uporaba epoksija bila dovoljena le v izjemnih primerih.

»Ta stran je namenoma prazna«

VIRI

- [1] Arrigler, A. 2013. Študij utrditvenih ukrepov za kamnite zidove. Diplomaska naloga Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Arrigler): str. 1, 2, 3, 23, 94, 119, 121
- [2] Perpetuate. 2014.
<http://www.perpetuate.eu/> (Pridobljeno 15. 9. 2014).
- [3] CBC News. 2014.
<http://www.cbc.ca/news/technology/q-a-earthquake-damage-1.1016149> (Pridobljeno 20. 9. 2014).
- [4] Jasa-sro.cz. 2014.
<http://www.jasa-sro.cz/en/services/carboplate-structure-strengthening> (Pridobljeno 20. 9. 2014).
- [5] Linkos.bg Mapei. 2014.
<http://linkos.bg/ilia/Mapei/Zdr%20-%20FRP/lipsi/MapeWrap%20System/fase%20applicativa.jpg> (Pridobljeno 18. 10. 2014).
- [6] Topbritishinnovations.org. 2014.
<http://www.topbritishinnovations.org/PastInnovations/StrongCarbonFibres.aspx> (Pridobljeno 18. 10. 2014).
- [7] NordicSkiRacer.com. 2014.
<http://www.nordicskiracer.com/news.asp?NewsID=4502> (Pridobljeno 18. 10. 2014).
- [8] Gostič, S., Mezgec, A., Žarnić, R. 2005. Protipotresne utrditve zidanih konstrukcij s CFRP kompoziti. Gradbenik: 37-41.
- [9] 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): str. 12
- [10] Kržan, M. 2014. Osebni arhiv Mete Kržan. Osebna komunikacija. (20. 8. 2014).
- [11] Kržan, M., Bosiljkov, V. 2013. Experimental evaluation of the seismic behaviour of multi-leaf stone masonry walls. V: Anderson, Don (ur.), Brzev, S. (ur.). 12th Canadian Masonry Symposium: Vancouver, British Columbia, Canada, June 2nd -5th, 2013. Vancouver, Proceedings of the twelfth Canadian Masonry, p. 1-11.
- [12] Mapei, Mape-Antique Strutturale NHL. 2014.
http://www.mapei.com/public/COM/products/613_mape-antique_strutturale_nhl_gb.pdf (Pridobljeno 20. 9. 2014).
- [13] EN European Standards. 2014

- <http://www.en-standard.eu/csn-en-1015-11-methods-of-test-for-mortar-for-masonry-part-11-determination-of-flexural-and-compressive-strength-of-hardened-mortar/> (Pridobljeno 9.12.2014)
- [14] Mapei, Mapewrap 12. 2014.
http://www.mapei.com/public/COM/products/1006_mapewrap_11-12_gb.pdf (Pridobljeno 20. 9. 2014).
- [15] ASTM.org. 2014.
<http://www.astm.org/Standards/D638.htm> (Pridobljeno 20. 9. 2014).
- [16] ASTM.org. 2014.
<http://www.astm.org/Standards/C579.htm> (Pridobljeno 20. 9. 2014).
- [17] EN-standards.eu. 2014.
http://www.en-standard.eu/iso-178-plastics-determination-of-flexural-properties/?gclid=CjwKEAiA2JqkBRDshIOY_9eMghkSJABvNd1QSaB9WeuCe9azob4ActJJKh2gJ6tAR-ub9DXhBN7RJxoCi47w_wcB (Pridobljeno 20. 9. 2014).
- [18] Mapei, Mapewrap Primer 1. 2014.
http://www.mapei.com/public/COM/products/1005_mapewrap_primer_1_gb.pdf (Pridobljeno 20. 9. 2014).
- [19] Mapei, Mapewrap 21. 2014.
http://www.mapei.com/public/COM/products/1007_mapewrap21_gb2.pdf (Pridobljeno 20. 9. 2014).
- [20] Mapei, Mapewrap C-G Fiocco. 2014.
http://www.mapei.com/public/COM/products/1012_mapewrap_c-g_fiocco_gb.pdf (Pridobljeno 20. 9. 2014).
- [21] Mapei, Mapewrap 31. 2014.
http://www.mapei.com/public/COM/products/1008_mapewrap31_gb.pdf (Pridobljeno 20. 9. 2014).
- [22] Petersen, R. B., Masia, M. J., Seracino, R. 2009. Bond Behavior of Near-Surface Mounted FRP Strips Bonded to Modern Clay Brick Masonry Prisms: Influence of Strip Orientation and Compression Perpendicular to the Strip. *Journal of composites for construction* 13, 3: 169-178.
- [23] Oliveira, D. V., Basilio, I., Lourenço, P. B. 2011. Experimental Bond Behavior of FRP Sheets Glued on Brick Masonry. *Journal of composites for construction* 14, 1-2: 1-10.
- [24] Capozucca, R. 2013. Effects of mortar layers in the delamination of GFRP bonded to historic masonry Roberto Capozucca. *Composites: Part B* 44, 639–649: 1-10.
- [25] Sciolti, M. S., Aiello, M. A., Frigione, M. 2012. Influence of water on bond behavior between CFRP sheet and natural calcareous stones. *Composites: Part B* 43, 3239–3250: 1-12.

- [26] Bajpai, K., Duthinh, D. 2003. Bending performance of masonry walls strengthened with near-surface mounted frp bars. North american masonry conference: June 1 - 4, 2003. Clemson, South Carolina.
- [27] SIST EN 1015-3:1999. Metode preskušanja zidarske malte – 3. del: Določevanje konsistence sveže malte.
- [28] Korpič, J. 2012. Eksperimentalne tlačne preiskave večslojnih kamnitih zidov. Diplomaska naloga Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba J. Korpič): str. 30
- [29] Kržan, M. 2014. Osebni arhiv Mete Kržan. Osebna komunikacija. (20. 8. 2014).
- [30] Lagomarsino, S., Modaressi, H., Pitilakis, K., Bosiljkov, V., Calderini, C., D'ayala, D., Benouar, D., Cattari, S. 2010. Perpetuate Project: the Proposal of a Performance-based Approach to Earthquake Protection of Cultural Heritage. V: Gu, X. (ur.), Song, X. (ur.). Structural analysis of historic constructions: 7th International Conference on Structural Analysis of Historic Constructions, SAHC, October 6-8, 2010. Switzerland, Trans Tech Publications, p. 1119-1124.