

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:

Korpič, J. 2012. Eksperimentalne tlačne preiskave večslojnih kamnitih zidov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Bosiljkov, V.): 75 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:

Korpič, J. 2012. Eksperimentalne tlačne preiskave večslojnih kamnitih zidov. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bosiljkov, V.): 75 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
PROMETNA SMER

Kandidat:

JANEZ KORPIČ

**EKSPERIMENTALNE TLAČNE PREISKAVE
VEČSLOJNIH KAMNITIH ZIDOV**

Diplomska naloga št.: 3272/PS

**COMPRESSIVE TESTS OF MULTIPLY-LEAF STONE
MASONRY WALLS**

Graduation thesis No.: 3272/PS

Mentor:

izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Član komisije:

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

doc. dr. Jože Lopatič

Ljubljana, 20. 12. 2012

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Janez Korpič izjavljam, da sem avtor te diplomske naloge z naslovom:

»Eksperimentalne tlačne preiskave večslojnih zidov«

Izjavljam, da je elektronska različica enaka tiskani različici.

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

Ljubljana, 10.12.2012

Janez Korpič

ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se zahvaljujem mentorju doc. dr. Vlatku Bosiljkovu. Za pomoč pri preiskavah materialov in zidov tehničnemu sodelavcu Franciju Čeponu. Za recepture malt in betonov gospe izr. prof. dr. Violeti Bokan Bosiljkov. Zahvala mladi raziskovalki Meti Kržan za pomoč pri tlačni analizi zidov.

Preiskave so potekale v sklopu projekta PERPETUATE-Performance based approach to the earthquake protection of cultural heritage in Europe and Mediteranean countries FP7-ENV-2009 št. pogodbe no. 244229 in doktorskega študija mlade raziskovalke Mete Kržan financiranega od strani Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

Zahvaljujem se podjetjema Kamno-grad-Seferović s.p. za izgradnjo zidov in Gradbeništvo Franc Novak.s.p. za omete. Hvala tudi študentoma Tomažu in Mihi, ki sta mi pomagala pri betoniranju vencev. Luki Kurnjeku za pomoč pri betoniranju vencev in pri preiskavi zidov.

Zahvaljujem se tutorju dr. Radu Flajsu za pomoč pri študiju in profesorju dr. Stanislavu Srpčiču za oporo in spodbudne besede v najtežjih trenutkih.

Hvala vsem sošolcem, prijateljem, znancem, sorodnikom in zaposlenim na FGG-ju, ki ste me spodbujali pri študiju.

Še posebej se zahvaljujem svoji Metki za njeno podporo in pomoč pri študiju ter pri izdelavi diplome.

Vsem najlepša hvala.

BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	620.173:691.2/.3:692.2(043.2)
Avtor:	Janez Korpič
Mentor:	izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov
Naslov:	Eksperimentalne tlačne preiskave večslojnih kamnitih zidov
Obseg in oprema:	75 str., 27 pregl., 10 graf., 63 sl., 25 en.
Tip dokumenta:	diplomska naloga – univerzitetni študij
Ključne besede:	kamniti zid, tlačna trdnost, zidarska zveza, smerniška zveza, vezniška zveza, veznik, smernik, troslojni zid

Izvleček

V diplomski nalogi sem predstavil različne tipe kamnitih zidov in njihovo izdelavo. Predstavljeno je tudi kamnoseško orodje in vrste obdelanega kamna. Kamen je najstarejši gradbeni material za zidane konstrukcije. Iz njegove uporabe izhajajo vsa znanja o zidarskih tehnikah in zvezah. Glavni namen preiskav je ugotoviti, ali lahko zidarska zveza vpliva na tlačno trdnost kamnitega zidu. V ta namen smo zgradili troslojne kamnite zidove z dvema različnima zidarskima zvezama. Prvo polovico zidov smo pozidali z vezniško zidarsko zvezo, drugo polovico pa s smerniško zidarsko zvezo. Zidovi so bili pozidani z apneno malto, nato pa ometani z grobim in finim ometom. Opisane so preiskave za določanje tlačne in upogibne trdnosti za apneno malto in kamen. Opravili smo tudi preiskavi trdnosti stika med kamnom in malto ter trdnosti jedra zidu. Pri tlačni preiskavi zidov smo s globalne deformacije zidu. Teste smo opravili na dveh nizkih in dveh visokih zidovih, tako da smo lahko analizirali tudi vpliv višine preskušancev na tlačno trdnost zidovine. Ugotovili smo, da zidarska zveza ne vpliva na tlačno trdnost zidu, kar velja tako pri nizkih kot pri visokih zidovih. Tlačna trdnost visokih zidov je nekoliko nižja od tlačne trdnosti nizkih zidov. V nalogi sem naredil pregled modelov za izračun tlačne trdnosti ter analiziral različne pristope k izračunu tlačne trdnosti enoslojne in večslojne zidovine. ter jih s primerjal z eksperimentalnimi rezultati. Izkaže se, da je ob kombinaciji Mann-ovega in Bindinega modela možno napovedati tlačno trdnost večslojne kamnite zidovine.

BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC:	620.173:691.2/.3:692.2(043.2)
Author:	Janez Korpič
Supervisor:	Assist. Prof. Vlatko Bosiljkov, Ph.D.
Title:	Compressive tests of multiply-leaf stone masonry walls
Notes:	75 p., 27 tab., 10 gr., 63 fig., 25 eq.
Type:	Graduation thesis – University studies
Keywords:	stone wall, compressive strength, masonry bond, stretcher bond, through stone bond, header, stretcher, three-leaf stone wall

Abstract

In the thesis overview of different types of stone masonry and the construction techniques are presented. There are also presented stonecutting tools and different types of stone masonry units in dependence from the extend of dressing. Stone is the oldest building material for building masonry structures. Thus all the masonry techniques developed from the history of building with stone. The main purpose of the investigation was to determine the influence of masonry bond on the compressive strength of stone masonry. For this purpose three-leaf stone masonry walls with two types of masonry bond were built. The first type was built with through stones connecting outer leaves through the thickness of the wall. The second one was built without through stones but with staggering units along the edges. All the specimens were built with lime mortar and than plastered with coarse and fine plaster at the end. Results of determining compressive and flexural strength of mortar and stone and their bond are also presented. Inner core was also tested and its compressive and splitting tensile strength were determined. During compressive tests of masonry global deformations were measured. Compressive tests on masonry were performed on the specimens of the size of walette and wall. The results of tests revealed that masonry bond do not have significant influence on obtained compressive strengths. Compressive strength was slightly lower for walls in comparisson to wallethes. Summarizing all experimental data and different analitical models for predicting compressive strength of multiple-leaf masonry walls, it was shown that Mann's and Binda's models can be used for estimation of compressive strength for multiply-leaf masonry.

Kazalo:

1.0 UVOD.....	1
2.0 NAMEN PREISKAV	1
3.0 KAMNITI ZIDOVI	2
3.1 Splošno	2
3.2 Pridobivanje in obdelava kamna.....	3
3.3 Orodje za obdelavo kamna	5
3.4 Zidanje in vrste kamnitih zidov	6
3.4.1 Zid iz lomljencev.....	7
3.4.2 Zid iz ploščatega kamna.....	8
3.4.3 Zid iz obdelanega kamna	9
3.4.4 Zid iz polklesanega kamna.....	9
3.4.5 Ciklopski zid	10
3.4.6 Zid iz klesanega kamna	10
4.0 IZDELAVA VZORCEV ZIDOV	13
4.1 Splošno	13
4.2 Zasnova vzorca zidu za preizkušanje in transport	15
4.3 Izdelava armiranobetonskih nosilcev.....	16
4.4 Zidanje zidkov	17
4.4.1 Zid z vezniško zidarsko zvezo	19
4.4.2 Zid s smerniško zidarsko zvezo	20
4.5 Ometavanje zidkov	22
4.5.1 Grobi omet	22
4.5.2 Betoniranje vencev.....	23
4.5.3 Fini omet	24
5.0 LABORATORIJSKE PREISKAVE MED IZDELAVO KAMNITIH ZIDOV	25
5.1 Preiskave sveže mešanice malte	25
5.1.1 Konsistenca malte za zidanje	25
5.1.2 Konsistenca malte za grobi omet	27
5.1.3 Konsistenca malte za fini omet	28
5.2 Preiskave otrdele malte.....	28
5.2.1 Krčenje malte	28
5.2.2 Tlačna in upogibna trdnost malte za zidanje.....	30
5.2.3 Tlačna in upogibna trdnost malte za grobi omet	32
5.2.4 Tlačna in upogibna trdnost malte za fini omet.....	33
5.3 Preiskave kamna	33

5.3.1 Tlačna trdnost kamna	34
5.3.2 Upogibna trdnost kamna	35
5.3.3 Vpojnost kamna	36
5.4 Preiskave jedra zidu	36
5.4.1 Tlačna trdnost jedra	36
5.4.2 Cepilna natezna trdnost	37
5.5 Sprijemnost apnene malte s kamnom	38
6.0 PREISKAVE KAMNITIH ZIDOV NA TERENU ALI IN SITU PREISKAVE	40
6.1 Porušne metode preskušanja (DT)	40
6.1.1 In-situ strižni preizkus	40
6.1.2 In-situ tlačni preizkus	41
7.0 EKSPERIMENTALNI DEL	41
7.1 Tlačne preiskave zidov	41
7.2 Tlačna preiskava nizkega zidu s smerniško zidarsko zvezo	44
7.3 Tlačna preiskava visokega zidu s smerniško zidarsko zvezo	47
7.4 Tlačna preiskava nizkega zidu z vezniško zidarsko zvezo	48
7.5 Tlačna preiskava visokega zidu z vezniško zidarsko zvezo	50
8.0 TEORIJA LOMA KAMNITE ZIDOVINE	52
8.1 Teorija loma enoslojnega zidu	52
8.1.1 Rots-ova analiza	53
8.1.2 Berndt-ova teorija loma	53
8.1.3 Sabhova teorija loma	55
8.1.4 Mann-ova teorija loma	56
8.2 Teorija loma večslojnih zidov	57
8.2.1 Teorija loma večslojnih zidov Taissos, Syrmakezis in sodelavci	58
8.2.2 Teorija loma večslojnih zidov - Binda in sodelavci	60
9.0 ANALITIČNI DEL	61
9.1 Tlačna trdnost enoslojnih zidov	61
9.2 Tlačna trdnost večslojnih zidov	62
9.2.1 Tlačna trdnost večslojnih zidov po Taissos-u	62
9.2.2 Tlačna trdnost večslojnih zidov po Bindi	65
9.3 Deformacijske lastnosti zidovja	66
9.3.1 Modul elastičnosti E	66
9.3.2 Strižni modul G	66
10.0 PRIMERJAVA ANALITIČNIH IN EKSPERIMENTALNIH PREISKAV	68
10.1 Tlačne trdnosti	68
10.2 Deformacijske lastnosti zidovja	73

11.0 ZAKLJUČEK.....	74
VIRI	76

Kazalo preglednic:

Preglednica 1: Vrste lomljenega kamna	3
Preglednica 2: Vrste drobljenega kamna	3
Preglednica 3: Vrste klesanega kamna	4
Preglednica 4: Razlez malte pri zidovih z vezniško ter pri zidovih s smerniško zidarsko zvezo	26
Preglednica 5: Razlez malte za grobi omet.....	27
Preglednica 6: Razlez fine malte.....	28
Preglednica 7: Tlačna in upogibna trdnost malte za zidanje.....	31
Preglednica 8: Tlačna trdnost malte za grobi omet.....	32
Preglednica 9: Tlačna trdnost in upogibna trdnost za fini omet	33
Preglednica 10: Tlačna trdnost kamna.....	34
Preglednica 11: Upogibna trdnost kamna	35
Preglednica 12: Vpojnost kamna	36
Preglednica 13: Tlačna trdnost jedra.....	36
Preglednica 14: Cepilna natezna trdnost jedra.....	37
Preglednica 15: Trdnost stika	39
Preglednica 16: Rezultati izračunov tlačne trdnosti enoslojnih zidov	62
Preglednica 17: Analitični rezultati tlačne trdnosti troslojnega zidu	63
Preglednica 18: Analitični rezultati po Bindi.....	65
Preglednica 19: Deformacijske konstante.....	67
Preglednica 20: Primerjava analitičnih rezultatov z rezultati preiskav tlačne trdnosti	68
Preglednica 21: Primerjava tlačnih trdnosti s pravilnikom NTC08.....	69
Preglednica 22: Dovoljena obremenitev po Peuliću (1967)	69
Preglednica 23: Projektne tlačne trdnosti iz Španije in Portugalske PIET-70	70
Preglednica 24: Projektne tlačne trdnosti iz Kanade (CSA S304, 1-94).....	70
Preglednica 25: Rezultati laboratorijskih in in-situ preiskav (Slovenija, Črna Gora, Hrvaška)	71
Preglednica 26: Tlačne trdnosti kamnitih zidov grških raziskovalcev.....	72
Preglednica 27: Primerjava vrednosti modula elastičnosti	73

Kazalo slik:

Slika 1: Struktura ali morfologija zidu iz polobdelanega kamna in sestavni gradniki zidu.....	1
Slika 2: Kraška hiška (Juvanec, 2004).....	2
Slika 3: Razmerje med bazo in krono suhega zidu	2
Slika 4: Kamnoseško ročno orodje (Peulić, 1976).....	5

Slika 5: Šivanje robov kamnitih zidov (Deu, 2004)	6
Slika 6: Zid iz lomljencev (Peulić, 1976)	7
Slika 7: Zid iz ploščatega kamna s prekinjenimi vodoravnimi sloji (Peulić, 1976)	8
Slika 8: Zid iz ploščatega kamna z neprekinjenimi vodoravnimi sloji (Peulić, 1976)	8
Slika 9: Zid iz polklesanega kamna (levo: Peulić, 1976, desno: Renčelj, Lah, 2008).....	9
Slika 10: Zid iz polklesanega kamna (Peulić 1976)	9
Slika 11: Ciklopski zid (Peulić, 1976).....	10
Slika 12: Ciklopski zid (Deu, 2004)	10
Slika 13: Zid iz klesancev, smerniška zveza za zidove debelin manjših od 30 cm (Peulić 1976).....	11
Slika 14: Zid iz klesancev, gotska zveza za zidove debelin od 30 do 60 cm (Peulić, 1976)	11
Slika 15: Zid iz klesancev, gotska zveza za zidove debelin nad 50 cm (Peulić, 1976)	11
Slika 16: Vogal zidu iz klesancev, povezan s kovinskimi sponkami (Peulić, 1976).....	12
Slika 17: Kovinske sponke za kamnite zidove iz obdelanega kamna (Peulić, 1976).....	12
Slika 18: Stari način vgrajevanja klesancev na suho (Peulić, 1976)	13
Slika 19: Levo: peč za žganje apna (apnenica), desno: jama za gašeno apno (apnica)	14
Slika 20: Zid z armiranobetonskim nosilcem, vencem in z navojnimi palicami	15
Slika 21: Armaturni načrt nosilca	16
Slika 22: Opaž nosilca	17
Slika 23: Nosilec zidka vpet v jeklen jarem za transport z mostnim žerjavom	17
Slika 24: Gradnja zidkov	18
Slika 25: Shema zidu z vezniško zidarsko zvezo	19
Slika 26: Zidanje sklada z vezniki	19
Slika 27: Izmenjava 1. in 2. sklada pri vezniški zidarski zvezi in zapolnitev votlin	20
Slika 28: Shema zidu s smerniško zidarsko zvezo	20
Slika 29: Struktura zidu s smerniško zidarsko zvezo	21
Slika 30: Skladi zidka pozidani s smerniško zidarsko zvezo.....	21
Slika 31: Ometavanje z grobo malto	22
Slika 32: Armaturni načrt venca.....	23
Slika 33: Betoniranje vencev	23
Slika 34: Ometanje s finim ometom	24
Slika 35: Stresalna mizica za določanje razleza malte	25
Slika 36: Graff-Kaufmanov deformeter (Golob, 2007).....	28
Slika 37: Preizkušanje upogibne trdnosti	30
Slika 38: Preizkušanje tlačne trdnosti.....	30
Slika 39: Tlačna preiskava kamna	34
Slika 40: Preiskava upogibne trdnosti kamna.....	35
Slika 41: Tlačna preiskava jedra zidu	37

Slika 42: Preiskava cepilne natezne trdnosti jedra zidu	38
Slika 43: Shema preizkusa z metodo »Bond wrench«, Bosiljkov (1996).....	38
Slika 44: Preizkus »Bond wrench« v laboratoriju	39
Slika 45: In situ strižna preiskava zidu (Gostič in sod. 2012).....	40
Slika 46: In situ tlačna preiskava zidu (Gostič in sod. 2012).....	41
Slika 47: Nameščanje zidka v stiskalnico kapacitete 5000 kN.....	42
Slika 48: Jeklena prečka	42
Slika 49: Shema merilnih mest	43
Slika 50: Zid pred obremenjevanjem in merilna mesta deformacij	44
Slika 51: Odpadli omet	45
Slika 52: Shema razpok za nizek zid s smerniško zidarsko zvezo.....	46
Slika 53: Shema razpok za visok zid s smerniško zidarsko zvezo.....	48
Slika 54: Shema razpok za nizek zid z vezniško zidarsko zvezo.....	49
Slika 55: Shema razpok za visok zid z vezniško zidarsko zvezo.....	51
Slika 56: Razpokanost zidu.....	51
Slika 57: Stanje napetosti v zidani prizmi pri tlačni obremenitvi (Hilsdorfova predpostavka)	52
Slika 58: Formiranje dodatnih cepilnih napetosti v zidaku (Berndt, 1994)	54
Slika 59: Prerazporeditev napetosti v b) elastičnem in c) plastičnem stanju (Sabha, 1994).....	55
Slika 60: Rušni model po Sabhu (1994)	56
Slika 61: Razporeditev napetosti v troslojnem zidu.....	58
Slika 62: Zidki iz preiskav Binda in sod. (2006)	60
Slika 63: Vzorci zidov, Huster (2000)	62

Kazalo grafikonov:

Grafikon 1: Krčenje malte za zidanje	29
Grafikon 2: Diagram napetosti za nizek zid s smerniško zidarsko zvezo.....	46
Grafikon 3: Diagram napetosti za visok zid s smerniško zidarsko zvezo.....	47
Grafikon 4: Diagram napetosti za nizek zid z vezniško zidarsko zvezo.....	49
Grafikon 5: Diagram napetosti za visok zid z vezniško zidarsko zvezo.....	50
Grafikon 6: Oblikovni faktor za spojnice po Rustmeierju (Mann, 1983).....	57
Grafikon 7: Anomalija tlačne trdnosti v odvisnosti višine zidu.....	63
Grafikon 8: Anomalija tlačne trdnosti v odvisnosti od materiala in oblike zidaka (k_1).....	64
Grafikon 9: Anomalija tlačne trdnosti v odvisnosti od obdelanosti kamna (ζ_e).....	64
Grafikon 10: Anomalija tlačne trdnosti v odvisnosti debeline zunanjega zidu	65

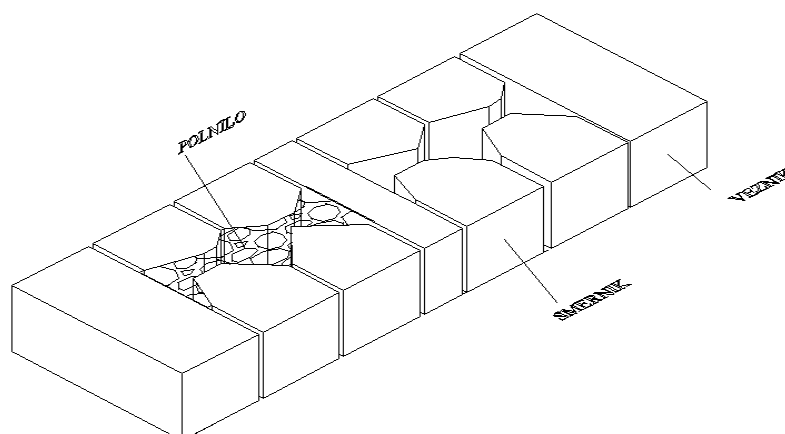
1.0 UVOD

Najpogostejši gradbeni elementi so zidovi in eni izmed njih so kamniti zidovi. Kamniti zidovi se delijo glede na slojevitost zidu in glede na stopnjo obdelanosti vgrajenega kamna. Glede na slojevitost zidov poznamo enoslojne, dvoslojne in troslojne zidove. Glede na obdelanost kamna pa poznamo, zid iz neobdelanega kamna oziroma lomljenca, zid iz ploščatega, polobdelanega in obdelanega kamna. V okviru evropskega projekta Perpetuate smo v namen preiskav mehanskih lastnosti z različno strukturo (morfologijo) izdelali dve vrsti troslojnih zidkov. V diplomski nalogi bom predstavil priprave na laboratorijske preiskave in izsledke teh preiskav, in sicer ali struktura (zgradba, morfologija) zidu vpliva na tlačno trdnost zidu.

2.0 NAMEN PREISKAV

Cilj naloge je ugotoviti mehanske lastnosti kamnitih zidov ter vgrajenih materialov in njihovo obnašanje pod različnimi obtežbami. Uporabnost teh parametrov je pomembna pri načrtovanju sanacij, adaptacij in pri nadgradnjah kamnitih objektov. Pri tem smo se omejili na zidove iz polobdelanega kamna, pozidanih z apneno malto.

Pozidanih je bilo 18 zidkov, od tega devet z vezniško zidarsko zvezo. Vsi zidovi pa so imeli smerniško zidarsko zvezo. V obeh primerih je bilo 8 višjih zidkov namenjenih strižnim preiskavam in en nižji za tlačno preiskavo. Pojem zidek se uporablja za laboratorijski vzorec ustreznih dimenzij. Pri smerniški zvezi je zid pozidan samo s smerniki, pri vezniški zvezi pa se v skladu izmenjujejo vezniki in smerniki. Z vezniki se poveže prvi in drugi sloj zidu, vmes pa je jedro oziroma mešanica malte in drobirja ali ostankov od klesanja kamnov.



Slika 1: Struktura ali morfologija zidu iz polobdelanega kamna in sestavni gradniki zidu

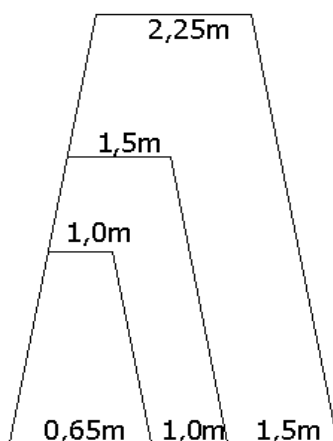
3.0 KAMNITI ZIDOVI

3.1 Splošno

Kamen je en od najstarejših gradbenih materialov. Najbolj preprosta tehnika zidanja je zidanje brez malte. Tej tehniki se reče tudi suhi zid. Tako so ljudje gradili preprosta bivališča in pastirske ograde. Na Krasu še vedno uporabljajo to tehniko pri gradnji pastirskih ograd in zatočišč pred neugodnimi vremenskimi vplivi.



Slika 2: Kraška hiška (Juvanec, 2004)



Slika 3: Razmerje med bazo in kono suhega zidu




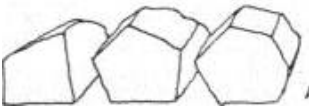
Druga tehnika je mokro zidanje, pri kateri kamne povezuje malta. Včasih so gradili z apneno malto, ki je imela majhno trdnost in se je dolgo sušila. Danes se največ uporablja podaljšana malta (apneno - cementna malta), saj se hitro suši ter ima dobre duktilne lastnosti. Cementna malta se zaradi togosti ne sme uporabljati na potresnih območjih. Kot sem že omenil, se zidovi delijo tudi glede na obdelanost kamna. V naslednjih podpoglavjih bom predstavil pridobivanje in obdelavo kamna ter orodja za ročno obdelavo kamna.

3.2 Pridobivanje in obdelava kamna

Kamen se pridobiva z lomljenjem večjih blokov iz stene kamnoloma. Predhodno se izvrti luknje, sledi zabijanje klinov, da se odlomi blok. Pridobiva se tudi z žaganjem s pomočjo žične ali tračne žage.

Žaga se vpreže v jarem in nato reže v predhodno narejenem zaseku. V zaseku je pesek iz jekla, kremenca ali korunda, med žaganjem pa se zaliva z vodo. Nato v kamnolomih, v kamnoseških delavnicah ali na gradbiščih bloke lomijo ali žagajo na manjše kose. Glede na namen in vrsto obdelave ločimo lomljen, drobljen in obdelan kamen. Slike v naslednjih preglednicah so povzete iz Bošnjak, Sever (1982).

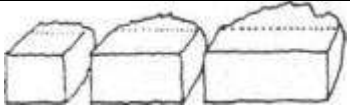

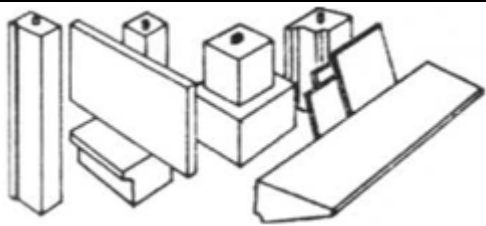
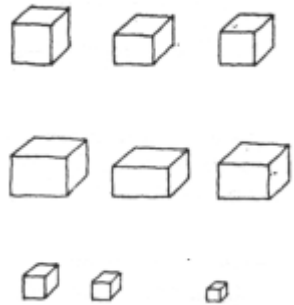
Preglednica 1: Vrste lomljenega kamna

LOMLJEN KAMEN	
 navaden lomljen kamen	Pridobiva se z odbiranjem kamna v kamnolomu.
 ploščat lomljen kamen	Pri lomu je kamen obdržal dve približno vzporedni ležiščni površini.
 polobdelan lomljen kamen	Pravilnemu kosu kamna se obdelata dve ležiščni površini in lice.
 kamen za ciklopski zid	Obdelane so tri ležiščne površine kamna.

Preglednica 2: Vrste drobljenega kamna

DROBLJEN KAMEN	
tolčenec	Železniški nasipi.
drobljen pesek	Kamen drobijo in sejejo na določene frakcije (kamniti agregat).

Preglednica 3: Vrste klesanega kamna

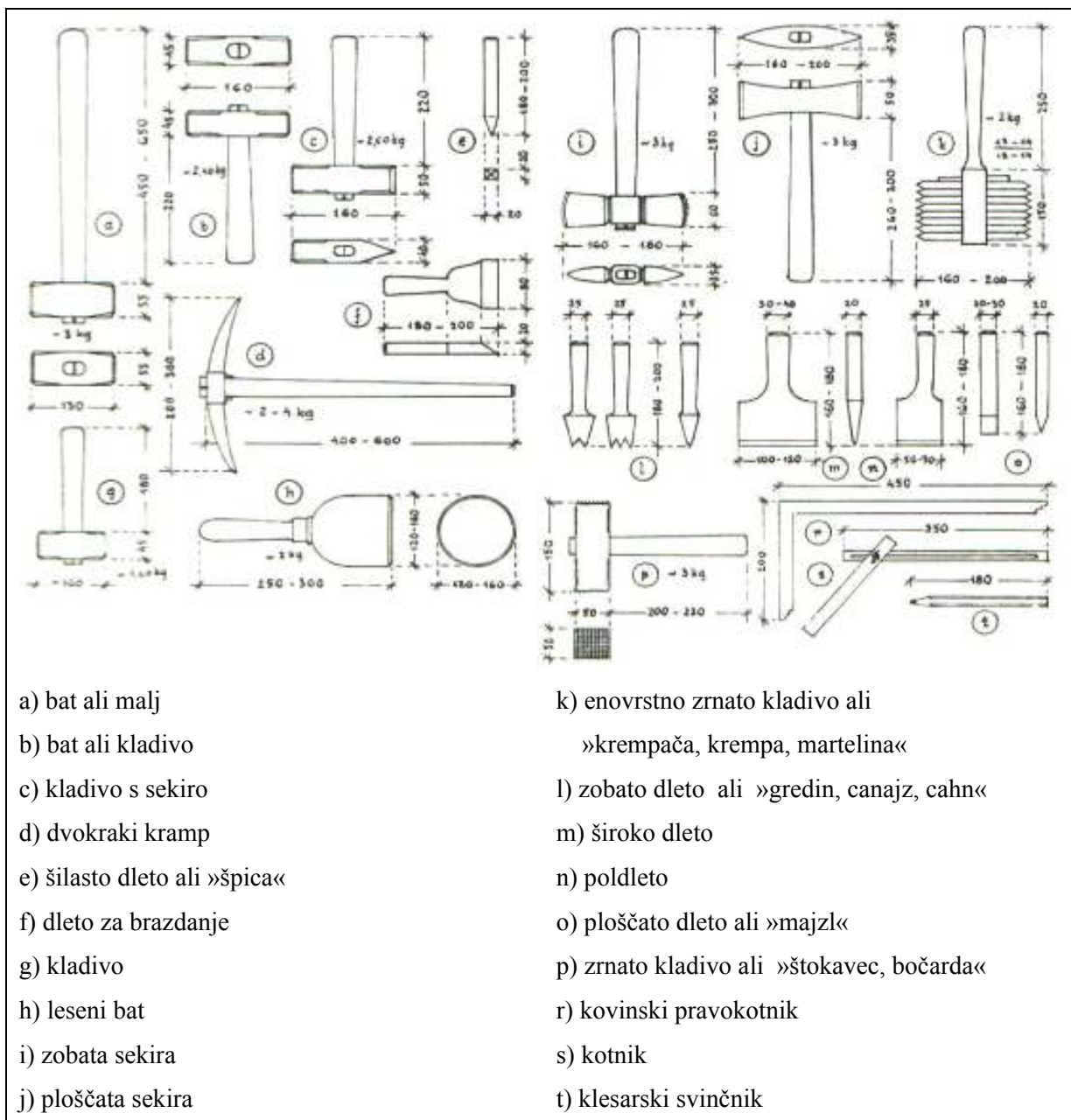
OBDELAN KAMEN	
 <p>polklesan kamen</p>	Štiri ležiščne površine kamna so obdelane do globine 20 cm, nevidni deli so lahko neobdelani.
 <p>klesan(tesan) kamen</p>	Kamni prizmatične ali kockaste oblike (6 pravilno obdelanih ploskev).
 <p>posebno obdelan kamen</p>	Klesan, žagan ali s tolčenjem obdelan kos boljše vrste kamna (kamniti okvirji za okna vrata, kamniti bloki, kamnite stopnice, stebri krožnega prereza, venci, okrasi).
 <p>pravilno lomljene kocke in prizme</p>	S strojnim in ročnim lomljenjem trdih vrst kamna se dobijo tlakovci smerniki (kamniti kvadri za zidanje).

Pri klesanem kamnu lahko zunanje lice estetsko obdelamo. Površina lica je lahko:

- gladka
- rustikalna (bunjasta)
- blaziničasta
- diamantna
- špičena
- štokana
- brazdana

3.3 Orodje za obdelavo kamna

Poleg ročnega orodja (slika 4), uporabljajo kamnoseki še žage, vrtalne stroje in brusilne stroje. Pri predstavitvi posameznih orodij sem pod narekovaji, navedel izraze, ki jih uporabljajo kamnoseki. Informacije sta mi posredovala profesorja s Srednje gradbene šole v Ljubljani, g. Janko Brunček in ga. Maja Capuder.

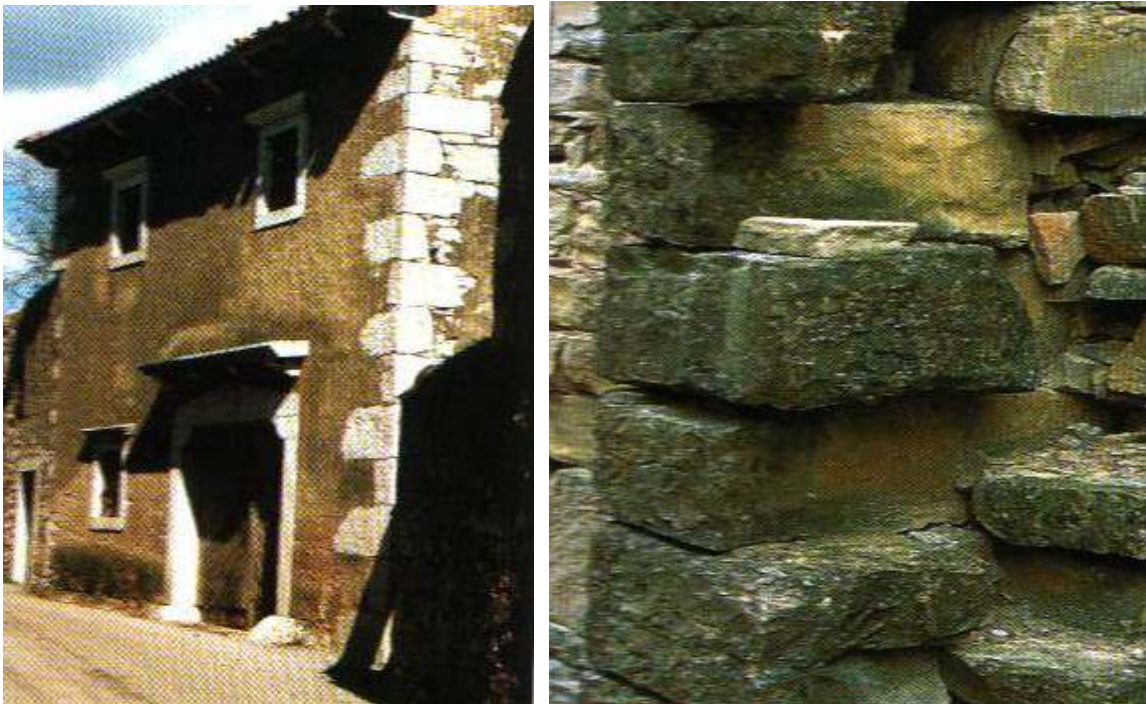


Slika 4: Kamnoseško ročno orodje (Peulić, 1976)

3.4 Zidanje in vrste kamnitih zidov

Zidanje s kamnom je zelo podobno zidanju z opeko. Poleg pravil, ki veljajo tudi za zidanje z opeko, je potrebno upoštevati še dodatna pravila za kamnite zidove. (Bošnjak, S. Sever, A. 1982)

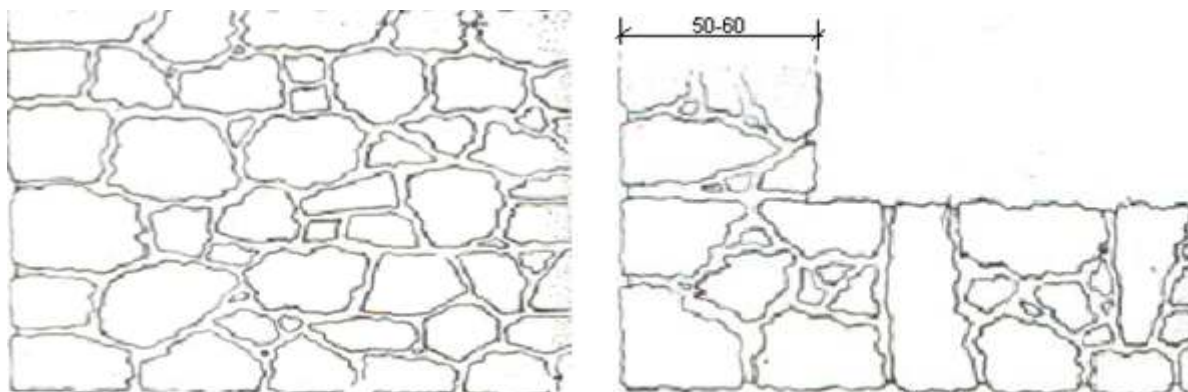
- Kamen mora ležati na širši ploskvi. Dolžina kamna mora biti večja od višine.
- Če je kamen večplastnen mora ležati, tako da so njegove naravne plasti vodoravne.
- Na licu zidu se ne smejo stikati več kot tri fuge
- Navpična fuga enega sklada mora biti prekrita s polnim kamnom drugega sklada.
- V zidu morajo biti, čim več veznikov, na vsaj dva smernika mora biti veznik. Lahko se tudi izmenjujejo skladi veznikov in smernikov.
- Kamni ob vogalih in odprtinah naj bodo večji, zagotoviti moramo šivanje vogalov in stičišča sten. Pri šivanju vogalov se morajo menjati skladi veznikov in smernikov
- Pri izravnalnih slojih zidu (zid iz polklesancev in zid iz ploščatega kamna) se lahko uporabljajo manjši kamni (podkladki ali »škajce«). (Renčelj, Lah, 2008)



Slika 5: Šivanje robov kamnitih zidov (Deu, 2004)

3.4.1 Zid iz lomljencev

Najmanjša debelina zidu iz lomljencev je 0,6 m. Kamen mora imeti dolžino, večjo od širine, višino pa enako širini ali manjšo. Vezniki morajo biti večji, pri tankih zidovih pa morajo prehajati čez celo debelino zidu. Vezniki tudi ne smejo biti klinasti, da ne izrivajo sosednjih manjših kamnov. Na vogalih in odprtinah pa se uporabljajo bolj obdelani kamni z vodoravnimi ležiščnimi površinami, ki se povezujejo izmenično kot smerniki in vezniki. Zidovi iz lomljencev se gradijo z enim licem ali z obema. Pri zidovih z dvema licema pozidamo sprednje in zadnje lice, fuge in votline pa zapolnimo z manjšimi kamni, ki jih zalijemo malto. Na višini 0,8 m in 2,0 m zidu se naredi izravnava.



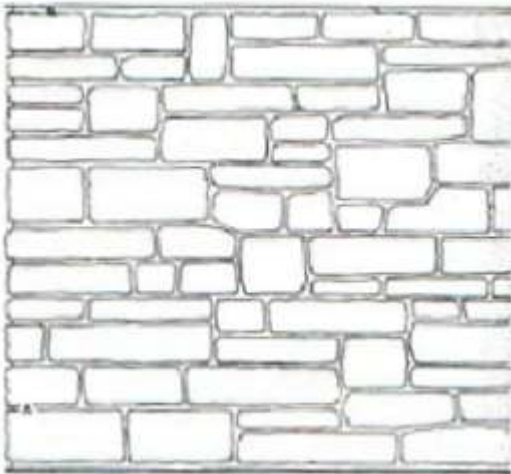
LICE ALI TEKSTURA ZIDU

STRUKTURA ALI MORFOLOGIJA ZIDU

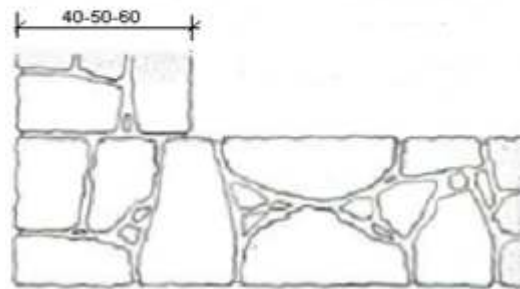
Slika 6: Zid iz lomljencev (Peulić, 1976)

3.4.2 Zid iz ploščatega kamna

Zidovi iz ploščatega kamna se izdelujejo z enim ali z dvema licema. Kamen je grobo obdelan in ima dve vzporedni ležiščni ploskvi. Najmanjša debelina zidu je 0,5 m. Zid nima izrazitih horizontalnih skladov razen izravnav, narejenih na višini 2,0 m.



LICE ALI TEKSTURA ZIDU

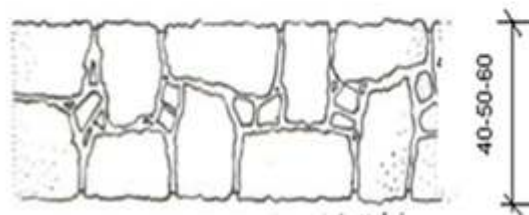


STRUKTURA ALI MORFOLOGIJA ZIDU

Slika 7: Zid iz ploščatega kamna s prekinjenimi vodoravnimi sloji (Peulić, 1976)



LICE ALI TEKSTURA ZIDU

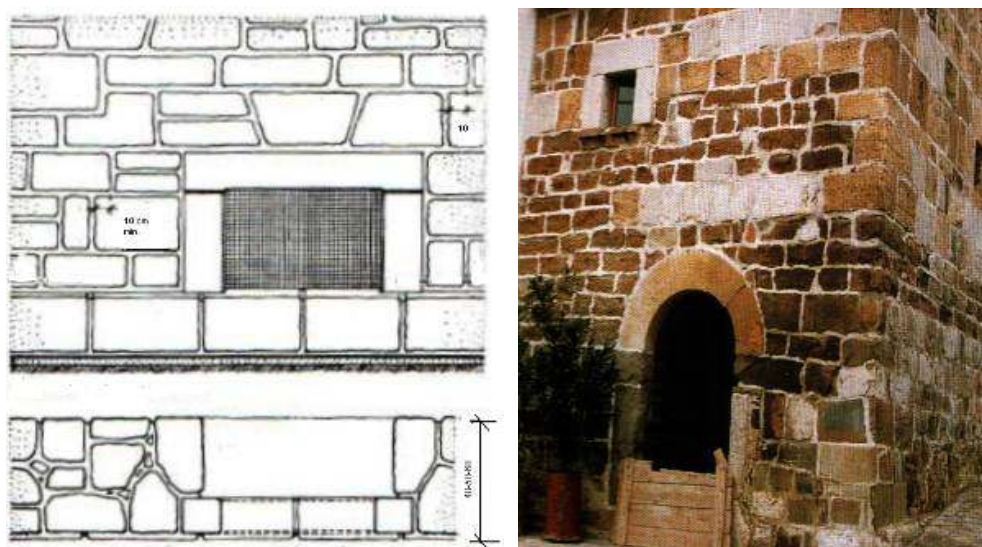


STRUKTURA ALI MORFOLOGIJA ZIDU

Slika 8: Zid iz ploščatega kamna z neprekinjenimi vodoravnimi sloji (Peulić, 1976)

3.4.3 Zid iz obdelanega kamna

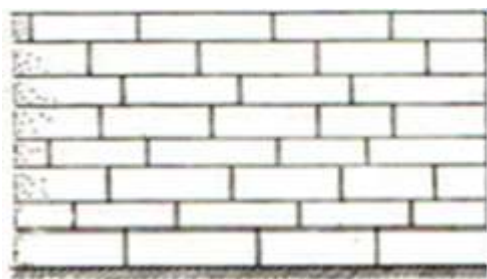
Z obdelanim kamnom je mogoča gradnja večplastnih zidov. Pri kamnu se obdelajo ležiščne in vertikalne površine. Značilnost takega zidu je, da se vodoravne ležiščne površine večkrat prekinejo s postavljanjem večjih kamnov.



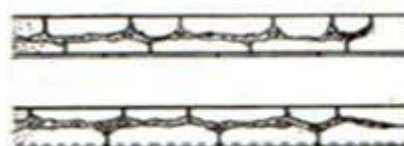
Slika 9: Zid iz polklesanega kamna (levo: Peulić, 1976, desno: Renčelj, Lah, 2008)

3.4.4 Zid iz polklesanega kamna

Pri tej vrsti zidu se kamen obdela do globine 20 cm v obliko kvadra, notranji del kamna pa ostane neobdelan. Lice kamna je fino ali grobo obdelano. V posameznem skladu morajo biti višine kamnov enake, višine skladov pa so lahko različne. Kamne se lahko zлага v različne vezave, potrebno pa je paziti, da je preklop dolg vsaj 10 cm glede na kamne enega in drugega sklada. Za zidove iz polklesanega kamna sta najbolj značilni poljska in angleška vezava. Pri poljski vezavi se v enem skladu menjajo smerniki in vezniki. Pri angleški vezavi pa se izmenjujejo skladi veznikov in skladi smernikov. Debelina fug je od 3 do 30 mm, odvisno od obdelave kamna.



LICE ALI TEKSTURA ZIDU

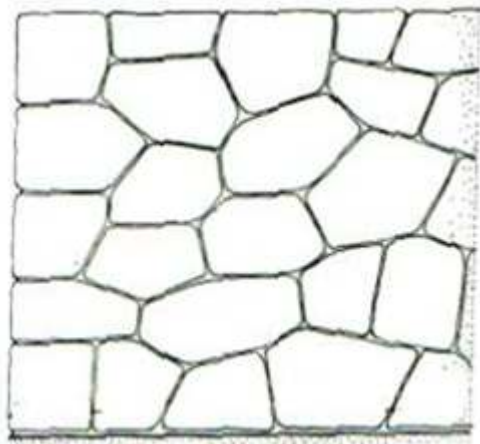


STRUKTURA ALI MORFOLOGIJA ZIDU

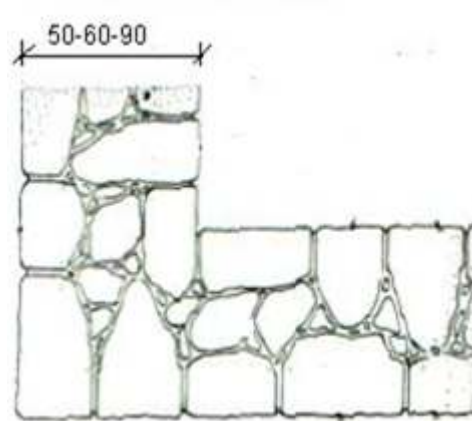
Slika 10: Zid iz polklesanega kamna (Peulić 1976)

3.4.3 Ciklopski zid

Ciklopski zidovi za Slovenijo niso značilni. Ime so dobili po mitološkem velikanu Kiklopu, zaradi velikih kamnov, vgrajenih v zid. Kamen se obdela v pet ali šestkotne oblike. Ležiščne ploskve se obdelajo do 15 cm globine, da se posamezni kamni dobro prilegajo drug v drugega. Vogali in zaključki se izdelajo iz pravilno klesanega kamna z vodoravnimi ležiščnimi ploskvami. Izravnava se dela na višini 2 m.



LICE ALI TEKSTURA ZIDU



STRUKTURA ALI MORFOLOGIJA ZIDU

Slika 11: Ciklopski zid (Peulić, 1976)



Slika 12: Ciklopski zid (Deu, 2004)

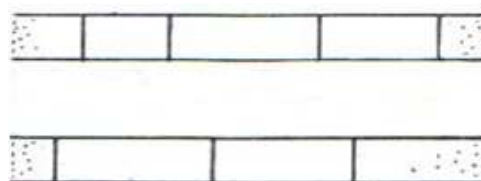
3.4.6 Zid iz klesanega kamna

Kamni so klesani v kvadre, z ravnimi ploskvami in z ostrimi robovi. Načini zidave in preklopi so podobni kakor pri zidovih iz polklesanega kamna. Tanjši zidovi se gradijo v vezniško ali v smerniško zidarsko zvezo, debelejši zidovi pa v vezniško ali v katero drugo vrsto zvez (poljsko, gotsko ali angleško). Navpične fuge so debeline 3-5 mm, vodoravne pa 4-6 mm. Skozi zgodovino so gradbeniki spoznali, da obstaja povezava med geometrijskimi karakteristikami in mehanskimi lastnostmi kamna, zato so za različne vrste kamna oblikovali kvadre različnih dimenzijskih razmerij (Peulić, 1976). Od tod pravilo, da višina (v), širina (\mathring{s}) in dolžina (d) klesancev ne smejo odstopati od naslednjih razmerij.

Klesanci iz:	v : š : d
mehkih peščenjakov in apnencev	1 : 1,5 : 2
trdih peščenjakov in apnencev	1 : 2 : 3
marmorja	1 : 2 : 4
magmatskih kamnin	1 : 2 : 5

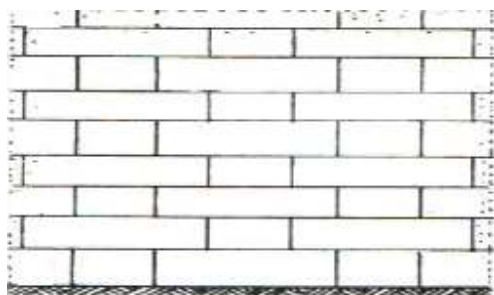


LICE ALI TEKSTURA ZIDU

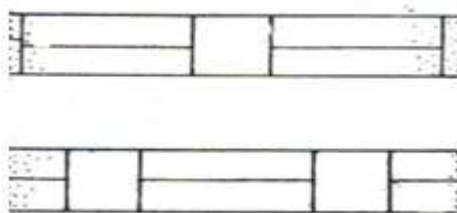


STRUKTURA ALI MORFOLOGIJA ZIDU

Slika 13: Zid iz klesancev, smerniška zveza za zidove debelin manjših od 30 cm (Peulić 1976)

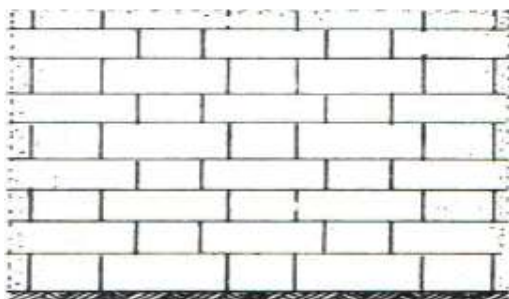


LICE ALI TEKSTURA ZIDU

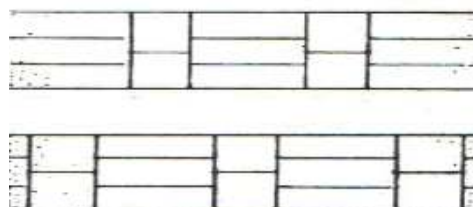


STRUKTURA ALI MORFOLOGIJA ZIDU

Slika 14: Zid iz klesancev, gotska zveza za zidove debelin od 30 do 60 cm (Peulić, 1976)

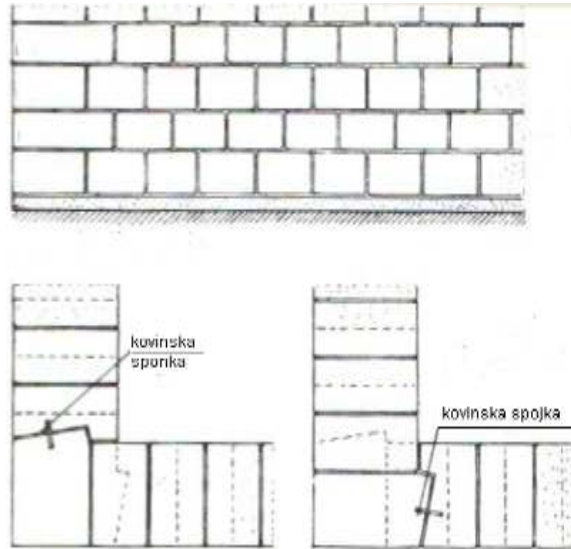


LICE ALI TEKSTURA ZIDU

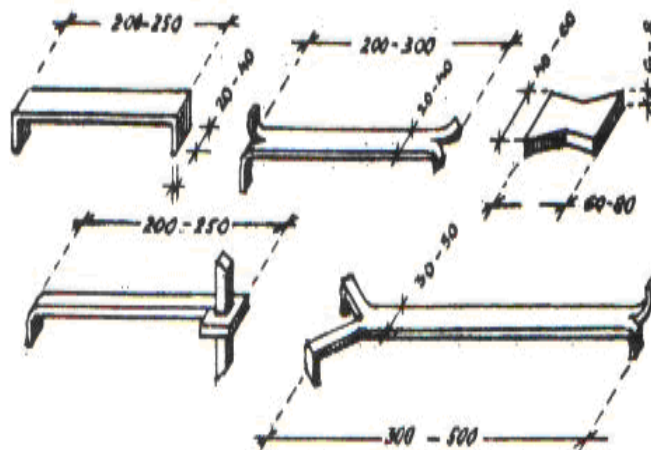


STRUKTURA ALI MORFOLOGIJA ZIDU

Slika 15: Zid iz klesancev, gotska zveza za zidove debelin nad 50 cm (Peulić, 1976)

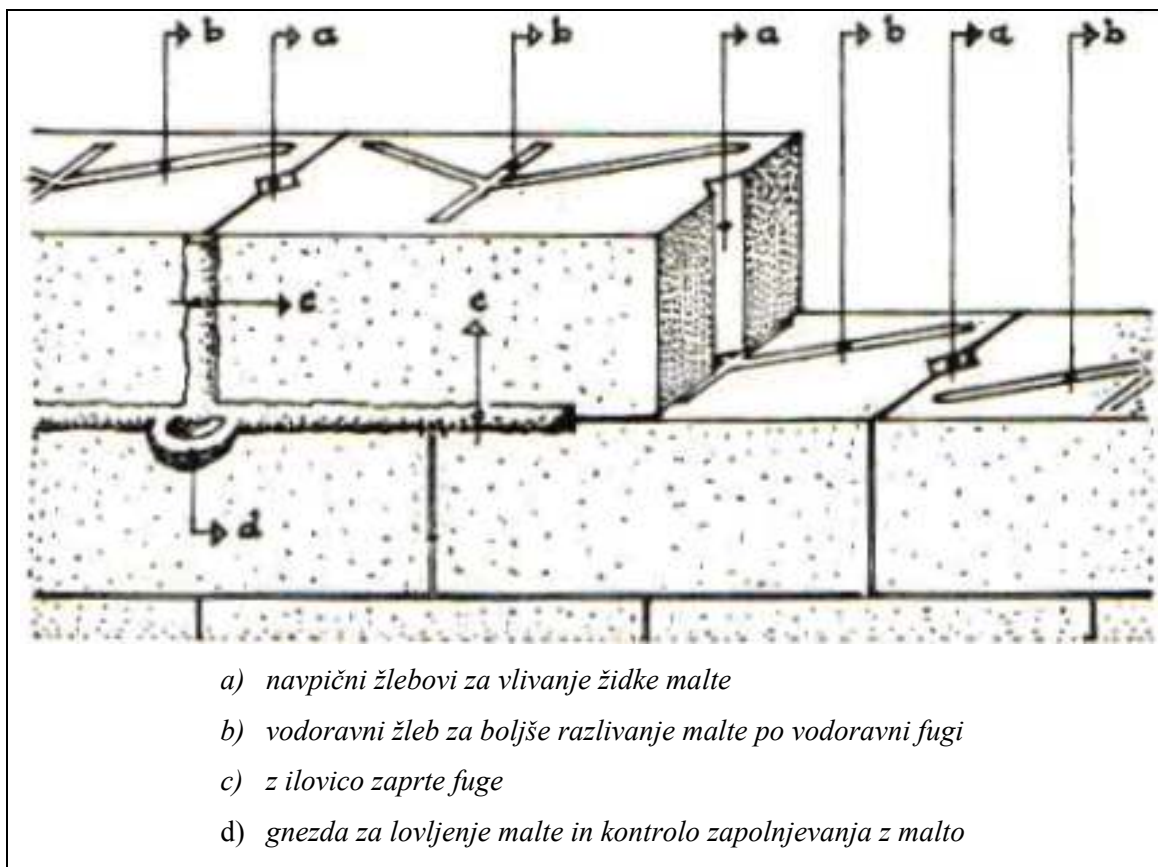


Slika 16: Vogal zidu iz klesancev, povezan s kovinskimi sponkami (Peulić, 1976)



Slika 17: Kovinske sponke za kamnite zidove iz obdelanega kamna (Peulić, 1976)

Suhi ali stari način vgrajevanja klesanca, z naknadnim zalivanjem fug z malto, je potekal po naslednjem postopku. Klesancem so izklesali navpične žlebove za vlivanje malte in vodoravne žlebove za razlivanje malte po vodoravni fugi. Preden so postavili klesanec na mesto vgradnje, so položili podložke iz lesa, svinca ali cinka. Debelina podložk je bila odvisna od debeline fuge. Tako so postavili vrsto klesancev in zaprli navpične in vodoravne fuge z ilovico. Pri tem so naredili tudi gnezda za lovljenje malte in za kontrolo zapolnjevanja fug. Potem so vliвали židko malto skozi navpične žlebove, dokler ni zapolnila fug. Nato so postopek ponovili pri naslednjih skladih. Včasih so lice zidu namazali z ilovico, da se lice ne bi umazalo z malto, po končanem zidanju pa so ilovico sprali.



Slika 18: Stari način vgrajevanja klesancev na suho (Peulić, 1976)

4.0 IZDELAVA VZORCEV ZIDOV

4.1 Splošno

Pri gradnji zidkov smo uporabljali staro tehniko zidanja, saj celoten projekt sloni na raziskavah kulturno - zgodovinskih objektov. Taki objekti so večinoma zgrajeni z apneno malto. Pri malti smo uporabljali rečni pesek, saj včasih niso poznali drobljenja kamnitega agregata oziroma niso imeli tehnologije kakor danes.

Za vezivo smo uporabili apneno testo, pridobljeno tudi na tradicionalni način. V Sloveniji sta le dva proizvajalca, ki pridobivata apno na stari način z žganjem v kopi (peč za žganje apna, tudi apnenica). Iz apnenice se žgano apno prestavi v apnico. To je jama, v katero se odloži žgano apno in zalije z vodo v razmerju 1:1. Tako nastane apneno testo, ki mora odležati v apnici vsaj tri leta. Z daljšim odležavanjem v apnici, apno pridobiva na kakovosti. To so vedeli že stari Rimljani, saj so uporabljali vsaj tri leta odležano apneno testo.

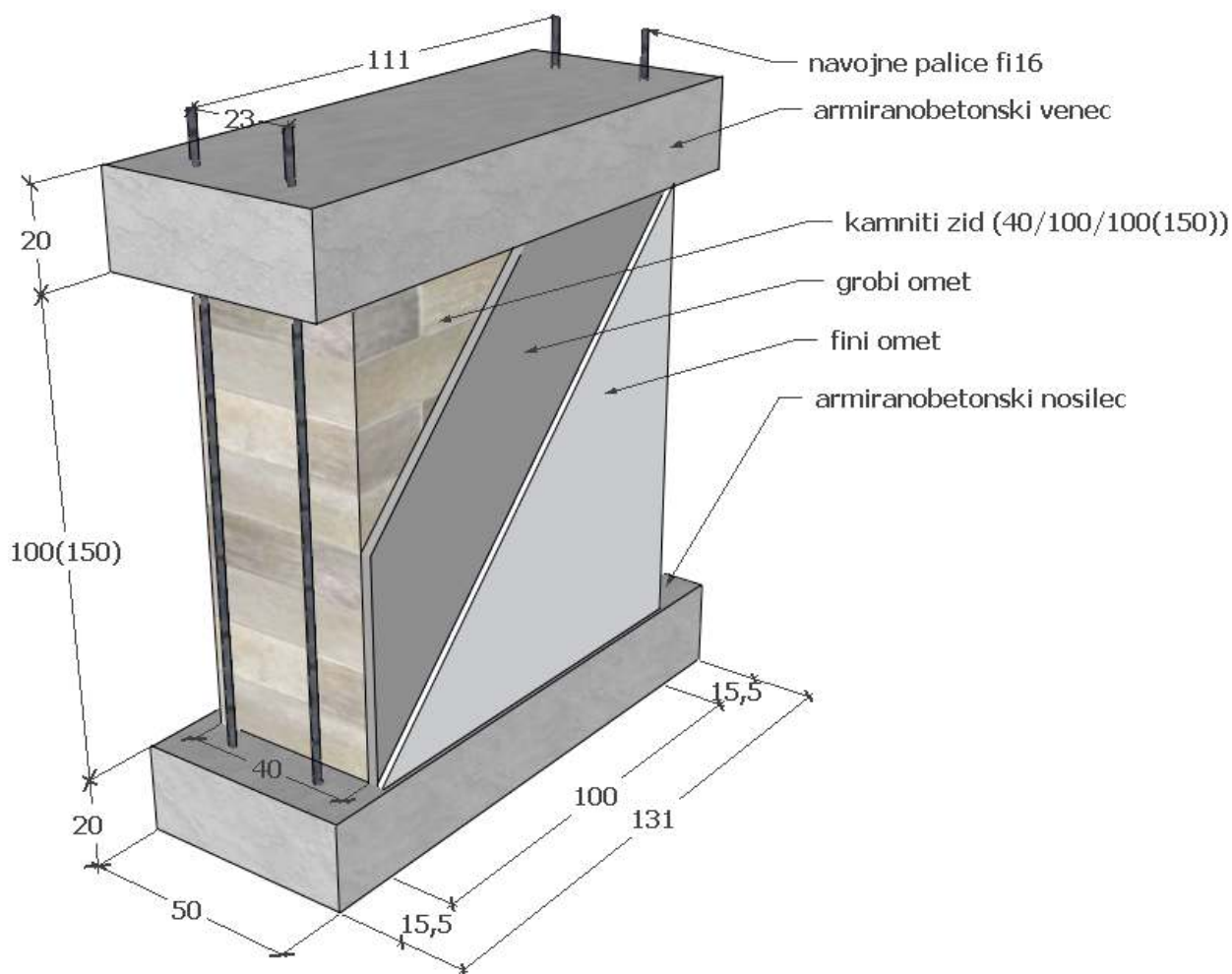


Slika 19: Levo: peč za žganje apna (apnenica), desno: jama za gašeno apno (apnica)

Zaradi dolgotrajnega vezanja apnene malte so že stari Rimljani, po potrebi, malti dodajali vulkanski pepel (tuf) in z njim pospešili vezanje. Zato smo apneni malti dodali do 20 % vulkanskega pepela. Pri malti smo dosegli hitrejše vezanje, nismo pa preseгли trdnosti malte 2 MPa, saj trdnost malt v zgodovinskih objektih znaša 1-5 MPa. Prednost apnenih malt je tudi njihova elastičnost, ki dobro vpliva na tlačno trdnost zidu, saj enakomerno raznaša obremenitev iz kamna na kamen. Za zidanje in ometavanje smo uporabljali različne recepture malt. Za zidanje smo uporabili volumsko razmerje apna in peska 1: 4, za grobi omet 1: 3, za fini omet pa 1: 2.

4.2 Zasnova vzorca zidu za preizkušanje in transport

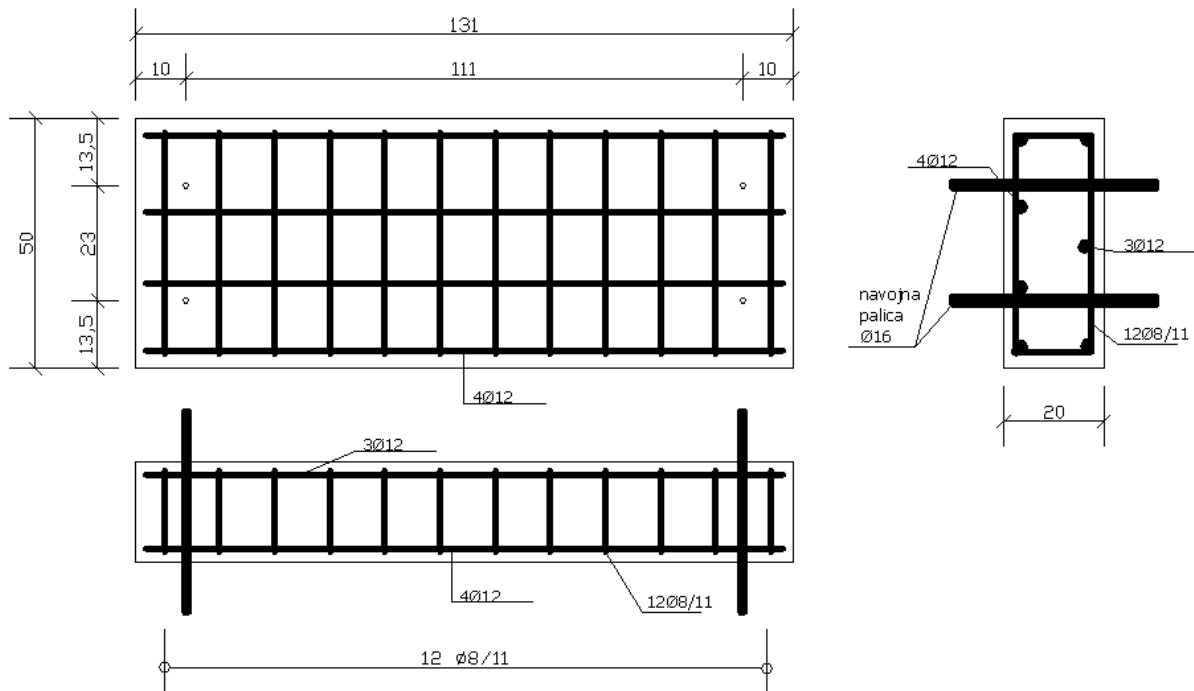
Odločili smo se, da bomo naredili 8 strižnih in en tlačni vzorec z vezniško zidarsko zvezo ter enako število vzorcev brez vezniške zidarske zveze. Vseh vzorcev je bilo 18. Dimenzije tlačnih vzorcev kamnitih zidov so 40/100/100 cm (debelina/širina/višina), dimenzije strižnih vzorcev kamnitih zidov pa 40/100/140 cm (debelina/širina/višina). Pri tem smo se morali spopasti z logističnimi, tehnološkimi ter transportnimi problemi. Pri vsakem vzorcu smo naredili armiranobetonski nosilec in venec, za vpetje, transport in enakomeren raznos obtežbe



Slika 20: Zid z armiranobetonskim nosilcem, vencem in z navojnimi palicami

4.3 Izdelava armiranobetonskih nosilcev.

V prvi fazi smo zabetonirali nosilce. Ti nosilci so služili za transport in vpetje zidu. Pri izdelavi smo morali pridvideti, kako bomo zid vpeli v napravo za preizkušanje na strig in transport. V nosilec smo vbetonirali navojne palice, z njimi smo transportirali zidovi in jih vpenjali v preizkuševalne naprave.



Slika 21: Armaturni načrt nosilca

Zaradi pomanjkanja prostora sva s strokovnim sodelavcem, betonirala nosilce v manjšem številu. Vsakič sva postavila opaž, armirala ter betonirala po šest nosilcev. Vgradila sva beton trdnostnega razreda C30/35 z zrnavostjo kamnitega agregata 0/32. Beton iz betonarne je bil zemeljsko vlažen, da med transportom ne bi prišlo do segregacije. Zaradi neplastičnosti betona, ga je bilo potrebno vgraditi s pomočjo vibracijske igle. Po nekaj dnevnem sušenju, sva razopazila nosilce in jih pospravila na začasno odlagališče v laboratoriju. Transport je potekal, tako da sva na vbetonirane navojne palice pritrdila poseben jeklen jarem, kateri je omogočil stabilen in varen transport.



Slika 22: Opaž nosilca



Slika 23: Nosilec zidka vpet v jeklen jarem za transport z mostnim žerjavom

4.4 Zidanje zidkov

Po betoniranju nosilcev je bilo na vrsti zidanje zidkov. Zidke so zidali kvalificirani zidarji iz podjetja Kamnograd, ki je specializirano za gradnjo s kamnom. Malto smo mešali po svoji recepturi, v razmerju: 84 kg peska, 19,36 kg apnenega testa, 4,38 kg tufa. Recepturo je na osnovi zahtevanih lastnosti malte projektirala izr. prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov.

Zidarjem sem pripravljala malto, spremljal njeno konsistenco ter pripravljala vzorce prizmic za tlačne in upogibne preizkuse malte. Pri zidkih je bilo vsak dan lahko pozidanih le nekaj vrst. Pri zidanju zidov je namreč potrebna postopnost gradnje. To pomeni, da se zidu naenkrat ne sme previsoko pozidati, saj bi se lahko zid zaradi teže zidakov in sveže malte posedel in izklonil iz navpične lege. Velikost kamnov je morala biti enakomerna zaradi homogenosti strukture zidu. Naležne spojnice so morale biti neprekinjeno vodoravne, kar je značilnost zidov na Krasu.

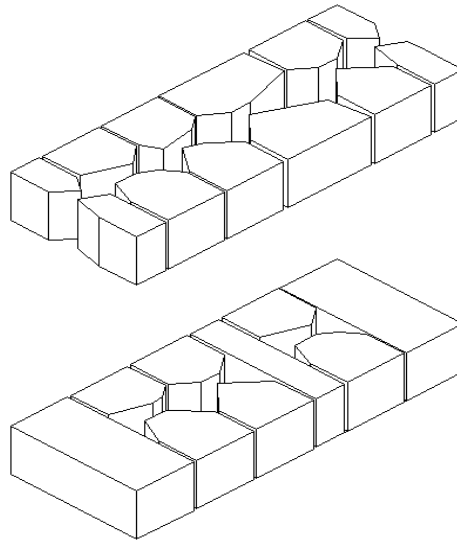
Povprečna debelina naležnih spojníc je 1,5 cm. Večje spojnice ne prispevajo k večji nosilnosti zidov, kot je današnje zmotno mišljenje zidarjev (Bosiljkov). Povprečne dimenzije smernikov so bile 14/11/21 cm (širina/višina/dolžina), povprečne dimenzije veznikov pa 14/11/40 cm (širina/višina/dolžina).



Slika 24: Gradnja zidkov

4.4.1 Zid z vezniško zidarsko zvezo

Vezniška zidarska zveza je bila pozidana na naslednji način. Sestavljata jo dve vrsti skladov, v prvem skladu so samo smerniki, v drugem skladu pa se izmenjujejo vezniki in smerniki. Jedro smo napolnili z mešanico malte in ostankov klesanja. Pri tem moram opomniti, da to ni povsem pravilna vezniška zidarska zveza, kot jo zasledimo v drugih literaturah. Pri vezniški zvezi naj bi bili v vsakem skladu prisotni vezniki.



Slika 25: Shema zidu z vezniško zidarsko zvezo



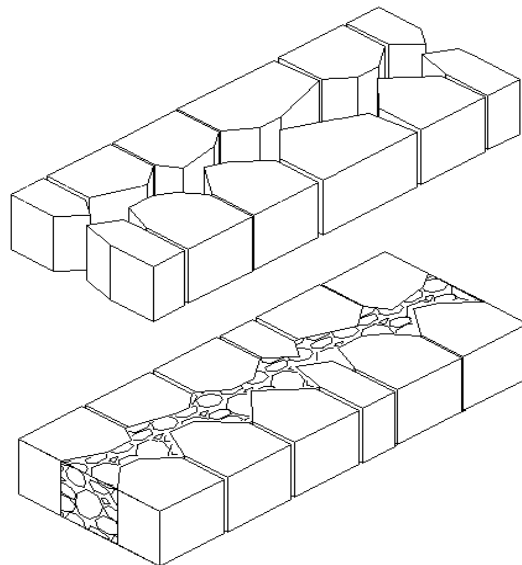
Slika 26: Zidanje sklada z vezniki



Slika 27: Izmenjava 1. in 2. sklada pri vezniški zidarski zvezi in zapolnitev votlin

4.4.2 Zid s smerniško zidarsko zvezo

Pri tej zidarski zvezi so vsi skladi zidu pozidani samo s smerniki, jedro pa je napolnjeno z mešanico ostankov klesanja in malte. Ta vrsta zidov je v praksi precej pogosta in predstavlja slabo prakso, saj so ti zidovi so ob potresu zelo ranljivi. Ker zunanji in notranji del zidu nista povezana, razpadeta vsak na svojo stran.



Slika 28: Shema zidu s smerniško zidarsko zvezo



Slika 29: Struktura zidu s smerniško zidarsko zvezo

V praksi se pogosto srečamo s slabim jedrom, v katerem so nasuti le ostanki klesanja, brez malte. Razlog je morda to, da v preteklosti ni bilo toliko surovin za malto, kot jih je danes in so zato malto uporabili samo za zidanje. Zidarji in kamnoseki so morali čim bolj obdelati naležne stranice kamna, da so dosegli vodoravnost in stabilnost skladov ter privarčevali tako pri uporabi malte.



Slika 30: Skladi zidka pozidani s smerniško zidarsko zvezo

4.5 Ometavanje zidkov

4.5.1 Grobi omet

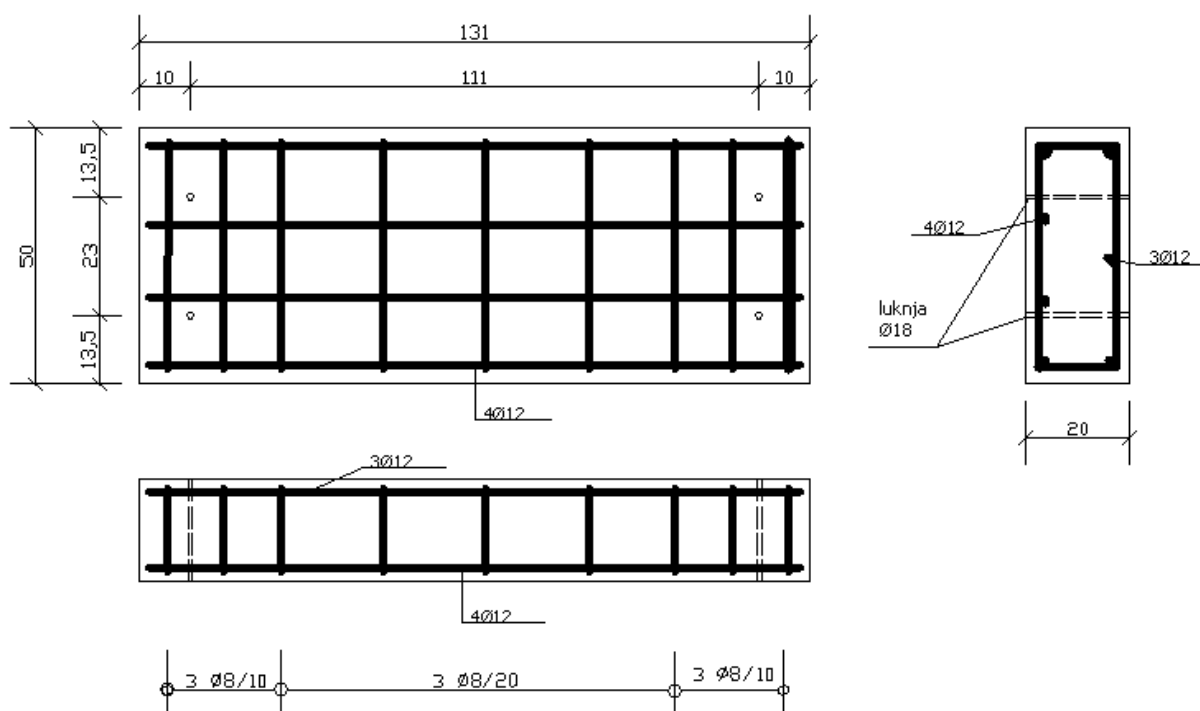
Po enomesečnem sušenju zidov smo zidove ometali z grobim ometom. Malto za grobi omet smo mešali v razmerju: 71,2 kg peska, 17,1 kg apnenega testa, 2,1 kg tufa in 7 l dodane vode. Tuf smo dodali zaradi hitrejšega sušenja. Ometavala sta zidarja iz gradbenega podjetja Novak, jaz sem pa mešal malto in opravljal laboratorijske preiskave sveže mešanice. Gradbeno podjetje Novak večino del opravi na spomeniško zaščitenih objektih, tako da smo se iz njihovih izkušenj veliko naučili. Na zid se najprej pritrdijo vodila, s katerimi se določa debelino in ravnost ometa. Tu smo uporabili »suha« vodila (letve), drugi način so »mokra« vodila ali »faže«. Nato se med vodili nanese omet in se izravna z letvijo in zagladi z gladilko. Povprečna debelina grobega ometa je 1,5 cm.



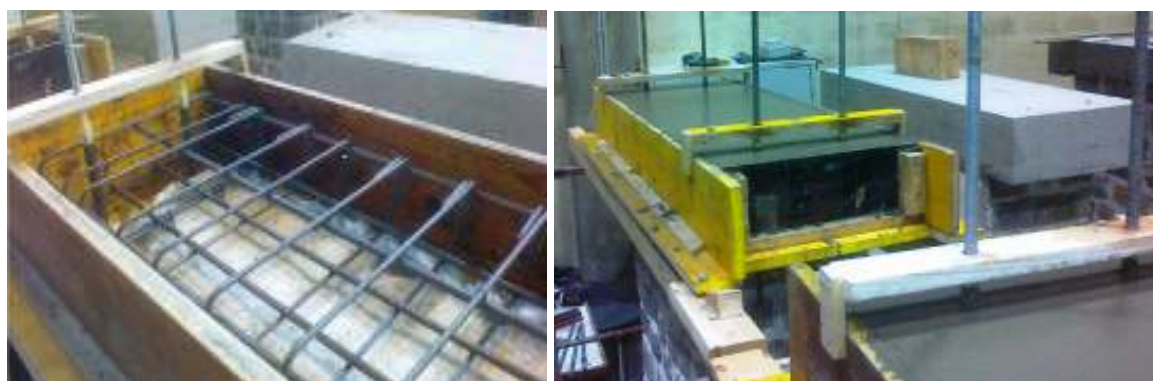
Slika 31: Ometavanje z grobo malto

4.5.2 Betoniranje vencev

Ko so se posušili grobi ometi, smo začeli betoniranje vencev na zidovih. Osnovni namen vencev je enakomeren raznos navpične obtežbe ter vpetje vzorca v preizkuševalno napravo. S povezavo preko navojnih palic z nosilcem, pa tvori stabilen in varen transport zidka. Zaradi ujemanja lukenj za vpetje v preizkuševalni napravi in ravnosti ter vzporednosti spodnje in zgornje ploskve je moralo biti betoniranje zelo natančno. Tako sem po svojem armaturnem načrtu, naredil armaturne koše in opaže. Delo je potekalo po fazah zaradi pomanjkanja prostora, tako da smo naenkrat opaževali in betonirali po en ali dva venca, razopažene zidke pa umikali na začasno odlagališče.



Slika 32: Armaturni načrt venca



Slika 33: Betoniranje vencev

4.5.3 Fini omet

Po betoniranju vencev smo napravili še fine omete. Namen finega ometa je estetika in zaščita grobega ometa pred vremenskimi vplivi. Ometaval je izkušeni kvalificirani zidar iz gradbenega podjetja Novak. Fino malto sem pripravil v masnem razmerju: 25 kg apnenega testa in 50 kg mivke. Sproti sem opravljal še preiskave sveže mešanice. Ometavanje poteka tako, da se fina malta nanese z gladilko na zid. Nato počakamo, da se malo osuši, nato pa se ponovno zagladi oziroma »fino zariba«.



Slika 34: Ometanje s finim ometom

5.0 LABORATORIJSKE PREISKAVE MED IZDELAVO KAMNITIH ZIDOV

5.1 Preiskave sveže mešanice malte

Pri preiskavah sveže mešanice sem opravil preiskave konsistence z razlezom. Konsistenca je stopnja vgradljivosti ki vpliva na velikost notranjega trenja v sveži mešanici. Z njo je povezana tudi obdelavnost malte, da se malta enakomerno in na tanko razporedi med zidakom in podlago. Konsistenca malte je odvisna od številnih parametrov: vrste, količine in zrnastostne sestave agregata, vrste in količine veziva, količine vode, morebitne prisotnosti dodatkov ter od masnega razmerja med vodo in vezivom.

5.1.1 Konsistenca malte za zidanje

Pri zidanju zidkov, sem za vsak mešalec malte posebej stehal sestavine in jih zamešal, nato pa preveril konsistence malte. Pri malti smo namreč dodajali vodo do primerne obdelavnosti malte, vodo za vezanje malte pa je že vsebovalo apneno testo. Iz vsakega mešalca malte sem vzel vzorec in na njem opravil meritev razleza. Meritev razleza sem opravil po standardu SIST EN 1015-3. Na stresalno mizico sem postavil standardizirani konus, vanj do polovice vgradil malto, jo nabil z 20 udarci z batom. Nato napolnil še drugo polovico konusa do vrha in ponovno z 20 udarci zgostil malto. Takoj zatem sem odstranil konus in 15-krat zavrtel ročico stresalne mizice s hitrostjo en obrat /s. Potem sem izmeril razlez pravokotno v dveh smereh. Poleg kontrole konsistence sem tudi meril, koliko vode sem dodal malti in vse skrbno beležil. Povprečna gostota sveže malte za zidanje je $2,16 \text{ kg/dm}^3$, povprečen razlez pri obeh vrstah zidkov pa je 116 mm. V preglednici 4 so podrobneje predstavljeni rezultati preiskav po datumih izdelave in z deleži dodane vode (glede na posamezen volumen mešalca).



Slika 35: Stresalna mizica za določanje razleza malte

Preglednica 4: Razlez malte pri zidovih z vezniško ter pri zidovih s smerniško zidarsko zvezo

Vezniška zidarska zveza				Smerniška zidarska zveza			
DATUM	VZOREC	DELEŽ DODANE VODE [%]	RAZLEZ [mm]	DATUM	VZOREC	DELEŽ DODANE VODE [%]	RAZLEZ [mm]
14.11.2011	M1Z	9,34	125	21.11.2011	M1Z	6,27	114
	M1S1	9,34	123		M1S1	5,74	111,5
	M1S2	8,84	114		M1S2	7,68	112
	M1K	7,21	118,5		M1S3	7,23	117,5
15.11.2011	M1Z	6,11	123,5		M1S4	6,56	115,5
	M1S1	3,96	113		M1S5	7,62	118,5
	M1S2	7,42	118		M1S6	6,54	115,5
	M1S3	7,62	119		M1K	7,51	117
	M1S4	6,05	111,5		22.11.2011	M1Z	7,00
	M1S5	5,59	111	M1S1		6,33	116
	M1S6	7,48	112,5	M1S2		7,00	118
	M1S7	6,80	115	M1S3		6,14	114,5
M1K	6,47	114,5	M1S4	6,65		118,5	
16.11.2011	M1Z	6,40	114	M1S5		6,36	120,5
	M1S1	6,46	116	M1K		7,99	114,5
	M1S2	6,72	114	23.11.2011	M1Z	6,78	112,5
	M1S3	5,91	116		M1S1	6,68	114
	M1S4	6,43	116,5		M1S2	7,62	112
	M1S5	7,54	113		M1S3	7,39	117
	M1S6	6,83	113,5		M1S4	8,84	117,5
	M1K	8,82	117		M1S5	6,88	112,5
17.11.2011	M1Z	7,33	111		M1S6	6,44	113
	M1S1	7,53	117		M1S7	7,00	116,5
	M1S2	6,81	117		M1K	6,29	117
	M1S3	7,14	118	24.11.2011	M1Z	6,32	115
	M1S4	6,06	112,5		M1S1	7,01	116
	M1S5	6,00	119,5		M1S2	7,99	116
	M1S6	6,55	117,5		M1S3	6,80	114
	M1K	4,84	118		M1S4	8,84	119,5
18.11.2011	M1Z	5,69	116		M1S5	7,45	118
					M1S6	7,25	117,5
					M1S7	8,84	115,5
					M1S8	6,85	115,5
				M1K	4,05	111	

Povprečje: **116**

Standardni odklon: **4**

Povprečje: **116**

Standardni odklon: **2**

5.1.2 Konsistenca malte za grobi omet

Ko so se zidki posušili, smo jih enostransko ročno ometali. Namen ometa je bila raziskava njegove togosti in obremenitev, pri kateri odstopi od zidu. Vzporedno so se na ometu opravljale neporušne preiskave (pregled s termokamero, ultrazvokom, radarjem in fotogrametrija). Materiali, ki smo uporabili za pripravo te malte, so bili: rečni pesek z zrnavostjo 0-4 mm, apneno testo, tuf in voda. Malto smo mešali v volumskem razmerju apna in peska 1 : 3. Za vsak mešalec sem stehal apneno testo, pesek in vodo, dodano za ustrezno konsistence malte. Pri vsakem mešalcu sem izmeril razlez po enakem postopku, kot je opisan v poglavju o konsistenci malte za zidanje. Povprečni razlez sveže malte za grobi omet je bil 145 mm, povprečna gostota pa je bila 2,08 kg/dm³.

Preglednica 5: Razlez malte za grobi omet

DATUM	VZOREC	DELEŽ DODANE VODE [%]	RAZLEZ [mm]
11.1.2012	M2Z	14,42	138
	M2S1	14,42	147
	M2S2	14,42	146
	M2S3	14,42	152
	M2S4	14,42	145
	M2S5	14,42	143
	M2S6	14,42	151
	M2S7	14,42	148
	M2S8	14,42	147
	M2K	14,42	148
12.1.2012	M2Z	14,42	145
	M2S1	14,42	141
	M2S2	14,42	147
	M2S3	14,42	146
	M2K	14,42	136

Povprečje: 145

Standardni odklon: 4

5.1.3 Konsistenca malte za fini omet

Po dobrem mesecu dni sušenja grobega ometa, smo zidke ometali s fino malto, ki se je mešala v volumskem razmerju apna in mivke 1 : 2. Uporabili smo apneno testo in mivko in vodo (dodano do ustrezne konsistence). Povprečen razlez je bil 143 mm s standardnim odklonom 3 mm. Povprečna gostota sveže mešanice je $1,92 \text{ kg/dm}^3$.

Preglednica 6: Razlez fine malte

DATUM	VZOREC	DELEŽ DODANE VODE [%]	RAZLEZ [mm]
22.2.2012	M3Z	7,45	146
	M3K	7,45	141
23.2.2012	M3Z	7,45	143

Povprečje: 143

Standardni odklon: 3

5.2 Preiskave otrdele malte

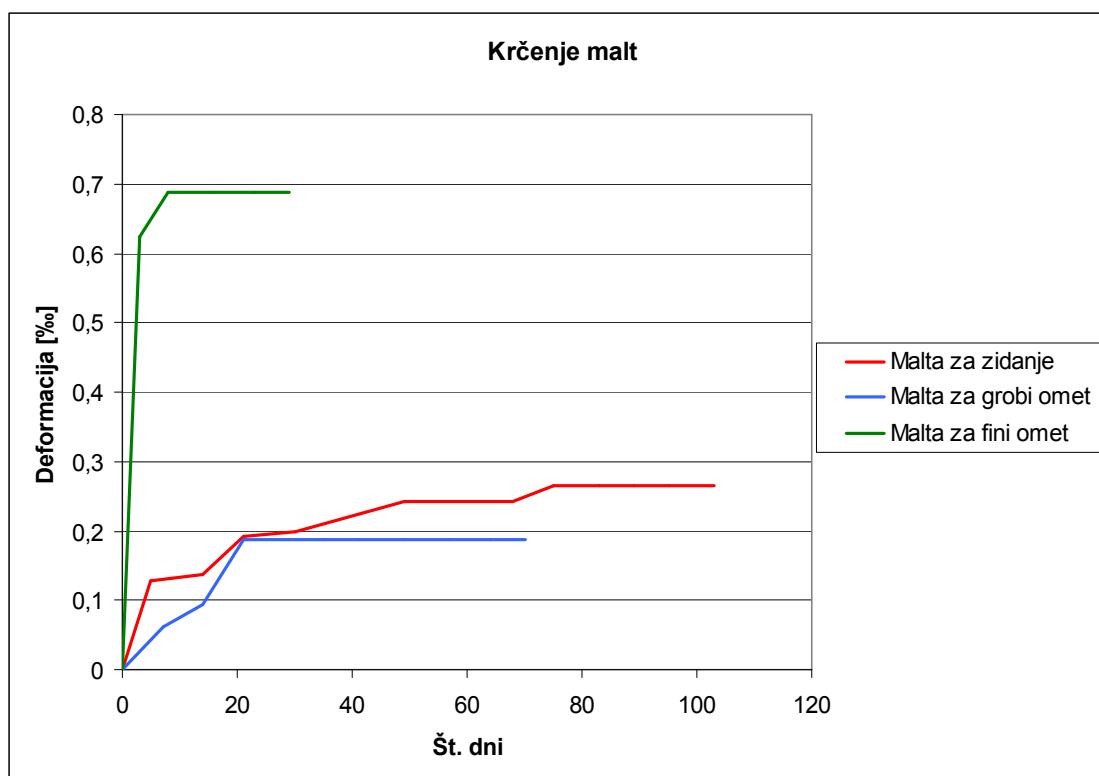
5.2.1 Krčenje malte

Vsak dan, ko smo zidali in ometavali, sem pri vsakem prvem in zadnjem mešalcu vgradil vzorce malte v standardne kalupe. Dnevno sem vgradil 6 kalupov za skupno 18 prizmic malte. Pred vgrajevanjem malte sem enemu kalupu vgradil reperje za merjenje krčenja. Po treh dneh sušenja v kalupih sem previdno vzel prizmice iz kalupov, kajti apnena malta se suši počasi. Pri fini malti je bilo krčenje veliko, prizmice so se upognile in razpokale. Krčenje sem meril s standardnim deformetrom Graff-Kaufman. Najprej sem v jarem sem vstavil kalibrirano kovinsko prizmico ter na merilni urici odčital vrednost ($500 \mu\text{m}$) in tako preveril umerjenost deformetra. Nato sem vstavljajal prizmice malt in meril krčenje.



Slika 36: Graff-Kaufmanov deformeter (Golob, 2007)

V grafikonu so predstavljene povprečne vrednosti deformacij malte za zidanje (8 prizmic), grobi omet (2 prizmici) in fini omet (2 prizmici). Abscisa predstavlja število dni, ordinata pa povprečno deformacijo. Apnene malte se razlikujejo po deležih vsebnosti veziva. Malta za zidanje je zmešana v volumskem razmerju 1 : 4 (apno : pesek), malta za grobi omet 1 : 3 (apno : pesek) ter fina malta 1 : 2 (apno : mivka). Zaradi večje vsebnosti apna in majhne zrnivosti je bilo največje in najhitrejše krčenje pri fini malti. Krčenje se je ustavilo po sedmih dneh in je znašalo 0,6875 %. Pri malti za grobi omet se je krčenje ustavilo pri 21 dneh in je znašalo 0,1875 %. Dolgotrajnejše krčenje je bilo pri malti za zidanje, ustavilo se je pri 83 dneh in je znašalo 0,266 %.



Grafikon 1: Krčenje malte za zidanje

5.2.2 Tlačna in upogibna trdnost malte za zidanje

Preiskave tlačne in upogibne trdnosti sem opravil v skladu z zahtevami standarda SIST EN 1015-11. Prizmice so bile tretji dan po vgradnji vzete iz kalupov, da so se sušile na zraku. Preiskave so bile opravljene po 28, po 90 in po 120 dneh starosti. Pred preiskavo sem prizmice izmeril in stehtal. Po preiskavi upogibne trdnosti smo polovičke uporabili za preiskavo tlačne trdnosti. Rezultati so podani v preglednici 7.

$$f_{mc} = \frac{P_m}{a^2}$$

$$f_{mf} = \frac{1,5 \cdot P_{m,sr} \cdot l}{a^3}$$

a - dimenzija prečnega prereza prizmice (mm)

P_m - sila ob porušitvi

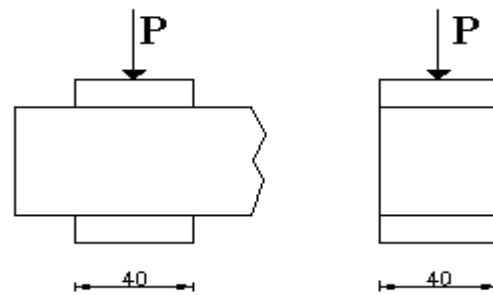
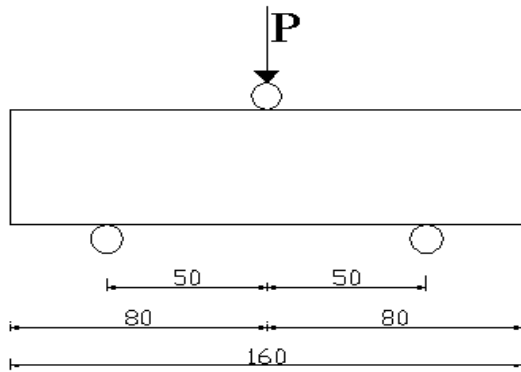
f_{mc} - tlačna trdnost malte

l - razmik med podporama (mm)

a - dimenzija prečnega prereza prizmice (mm)

$P_{m,sr}$ - povprečna sila ob porušitvi

f_{mf} - upogibna trdnost malte



Slika 37: Preizkušanje upogibne trdnosti



Slika 38: Preizkušanje tlačne trdnosti

Povprečna upogibna trdnost malte po 90 dneh je 0,57 MPa, tlačna trdnost malte pa je 2,20 MPa. Taka trdnost je bila pričakovana in zaželena, kajti tlačna trdnost malt na zgodovinskih objektih ne presega 2 MPa. Pri starosti 120 dni tlačna trdnost za malenkost pade. Vzrok temu je lahko tudi velik raztros rezultatov in majhno število vzorcev za preiskavo.

Preglednica 7: Tlačna in upogibna trdnost malte za zidanje

DATUM IZDELAVE	STAROST (dni)	GOSTOTA γ [kg/dm ³]	UPOGIBNI PREIZKUS			TLAČNI PREIZKUS		
			P_m [kN]	$P_{m,sr}$ [kN]	f_{mf} [Mpa]	P_m [kN]	$P_{m,sr}$ [kN]	f_{mc} [Mpa]
14.11.2011 Z	28	1,94	0,13	0,128	0,295	1,60	1,605	1,003
						1,52		
		1,95	0,135			1,60		
						1,73		
		1,96	0,118			1,62		
14.11.2011 K	28	1,96	0,182	0,165	0,370	1,82	1,975	1,234
						2,05		
		1,94	0,149			1,88		
						2,03		
		1,92	0,163			2,10		
24.11.2011 Z	90	2,04	0,28	0,267	0,639	3,35	3,447	2,154
						3,48		
		2,00	0,25			3,49		
						3,59		
		2,07	0,27			3,31		
24.11.2011 K	90	2,01	0,21	0,210	0,460	3,55	3,592	2,245
						3,71		
		1,98	0,22			3,55		
						3,67		
		2,01	0,2			3,74		
24.11.2011 Z	120	2,02	0,29	0,260	0,587	3,28	3,000	1,875
						2,88		
		2,10	0,23			2,83		
						3,08		
		2,02	0,26			3,05		
24.11.2011 K	120	2,03	0,26	0,250	0,569	3,57	3,310	2,069
						3,26		
		2,01	0,25			3,05		
						3,19		
		2,02	0,24			3,28		
		3,51						

5.2.3 Tlačna in upogibna trdnost malte za grobi omet

Preiskave tlačne in upogibne trdnosti smo opravili tudi pri grobih ometih. Teste smo opravili pri 28 dneh in pri 56 dneh starosti. Tudi tu je opaziti padec trdnosti. Vzrok temu je lahko slab vzorec, premajhno število preiskav in velik raztros rezultatov.

Preglednica 8: Tlačna trdnost malte za grobi omet

DATUM IZDELAVE	STAROST (dni)	GOSTOTA kg/dm ³	UPOGIBNI PREIZKUS			TLAČNI PREIZKUS		
		γ	P_m (kN)	$P_{m,sr}$ (kN)	f_{mf} (MPa)	P_m (kN)	$P_{m,sr}$ (kN)	f_{mc} (MPa)
11.1.2012 Z	28	1,90	0,14	0,147	0,368	2,00	2,033	1,271
						1,90		
		1,92	0,14			2,13		
						1,98		
		1,90	0,16			2,14		
					2,05			
11.1.2012 K	28	1,87	0,16	0,153	0,365	1,80	1,687	1,054
						1,74		
		1,85	0,15			1,63		
						1,57		
		1,86	0,15			1,73		
					1,65			
12.1.2012 Z	56	1,88	0,138	0,139	0,338	1,32	1,437	0,898
						1,48		
		1,87	0,124			1,38		
						1,51		
		1,89	0,155			1,31		
					1,62			
12.1.2012 Z	56	1,91	0,11	0,156	0,376	1,86	1,857	1,160
						1,83		
		1,91	0,185			1,76		
						1,96		
		1,91	0,172			1,83		
					1,90			

5.2.4 Tlačna in upogibna trdnost malte za fini omet

Fini omet zaradi svoje tankosti ne vpliva na trdnost in togost ometa. Njegova funkcija je samo zaščita grobega ometa in estetika in zato njegove mehanske lastnosti niso tako pomembne. Kljub temu sem napravil tlačne in upogibne preiskave fine malte. Starost malte je bila 28 dni, tlačna in upogibna trdnost sta bili podobnega velikostnega reda kot pri ostalih maltah.

Preglednica 9: Tlačna trdnost in upogibna trdnost za fini omet

DATUM IZDELAVE	STAROST [dni]	GOSTOTA	UPOGIBNI PREIZKUS			TLAČNI PREIZKUS		
		γ [kg/dm ³]	P_m [kN]	$P_{m,sr}$ [kN]	f_{mf} [kN]	P_m [kN]	$P_{m,sr}$ [kN]	f_{mc} [Mpa]
22.2.2012	28	1,70	0,31	0,243	0,681	1,93	1,732	1,082
						1,90		
		1,68	0,26			1,57		
						1,75		
		1,77	0,16			1,68		
						1,56		

5.3 Preiskave kamna

Kamen, s katerim so bili pozidani zidovi, so zidarji pripeljali iz okolice Bihaća (republika BIH). Vrsta kamna je apnenec in njegova struktura je zelo slojevita. V posameznih polklesancih je opaziti žile kalcitov in mineral mangan. Taki sloji lahko vplivajo na mehanske lastnosti kamna in zidov, saj kamen po teh oslabitvah poka. Pri vgradnji takega kamna je treba biti previden in ga vgraditi tako, da so sloji vodoravni. Poleg tega je treba vgraditi »zdrav« kamn (nepreperel in nerazpokan). Kamen, ki smo ga vgradili, ima povprečno gostoto 2,65 kg/dm³. Preiskave kamna niso povsem narejene po veljavnih standardih in so opisane v nadaljevanju.

5.3.1 Tlačna trdnost kamna

Tlačno trdnost kamna sem preizkušal na kockah 7 /7 /7 cm. Vsako kocko sem izmeril in stehtal. Nato sva pa jih s tehničnim sodelavcem preizkusila na tlak v preši s kapaciteto 5000 kN. V preglednici 10 sem podal rezultate tlačnih preiskav. Povprečna trdnost kamna je 171,5 MPa s standardnim odklonom 41,3 MPa.

Preglednica 10: Tlačna trdnost kamna

$f_{bc} = \frac{P_m}{a^2}$ f_{bc} – tlačna trdnost kamna P_m – porušna sila a – stranica preiskuševalne kocke	VZOREC	γ [kg/dm ³]	f_{bc} [MPa]
	1	2,61	107,9
	2	2,71	168,0
	3	2,60	219,9
	4	2,64	207,2
	5	2,69	182,0
	6	2,67	143,8



Slika 39: Tlačna preiskava kamna

5.3.2 Upogibna trdnost kamna

Upogibno trdnost sem preizkušal na treh prizmicah velikosti 4/4/16 cm. Rezultati meritev so podani v preglednici 11. Povprečna upogibna trdnost kamna znaša 24,2 MPa s standardnim odklonom 4,2 MPa. S preiskavo je bilo ugotovljeno, da upogibna trdnost znaša 14 % tlačne trdnosti kamna

Preglednica 11: Upogibna trdnost kamna

$f_{bf} = \frac{1,5 \cdot P_m \cdot l}{a^3}$	VZOREC	γ [kg/dm ³]	f_{bf} [MPa]
<i>f_{bf}</i> – upogibna trdnost kamna	1	2,71	19,92
<i>P_m</i> – porušna sila	2	2,65	28,38
<i>a</i> – stranica prereza preizkuševalne prizmice	3	2,65	24,29
<i>l</i> – razmik med podporama			



Slika 40: Preiskava upogibne trdnosti kamna

5.3.3 Vpojnost kamna

Pri tej preiskavi je nujno poudariti, da se preiskava ni izvajala po standardu za preiskavo vpojnosti kamna pri atmosferskem tlaku SIST EN 12370:2000. Kocke s stranico 7 cm sem predhodno stehtal in nato sem jih nato dal sušiti v pečico, kjer so se sušile do konstantne mase. Nato sem jih potopil v vodo za nekaj dni, da so se napile do konstantne mase. Vpojnost je razmerje med maso vpite vode in maso suhega kamna. Povprečna vpojnost je 0,1763 % s standardnim odklonom 0,0073 %. Rezultati preiskave so podani v preglednici 12.

Preglednica 12: Vpojnost kamna

$U = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100(\%)$	Vzorec	Vpojnost U [%]
<i>U</i> – vpojnost	1	0,1718
<i>m</i> ₁ – masa osušenega kamna	2	0,1847
<i>m</i> ₂ – masa z vodo zasičenega kamna	3	0,1725

5.4 Preiskave jedra zidu

5.4.1 Tlačna trdnost jedra

Vzorci sem izdelal med zidanjem zidkov, tako da sem v standardni kalup vgradil mešanico malte in ostankov klesanja. Vzorci so imeli obliko valja s premerom 150 mm in dolžine 300 mm. Tlačne preiskave sem opravil na treh vzorcih pri starosti 342 dni. Predhodno sem jih izmeril in stehtal. Povprečna gostota jedra je bila 2,05 kg/dm³. Vzorcem je bilo potrebno narediti vzporedne in ravne naležne ploskve za enakomeren raznos obtežbe. To sem naredil tako, da sem nanesele mavec na obe naležni stranici in izravnal. Nato sem teste opravil na preši kapacitete 5000 kN. Povprečna tlačna trdnost jedra je bila 0,90 MPa s standardnim odklonom 0,213 MPa. Tlačna trdnost jedra je približno dvakrat manjša od tlačne trdnosti malte za zidanje (2,20 MPa). Vzrok k temu je lahko votlikavost in nehomogenost jedra.

Preglednica 13: Tlačna trdnost jedra

$f_{ic} = \frac{P}{A}$	Vzorec	Gostota [kg/dm ³]	Tlačna trdnost [MPa]
<i>f</i> _{ic} – tlačna trdnost jedra	1	2,19	1,10
<i>P</i> – porušna sila	2	2,14	0,92
<i>A</i> – ploskev	3	1,96	0,68



Slika 41: Tlačna preiskava jedra zidu

5.4.2 Cepilna natezna trdnost

Cepilno natezno trdnost jedra sem opravil na treh vzorcih. Vzorci so bili valjaste oblike, s premerom 150 mm in dolžino 300 mm. Njihova struktura je bila zelo votlikava. Preiskavo sem opravil pri starosti 342 dni. Povprečna cepilna natezna trdnost je bila 0,16 MPa, s standardnim odklonom 0,084 MPa.

Preglednica 14: Cepilna natezna trdnost jedra

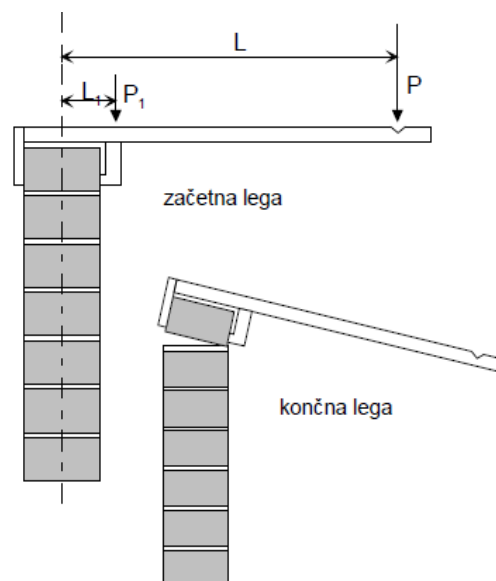
$f_{it} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot l \cdot d}$ <i>f_{it} – cepilna natezna trdnost jedra</i> <i>P – porušna sila</i> <i>l – dolžina valja</i> <i>d – premer valja</i>	Vzorec	Gostota [kg/dm ³]	Cepilna natezna trdnost [MPa]
	1	1,99	0,23
	2	2,05	0,17
	3	1,95	0,07



Slika 42: Preiskava cepilne natezne trdnosti jedra zidu

5.5 Sprijemnost apnene malte s kamnom

Sprijemnost apnene malte s kamnom smo preizkušali po metodi »Bond wrench«. Z »Bond wrench« testom določamo sprejemno upogibno-natezne trdnosti (f_{tjb}) stičnega območja. Sprijemnost je odvisna od osnovnih parametrov stika in od lege spojnice v zidani prizmi. Za ta test nisem posebej pripravil zidanih prizem, ampak sem po tlačni preiskavi zidkov vzel dvojico kalupov iz porušenega zidka. Trdnost stika apnene malte je zelo majhna, povprečno 0,03 MPa. (standardni odklon: 0,0077, variacija: 0,0001). Vzrok bi lahko bil v temu, da so vzorci bili že izpostavljeni visoki obtežbi. Rezultati preiskav so podani v preglednici 15.



Slika 43: Shema preizkusa z metodo »Bond wrench«, Bosiljkov (1996)



Slika 44: Preizkus »Bond wrench« v laboratoriju

Preglednica 15: Trdnost stika

$f_{bw} = \frac{PL}{W} + \frac{P}{A}$	Vzorec	f_{bw} [MPa]
F_{bw} – trdnost stika P – porušna sila L – ročica sile W – odpornostni moment ploskve stika A – površina ploskve stika	BW1	0,0212
	BW2	0,0318
	BW3	0,0361

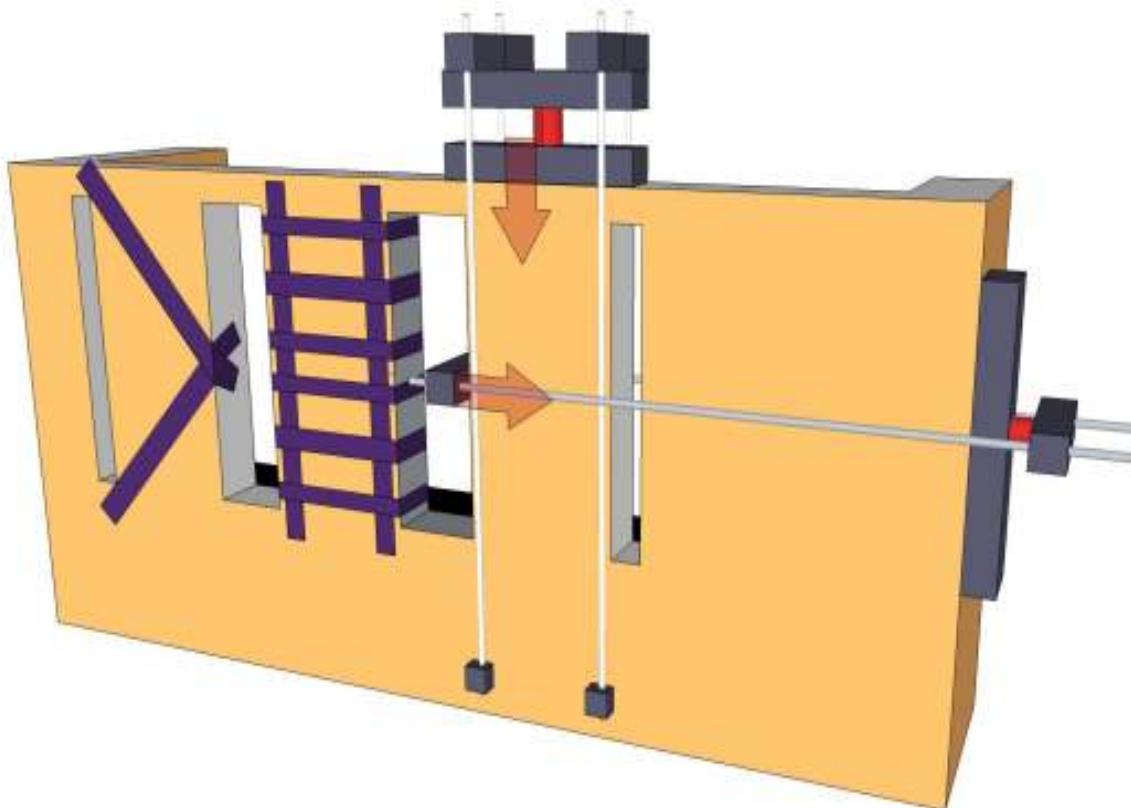
6.0 PREISKAVE KAMNITIH ZIDOV NA TERENU ALI IN SITU PREISKAVE

V nadaljnjih podpoglavjih bom na kratko predstavil nekaj najbolj značilnih preiskav na terenu, katere bolj podrobno opisuje Cotič (2010). V praksi je bolj znan angleški izraz »in-situ« preiskava, kar v prevodu pomeni preiskava v prvotni obliki. Rezultati in-situ preiskav zgodovinskih materialov so bolj merodajni, ker tovrstne preiskave omogočajo ocene dejanskih trdnosti zidovine, ki je bil podvržena vplivov, kot so propadanje materiala, vlaga, zmrzovanje itd.

6.1 Porušne metode preskušanja (DT)

6.1.1 In-situ strižni preizkus

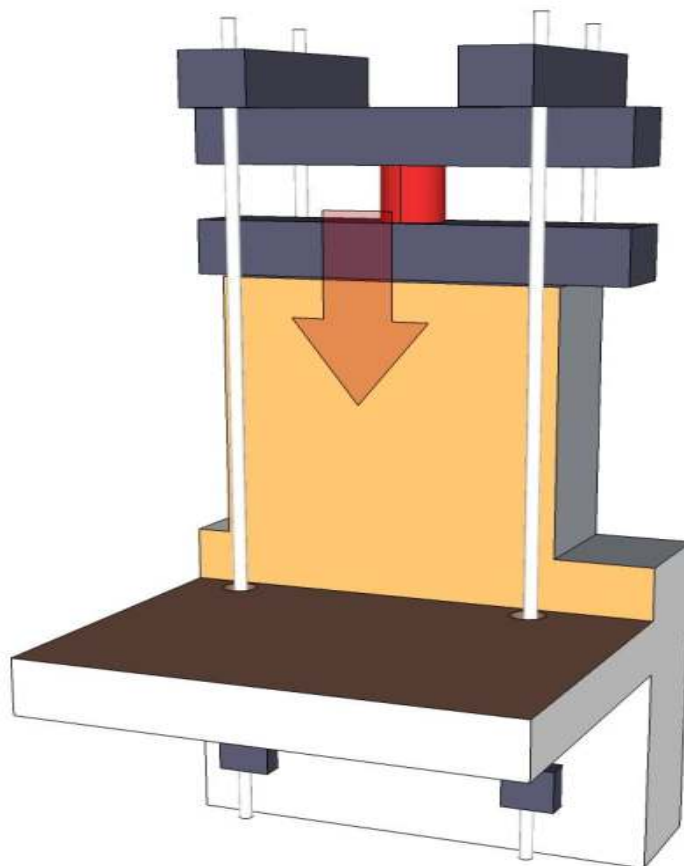
S strižnim preizkusom določamo natezno trdnost zidu, njegovo togost, strižni modul in duktilnost. Na objektu določimo ustrezno lokacijo, kjer bomo opravili strižni preizkus, saj mora velik del stavbe prenesti reakcijo hidravličnega bata, s katerim vodoravno obremenjujemo zidni izsek. Na izbrani lokaciji naredimo dva izseka, v enega vstavimo hidravlični bat, drugi pa nam služi kot prostor v katerega se strižno poruši zidni izsek. Vodoravno obtežbo vnašamo na sredini višine zidu. Obtežbo lahko vnašamo kot monotono naraščajočo ali s cikličnim obremenjevanjem. Nato zid opremimo z merilniki pomikov in dilatometri v obeh diagonalnih smereh ter z drugo potrebno opremo za zajem podatkov.



Slika 45: In situ strižna preiskava zidu (Gostič in sod. 2012)

6.1.2 In-situ tlačni preizkus

S tlačnim preizkusom določamo tlačno trdnost in modul elastičnosti zidu. Postopki priprave preizkušanca, obremenjevanje in zajem podatkov so podobni kot pri strižnem preizkusu, le da tu preizkušanec obremenjujemo z navpično obtežbo.



Slika 46: In situ tlačna preiskava zidu (Gostič in sod. 2012)

7.0 EKSPERIMENTALNI DEL

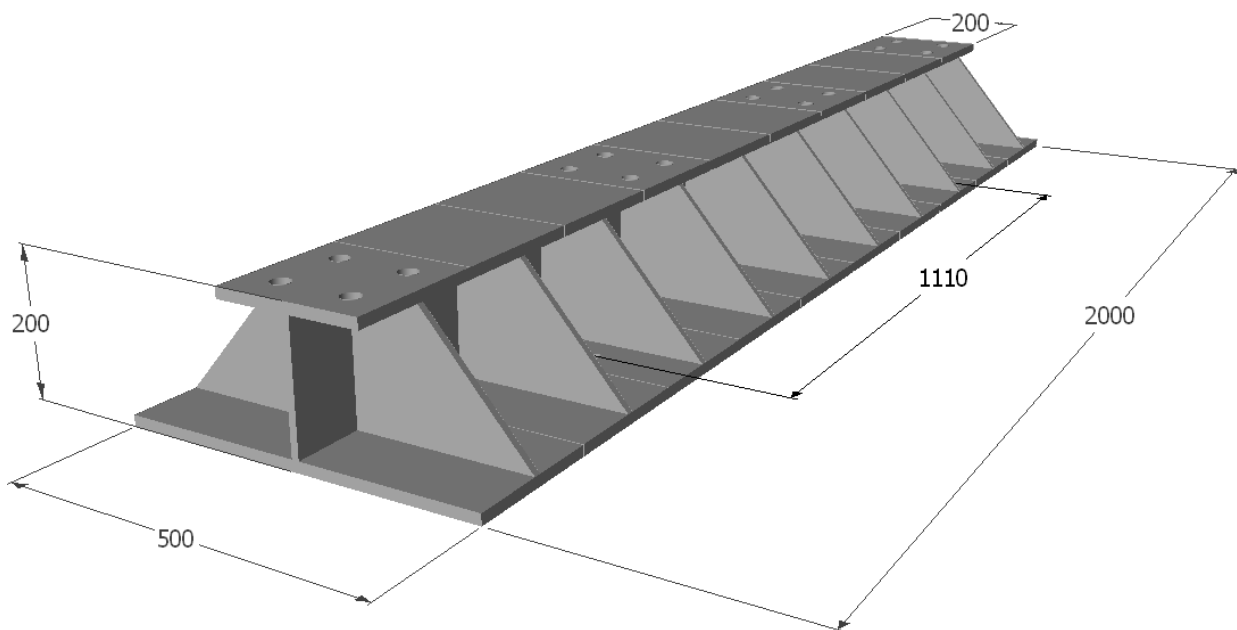
7.1 Tlačne preiskave zidov

Tlačno preiskavo smo začeli v stiskalnici kapacitete 5000 kN z naležnimi ploskvami 60 x 60 cm. Raznos obtežbe po celotni dolžini zidu (100 cm), naj bi potekal preko nosilca in venca. Če bi se obtežba prenašala pod kotom 45°, bi višina venca 20 cm zadoščala za enakomeren raznos obtežbe. Pri prvi preiskavi, ko smo bili že blizu porušne obtežbe, pa je prišlo do koncentrirane obtežbe v območju naležne ploskve stiskalnice, zato smo preizkus ustavili.



Slika 47: Nameščanje zidka v stiskalnico kapacitete 5000 kN

Enakomeren raznos obtežbe bi zagotovili z uporabo prečke, ki sem jo dimenzioniral za vpenjanje preizkušancev pri strižnih testih, a je bila skupna višina vzorca in prečke previsoka za stiskalnico (kapacitete 5000 kN). Zato smo uporabili drugo stiskalnico (kapacitete 3000 kN), katere bat ima premer cca 20 cm. Poleg jeklene prečke smo dodali še dodatne jeklene elemente, da bi zagotovili enakomeren raznos obtežbe.



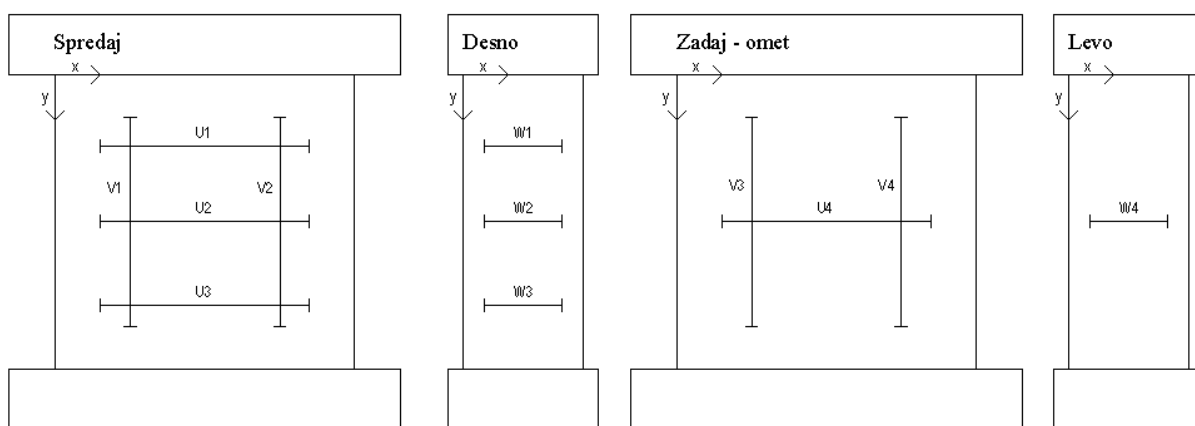
Slika 48: Jeklena prečka

Pred tlačno preiskavo smo vsak zid opremili z induktivnimi merilci pomikov (LVDT).

Na merilnih mestih smo merili globalne deformacije zidkov.

Namen induktivnih merilcev pomikov (LVDT):

- V1, V2 – za merjenje globalnih vertikalnih deformacij na zidu.
- V3, V4 – za merjenje globalnih vertikalnih deformacij na ometu.
- W1, W2, W3, W4 – za merjenje globalnih prečnih deformacij zidu.
- U1, U2, U3 – za merjenje vzdolžnih deformacij zidu.
- U4 - za merjenje vzdolžnih deformacij zidu.



Slika 49: Shema merilnih mest



Slika 50: Zid pred obremenjevanjem in merilna mesta deformacij

7.2 Tlačna preiskava nizkega zidu s smerniško zidarsko zvezo

Kot sem že omenil v poglavju 7.1, smo imeli pri prvem poskusu, na zidku dimenzij 100/40/100 cm, težave s koncentrirano obtežbo v območju naležnih ploskev stiskalnice. Zato da bom najprej opisal nastanek razpok pri prvem delu testa, nato pa še pri nadaljevanju testa na drugi stiskalnici. Po vpetju zidka v stiskalnico kapacitete 5000 kN in po namestitvi induktivnih merilcev pomikov, smo začeli z monotono naraščajočim obremenjevanjem.

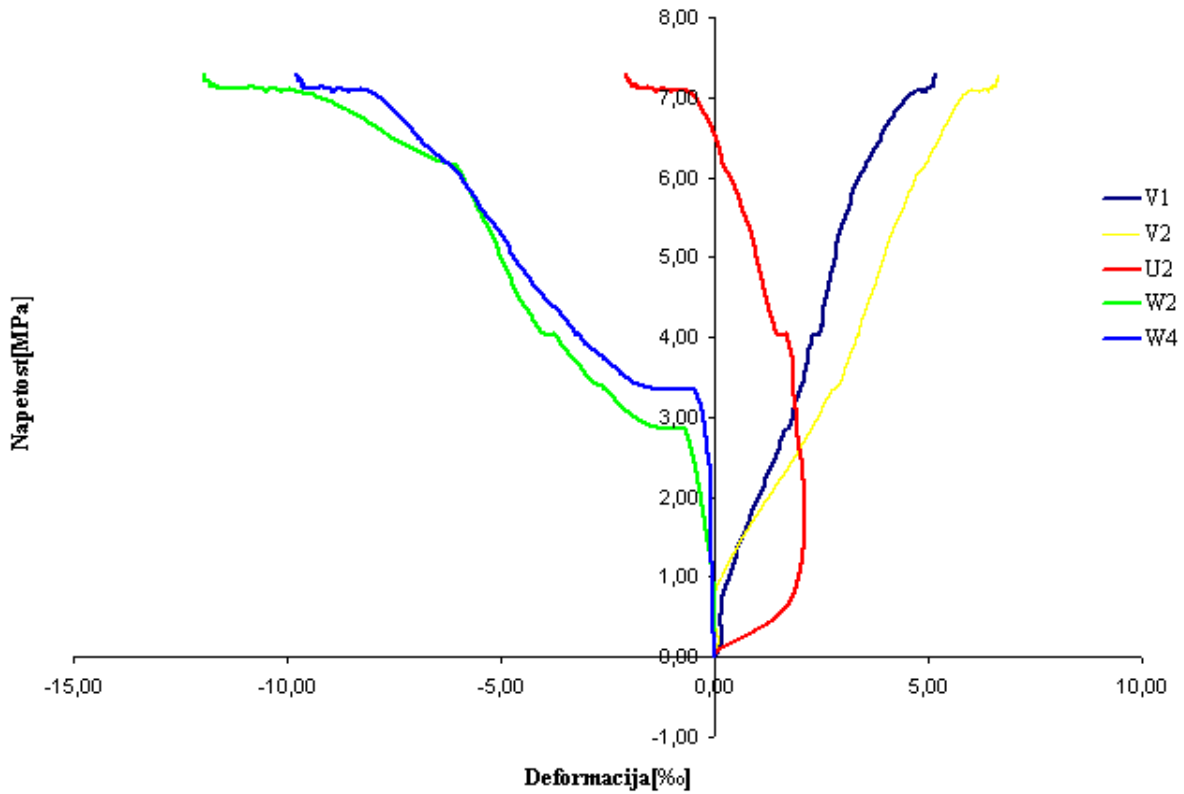
Prva razpoka se je pojavila na navpični spojnici pri 0,45 MPa (6,2 % f_{max}). Pri 1,5 MPa (21 % f_{max}) pride do odstopanja ometa od zidu, nastane razpoka velikosti 0,3 mm. Pri napetosti 2,06 MPa smo morali odstraniti LVDT-je V3, V4, U4, da se ne bi poškodovali pri odpadu ometa. Pri napetosti 2,23 MPa je odpadel omet. Nato se začne drobiti malta v spojnica do napetosti 3,1 MPa (43 % f_{max}), pri kateri počí prvi kamen. Razpoke se nato podaljšujejo čez kamne in še naprej do armiranobetonskih nosilcev. Razpoke pri nosilcih so potekale po robu naležnih ploskev v širini 60 cm, zato smo sklepali, da so razpoke nastale zaradi koncentriranih napetosti, in prekinili preizkus pri 4 MPa (56 % f_{max}). Odločili smo se da bomo test nadaljevali na drugi stiskalnici s predvideno kapaciteto 3000 kN (dejanska je bila ugotovljena med testom 2875 kN). Tako smo morali montirati stiskalnico na drug okvir, in prestaviti zid.

Za enakomeren raznos obtežbe smo na zid položili jekleno prečko in še nekaj jeklenih elementov. Zid smo ponovno opremili z LVDT-ji (razen V3, V4 in U4). Pri ponovnem obremenjevanju se do napetosti 4 MPa se ni zgodilo nič, nato pa so se pojavile razpoke na desni spodnji strani zidu. Pri 5 MPa ($70\% f_{max}$) so pokali kamni v desnem zgornjem robu zidu. Z naraščanjem napetosti se je veliko spojnic krušilo, do napetosti 7 MPa ($97\% f_{max}$) pa je razpokala večina kamnov. Pri 7,19 MPa je bila dosežena največja vrednost. Iz grafikona vidimo, da se je leva stran zidu (V1) posedla prej kot desna (V2). Pri prečnih deformacijah pa se je leva stran (W2) prej začela odpirati kot desna (W4).

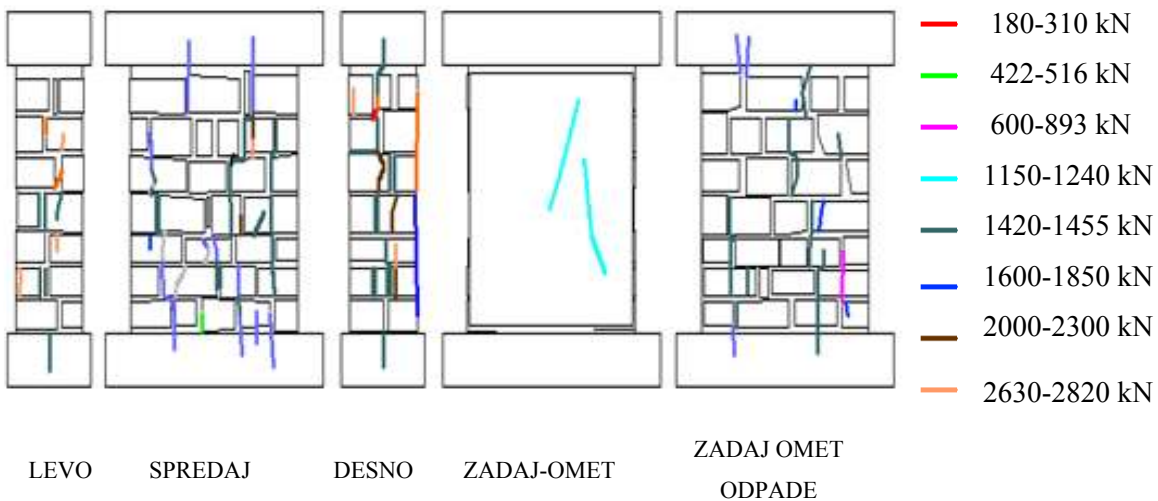


Slika 51: Odpadli omet

TLAČNI PREIZKUS ZID-SMERNIŠKA ZIDARSKA ZVEZA



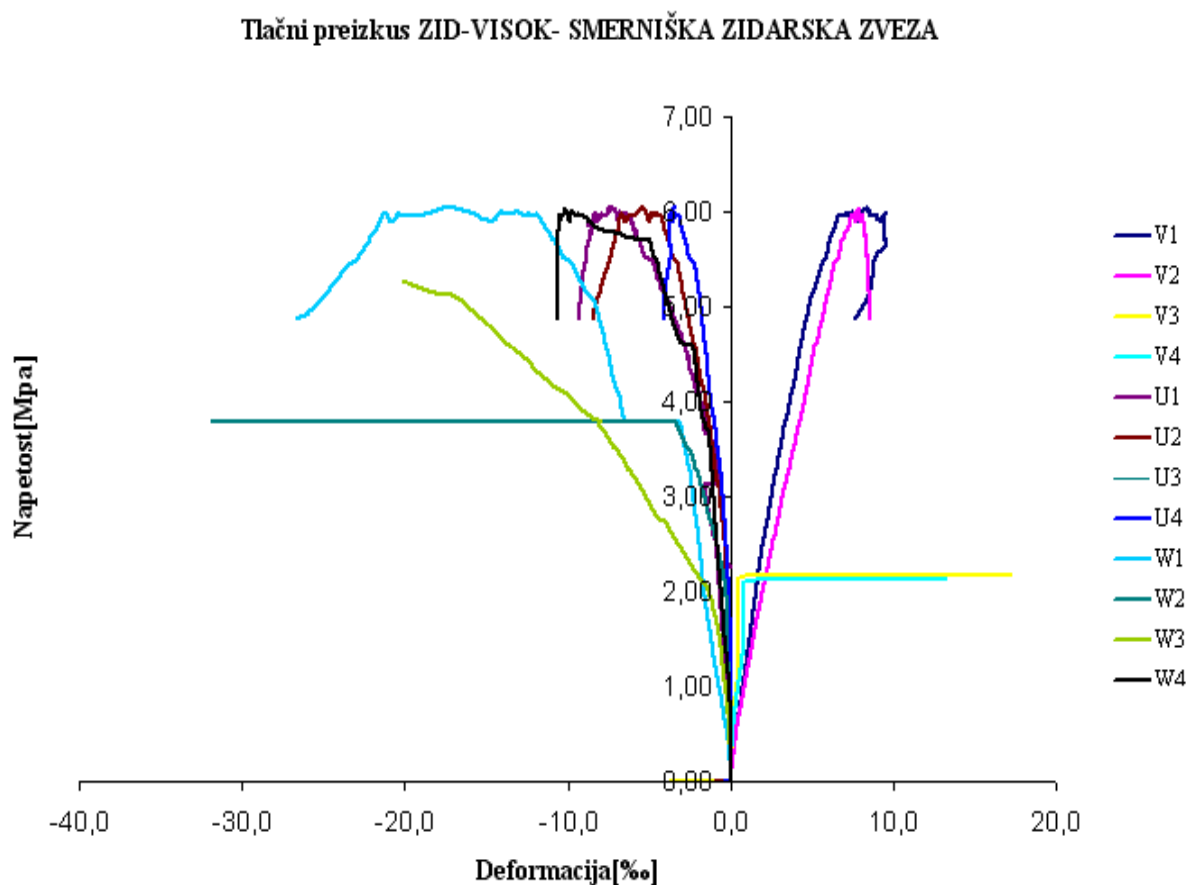
Grafikon 2: Diagram napetosti za nizek zid s smerniško zidarsko zvezo



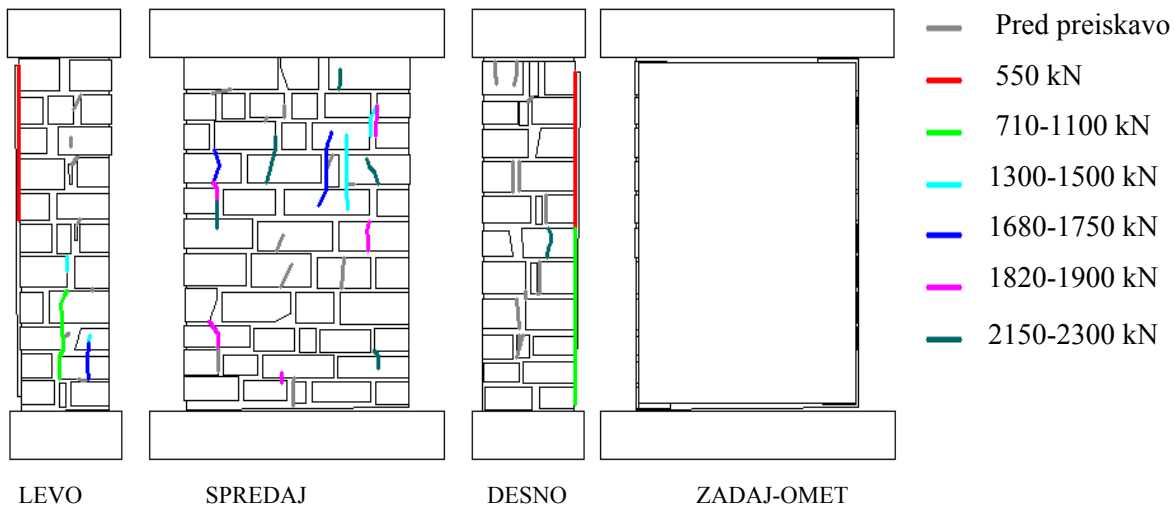
Slika 52: Shema razpok za nizek zid s smerniško zidarsko zvezo

7.3 Tlačna preiskava visokega zidu s smerniško zidarsko zvezo

Zaradi težav s stiskalnicami in nepopolnih rezultatov pri nizkih zidovih (višina 100 cm), smo se odločili, da bomo tlačne teste ponovili na visokih zidovih (višina 150 cm). Pri napetosti 1,38 MPa (23 % f_{max}) je začel odstopati omet, razpoka med ometom in zidom se je širila do napetosti 1,78 MPa (29 % f_{max}). Pri napetosti 2,2 MPa smo odstranili induktivce (V3, V4 in U4) na ometu. Pri napetosti 2,75 MPa (46 % f_{max}) se pojavi prva večja razpoka na levi strani spodaj. Pri napetosti 3,75 MPa odstranimo omet, pri tem se omet zruši na induktivce W4. V območju napetosti 4,25 MPa (70 % f_{max}) se pojavijo razpoke na sprednji strani. Pokati začnejo kami, razpoke se združujejo čez več skladov. Razpoka se pojavi tudi na levi strani zidu. Do napetosti 5,7 MPa (94 %) se nadaljuje drobljenje malte v spojnicah in pokaanje kamnov. Pri 6,05 MPa doseže napetost najvišjo vrednost.



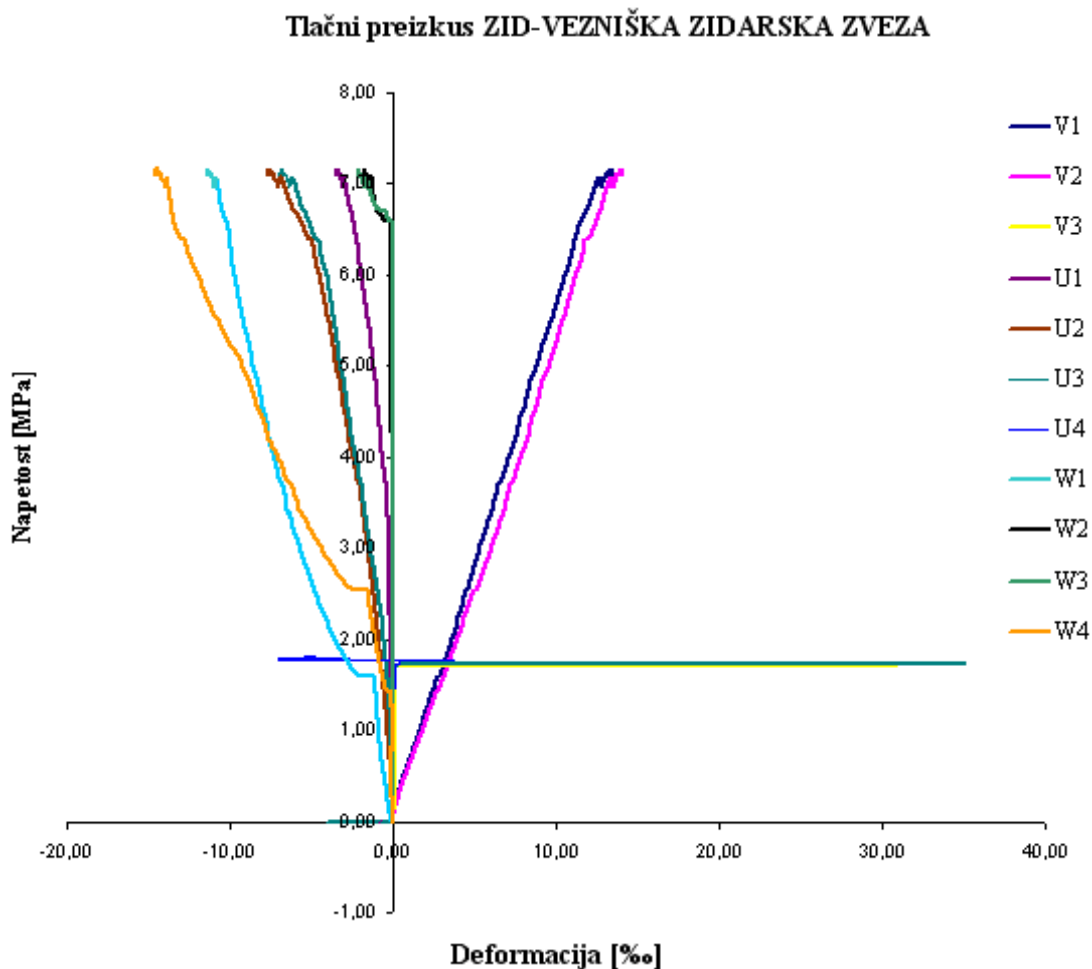
Grafikon 3: Diagram napetosti za visok zid s smerniško zidarsko zvezo



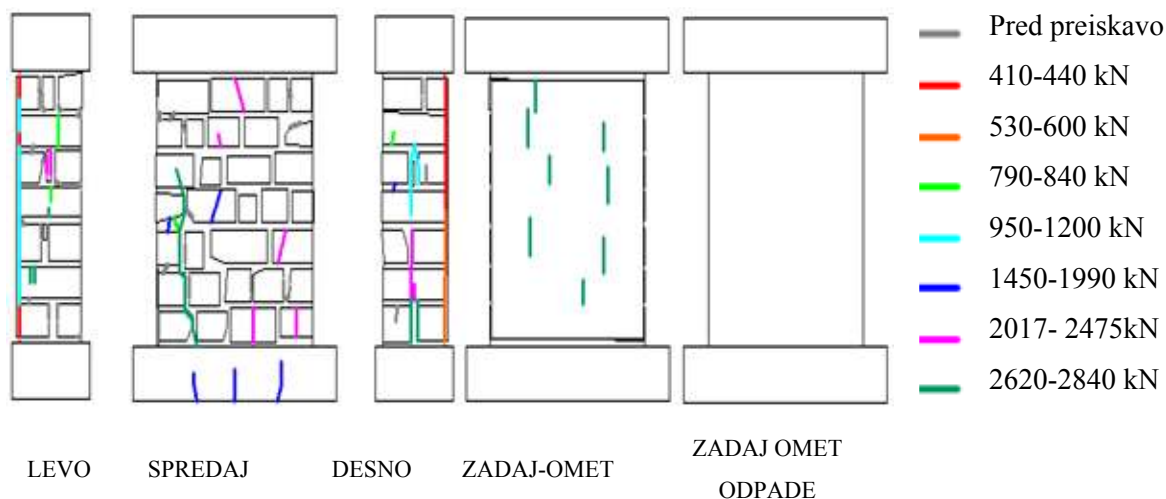
Slika 53: Shema razpok za visok zid s smerniško zidarsko zvezo

7.4 Tlačna preiskava nizkega zidu z vezniško zidarsko zvezo

Podobno kot pri nizkem zidu s smerniško zidarsko zvezo, smo imeli tudi pri nizkem zidu z vezniško zidarsko zvezo težave s stiskalnico (prešo). Pri napetosti 1,32 MPa (18 % f_{max}) začne odstopati omet na desni strani zidu, na levi pa odstopi šele pri 3 MPa (42 % f_{max}). Vmes smo odstranili induktivce (V3, V4 in U4) pri napetosti 1,7 MPa (24 % f_{max}), kar se jasno vidi v grafikonu 5. Pri napetosti 2 MPa (28 % f_{max}) počni prvi kamen na desni strani. Do napetosti 2,75 Mpa (0,38 % f_{max}) se drobi malta v spojnicah. Nato počni še en veznik, na desni strani se po sredini širine zidu začne formirati razpoka. Zid se začne odpirati, na grafikonu vidimo povečano deformacijo (W4) v območju napetosti 2,75 Mpa. Pri napetosti 4,43 MPa (62 % f_{max}) se oblikuje še več razpok ob vertikalnih spojnicah in kamnih, pokati začne celo armiranobetonski nosilec. Z naraščanjem napetosti do 6,19 MPa (86 % f_{max}) začne na sprednji strani pokati še več daljših smernikov. Pri napetosti 6,58 - 6,85 MPa (92 % - 96,6 % f_{max}) se oblikuje velika razpoka na sprednji strani (levo spodaj ob nosilcu). Najvišjo napetost (7,17 Mpa) smo dosegli pri kapaciteti stiskalnice (2875 kN). Stiskalnica je bila za malenkost prešibka, da bi se zid porušil pod tlačno obtežbo. Kot se vidi iz grafikona 4, je plato grafa zelo majhen, ali povedano drugače, pri največji napetosti ni izrazito povečanih deformacij, z razliko od grafikona 10, kjer so pri največji napetosti deformacije velike.



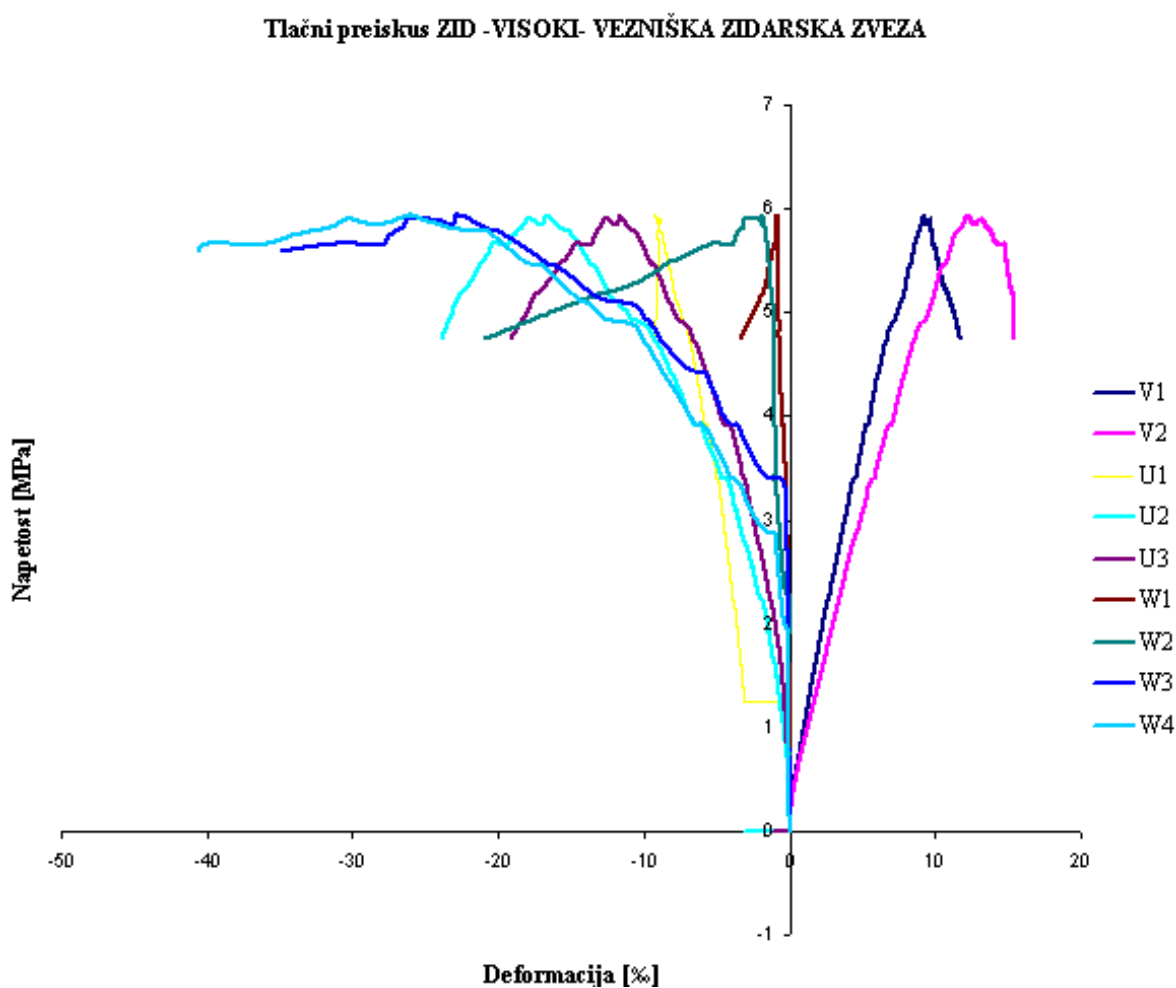
Grafikon 4: Diagram napetosti za nizek zid z vezniško zidarsko zvezo



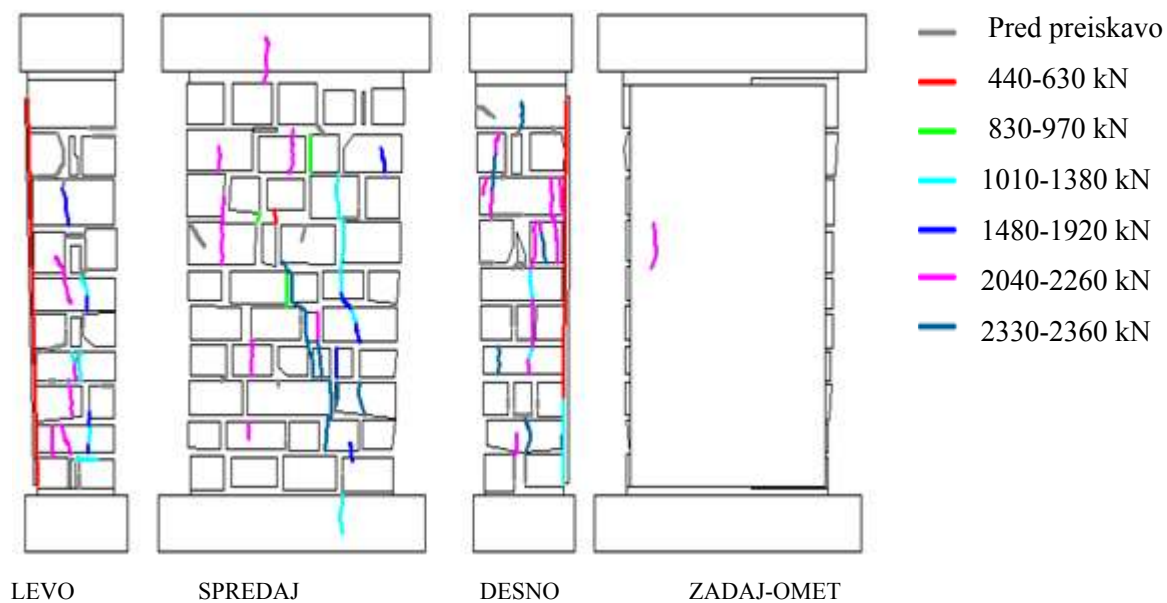
Slika 54: Shema razpok za nizek zid z vezniško zidarsko zvezo

7.5 Tlačna preiskava visokega zidu z vezniško zidarsko zvezo

Zadnji tlačni test na visokem zidu je potekal brez zapletov. Po postavitvi in opremljanju z induktivnimi merilci, smo začeli obremenjevati z monotono naraščajočo obtežbo. V območju napetosti 1,1 MPa do 1,5 MPa (19-25 % f_{max}) začne odstopati omet, najprej na desni strani na to pa še na levi strani. Pri 2,53 MPa (43 % f_{max}) omet dokončno odpade od zidu. Medtem so nastale razpoke v vertikalnih spojnicah. Prvi kamen počí na sprednji strani zidu, pri napetosti 2,75 MPa (46 % f_{max}), kmalu zatem pa še na desni strani spodaj. Z naraščanjem napetosti se formirajo razpoke na desni strani zidu. V območju napetosti od 3,75 do 5 MPa (63 – 84 % f_{max}) se na sredini leve strani zidu širijo razpoke, zid pa se »napihuje«. Večje število veznikov je razpokanih. Z naraščanjem napetosti začnejo pokati kamni še na desni strani. Oblikuje se velika razpoka po sredini zidu, pri tem odleti del kamenja. Nekateri vidni vezniki imajo tudi več kot dve razpoki, na desni strani zidu pa celo po štiri razpoke. Zid se poruši pri napetosti 5,94 MPa.



Grafikon 5: Diagram napetosti za visok zid z vezniško zidarsko zvezo



Slika 55: Shema razpok za visok zid z vezniško zidarsko zvezo



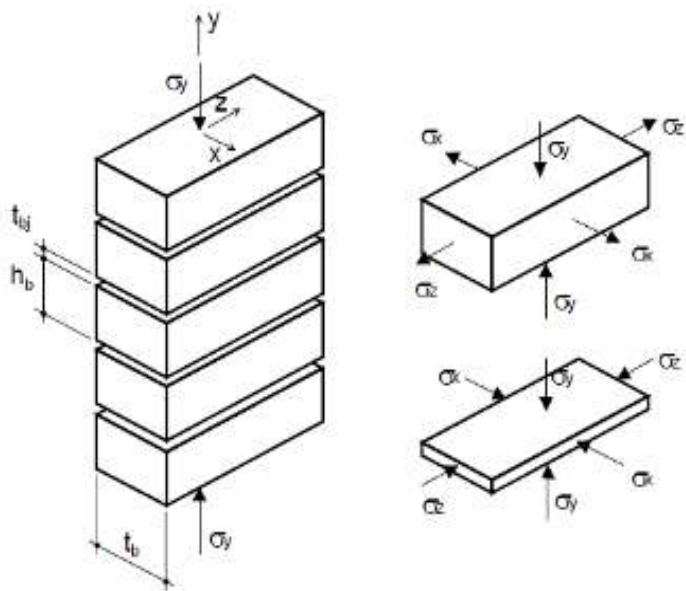
Slika 56: Razpokanost zidu

8.0 TEORIJA LOMA KAMNITE ZIDOVINE

8.1 Teorija loma enoslojnega zidu

V tem poglavju so navedene teorije loma enoslojnega zidu ter teorije loma troslojnih zidov, kar sem povzel po Bosiljkovu (1996). Da bi razumeli porušitve zidovine v tlaku, moramo poznati materialne (konstitutivne) zakone osnovnih materialov in ustrezna merila porušitve tlačno obremenjene zidovine. Razvoj teorij loma se je začel v 40-ih prejšnjega stoletja. Na začetku so preučevali lom na prizmah, ker so lahko izločili stranske parametre, ki vplivajo na medsebojne odnose zidaka in malte pri tlačni obremenitvi.

Avtorji so poenostavili mehanizem loma z zidakom polnega formata in malte. Malta je bolj deformabilna kakor zidak, zato je Poissonov količnik malte ν_m večji od Poissonovega količnika zidaka ν_b . Zaradi kemijske in mehanske povezave med zidakom in malto, nastane trisočno tlačno napetostno stanje v malti. Navpično na zidak deluje tlačno enoosno napetostno stanje, prečno na zidak pa deluje dvoosno natezno napetostno stanje. Pri omenjenem razmerju Poissonovih števil se zgodi tlačna porušitev zidane prizme, zaradi prekoračitve cepilne natezne napetosti zidaka. Pri drugačnem razmerju ($\nu_m < \nu_b$) bi bila porušitev zidaka kombinacija strižne in natezne porušitve. Zaradi različnega deformiranja malte in zidaka, je tlačna trdnost zidu veliko večja od trdnosti malte, vendar manjša od trdnosti zidaka.



Slika 57: Stanje napetosti v zidani prizmi pri tlačni obremenitvi (Hilsdorfova predpostavka)

8.1.1 Rots-ova analiza

Rots (1991) izhaja iz ravninskega deformacijskega stanja tlačno obremenjene prizme in (za razliko od Shrive-a in Jessop-a) upošteva tudi kvadrate Poissonovih števil. Podaja razmerje med tlačno obremenitvijo preskušane prizme σ_y in horizontalno natezno napetostjo v opeki σ_{xb} .

$$\frac{\sigma_{xb}}{\sigma_y} = -\frac{\nu_m(1+\nu_m)E_b - \nu_b(1+\nu_b)E_m}{(1-\nu_m^2)E_b h_b + (1-\nu_b^2)E_m t_{bj}} \quad (1)$$

Osnovne predpostavke so:

- linearno-elastično obnašanje in homogene deformacije konstitutivnih materialov,
- koncentracije napetosti na robovih zidakov in malte v stičnem območju se zanemarijo,
- morebitno luščenje ter vpliv oblike in tehnologije izdelave zidakov se ne upošteva,
- ne upošteva se sprememb lastnosti malte, ki so posledica kompleksnega sušenja malte v spojnici ter morebitnega neenakomernega stika med malto in opeko v celotnem stičnem območju.

8.1.2 Berndt-ova teorija loma

Berndt (1994) je s svojimi raziskavami razvil porušni model za enakomerne in neenakomerne zveze iz obdelanih zidakov. Merilo za porušitev je natezna porušitev kamna. Pri tem se opazuje linearno-elastično obnašanje kamna in horizontalna natezna napetost kamna, ki nastane zaradi različnih prečnih deformacij v kamnu in malti. Zaradi zdrobitve in izločitve malte na robovih spojnici nastanejo še dodatne cepilne natezne napetosti v kamnu. Oba deleža napetosti se seštejeta in opišeta v obliki linearne napetostne linije za kamen v območju tlak-nateg. V tem poglavju sem poenostavil enačbo (2) na podlagi doktorske disertacije Huster (2000), ter dodal tabelo, v kateri so členi enačbe, ki so odvisni od tlačne trdnosti malte.

$$\sigma_{xb} = \sigma_y \left[\frac{t}{h_b'} \frac{\nu_m}{1-\nu_m} + 0,3 \frac{t_b'}{h_b''} \right] \quad (2)$$

t – debelina naležne spojnice (fuge)

t_b - debelina zidaka.

t_b' - obojestranska globina odkrušitve.

$h_b' = \min \{ \text{višina kamna}; 10 \text{ cm} \}$

$h_b'' = \min \{ \text{višina kamna}; 20 \text{ cm} \}$

ν_m – deformacijski modul malte

φ – kot notranjega trenja

f_{mc} [MPa]	ν_m	φ
< 2,50	0,5	20°
2,50-10	0,4	30°
10-20	0,3	40°

$$t_b' = t + \frac{t}{\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)} \quad (3)$$

Porušna ovojnica za zidak v tlačno-nateznem stanju.

$$\sigma_{xb} = f_{tb} + 0,7\sigma_y \frac{f_{tb}}{f_{cb}}, \text{ kjer so} \quad (4)$$

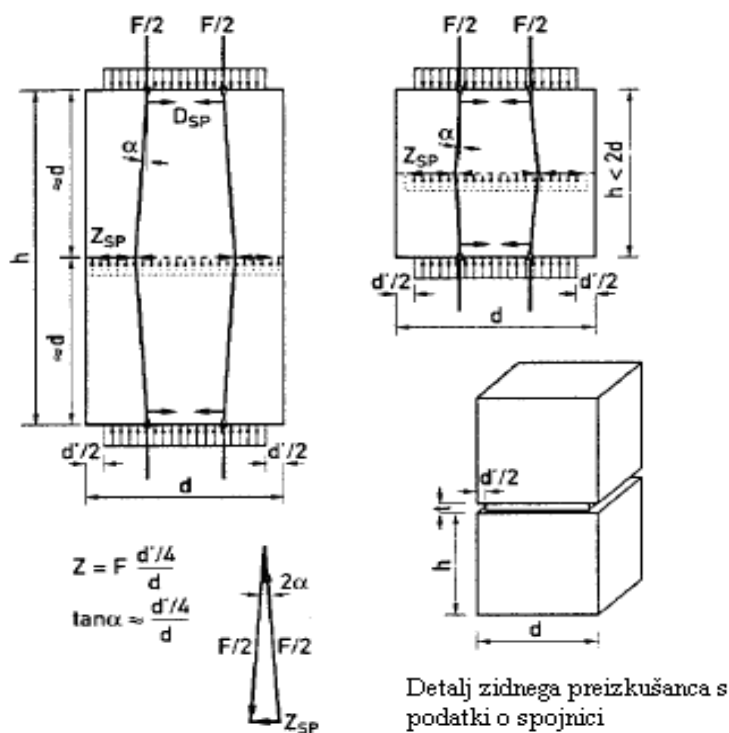
f_{tb} – natezna trdnost zidaka

f_{cb} – tlačna trdnost zidaka

σ_y – tlačna napetost

Ob upoštevanju enačb: (2) in (4) dobimo za tlačno trdnost zidovine izraz:

$$f_{Mc} = \frac{f_{cb}}{\left[\frac{t}{h_b'} \frac{v_m}{1-v_m} + 0,3 \frac{t_b'}{h_b''} \right] \frac{f_{cb}}{f_{tb}} + 0,7} \quad (5)$$

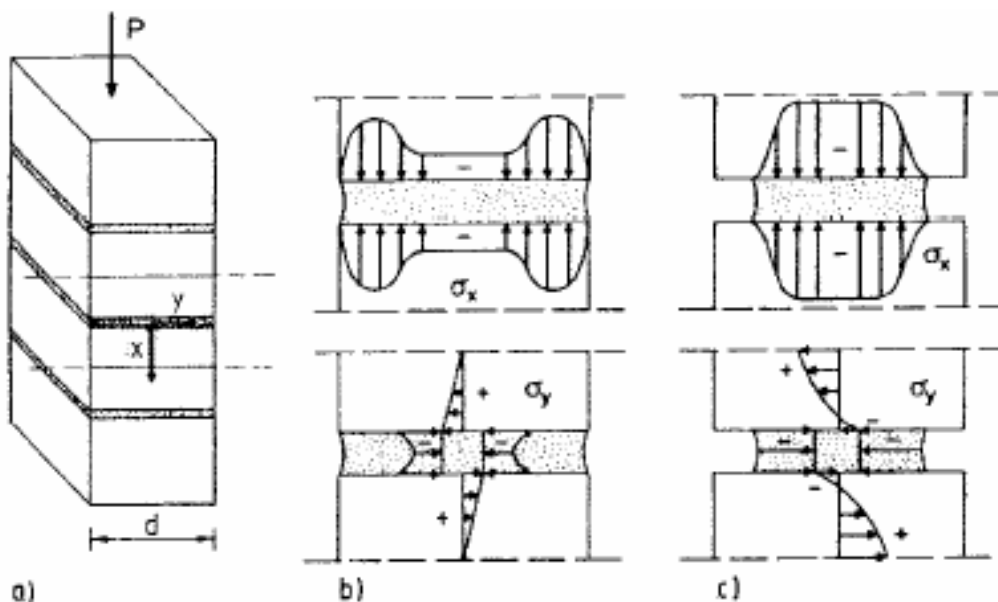


Slika 58: Formiranje dodatnih cepilnih napetosti v zidaku (Berndt, 1994)

Trdnost zidovine dobimo torej kot presečišče napetostne linije s porušno krivuljo. Napetostna linija predpostavi linearno elastično obnašanje zidaka in malte, porušna krivulja pa predstavlja natezno porušitev zidaka v zidovini. Pri izračunu tlačne trdnosti zidu se upošteva le Poissonov količnik malte, geometrija kamna in mehanske lastnosti kamna.

8.1.3 Sabhova teorija loma

Sabhova (1994) teorija loma temelji na enakomernih zidnih zvezah obdelanega kamna. Preden je dosežena rušna obtežba, se iz območja spojníc malta drobi in odpada. Pri Berndtovi teoriji loma se kot posledica tovrstnega dogajanja predpostavi vzpostavitev cepilnih nateznih napetosti v kamnu. Te napetosti dosežejo največjo vrednost na polovici višine zidaka, medtem, ko so natezne napetosti, zaradi oviranja prečnega deformiranja, največje v stiku s spojnico. V nasprotju z Berndtovim rušnim modelom, se deleži napetosti ne seštevajo. Porazdelitve napetosti, ki jih upošteva Sabhov porušni model, so prikazane na sliki (Slika 59). Za območja spojníc, ki niso zdrobljena, se predpostavi hidrostatsično stanje napetosti. Veljavnost rušnega modela je omejena z geometrijo spojníc ($t_{bj} < t_j/5$), saj se pri večji višini spojníc ne vzpostavi večosno napetostno stanje.



Slika 59: Prerazporeditev napetosti v b) elastičnem in c) plastičnem stanju (Sabha, 1994)

Na podlagi analize, opravljene z metodo končnih elementov (MKE), je bila določena kritična globina zdrobitve spojnice, za maksimalne prečne natezne napetosti v kamnu. Pri tej globini zdrobitve spojnice je bila podana zveza med vertikalnimi tlačnimi napetostmi v zidovini in prečnimi nateznimi napetostmi v kamnitem zidaku v obliki enačbe:

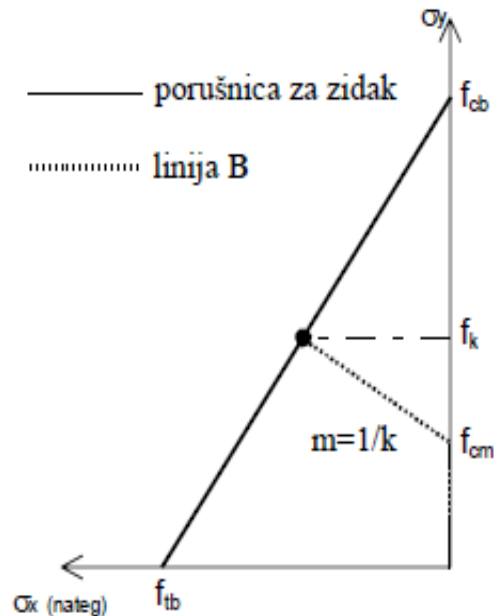
$$\sigma_y = \frac{1}{k} \sigma_{xb}, \quad (6)$$

$$k = -3,22 \left(2,5 \frac{t_{bj}}{t_m} \right)^2 + 1,524 \left(2,5 \frac{t_{bj}}{t_m} \right). \quad (7)$$

Enačba (6) predstavlja linearno napetostno linijo za cepilno natezno napetost v kamnitem zidaku.

Ker nastane cepilna natezna napetost šele po prekoračitvi enosne tlačne trdnosti malte v spojnici, ima napetostna linija za cepilno natezno napetost v kamnitem zidaku bilineano obliko (linija B - Slika 60).

Tlačno trdnost zidovine dobimo kot presečišče z linijo porušitve zidaka. Avtor je izpeljal enačbe za določitev tlačne trdnosti zidovine. Pri tem je upošteval porušnico zidaka v biaksialnem stanju napetosti (v obliki linearne ovojnice) in eksperimentalnih rezultatov Khoo in Hendryja (Khoo, 1972).



Slika 60: Rušni model po Sabhu (1994)

8.1.4 Mann-ova teorija loma

Ta teorija (Mann, 1983), ki se bistveno razlikuje od predhodno obravnavanih teorij, je bolj primerna za kamnito zidovino. Temelji na predpostavki, da nastopi porušitev zidovine s tlačno porušitvijo malte. Tlačna trdnost zidovine se torej opiše s tlačno trdnostjo malte v zidovini. Izhaja iz Mohrove hipoteze. Trdnost malte v zidovini je produkt tlačne trdnosti malte f_{cm} , določene na kockah, in oblikovnega faktorja trdnosti malte f , ki upošteva naraščanje trdnosti malte zaradi večosnega napetostnega stanja v zidovju. Oblikovni faktor, ki je funkcija vitkosti spojnice h/d , je bil izpeljan iz enosnih tlačnih preiskav na maltah različnih vitkosti, in je prikazan na grafikonu 6.. V oblikovnem faktorju je upoštevan tudi kot nagnjenosti spojnice α . Za opis povezanosti zidovine vpelje Mann tudi faktor prenašanja \bar{u} , ki prerez zidovine zreducira na zgoraj in spodaj z zidaki omejene ravnine spojníc. Huster (2000) poda za faktorje prenašanja \bar{u} naslednje vrednosti: 0,85 za polobdelan kamen (grobo klesani bloki) in 0,6 za lomljence. Tlačno trdnost zidovine podaja enačba (8):

$$f_k = f_{cm} \cdot f \cdot \ddot{u} \quad (8)$$

$$f = \frac{8}{9} \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{2t}{3t_b}\right)^2 \cos^4 \alpha} \quad (9)$$

$$\ddot{u} = \frac{A_b}{A_{MW}} \quad (10)$$

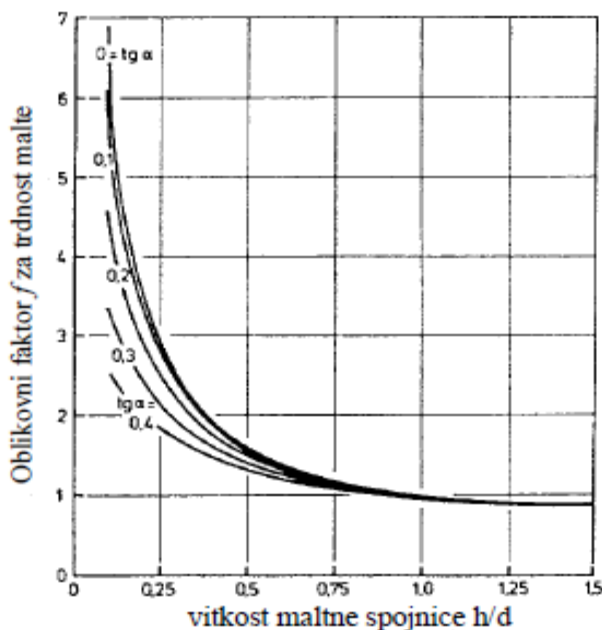
\ddot{u} – faktor prenašanja (0,85 za polobdelan kamen, 0,6 za lomljence)

f – oblikovni faktor

α – naklon spojnice

t – debelina naležne spojnice

t_b – višina kamna



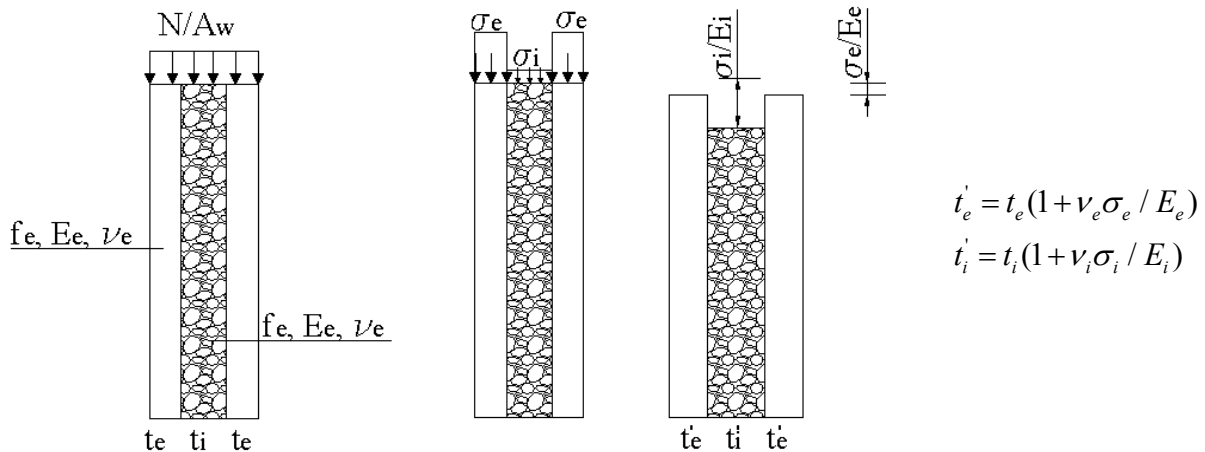
Grafikon 6: Oblikovni faktor za spojnice po Rustmeierju (Mann, 1983)

8.2 Teorija loma večslojnih zidov

Zgodovinski kamniti zidovi so najpogosteje zgrajeni iz treh slojev, novodobni zidovi pa so običajno enoslojni. Zato je tudi večina računskih modelov razvitih za enoslojne zidove. Ti modeli so pa pri večslojnih zidovih neuporabni. Porušni mehanizem troslojnih zidov deluje tako, da enakomerna obtežba deluje po celotni debelini zidu. Večji del obtežbe prevzame zunanja zidova, največje deformacije pa so v jedru. Vodoravne deformacije jedra povzročajo vodoravne napetosti, ki delujejo na zunanja zidova. Zaradi medsebojnega vpliva tlaka in upogiba se zunanji zid poruši.

8.2.1 Teorija loma večslojnih zidov Taissos, Syrmakezis in sodelavci

Eno izmed teorij loma večslojnih zidov podajajo raziskovalci Taissos (1991) in Syrmakezis in sodelavci (1995). Računski model upošteva tlačne trdnosti gradnikov (malta in zidak), material (kamen ali opeka), obliko zidakov, debelino spojnic (fug) in poroznost materialov. Na podlagi tega računskega modela sta kasneje Taissos in Vintzileou (1995) podala formuli za tlačne trdnosti pred in po injektiranju zgodovinskih zidov.



Slika 61: Razporeditev napetosti v troslojnem zidu

Tlačna trdnost troslojnega zidu:

$$f_{Mc} = \frac{2\lambda_e \delta f_{Mc}^e + \lambda_i f_{Mc}^i}{(1 + 2\delta)} \quad (11)$$

Tlačna trdnost zunanjega sloja zidu, enačba se lahko uporabi za enoslojni zid:

$$f_{Mc}^e = f_{Mc} = \frac{\frac{2}{3} \sqrt{f_{bc}} + k_1 f_{mc} - k_2}{1 + 3,5 \cdot \left(\frac{V_m}{V_M} - 0,30\right)}, \text{ kjer je} \quad (12)$$

f_{bc} – tlačna trdnost zidaka (100 MPa je največja vrednost)

f_{mc} – tlačna trdnost malte

k_1 – faktor vpliva materiala in oblike zidaka (obdelave kamna) je:

k_2 – faktor vpliva materiala in oblike zidaka je:

k_1	k_2	
1	-	za opeko
0,6	2,5	za lomljenec
0,3	0,5	za polobdelan kamen
0,2	0	za kamniti blok

Tlačna trdnost jedra:

$$f_{Mc}^i = f_0 e^{(-10n_i)} \zeta_i, \text{ kjer je} \quad (13)$$

n_i - poroznost jedra,

$\zeta_i = 1$, če je jedro narejeno srednjega kamnja, votline pa zapolnjene z malto, drugače $\zeta_i = 0$

f_{mc} [MPa]	f_0 [MPa]
10	35
4	20
1	10

δ - razmerje med debelino zunanega zidu in debelino jedra.

$$\delta = t^e / t^i \quad (14)$$

$\lambda_i = I$, korekcijski faktor za polnilo

λ_e – korekcijski faktor za zunanji zid

$$\lambda_e = 1 - \left(\frac{0,018}{f_{Mc}^e} \left(\frac{h_M}{t_e} \right)^2 h_M^{2/3} \right) : \left(\frac{0,31 \left(\frac{h_M}{t_e} \right)^3}{E_M^e} + \frac{t_i}{E^i} \right) \approx 1 - 0,06 \zeta_e t_e h_M^{-4/3}, \quad (15)$$

h_M – višina zidu v milimetrih,

t_e – debelina zunanega zidu v milimetrih,

t_i – debelina jedra v milimetrih

E_M^e – modul elastičnosti zunanega zidu,

E^i – modul elastičnosti jedra

$$E_M^e = \zeta_e f_{Mc}^e, \quad (16)$$

$\zeta_e = 500$ za zidove iz lomljenecv

$\zeta_e = 1000$ za zidove iz pobelanega kamna

$\zeta_e = 1500$ za zidove iz klesancev (rezani bloki)

$$E^i = \zeta_i f_{Mc}^i, \quad (17)$$

$\zeta_i = 2000$ za jedro

8.2.2 Teorija loma večslojnih zidov - Binda in sodelavci

Binda in sod. (2006) predlagajo enačbo (17) za večslojne zidove. Izpeljana je iz razmerij napetosti, ki jih prenašajo posamezne plasti oziroma sloji zidov.

$$f_{Mc} = \frac{2t_e}{2t_e + t_i} f_{Mc}^e + \frac{t_i}{2t_e + t_i} f_{Mc}^i, \text{ kjer so} \quad (17)$$

t_e – debelina zunanjšega sloja zidu

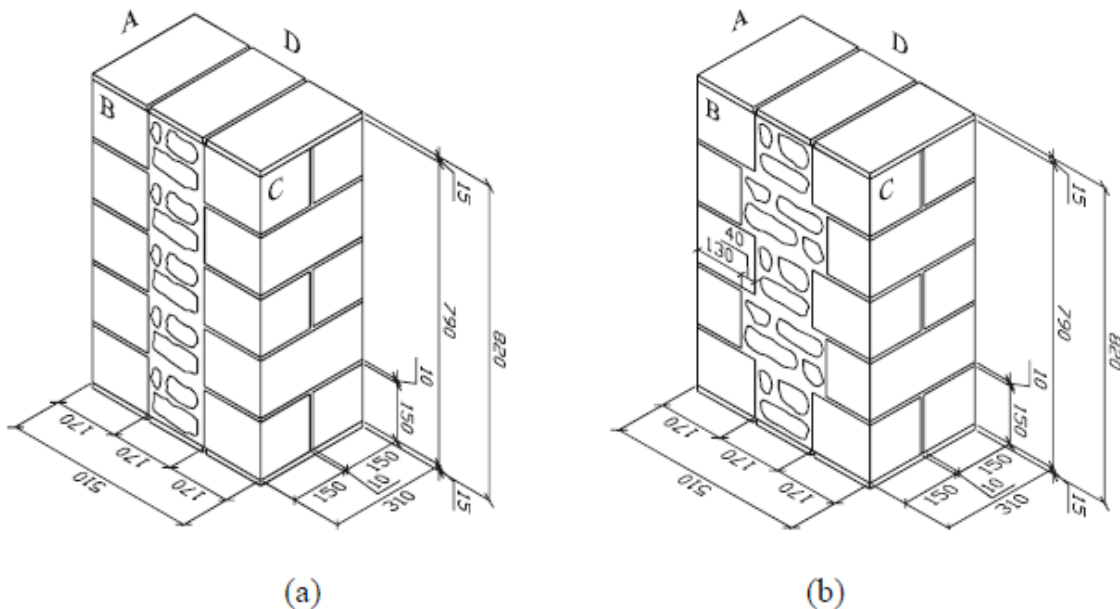
t_i – debelina jedra zidu

f_{Mc}^e – tlačna trdnost zunanje plasti zidu

f_{Mc}^i – tlačna trdnost jedra zidu

Na podlagi laboratorijskih preiskav kamnitih zidkov podobne teksture in morfologije kot so naši, raziskovalci predlagajo tudi korekcijske faktorje: $\theta_e = 0,7$ in $\theta = 1,3$.

$$f_{Mc} = \frac{2t_e}{2t_e + t_i} \theta_e f_{Mc}^e + \frac{t_i}{2t_e + t_i} \theta_i f_{Mc}^i. \quad (18)$$



Slika 62: Zidki iz preiskav Binda in sod. (2006)

Slabost te enačbe je, da ne podaja enačb za trdnosti posameznih slojev zidov (f_{Mc}^e , f_{Mc}^i). Zato je potrebno enačbo (18) kombinirati z drugimi enačbami, ki se lahko izkažejo za napačne že v odvisnosti od obravnavanega modela. Vstavimo pa lahko trdnosti posameznih slojev iz in-situ preiskav.

9.0 ANALITIČNI DEL

Zidovina je sestavljen heterogen nelinearen konstrukcijski material. Zato so mehanske lastnosti zidu odvisne od mehanskih lastnosti sestavnih materialov, njihovega prostorninskega razmerja in medsebojnega stikovanja.

9.1 Tlačna trdnost enoslojnih zidov

Standard SIST EN 1996 omogoča izračun tlačne trdnosti enoslojnega kamnitega zidu, pri tem pa je zelo omejen. Omenja samo obdelane kamne (vse štiri strani kamna so obdelane). Tlačna trdnost zidu je odvisna od tlačne trdnosti malte in zidakov, oblike zidakov ter tipa malte. Z to obliko kamna in za malto splošne uporabe poda koeficient $K = 0,45$.

$$f_k = K(\delta f_{bc})^\alpha f_{mc}^\beta \quad (19)$$

f_k - karakteristična tlačna trdnost zidovja

f_{bc} - tlačna trdnost zidaka

f_{mc} - tlačna trdnost malte

K – konstanta, ki je odvisna od oblike in materiala zidaka ter tipa malte

α, β – konstanti ($\alpha = 0,7$ in $\beta = 0,3$ za malto splošne uporabe in lahko malto)

V preglednici 16 je podan del izračunov nemškega avtorja Huster-ja (2000). Ti izračuni, ki jih je opravil za tri zidove z različnimi strukturami in maltami, so narejeni po več različnih teorijah porušitve kamnitih zidov. Za lažjo primerjavo sem izbral avtorja Berndt (1996) in Mann (1983) ter standard SIST EN 1996. K preglednici sem dodal moje izračune tlačne trdnosti (celice zelene barve) za enoslojni zid iz kvadrov (apnenec). Dodal sem tudi tlačne trdnosti, izračunane po SIST EN 1996. Pri nemškem avtorju Huster(2000), pa so rezultati izračunani na podlagi konstant značilnih za nemški EC 6. V preglednici je ta izračun označen kot EC 6*.

SIST EN 1996: $K = 0,45$, $\alpha = 0,70$, $\beta = 0,30$ in $\delta = 1,3$,

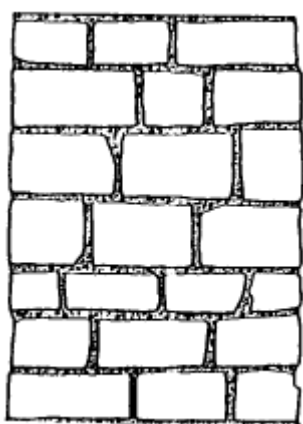
EC6*: $K = 0,60$, $\alpha = 0,65$, $\beta = 0,25$ in $\delta = 1,3$

Poleg izračunov je Huster (2000) podal tudi rezultate eksperimentalnih preiskav. Huster-jevi rezultati, izračunani po Berndt-u (1996), imajo manjše tlačne trdnosti od rezultatov iz preiskav. Pri izračunu tlačne trdnosti po Mann-u (1983), pa so pri drugem zidu največja odstopanja.

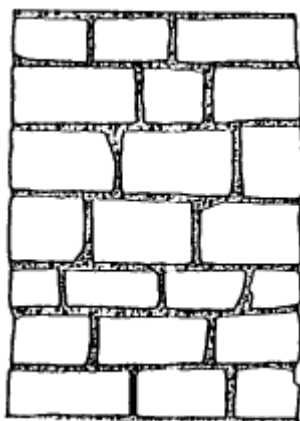
Najboljše ujemanje rezultatov za svoj primer zidu sem dobil z računom po Mann-u (1983). Glede na podobne mehanske lastnosti kamna in malte, bi morali biti rezultati primerljivi s Husterjevim zidom 1.

Preglednica 16: Rezultati izračunov tlačne trdnosti enoslojnih zidov

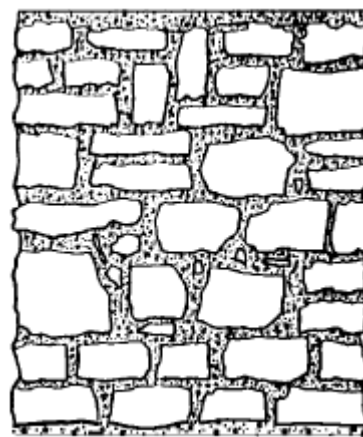
	Gradniki					Izračun				Preiskave	
	Obdelava kamna	Vrsta kamna	f_{bc} [MPa]	F_{bt}	f_{mc} [MPa]	Berndt (1996) [MPa]	Mann (1983) [MPa]	SIST EN 1996 [MPa]	EC6*	Huster (2000) [MPa]	
Huster (2000)	1	kvadri	peščenjak	99,6	3	1,1	10,4	4,9	13,9	14,5	11
	2	kvadri	peščenjak	99,6	3	16,9	18,2	75,2	31,6	28,7	23,5
	3	lomljenec	apnenec	22	1,6	1,1	2,9	2,2	4,8	5,4	4,5
naš zid		kvadri	apnenec	171,5	24,2	2,15	79,8	11,8	24,9	24,4	-



1



2



3

Slika 63: Vzorci zidov, Huster (2000)

9.2 Tlačna trdnost večslojnih zidov

9.2.1 Tlačna trdnost večslojnih zidov po Taissos-u

Za izračun tlačne trdnosti Taissos (1991), Symakes in sodelavci (1995) podajajo naslednjo enačbo:

$$f_{Mc} = \frac{2\lambda_e \delta f_{Mc}^e + \lambda_i f_{Mc}^i}{(1 + 2\delta)} \quad (11)$$

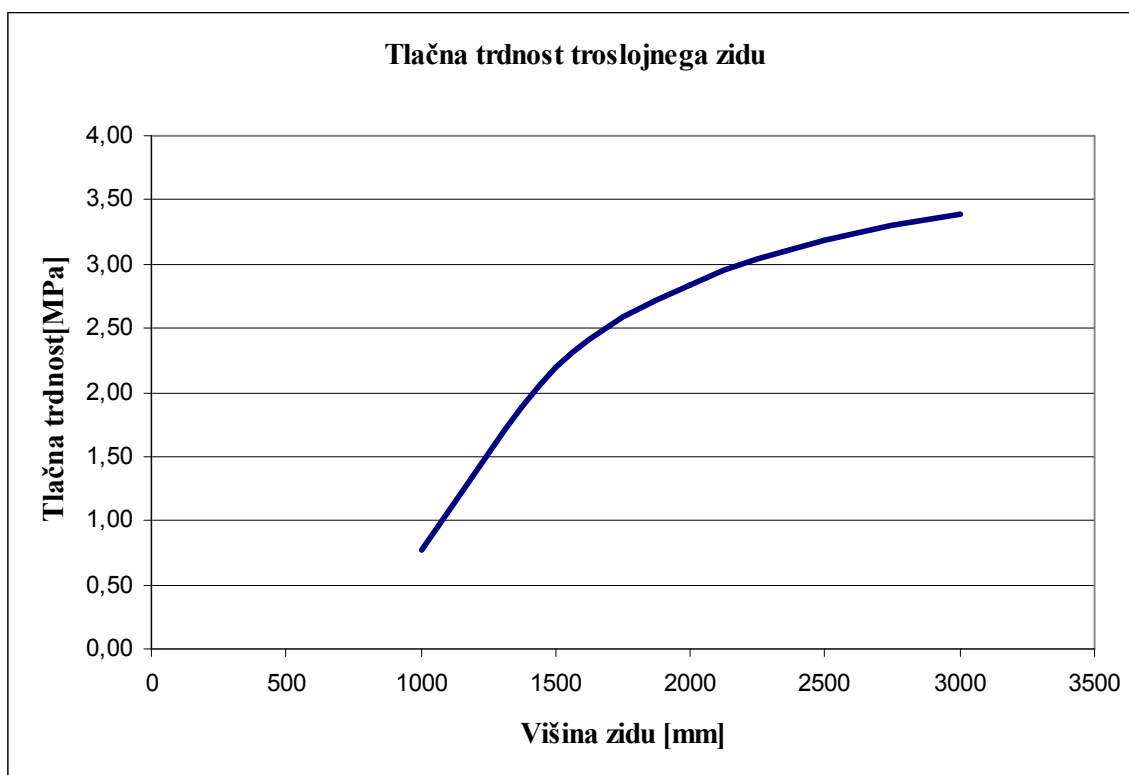
Podroben opis simbolov v enačbi je v poglavju 8.2.1, ki se nanaša na teorijo loma večslojnih zidov. Pri tem naj omenim, da enačba (11) ne upošteva vpliva zidarske zveze. Glede na medsebojni vpliv porušnih mehanizmov malte in zidakov, lahko ta vpliv zanemarimo. V naslednji preglednici so izračunane tlačne trdnosti troslojnega zidu in tlačne trdnosti posameznih slojev (zunanji zid in jedro). Pri računih sem upošteval naslednje lastnosti vgrajenih materialov: $f_{cb} = 100$ MPa in $f_{cm} = 2,15$ MPa. Enačba upošteva tudi višino zidu, zato sta izračunani dve vrednosti. Rezultati v zadnjem stolpcu so presenetljivi in tudi nelogični. Za višji zid je bila izračunana večja tlačna trdnost od nižjega zidu, razlika pa je ogromna (186 %).

Preglednica 17: Analitični rezultati tlačne trdnosti troslojnega zidu

Višina zidu [cm]	Zunanji zid $f_{Mc,e}$ [MPa]	Jedro $f_{Mc,i}$ [MPa]	Cel zid f_{Mc} [MPa]
100	5,80	0,42	0,77
150	5,80	0,42	2,20

Pri nadaljnji analizi parametrov sem opazil še nekaj anomalij in predstavil v naslednjih grafikonih.

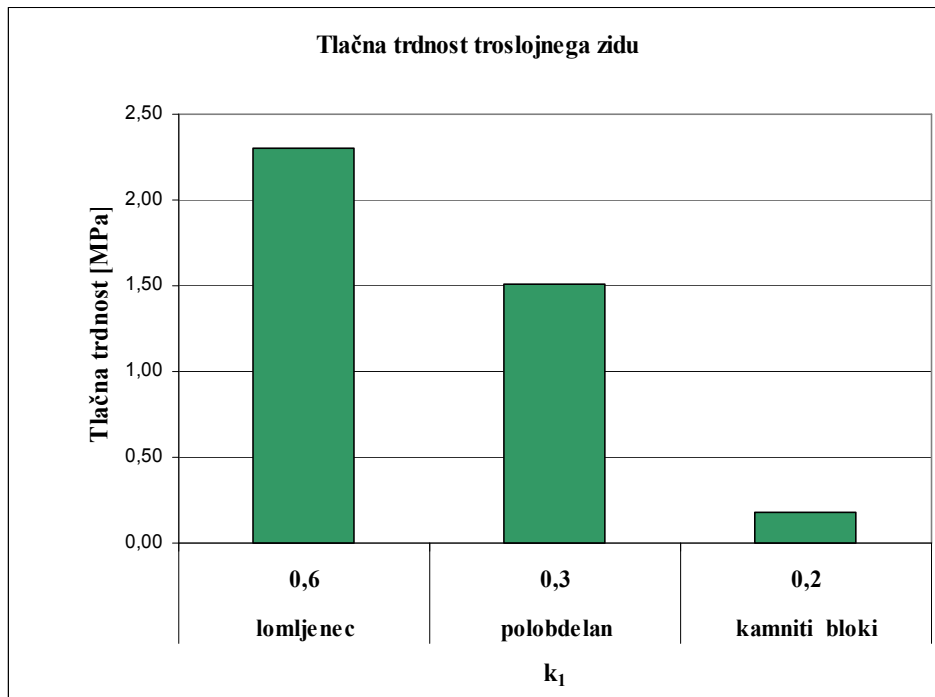
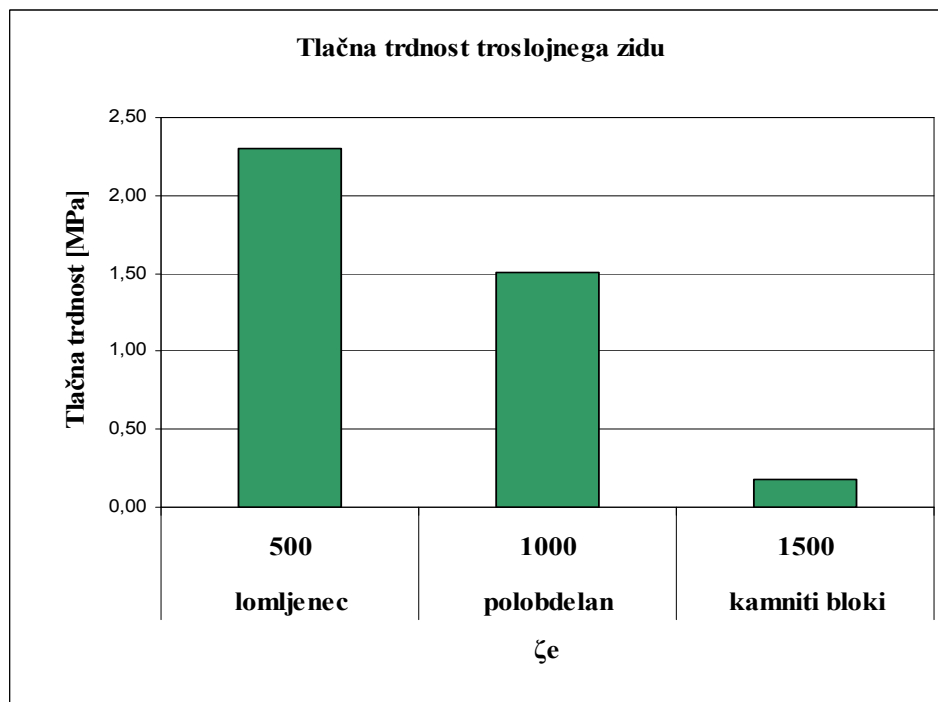
V naslednjem grafikonu je prikazana anomalija tlačne trdnosti izračunana po enačbi (11), ko s povečevanjem višine zidu, narašča trdnost zidu. V realnosti pa pri visokih zidovih pride do porušitve zaradi uklona.



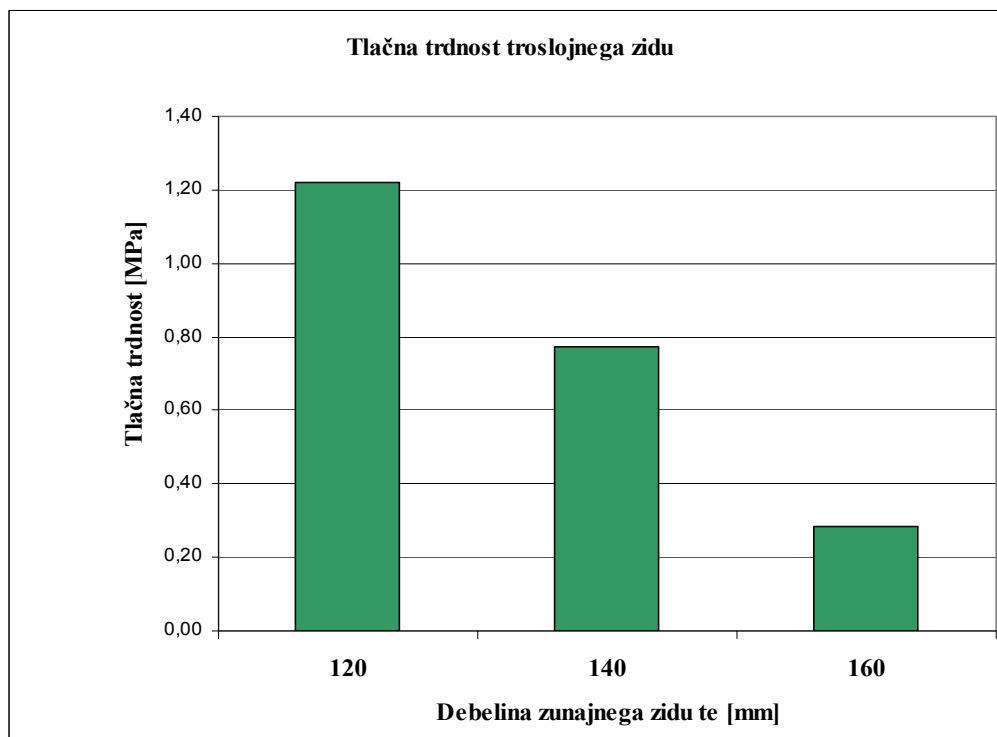
Grafikon 7: Anomalija tlačne trdnosti v odvisnosti višine zidu

Obdelanost kamna podajamo s faktorjema k_1 in ζ . V praksi se z obdelanostjo kamna dosega večjo trdnost zidovja. Z ravnimi spojnicami dosežemo enakomeren raznos obtežbe in manjšo uporabo malte, ki je šibek člen v zidu. Po enačbi (11) pa dobimo ravno nasprotno rezultate, ki jih prikazujeta grafikona 8 in 9.

Z obdelanostjo kamna zid dobi trdnost, to lastnost z raziskavami potrjuje tudi Vintzileou (2012). Tlačna trdnost prizme iz dveh zidakov z gladko površino je 0,87 % f_{bc} . Če pa je stik napolnjen z malto pa 0,40 f_{bc} . Grafikona 8 in 9 sta narisana po rezultatih za zidove višine 1200 mm. Če bi bila višina zidu 1000 mm, bi se ob upoštevanju konstant za kamniti blok, pojavila negativna tlačna trdnost.

Grafikon 8: Anomalija tlačne trdnosti v odvisnosti od materiala in oblike zidaka (k_1)Grafikon 9: Anomalija tlačne trdnosti v odvisnosti od obdelanosti kamna (ζ_e)

Zadnja anomalija se pojavi pri povečevanju debeline zunanjih zidov. Pri debelini 170 mm se pojavijo negativne vrednosti tlačne trdnosti. V realnosti večje debeline zunanjih zidov povečujejo trdnost celotnega zidu.



Grafikon 10: Anomalija tlačne trdnosti v odvisnosti debeline zunanjega zidu

Iz tega bi lahko sklepali, da računski model morda deluje le na omejenih dimenzijah vzorcev. Če bi vstavili realne dimenzije zidov, pa bi dobili napačne rezultate. Omejitev dimenzij v literaturi nisem zasledil.

9.2.2 Tlačna trdnost večslojnih zidov po Bindi

Naslednji izračuni so opravljeni po teoriji Binde in sod. (2006). Enačbi (17) in (18) ne podajata enačb tlačnih trdnosti za posamezne sloje zidu. Trdnosti zunajnjih zidov sem izračunal po enačbah drugih avtorjev, trdnost jedra sem pa pridobil iz preiskave. Rezultati so v naslednji preglednici.

Preglednica 18: Analitični rezultati po Bindi

Metoda za zun. zid	f_{Mc}^c	f_{Mc}^i	f_{Mc} Enačba(17)	θ_e	θ_i	$f_{Mc}(\theta_{e,i})$ Enačba(18)	Lab. preiskava
	[MPa]	[MPa]	[MPa]			[MPa]	[MPa]
SIST EN 1996	24,9	0,9	14,8	0,7	1,3	12,6	5,94 - 7,19
EC6*	24,4	0,9	17,4	0,7	1,3	12,3	
Mann	11,8	0,9	8,5	0,7	1,3	6,1	
Berndt	79,8	0,9	56,1	0,7	1,3	39,5	

Iz primerjave analitičnih in eksperimentalnih rezultatov je razvidno, da se je analitični rezultat, s kombinacijo metode po Mann-u in enačbe Binde (označen je zeleno), najbolj približal eksperimentalno pridobljenim vrednostim tlačne trdnosti (93 % ujemanje). Ostale kombinacije metod so se slabše obnesle, saj rezultati precej odstopajo od eksperimentalnih (od 91 % do 499 %).

9.3 Deformacijske lastnosti zidovja

9.3.1 Modul elastičnosti E

Modul elastičnosti zidu E se po SIST EN 1996 izračuna iz izraza:

$$E = K_E f_k. \quad (20)$$

SIST EN 1996 navaja priporočeno vrednost konstante $K_E = 1000$ in je za vse vrste zidov enaka. V tem standardu so računski modeli razviti za sodobne zidane zgradbe, za zgodovinske objekte pa neuporabni. Taissos (1991), Syrmakes in sodelavci (1995) predlagajo enačbi (20) in (21) za posamezne sloje zidu. Sloji se delijo na zunanja zidova in notranji sloj ali jedro.

$$E_M^e = \zeta_e f_{Mc}^e \quad (21)$$

$\zeta_e = 500$ za zidove iz lomljencev

$\zeta_e = 1000$ za zidove iz polbdelanega kamna

$\zeta_e = 1500$ za zidove iz klesancev (rezani bloki)

$$E^i = \zeta_i f_{Mc}^i \quad (22)$$

$\zeta_i = 2000$ za jedro

Po enačbah (20) in (21) sem izračunal module elastičnosti za zunanji zid ($E_M^e = 5798$ MPa) in jedro ($E^i = 833$ MPa). Izračunani modul elastičnosti za zunanji zid je izredno visok, glede na rezultate preiskav. Rezultat lahko tudi ovržemo, saj računski model daje napačne rezultate že pri tlačni trdnosti.

9.3.2 Strižni modul G

Pri določanju strižnega modula ni standardnega postopka, zato se lahko oceni po SIST EN 1996 z naslednjo enačbo:

$$G = 0,40E. \quad (23)$$

Ta enačba je podana za sodobno zidovino. Iz tlačnih preiskav lahko izračunamo strižni modul z enačbo linearne elastične teorije za homogen izotropen elastičen material. Elastični modul iz tlačnih preiskav izračunamo iz količnika spremembe napetosti in spremembe vertikalnih deformacij. Območje spremembe je omejeno z 1/3 tlačne trdnosti zidu ali do napetosti ob nastanku prve razpoke.

$$G = \frac{E_M}{2(1+\nu_M)}. \quad (24)$$

V naslednji preglednici so deformacijske konstante zidu. Strižni modul je izračunan po enačbi (24). Razmerje med modulom elastičnosti in strižnim modulom je povprečju znašalo 0,41 ali $G \approx 0,41 E$. Sklepamo lahko, da se enačba (23) po SIST EN 1996 ujema z našimi rezultati preiskav.

Preglednica 19: Deformacijske konstante

Vrsta zidu	Deformacijske konstante			Razmerje modulov
	E [Mpa]	Poisson k.	G [Mpa]	G/E
Nizek zid vezniška zveza	523	0,15	230	0,44
Nizek zid smerniška zveza	1542	0,19	648	0,42
Visok zid vezniška zveza	741	0,46	252	0,34
Visok zid smerniška zveza	1106	0,17	475	0,43
Povprečje	978	0,24	401	0,41
Standardni odklon	446	0,15	198	0,05

Za zgodovinske večslojne zidove avtorji Taissos (1991) ter Syrmakes in sod. (1995) podajo podobno enačbo.

$$G = 0,40E_M^e = 0,40f_{Mc}^e \zeta_e \quad (25)$$

Enačba (24) nam daje napačne rezultate že pri trdnosti zidu. Strižni modul po tej enačbi znaša 2319 MPa in je previsok glede na povprečno vrednost rezultatov laboratorijskih preiskav ($G = 401$ MPa).

10.0 PRIMERJAVA ANALITIČNIH IN EKSPERIMENTALNIH PREISKAV

10.1 Tlačne trdnosti

V računski analizi so tlačne trdnosti izračunane po dveh enačbah. Po enačbi (11), ki jo predlaga Taissos ter po enačbi (18), katero predlaga Binda in sodelavci. Med eksperimentalnimi in računskimi rezultati z enačbo (11) opazimo velika odstopanja (277 - 933 %). Poleg tega so računski rezultati nerealni, če primerjamo samo višino zidu. Pri računu z enačbo (18) naj omenim, da sem pri izračunu tlačne trdnosti enoslojnega zidu uporabili enačbo (8). Rezultat te kombinacije enačb se je najboljše ujema z eksperimentalnimi rezultati (93% ujemanje).

Preglednica 20: Primerjava analitičnih rezultatov z rezultati preiskav tlačne trdnosti

	Laboratorijske preiskave [MPa]	Računska Analiza	
		Enačba (11) [MPa]	Enačba (18) [MPa]
Nizek zid vezniška zveza	7,17	0,77	6,1
Nizek zid smerniška zveza	7,19		
Visok zid vezniška zveza	5,94	2,2	
Visok zid smerniška zveza	6,05		

Če med seboj primerjamo samo laboratorijske preiskave, se tlačne trdnosti zidu glede na zidarsko zvezo ne razlikujejo veliko. Pri nizkih zidovih je razlike 0,2 %, pri visokih zidovih 1,7 %. Torej izbira zidarske zveze ni bistveno vplivala na tlačno trdnost zidov. Očitno pa vpliv raste hkrati z višino zidu, saj je pri 50 % povišanju zidu, pri smerniški zvezi padec trdnosti 16 %, pri vezniški pa 17 %. Presenetljivo je bilo tudi to, da so zidovi z vezniško zidarsko zvezo dosegli manjše tlačne trdnosti kot pa zidovi s smerniško zidarsko zvezo. Pričakovali smo ravno obratne rezultate.

V naslednji preglednici sem zbral podatke o trdnosti kamnitih zidov glede na tipe zidov. Preglednica je nepopolna, saj za vse tipe zidov ni bilo podatkov. Razdeljena je glede na pravilnik in dobljene rezultate laboratorijskih ter in-situ preiskav. V prvem stolpcu so vrednosti tlačne trdnosti zidov iz italijanskega pravilnika za zidane konstrukcije NTC08. Naslednja dva stolpca vsebujeta rezultate preiskav na terenu, zadnji stolpec pa so rezultati naših tlačnih preiskav v laboratoriju. Rezultati laboratorijskih preiskav se zelo dobro ujemajo z vrednostimi pravilnika NTC08 (v povprečju 94 % ujemanje).

Preglednica 21: Primerjava tlačnih trdnosti s pravilnikom NTC08

Zid	Račun	Preiskave tlačne trdnosti		
	Tlačna trdnost [MPa]	Lokalna tlačna trdnost [MPa]		Tlačna trdnost [MPa]
	pravilnik NTC08	Čezsoča (Flat jack)	Žiče (preiskave na valjih)	Laboratorijske preiskave
Iz lomljencev	1-1,8	1,5-1,65	-	-
Iz polobdelanega lomljenca	2,6-3,80	-	7,1	-
Iz lomljencev in jedra	2-3	-	-	-
Iz klesanih blokov	6-8	-	-	5,94-7,19
Iz klesanih mehkih kamnin (tuf, apnenec)	1,4-2,4	-	-	-

Preglednica 22: Dovoljena obremenitev po Peuliću (1967)

Zid iz lomljencev [MPa]	Zid iz polobdelanega lomljenca [MPa]	Zid iz lomljencev z jedrom [MPa]	Zid iz klesanih blokov [MPa]	Zid iz ploščatega kamna [MPa]
0,5	1,2	0,5	1-6	0,9

V nadaljevanju sem v tabeli predstavil projektne vrednosti držav Španije, Portugalske (PIET-70, Lourenco) in Kanade (Canadian codes) kot tudi vrednosti za območje bivše Jugoslavije. Vrednosti so pridobljene iz poročila Bosiljkov in Kržan (2012).

Pri primerjavi vrednosti iz PIET-70 so mehanske lastnosti materialov naših zidov materialov in zidov veliko višje. Glede strukture zidu in tipa malte, pa je težko primerjati naše zidove z zidovi v tabeli. Naši kamniti zidaki so polobdelani kamni. Nevidna stran kamna je neobdelana. Za najboljšo primerjavo bi bil klesan blok iz trdega apnenca in z višino manjšo od 30 cm. Trdnostni razred malte pa M4. Projektna trdnost zidu znaša s temi lastnosti znaša 2 MPa.

Preglednica 23: Projektne tlačne trdnosti iz Španije in Portugalske PIET-70

Vrsta kamna	Tlačna trdnost kamna [MPa]	Zid iz kamnitih blokov (klesancev)			Ostali tipi kamnitih zidov		
		Suha tehnika malte ni, naležne spojnice so ravne [MPa]	Klesan blok h>30 cm Malta>M8 [MPa]	Klesan blok h<30 cm Malta>M4 [MPa]	Z ravnimi skladi Malta>M4 [MPa]	Lomljenec Malta>M0.5 [MPa]	Suhi zid [MPa]
Granit Bazalt	>100	8,0	6,0	4,0	2,5	1,0	0,7
kremenjak, peščenjak, trdi apnenec, marmor	>30	4,0	3,0	2,0	1,2	0,8	0,6
Peščenjak, mehki apnenec	>10	2,0	1,5	1,0	0,8	0,6	0,5

Pri kanadskih projektih vrednosti so navedene vrednosti samo za enoslojne kamnite zidove. Če primerjam tlačno trdnost za enoslojni zid, ki sem jo izračunal po Mannu (11,8 MPa) s kanadskimi projektimi vrednostmi, so tudi največje projektne vrednosti nekajkrat manjše od izračunane, čeprav sem pri računu upošteval zid z apneno malto tlačne trdnosti 2,15 MPa. V preglednici so navedene podaljšane malte z različnimi volumskimi razmerji sestavin.

Preglednica 24: Projektne tlačne trdnosti iz Kanade (CSA S304, 1-94)

Tip zidu	Vrsta kamnitega zidaka	Vrsta Malte	
		cement : apno : pesek 1 : (0,25-0,5) : 3	cement : apno : pesek 1 : (0,5-1,25) : 3
		Tlačna trdnost [MPa]	
Masivni zid Enoslojni	Lomljenec	0,8	0,7
	Klesani bloki iz granita	5,0	4,4
	Klesani bloki iz apnenca in marmorja	3,1	2,8
	Klesani bloki iz peščenjaka in umetnega kamna	2,5	2,2

V naslednji preglednici so podane vrednosti kamnitih zidov v Sloveniji, Črni gori in na Hrvaškem. Po strukturi zidu in vgrajeni malta lahko svoje zidove primerjam s Pišecami (grobo klesani bloki in troslojni zid), vendar pa so vrednosti laboratorijskih preiskav veliko večje (povprečno 6,57 MPa) kakor pa rezultati iz in situ preiskav (1,2-1,6 MPa). Res pa je, da so preiskovani objekti na terenu podvrženi visoki starosti, vlagi in vremenskim vplivom. Drugi primerljivi troslojni zid je iz Hrvaške, njegovi skladi neravni, pri naših zidovih pa so skladi ravni, tlačna trdnost zidu iz Hrvaške je primerljiva s tlačno trdnostjo naših zidov.

Preglednica 25: Rezultati laboratorijskih in in-situ preiskav (Slovenija, Črna Gora, Hrvaška)

Avtorji preiskav kamnitih na zidovih: Bosiljkov in sod. (2004), Tomažević, Sheppard (1982), Tomažević, Aničić (1989), Tomažević (2011), Turnšek in sod. (1978), Uranjek in sod. (2012)

Vrsta zida	Lab. ali In-situ	Kamen	Malta	f_{Mc} [Mpa]	f_{Mt} [Mpa]	E_M [Mpa]	G_M [Mpa]
Kozjansko, nehomogen dvoslojen zid zgrajen iz lomljencev	In-situ	apnenec	Apneno glinena malta z blatnim peskom	0,51	0,02	197	65
Črna gora	In-situ	apnenec	Apnena malta s finim peskom	0,33 - 0,77	0,10	390 - 3210	87
Bovec, nehomogen dvoslojen zid iz lomljencev, delno vodoravni skladi	In-situ	apnenec	Apnena malta z blatnim peskom	0,98	0,06	2660	80
Bovec, nehomogen dvoslojen zid iz lomljencev, delno vodoravni skladi	In-situ	apnenec	Apnena malta z blatnim peskom	-	0,08	-	170
Ljubljana relativno homogen zid	In-situ	slate, limestone	Apnena malta z blatnim peskom	-	0,13 - 0,15	-	40
Pišeece nehomogen, delno vodoravni skladi, dvoslojen zid	In-situ	apnenec, peščenjak	Apnena malta z blatnim peskom	1,00 - 1,20	0,14	1500	430
Pišeece, grobo klesani bloki troslojen zid	In-situ	apnenec	Apnena malta s finim peskom	1,20 - 1,60	-	1700	-
Hrvaška, neravni skladi troslojen zid z jedrom	In-situ			4,7 - 5,5		1800 - 2100	

V naslednji preglednici so podani rezultati meritev grških raziskovalcev Vintzileou in Taissos (1995), Miltiadou-Fezans in sod. (2003) in Toumbakari in sod. (2005). Glede na strukturo zidov so primerljivi z mojimi zidovi. Taissos in Vintzileou sta preiskovala tudi zidarske zveze. Pri vezniški zvezi so zidovi v poprečju za 65 % slabše trdnosti kot naši preizkušanci, pri smerniški pa za 76 %. Naj omenim, da se je pri njunih priskavah pokazala očitna razlika tlačne trdnosti pri različnih zidarskih zvezah. Glede na zvezo brez veznikov je imel zid z vezniki za povprečno 45 % večjo tlačno trdnost. Pri ostalih raziskovalcih (Miltiadou-Fezans in sod. (2003), Toumbakari in sod. (2005)) so v povprečju za 68% nižje vrednosti tlačne trdnosti od naših preizkušancev.

Preglednica 26: Tlačne trdnosti kamnitih zidov grških raziskovalcev

Raziskovalci		Struktura oz. morfologija	f_{Mc}	E_M	ε_v	
			[MPa]	[MPa]	[%o]	
Vintzileou in Taissos, (1995)	1	Troslojni kamniti zid, laboratorijske preiskave $t_w = 40$ cm, $t_i = 14$ cm	Z vezniki	2,10	7000	1,04
	2		Z vezniki	2,40	5000	1,41
	3		Brez veznikov	1,30	2706	-
	4		Brez veznikov	1,60	4442	0,80
	5		Brez veznikov	1,70	5670	2,80
	6		Brez veznikov	1,35	5625	0,58
Miltiadou-Fezans in sod. (2003)	1	Troslojni kamniti zid, laboratorijske preiskave $t_w = 45$ cm		1,82	1000	-
	2			1,74	1440	1,60
	3			2,26	1500	2,25
Toumbakari in sod. (2005)	BC1	Troslojni kamniti zid, laboratorijske preiskave, $t_w = 40$ cm, $t_i = 14$ cm,		-	2240	-
	BC2			2,41	1560	3,12
	BC3			2,09	1400	1,85
	BC4			2,18	1040	2,34
	BC5			2,28	1170	2,31
	SC1			2,02	1620	1,42
	SC2			2,07	1560	1,65
	SC3			2,65	1190	1,73
	SC4			2,71	1010	2,11

10.2 Deformacijske lastnosti zidovja

V naslednji preglednici so zbrani moduli elastičnosti naših zidov ter vrednosti, pridobljenih na osnovi drugih testov. Za primerjavo sem dodal še vrednost modula elastičnosti iz pravilnika NTC08. Če pogledamo naše zidove, vidimo, da je nizek zid z vezniško zidarsko zvezo za 32 % bolj deformabilen od nizkega zidu s smerniško zidarsko zvezo. Pri visokih zidovih je podobna deformabilnost (33 %). Pri zidovih višjih za 50 % je zid s smerniško zidarsko zvezo 28 % bolj deformabilen, podobno tudi pri zidu z vezniško zidarsko zvezo, kjer je razlika 29 %. Pri tem moram poudariti, da so ta opažanja samo na majhni populaciji vzorcev, tako da jih ne moremo statistično obravnavati.

V primerjavi s pravilnikom so vrednosti nizke. V primerjavi z raziskovalci pa so vrednosti deformacijskih konstant dokaj podobne.

Preglednica 27: Primerjava vrednosti modula elastičnosti

Vrsta zidu	Laboratorijske preiskave		Avtorji			
	E (MPa)	Poisson k.	NTC08 (MPa)	Tomažević (1996) (MPa)	Valluzzi in sod. (2004) (MPa)	Sorour (2010) (MPa)
Nizek zid vezniška zveza	523	0,15	2400	200	1857	1600
Nizek zid smerniška zveza	1542	0,19				
Visok zid vezniška zveza	741	0,46	3200	1000		3500
Visok zid smerniška zveza	1106	0,17				

11.0 ZAKLJUČEK

Da bi raziskali vpliv zidarskih zvez na tlačno in strižno nosilnost zidu, smo opravili veliko laboratorijskih preiskav. Moja naloga je obsegala izdelavo preizkušancev, preiskave mehanskih lastnosti vgrajenih materialov in tlačne preiskave zidov. Naloga je bila kompleksna, zato se jo je bilo treba lotiti sistematično. Izdelati je bilo treba 18 vzorcev z dvema zidarskima zvezama. Prva polovica je bila sezidana z vezniško zidarsko zvezo, druga polovica pa brez vezniške povezave med zunanjimi sloji. Vsak vzorec je bil vpet med armiranobetonskim nosilcem in vencem. Tak sistem je bil namenjen varnemu in stabilnemu transportu, pri preizkušanju pa je služil, za vpenjanje v preizkuševalno napravo in za enakomeren raznos obtežbe.

Najprej smo zabetonirali nosilce in pri tem vsakemu nosilcu vgradili štiri navojne palice za vpetje zidu v sistem. Po izbiri izvajalca za zidanje zidov, smo začeli zidati zidke. Med zidanjem sem preiskoval konsistenco malte. Konsistenco malt sem spremljal tudi v kasnejših fazah izdelave, pri grobem in finem ometu. Povprečni razlez malte za zidanje je bil 116 mm, za grobi omet 145 mm ter 143 mm za fini omet. Zidanju je sledilo nanašanje grobega ometa, nato betoniranje vencev in nazadnje še fini omet.

Analize trdnosti malte za zidanje pri starosti 90 dni so pokazale, da je tlačna trdnost malte 2,09 MPa, torej v območju trdnosti za zgodovinske malte. Malta za grobi omet je po 28 dneh starosti dosegla 1,16 MPa, malta za fini omet pa 1,08 MPa. Pri preiskavi kamna sem opravil upogibne in tlačne preizkuse. Povprečna upogibna trdnost kamna je 24,2 MPa, povprečna tlačna trdnost pa znaša 171,5 MPa. Kamnu sem izmeril tudi vpojnost, v povprečju je znašala 0,1763 %. Začetno krčenje apnene malte za zidanje je bilo dolgotrajnejše in se je ustavilo po 83 dneh pri vrednosti 0,266 %. Začetno krčenje malte za grobi omet se je ustavilo po 21 dneh, pri vrednosti 0,1875 %. Pri preiskavi trdnosti stika z metodo Bond wrench je povprečna trdnost znašala 0,03 MPa. Pri tem je treba omeniti, da smo za potrebe teh preiskav, vzeli dvojice (dva kamna povezana z malto) iz porušenih zidov (po tlačnih preiskavah zidov).

Prvotno načrtani plan tlačnih preiskav kamnitih zidov se nam je na začetku izjalovil zaradi tehničnih težav. Za tlačne preizkuse smo določili le dva zidka, dimenzij 100/40/100 cm z različnima zidarskima zvezama. Pri prvem preizkusu je prišlo do koncentrirane obtežbe, zato smo morali poskus ponoviti z drugo prešo. Za boljši raznos smo uporabili jekleno prečko, ki sem jo sprojektiral za potrebe strižnih preiskav zidov. Pri obeh tlačnih testih na nizkih zidkih s porušitvijo nismo bili zadovoljni, kajti zidka sta kljub veliki razpokanosti ostala cela. V grafikonih razmerja med napetostjo in deformacijami je nastal zelo majhen plato, kjer naj bi se deformacije povečevale brez naraščanja napetosti. Vzrok temu je tudi za malenkost premajhna kapaciteta preše. Tlačne preizkuse smo nato nadaljevali z dvema visokima zidoma (100/40/150 cm). Pri teh dveh tlačnih preizkusih je porušitev potekala normalno.

Preiskave so pokazale, da zidarske zveze ne vplivajo na tlačno trdnost zidu. Razlika med zidoma je bila majhna. Pri nizkih zidovih je razlike 0,2 %, pri visokih zidovih 1,7 %. Je pa tlačna trdnost pri višjih zidovih za 16,5 % nižja od nizkih zidov. Tlačna trdnost zidov s smerniško zidarsko zvezo je ne glede na višino za 1 % višja, kot zidovi z vezniško zidarsko zvezo. Pričakovali smo, da bodo zidovi z vezniško zidarsko več nosili, preiskave pa so pokazale drugače.

V poglavju »Analitični del« sem analiziral enačbi za trdnost večslojnega zidu. Prva enačba, (11) je pokazala veliko napak, saj se je tlačna trdnost z višanjem zidu povečevala, z boljšo obdelavo kamna in z večanjem debeline zunanjih zidov pa se je celo zmanjševala. V nadaljnjih raziskavah bo treba enačbo še nekoliko popraviti, da bodo rezultati bolj realni. Pri drugi enačbi (18) sta glavni neznanki tlačna trdnost zunanje plasti zidu in tlačna trdnost jedra. Ti dve vrednosti lahko dobimo z in-situ preiskavami ali pa si pomagamo z drugimi enačbami. V mojem primeru se je najbolje izkazala kombinacija enačbe (18) po Bindi in enačbe (8) za trdnost enoslojnega zidu po Mann-u (1983). Tlačna trdnost jedra je bila pridobljena z laboratorijskimi preiskavami in je v povprečju znašala 0,9 MPa. Pri razvijanju tega analitičnega modela bo potrebno razviti še računске izraze za posamezne sloje zidu ter za medsebojno interakcijo posameznih slojev. Potem bi omenjena enačba, lahko podala bolj realne rezultate, uporabne tudi za prakso.

VIRI

Beg, D. (ur.), Pogačnik, A (ur.). 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po Evrokod standardih. Ljubljana. Inženirska zbornica Slovenije: 1077 str.

Berndt, E. 1996. Zur Druck - und Schubfestigkeit von Mauerwerk - experimentell nachgewiesen an Strukturen aus Elbesandstein. Bautechnik: 222-234.

Bosiljkov, V. 1996. Modeliranje mehanskih lastnosti zidov. Magistrska naloga. Ljubljana, UL FGG (samozaložba V. Bosiljkov): 196 str.

Bosiljkov, V. 2000. Eksperimentalne in računske raziskave vpliva modificiranih malt na mehanske lastnosti opečne zidovine. Doktorska disertacija. UL FGG (samozaložba V. Bosiljkov): 314 str.

Bosiljkov, V., Tomaževič, M., Bohinc, U., Leskovar, I. 2004. On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings. Deliverable D10.2 & 10.4, Report on the evaluation at pilot sites (Report for owners of historic buildings) : pilot site: Pišce / Slovenia : revised report. Ljubljana: Zavod za gradbeništvo Slovenije: 178 str.

Bosiljkov, V., Kržan, M. 2012. Deliverable D15 Results of laboratory and in-situ tests on masonry properties and tables with mechanical parameters to be adopted in numerical modelling. Part of the report related to State of the Art: loč. pag.

Bošnjak, S., Sever, A. 1982. Tehnologija delovnih procesov 1 gradnja. Ljubljana. Tehnična založba Slovenije: 207 str.

Binda, L., Pina-Henriques, J., Anzani, A., Fontana, A. and Lourenco, PB. 2006. A contribution for the understanding of load-transfer mechanisms in multi-leaf masonry walls: Testing and modelling, Engineering Structures 28: 1132-1148.

Cotič, P. 2010. Eksperimentalno podprta parametrična nelinearna seizmična analiza kamnite zidane stavbe. Diplomaska naloga. Ljubljana, UL FGG (samozaložba P. Cotič): 117 str.

CSA Standard S304.1-94, 1994. Masonry design for buildings (Limit States Design), Canadian Standards Association, Rexdale, Ont: loč. pag.

Deu, Ž. 2004. Obnova stanovanjskih stavb na slovenskem podeželju. Ljubljana, Kmečki glas: 277 str.

Golob, D. 2007. Vpliv vrste polimerne disperzije na mehanske in fizikalne lastnosti sanacijskih malt in betonov. Diplomaska naloga. Ljubljana, UL FGG (samozaložba D. Golob): 69 str.

Gostič, S., Bosiljkov, V., Jarc Simonič, M. 2012. In-situ testing of brick masonry walls strengthened with CFRP fabric. 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: 8 str.

Huster, U. 2000. Tragverhalten von einschaligem Natursteinmauerwerk unter zentrischer Druckbeanspruchung. Entwicklung und Anwendung eines Finite-Elemente-Programmes. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs, Kassel University Press GmbH, Kassel (Selbstverlag U. Huster): 177 str.

Juvanec, B. 2005. Kamen na kamen. Ljubljana, Pleško: 140 str.

Khoo, C.L. 1972. A Failure Criterion for Brickwork in Axial Compression, Thesis presented to Univ. of Edinburgh, at Edinburgh, Scotland: loč. pag.

Lourenco, P.B. 2012. Non-linear numerical modelling of masonry, Part I: Masonry Behavior and Modeling (invited lecture), 15th IBMAC, Florianopolis – Brazil, June 3-6, 2012: loč. pag.

Mann, W. 1983. Zum Tragverhalten von Mauerwerk aus Natursteinen, Mauerwerk-Kalendar, Verlag Ernest & Sohn, Berlin: loč. pag.

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

NTC 2008. Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 14 gennaio 2008, Suppl. ord. n° 30 alla G.U. n. 29 del 4/02/2008. - Sections extracted from the commentary to Italian National Technical Code: loč.pag.

Peulić, Đ. 1976. Konstruktivni elementi zgrada. Zagreb, Oour izdavačka djelatnost: 391str.

P.I.E.T. 70 1971. "Obras de Fábrica. Prescripciones del Instituto Eduardo Torroja". Consejo Superior de Investigacioens Científicas. Madrid, 1971: loč. pag.

Renčelj, S., Lah, L. 2008. Kraška hiša in arhitektura krasa – med očarljivostjo in vsakdanom. Koper, Založba Libris: 230 str.

Rots, J.G. 1991. Numerical simulation of cracking in structural masonry. *Heron* 36, 2: 49-63.

Roque, J.C.A. 2002. Reabilitação estrutural de paredes antigas de alvenaria. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil. Escola de Engenharia da Universidade do Minho (só editor J.C.A. Roque): 246 str.

SIST EN 1996-1-1: 2006. Evrokod 6: Projektiranje zidanih konstrukcij -1-1. del: Splošno – Pravila za armirano in nearmirano zidovje.

Sabha, A., Schöne I. 1994. Untersuchungen zum Tragverhalten von Mauerwerk aus Elbesandstein, *Bautechnik*, Heft 3, Vol. 71: loč. pag.

Elmshawī, A., Shrive, N., Duchesne, D., Paquette, J., Mufti, A., Jaeger, L. 2011. Elastic Moduli Of Stone Masonry Based On Static And Dynamic Tests. Minneapolis, NAMC: 11 str.

Sorour, M. 2010. Characterization and Repair of Historic Stone Masonry Structures. PhD Thesis, The University of Calgary, AB (samozaložba M. Sorour): loč. pag.

Syrmakezis, C.A., Chronopoulos, M.P. and Sophocleous, A.A. 1995. Structural analysis methodology for historical buildings, *Transactions on the Built Environment* vol 15: 10 str.

Tassios, T. 2004. Recupero di murature tri-strato, "Attualità della sperimentazione per la conservazione dei materiali e delle strutture", Primo Seminario CIAS – Maggio 1991 (<http://www.4emme.it/>) (Pridobljeno 22. 11. 2012.).

Tomažević, M., Sheppard, P. 1982. The strengthening of stone-masonry buildings for revitalization in seismic regions. V: Proc. 7th European Conf. on Earthquake Eng., Athens, Vol.5: 275-282.

Tomažević, M., Aničić, D. 1989. Research, technology and practice in evaluating, strengthening and retrofitting masonry buildings: Some Yugoslavia experiences, Proc. Int. Seminar on Evaluating, Strengthening and Retrofitting Masonry Buildings, Arlington, USA: loč. pag.

Tomažević, M. 1996. Strengthening of Old Masonry Houses for Seismic Loads, Post-earthquake Rehabilitation and Reconstruction. Elsevier Science: loč. pag.

Tomažević, M. 2011. Seismic resistance of masonry buildings in historic urban and rural nuclei : lessons learned in Slovenia. *Int. j. archit. herit.* 5, 4-5: 436-465.

Tomažević, M. 2000. "Seismic Redesign of Existing Stone-Masonry Buildings," *European Earthquake Engineering* 3: 59-66.

Tomažević, M. 2009a. Potresno odporne zidane stavbe. Ljubljana, Tehnis:301 str.

Tomažević, M. 2009b. Shear Resistance of Masonry Walls and Eurocode 6: Shear versus Tensile Strength of Masonry. *Materials and Structures* 42, 7: 889-907.

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

Turnšek, V., Terčelj, S., Sheppard, P., Tomažević, M., 1978. The seismic resistance of stone-masonry walls and buildings. V: *Proc. 6th European Conf. on Earthquake Eng., Dubrovnik, Vol.3, Paper 32*: 255-262.

Uranjek, M., Bosiljkov, V., Žarnić, R. and Bokan-Bosiljkov V. 2012. In situ tests and seismic assessment of a stone-masonry building. *Mat. struct.* 45, 6: 861-879.

Uranjek, M. 2011. Propadanje in trajnostna obnova ovoja stavbne dediščine. Dokt. dis. Ljubljana, UL, FGG (samozaložba M. Uranjek): 261 str.

Valluzzi, M., Porto, F., Modena, C. 2004. Behavior and Modeling of Strengthened Three-Leaf Stone Masonry Walls. *Materials and Structures.* 37, 3: 184-192.

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

Žganje apna. 2012.

<http://www.gosavstvo.si/index.php/zganje-apna/2010/08/> (Pridobljeno 15. 9. 2012.)

Apnica. 2012.

<http://www.beljenje.com/index.php/postopek> (Pridobljeno 15. 9. 2012.)

Vintzileou. 2012.

ftp://ftp.stru.polimi.it/incoming/Chesi/Dott_CBA/Vintzileou/MECHANICS%20OF%20MASONRY.pdf (Pridobljeno 19. 11. 2012.)