

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:

Bregar, G. 2012. In-situ določanje vpliva vlage in propadanja materiala na mehanske lastnosti zidovine. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Bosiljkov, V., somentorica Kržan, M.): 68 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:

Bregar, G. 2012. In-situ določanje vpliva vlage in propadanja materiala na mehanske lastnosti zidovine. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bosiljkov, V., co-supervisor Kržan, M.): 68 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

**VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
SMER OPERATIVNO
GRADBENIŠTVO**

Kandidat:

GAŠPER BREGAR

**IN-SITU DOLOČANJE VPLIVA VLAGE IN
PROPADANJA MATERIALA NA MEHANSKE
LASTNOSTI ZIDOVINE**

Diplomska naloga št.: 461/SOG

**IN-SITU EVALUATION OF THE INFLUENCE OF
MOISTURE AND DECAY ON MECHANICAL
PROPERTIES OF THE MASONRY**

Graduation thesis No.: 461/SOG

Mentor:

izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov

Predsednik komisije:

doc. dr. Tomo Cerovšek

Somentorica:

asist. Meta Kržan

Član komisije:

doc. dr. Tomaž Maher

doc. dr. Živa Kristl

Ljubljana, 29. 06. 2012

POPRAVKI

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Gašper Bregar izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom: »In-situ določanje vpliva vlage in propadanja materiala na mehanske lastnosti zidovine«.

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

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

Ljubljana, 1.6.2012

Gašper Bregar

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	692.2:699.8(043.2)
Avtor:	Gašper Bregar
Mentor:	Vlatko Bosiljkov, doc. dr.
Somentorica:	Meta Kržan, univ. dipl. ing. gr.
Naslov:	In-situ določanje vpliva vlage in propadanja materiala na mehanske lastnosti zidovine
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – Visokošolski strokovni študij
Obseg in oprema:	68 str., 19 pregl., 52 sl.
Ključne besede:	Zidovina, opeka, mehanske lastnosti, prisotnost vlage, propadanje materiala

Izveleček

V diplomski nalogi smo opisali eksperimentalno analizo, izvedeno na opečnati zidovini in njenih konstituentih objekta Kolizej v Ljubljani. Ugotavljali smo, kakšen in kolikšen vpliv imata vlaga in propadanje materiala na mehanske lastnosti zidovine, saj je na objektu zaradi različne vsebnosti vlage material različno propadel. V prvem delu diplomske naloge je opisano stanje, v kakršnem je bila konstrukcija v zadnjem obdobju obstoja. Opisani so tudi postopki pregleda konstrukcije in stopnje poznavanja konstrukcije po standardu Evrokod 8-3.

Za potrebe ugotavljanja mehanskih lastnosti zidovine smo izvedli dva različna in-situ preizkusa ter več različnih laboratorijskih preiskav na odvzetih vzorcih. In-situ smo izvedli strižna testa zidov na dveh lokacijah ter strižne teste stikov med opeko in malto na petnajstih lokacijah objekta. V laboratoriju smo izvedli enosne tlačne preizkuse opečnih prizem ter vzorcev malte, enosna tlačna preizkusa na zidkih, vzeti iz objekta, cepilne teste na vzorcih opeke ter še nekaj manjših testov. Z razdelitvijo rezultatov posameznih preiskav po različnih mestih odvzema, po vsebnosti vlage ter po stopnji propadlosti smo pokazali vpliv vlage in z njo pospešenega propadanja, saj so mehanske karakteristike zidovine, na mestih, kjer je imela vlaga dolgotrajen vpliv, tudi do dvakrat slabše.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 692.2:699.8(043.2)
Author: Gašper Bregar
Mentor: Assist. Prof. Vlatko Bosiljkov, Ph. D.
Comentor: Meta Kržan, B. Sc.
Title: In-situ evaluation of the influence of moisture and decay on mechanical properties of the masonry
Documenttype: GraduationThesis – Higher professional studies
Scopeandtools: 68 p., 19 tab., 52 fig.
Keywords: Masonry, brick, mechanical properties, the presence of moisture, degradation of materials

Abstract

In this thesis the results of experimental tests carried out on the masonry of the Kolizej Palace in Ljubljana are presented. Main scope of this research was the evaluation of the influence of the moisture and material degradation on the mechanical properties of built-in masonry. In the first part of the thesis the history and the state of the building prior demolition are presented. Within this scope levels of knowledge of the structure according to Eurocode 8-3 are briefly presented as well.

For the purpose of the evaluation of the mechanical properties of the masonry numerous in-situ and laboratory tests were performed on masonry assemblages and its constituents. In-situ shear tests were carried at two positions while shove tests were performed at 15 different locations. Laboratory tests encompass two tests on the samples taken from the building prior its demolition, compressive tests on brick and mortar samples, splitting tensile tests and numerous tests for the determination of the moisture content of built material. All the collected results are interpreted depending from the moisture content and decay of the material. Due to long term influence of the moisture on material degradation, at some spots in the basement floor the mechanical properties are twice lower in comparison to the properties of the same masonry in the upper floors.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se zahvaljujem mentorju doc. dr. Vlatku Bosiljkov, somentorici Meti Kržan ter Davidu Antolincu in Franciju Čeponu za tehnično pomoč pri preiskavah.

Še posebej pa se zahvaljujem moji Anji, ki mi je stala ob strani vsa leta študija.

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 v okviru projekta: Optimizirani pristop k načrtovanju trajnostnih ukrepov za ohranjanje objektov zgodovinske in druge stavbne dediščine, L2-0873, naročnika: Ministrstvo za znanost in tehnologijo.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
2	DIAGNOSTIKA STANJA KONSTRUKCIJE PO VELJAVNEM STANDARDU.....	3
2.1	Povzetek EC 8-3	3
2.1.1	Stopnje poznavanja konstrukcije in faktorji zaupanja	3
3	KOLIZEJ V LJUBLJANI – OPIS OBJEKTA IN STANJA.....	6
3.1	Zgodovina in opis objekta	6
3.2	Pregledna mesta	7
3.3	Stanje temeljev-povzeto po poročilu ZRMK-ja (Bergant, 1995)	12
3.4	Zidovje in stebri	12
3.5	Opeka	15
3.6	Malta	16
3.7	Ostrešje	18
3.8	Nestrokovni posegi	18
3.8.1	Delna porušitev objekta.....	18
3.8.2	Hydroizoliranje notranjih stebrov in sten v kleti.....	19
3.9	Povzetek dosedanjih poročil o stanju objekta	20
3.9.1	Opis vidnejših poškodb zidovine in nosilne konstrukcije.....	20
3.9.2	Rezultati preiskav opeke-povzeto po poročilu FGG-ja (Bosiljkov in sod., 2008).....	20
3.9.3	Rezultati preiskav malte (Bosiljkov in sod., 2008)	22
3.9.4	Ocena mehanskih lastnosti opečne zidovine (Bosiljkov in sod., 2008)	22
4	METODOLOGIJA DOLOČANJA STANJA KONSTRUKCIJE	24
4.1	Opis preiskav	24
4.1.1	Opis stanja v Kolizeju tekom preiskav.....	24
4.2	Tlačna trdnost opeke (enoosni tlačni preskus opečnih prizem).....	25
4.3	Cepilna natezna trdnost.....	26
4.4	Vodovpojnost opeke.....	27
4.5	Določanje vsebnosti vlage v opeki.....	28
4.6	Tlačna trdnost malte (enoosni tlačni preizkus)	28
4.7	Sejalna analiza malte	29
4.8	Modul elastičnosti malte.....	30
4.9	Strižna trdnost stika med opeko in malto («Shove testi»)	31
4.9.1	Potek preiskave	31
4.10	Strižna trdnost opečnate zidovine («Shear test»).....	32

4.10.1	Potek preiskave	33
4.10.2	Izvedenotenje mehanskih lastnosti iz pridobljenih podatkov.....	34
4.11	Tlačna trdnost opečnate zidovine (tlačni preizkus)	37
4.11.1	Priprave za preiskavo	38
5	REZULTATI PREISKAV	41
5.1	Tlačni preizkus opečnatih prizem	41
5.2	Cepilna natezna trdnost opeke	43
5.3	Vodovpojnost opeke.....	44
5.4	Tlačni preizkus malte	45
5.4.1	Modul elastičnosti malte (E_m)	46
5.5	Sejalna analiza maltnih mešanic	47
5.6	Strižni test stika med opeko in malto («In-situ shove test«).....	47
5.6.1	Rezultati testov za klet.....	48
5.6.2	Rezultati testov za pritličje.....	49
5.6.3	Rezultati testov za 1. nadstropje.....	50
5.7	Strižna trdnost opečnatega zidovja («In-situ shear test«).....	51
5.7.1	Rezultati testa v kleti	51
5.7.2	Rezultati testa v pritličju	55
5.8	Tlačna trdnost opečnatih zidkov	59
5.8.1	Rezultati za ZID 1	59
5.8.2	Rezultati za ZID 2	61
6	SKLEP	64
	VIRI	67

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Vlažnost opečnatega zdroba na posameznih mestih pregleda (Bosiljkov in sod., 2008).....	21
Preglednica 2: Vodovpojnost zidakov na posameznih mestih pregleda (Bosiljkov in sod., 2008) 21	
Preglednica 3: Rezultati preiskav tlačne trdnosti opeke (Bosiljkov in sod., 2008)	21
Preglednica 4: Pregled mehanskih lastnosti za opečno zidovino (Bosiljkov in sod., 2008)	23
Preglednica 5: Ocenjene mehanske lastnosti opečne zidovine Kolizeja (Bosiljkov in sod., 2008) 23	
Preglednica 6: Ocenjene mehanske lastnosti opečnih zidov in opečnih stebrov (Lutman in Weiss, 2004).....	23
Preglednica 7: Karakteristike opeke.....	41
Preglednica 8: Prikaz rezultatov cepilne natezne trdnosti opeke.....	44
Preglednica 9: Vodovpojnost opeke.....	45
Preglednica 10: Tlačna trdnost malte.....	46
Preglednica 11: Modul elastičnosti malte.....	47
Preglednica 12: Rezultati strižnih preizkusov stikov med opeko in malto v kleti	48
Preglednica 13: Rezultati strižnih preizkusov stikov med opeko in malto v pritličju.....	50
Preglednica 14: Rezultati strižnih preizkusov stikov med opeko in malto v 1. nadstropju	51
Preglednica 15: Rezultati karakterističnih mejnih stanj za klet-spodnji in zgornji del zidu	53
Preglednica 16: Rezultati strižnega preizkusa zidu v kleti-vrednosti idealizacije ter natezna trdnost zidu	53
Preglednica 17: Rezultati karakterističnih mejnih stanj za pritličje-spodnji in zgornji del	57
Preglednica 18: Rezultati strižnega preizkusa za pritličje-vrednosti idealizacije ter natezna trdnost zidu	57
Preglednica 19: Primerjava rezultatov za ZID 1 in ZID 2 z drugimi rezultati.....	63

KAZALO SLIK

Slika 1: Severna in zahodna fasada Kolizeja – pogled iz Gosposvedske ulice (Žiga, 2006).....	7
Slika 2: Vzhodna fasada pred porušitvijo leta 2011.....	7
Slika 3: Posledice večletnega navlaževanja zidu.....	13
Slika 4: Posledica kapilarnega dviga vode (Bosiljkov in sod., 2008).....	13
Slika 5: Cvetenje in izločanje soli iz vgrajenih materialov	14
Slika 6: Stanje lesenega stropa v 1. nadstropju	14
Slika 7: Izgled in primerjava propadanja med svetlo in temno opeko na fasadnem zidu.....	15
Slika 8: Vrste opeke, uporabljene na objektu Kolizeja	15
Slika 9: Notranjost zidu je povsem navlažena, na zunanji strani je zid suh	16
Slika 10: Nadmerna zrna v horizontalni spojnici parapetnega zidu	17
Slika 11: Erozijski zaključni fugi spojnici na fasadnem zidu.....	17
Slika 12: Razpokanost maltne spojnice, izguba adhezije	18
Slika 13: Delna porušitev leta 1995 (Bergant, 1995)	19
Slika 14: Prikaz dviga kapilarne vode iz temeljnih tal	19
Slika 15: Primer sobe, kjer smo izvajali preizkus	24
Slika 16: Prikaz postavitve deformetrov na opečnih prizmah	25
Slika 17: Določevanje cepilne natezne trdnosti na opeki (Schubert, 1991).....	26
Slika 18: Opeka med in po obremenitvi	27
Slika 19: Prikaz odvzemanja vzorca za ugotavljanje vlažnosti opeke.....	28
Slika 20: Prikaz priprave in izvedba testa tlačne trdnosti malte	29
Slika 21: Prikaz krivulje zrnivosti za peske in agregate	30
Slika 22: Prikaz pravilne priprave za izvedbo testa.....	32
Slika 23: Lokacija izvedbe strižnih testov in prikaz priprave na strižni test.....	33
Slika 24: Postavitev merskih mest za strižni test.....	33
Slika 25: Prikaz izvajanja strižnega testa	34
Slika 26: Prikaz delovnega diagrama z eksperimentalno ovojnico.....	35
Slika 27: Histerezna ovojnica in njena idealizacija (Uranjek, 2011)	36
Slika 28: Lokacija odvzema vzorcev za tlačni preizkus.....	37
Slika 29: Prikaz namestitve preizkušanca v stiskalnico.....	38
Slika 30: Shematični prikaz merilnih instrumentov na preizkušancu ZID 1	39
Slika 31: Delovni diagram napetost-deformacija za opečne prizme.....	41
Slika 32: Porušitev opečne prizme P1	42
Slika 33: Porušitev opečne prizme P2	42
Slika 34: Porušitev opečne prizme P3	43
Slika 35: Prikaz krivulje zrnivosti za apneno maltno mešanico	47

Slika 36: Prikaz delovnih diagramov za strižne preizkuse stikov med opeko in malto v kleti.....	49
Slika 37: Prikaz delovnih diagramov za strižne preizkuse stikov med opeko in malto v pritličju	50
Slika 38: Prikaz delovnih diagramov za hitri strižni test v 1. nadstropju.....	51
Slika 39: Prikaz delovnega diagrama za strižni test-klet spodnji del	52
Slika 40: Prikaz delovnega diagrama za strižni test-klet zgornji del.....	52
Slika 41: Shema razpok in porušitev na preizkušancu v kleti.....	54
Slika 42: Prikaz izvajanja testa v kleti.....	55
Slika 43: Prikaz delovnega diagrama za strižni test pritličje-spodnji del	56
Slika 44: Prikaz delovnega diagrama za strižni test pritličje-zgornji del.....	56
Slika 45: Shema razpok in porušitev na preizkušancu v pritličju	58
Slika 46: Zid v pritličju po končanem testu	58
Slika 47: ZID 1 pred obremenjevanjem	59
Slika 48: Graf napetost-deformacije za ZID 1	60
Slika 49: Shema razpok za ZID 1	60
Slika 50: Prikaz razpokanosti na ZID-u 2 pred obremenitvijo	61
Slika 51: Delovni diagram za ZID 2.....	62
Slika 52: Shema razpok za ZID 2.....	62

1 UVOD

Zidane stavbe predstavljajo dobršen del vseh grajenih objektov v Sloveniji. Med njimi je veliko opečnatih zgradb, ki so zidane s polno opeko. V današnjih časih tovrstna gradnja ni več pogosta, saj so pri nas opečno gradnjo s polnimi opekami izpodrinili opečni votlaki. V današnjih časih težimo k ohranitvi določenih starih gradenj, saj kot kulturna dediščina predstavljajo spomenike gradbene in arhitekturne zgodovine.

Da omogočimo ohranitev in varno uporabo starih objektov, je potrebno izvesti vrsto strokovnih analiz. Mnoge objekte je zaradi dotrajanosti zaradi časa in drugih vzrokov potrebno primerno ojačiti. Ena izmed analiz je presoja stanja nosilne konstrukcije objekta, saj morajo objekti po predpisih zadostovati zahtevam glede mehanske odpornosti in stabilnosti.

Za analizo nosilnosti objekta je potrebno oceniti tudi stanje oziroma dotrajanost konstrukcije. Stanje in primerne materialne karakteristike se določa na podlagi vizualnega pregleda konstrukcijskih elementov, z oceno in primerjavo z mehanskimi karakteristikami podobnih konstrukcij v literaturi in predpisanih standardih ter za najbolj natančno in najbolj varno oceno z in-situ preiskavami konstrukcije ter z laboratorijskimi testi na objektu odvzetih vzorcev.

V svoji diplomski nalogi sem se predvsem posvetil ugotavljanju vpliva vlage in propadanja materiala na mehanske karakteristike zidovine, konkretno na objektu Kolizej v Ljubljani, ki je bil zaradi različno dotrajanih zidov primeren za analizo. Opisano je stanje zidovine, stropov in strehe, kakršno je bilo tik pred poružitvijo leta 2011. Pri določevanju stanja in primerjavi mehanskih karakteristik zidovine Kolizeja, so bile v pomoč analize in ocene dosedanjih preiskav različnih institucij; Zavoda za gradbeništvo Slovenije (Lutman in Weiss, 2004) – v nadaljevanju imenovano kar poročilo ZAG-a; Zavoda za raziskavo materialov in konstrukcij, Ljubljana (Bergant in sod., 1995) – v nadaljevanju poročilo ZRMK-ja, ter poročilo Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani (Bosiljkov in sod., 2008) – v nadaljevanju poročilo FGG.

Da bi prikazali vpliv vlage in propadanje materiala, smo primerjali rezultate mehanskih karakteristik elementov zidovja, ki so bili zaradi večje vsebnosti vlage bolj propadli, s tistimi z manjšim vplivom delovanja vlage. Za določitev mehanskih karakteristik zidovja smo izvedli več in-situ preiskav (na objektu samem) ter preiskav v laboratoriju, in sicer na konstituentih zidov ter na zidovih. Na licu mesta smo izvedli strižna testa, shove teste ter odvzeli vzorca za enoosna tlačna preizkusa na zidkih v laboratoriju UL FGG. Za določitev mehanskih karakteristik posameznih konstituentov zidovine smo v laboratoriju UL FGG izvedli enoosne tlačne preizkuse na opečnatih prizmah in na vzorcih malte, strižne teste stika med opeko in malto ter cepilne teste zidne opeke. Izvedli smo tudi sejnalno analizo maltnih vzorcev ter z analizo večih vzorcev ugotavljali prisotnost vlage na lokacijah, kjer smo izvajali in-situ teste.

Pri analizi objekta je potrebno upoštevati veljavne predpise. V začetnem delu diplome sem zato predstavil metode ocenitve stopnje poznavanja konstrukcije za oceno potresne odpornosti objekta, ki ga predpisuje standard Evrokod 8-3 (SIST EN 1998-3: 2005), ki obravnava analizo obstoječih konstrukcij -v nadaljevanju imenovan EC 8-3. Pri analizi nekaterih mehanskih lastnosti materiala pa smo se posluževali predpisov standarda Evrokod 6 (SIST EN 1996-3: 2006), ki predpisuje pravila za projektiranje zidanih konstrukcij – v nadaljevanju imenovan EC 6. Vendar pa EC 8-3 kot tudi vsi ostali veljavni standardi pri nas ne predpisuje navodil glede upoštevanja vpliva vlage in propadanja materiala na mehanske karakteristike starejše zidovine. Tudi strokovna literatura nima jasnih navodil glede upoštevanja vpliva vlage in propadanja na mehanske karakteristike zidovine, zato lahko trdimo, da je to področje še precej neraziskano.

2 DIAGNOSTIKA STANJA KONSTRUKCIJE PO VELJAVNEM STANDARDU

Kot že rečeno v uvodu, je za analizo konstrukcije potrebnih več kontrol, med njimi je pogosto najbolj merodajna kontrola potresne odpornosti objekta. Za analizo potresne odpornosti obstoječih objektov je poleg ostalih določil Evrokodov 8, evropskih standardov za potresno projektiranje konstrukcij, potrebno upoštevati EC 8-3, ki se nanaša na obstoječe stavbe.

2.1 Povzetek EC 8-3

Standard EC 8-3 se nanaša na oceno potresnega odziva obstoječih stavb in ukrepe za njihovo prenovu.

V njem so navedeni:

- osnovna pravila za oceno potresne odpornosti obstoječih stavb,
- vrste analiz, ki jih lahko uporabljamo,
- opis tehničnih in konstrukcijskih ukrepov, povezanih s prenovu in potresnim utrjevanjem stavb,
- pravila za upoštevanje materialnih in geometrijskih karakteristik

2.1.1 Stopnje poznavanja konstrukcije in faktorji zaupanja

Podatki, ki jih zberemo iz različnih virov, nam služijo kot osnova za analizo potresne odpornosti obstoječih konstrukcij, vključevati morajo:

- razpoložljivo dokumentacijo za obravnavano konstrukcijo,
- ustrezne vire podatkov (sodobni predpisi in standardi),
- področje preiskav in
- v večini primerov tudi in-situ in/ali laboratorijske meritve in teste.

Večji del standarda EC 8-3 opisuje postopek za pridobivanje informacij o konstrukciji, ki se potem uporabijo za računsko analizo stanja. Standard zahteva zbiranje naslednjih osnovnih informacij:

- vrsta konstrukcijskega sistema,
- vrsta temeljev,
- zgradba in lastnosti temeljnih tal,
- geometrija konstrukcije in konstrukcijskih elementov,
- mehanske lastnosti materiala,
- morebitne informacije o projektiranju stavbe (izvedbeni detajli) in
- poškodovanost nosilne konstrukcije.

Glede na količino in kvaliteto podatkov, ki se jih pridobi po zgoraj navedenih navodilih, se določi stopnja poznavanja konstrukcije. Dosežene so lahko tri stopnje poznavanja konstrukcije:

- stopnja KL1- omejeno poznavanje,
- stopnja KL2- normalno poznavanje,
- stopnja KL3- popolno poznavanje.

Za določevanje stopenj poznavanja so določeni trije glavni kriteriji:

- *geometrija*: načrti obstoječe nosilne konstrukcije in tistih nenosilnih elementov, ki lahko vplivajo na potresno varnost,
- *detajli*: poznavanje količine in detajlov armiranja v armirano-betonskih elementih, spojev med jeklenimi elementi, povezave med vertikalno in horizontalno nosilno konstrukcijo objekta, vrste spojníc pri zidanih elementih, ter vrste ojačitev zidanih elementov, če so prisotne,
- *materiali*: mehanske karakteristike vgrajenih materialov, ki prispevajo k nosilnosti.

Ti kriteriji se nato delijo na več podkriterijev, ki predpisujejo stopnjo poznanih informacij. Za nas je najbolj pomembna razdelitev, ki definira poznavanje materialov in vsebuje podpoglavja:

- Porušne in neporušne metode testiranja- neporušne metode se uporabljamo v povezavi s porušnimi metodami, kot dopolnitev le teh.
- Omejene in-situ preiskave- izvaja se jih za dopolnitev že obstoječih elaboratov in preiskav, se pravi takrat, kadar že imamo veliko informacij o karakteristikah materiala.
- Razširjene in-situ preiskave- uporabljajo se takrat, kadar nimamo originalnih podatkov o konstrukciji, kot tudi nimamo informacij o kakršnih koli raziskavah.

Ko pregledamo vse kriterije, določimo stopnjo poznavanja objekta:

Stopnja KL1 – omejeno poznavanje: podatki o geometriji konstrukcije in njenih ključnih elementih se pridobijo z meritvami dimenzij ali iz podatkov projektne dokumentacije. Konstrukcijski detajli niso razvidni iz dokumentov in se lahko predpostavijo v skladu s tipičnim projektiranjem iz časa, ko je bila stavba zgrajena. Prav tako, če razpoložljiva projektna dokumentacija ne vsebuje podatkov o vgrajenih materialih, se lahko uporabijo vrednosti iz ustreznih predpisov iz časa gradnje konstrukcije. Tej stopnji zaupanja pripada faktor $CF_{KL1} = 1,35$.

Stopnja KL2 - normalno poznavanje: podatki o geometriji konstrukcije in njenih elementih se pridobijo s podrobnim merjenjem dimenzij ali pa se za ugotavljanje dimenzij uporabijo obstoječi načrti konstrukcije. Konstrukcijski detajli se ugotovijo z uporabo projektних načrtov za izdelavo

konstrukcije ali z raziskavami na konstrukciji. Pri tem je potrebno pregledati vsaj 50% vseh elementov. Karakteristike uporabljenega materiala se ugotavlja bodisi z uporabo izvornih projektne dokumentacij, bodisi s testiranjem. Če uporabimo testiranje, je potrebno v vsaki etaži testirati vsaj 2 vzorca materiala. Tej stopnji poznavanja konstrukcije pripada faktor zaupanja $CF_{KL2} = 1,20$.

Stopnja KL3 – popolno poznavanje: geometrija konstrukcije in elementov se ugotavlja iz popolne projektne dokumentacije, vendar je priporočljivo, da se podatke potrdi tudi s podrobnimi izmerami na konstrukciji. Iz načrtov so razvidne originalne dimenzije konstrukcije in tudi morebitne kasnejše predelave. Kvaliteta konstrukcijskih detajlov se ugotavlja eksperimentalno, predpisan je pregled vsaj 80% vseh elementov konstrukcije. Lastnosti vgrajenega materiala ugotavljamo tako, da se v vsaki etaži vzame vsaj tri vzorce materiala. Tej stopnji poznavanja konstrukcije pripada faktor zaupanja $CF_{KL3} = 1,00$.

Faktorji zaupanja so bistvenega pomena za določanje nosilnosti posameznih elementov, saj jih izračunamo tako, da srednje vrednosti materialnih karakteristik delimo s faktorji zaupanja in varnostnimi faktorji za material. Slabše poznavanje konstrukcije se odrazi z večanjem faktorja zaupanja, ki zmanjšuje nosilnost elementov.

3 KOLIZEJ V LJUBLJANI – OPIS OBJEKTA IN STANJA

3.1 Zgodovina in opis objekta

Kolizej je zasnoval arhitekt in industrialec Benedikt Withalem. Takratnim oblastem je predlagal, da zgradijo objekte za prehodno nastanitev vojaških enot po cesarstvu Avstroogrsko monarhije. Tako so bili zgrajeni štiri Kolizeji, in sicer dva na Dunaju, eden v Gradcu in eden v Ljubljani. Primarni namen objekta je bila zmožnost nastanitve nekaj tisoč vojakov z njihovo popolno oskrbo (hlevi za konje, skladišča, obrtniške delavnice, sobe). Z izgradnjo novih vojašnic v Ljubljani je objekt izgubil svoj prvotni pomen. Kolizej je kmalu dobil pomen stanovanjsko-poslovnega objekta, saj so v zgradbo nastanili tudi različne trgovine, gostilne, kavarne, jih opremili s plesnimi dvoranami in letnimi vrtovi.

Ljubljanski Kolizej je bil zgrajen dokaj hitro za tiste čase. Temeljni kamen je bil postavljen leta 1845, že leta 1846 je imel na voljo 21 sob ter po eno dvo-, tro-, in šest-sobno stanovanje. Gradnja je potekala do leta 1848. Dokončan Kolizej je obsegal okoli 15.000 bruto kvadratnih metrov površin, imel je 126 sob za vojake, pivnico, kavarno, pekarno, jahalno šolo ter šest dvoran. V kleti je bilo 1156 kvadratnih metrov obokanega prostora, namenjenega za oskrbo vojske. Zgornja tri nadstropja so imela šest dvoran, namenjenih vojakom, in 126 že prej omenjenih sob za častnike. Že prvo leto po izgradnji je objekt utrpel požar, vendar je bil kmalu obnovljen. Doživel je tudi potres leta 1895, vendar podatkov o takratnih poškodbah žal nimamo. Po drugi svetovni vojni se objekta ni več vzdrževalo. Leta 1995 se je delno porušil zaradi nenadzorovanih gradbenih posegov v konstrukcijo (Šuštar, 1996).

Objekt je bil dolg 121,5 m in širok 28,9 m, postavljen je bil v bivšo gramozno jamo, delno je bil točkovno temeljen, delno pa pasovno. Temeljna konstrukcija je bila zidana, delno iz klesanega kamna (temelji obodnih zidov) in delno iz opeke starega formata (temelji stebrov ter notranjih sten). Za vezivo je bila uporabljena apnena malta, ki je služila tudi kot podloga za točkovne temelje. Obodno zidovje je bilo prav tako zidano iz opeke, le severno in južno zidovje je bilo pozidano v kombinaciji s kamnom. V kleti so bili obodni zidovi debeli 1 m, stebri pa so bili kvadratnega prereza širine oziroma dolžine od 0,85 m do 1,10 m. V zgornjih etažah, torej od kleti navzgor, so bile obodne stene objekta debeline 0,65 m. Stropna konstrukcija v kleti je bila tvorjena z lokovjem in oboki iz opeke, v vseh ostalih nadstropjih je bil strop iz lesenih stropnikov. Stropniki so nalegali pravokotno na oboden nosilni zid na eni strani in notranji nosilni zid na drugi strani, premeščali so razpone do 6 m. Notranje stene so bile debeline do 0,4 m in so bile pozidane od pritličja pa vse do podstrešja kontinuirno. Objekt je bil na delu, ki je segal izven osnovne tlorisne oblike objekta, povezan z jeklenimi palicami v prečni smeri (ne po celotni prečni dolžini) in vzdolžni smeri. Te vezi so bile sidrane v obodne nosilne zidove. Protipotresne ojačitve so namestili po velikem potresu leta 1895. Ostrešje je bilo leseno, izdelano po principu trapeznega vešala.

Prvotna zasnova je do porušitve leta 2011 doživela precej sprememb. Zaradi sprememb namembnosti je bilo v vseh etažah dodanih mnogo, predvsem prečnih zidov, nekaj prvotnih pa je bilo porušeni.



Slika 1: Severna in zahodna fasada Kolizeja – pogled iz Gosposvedske ulice (Žiga, 2006)



Slika 2: Vzhodna fasada pred poružitvijo leta 2011

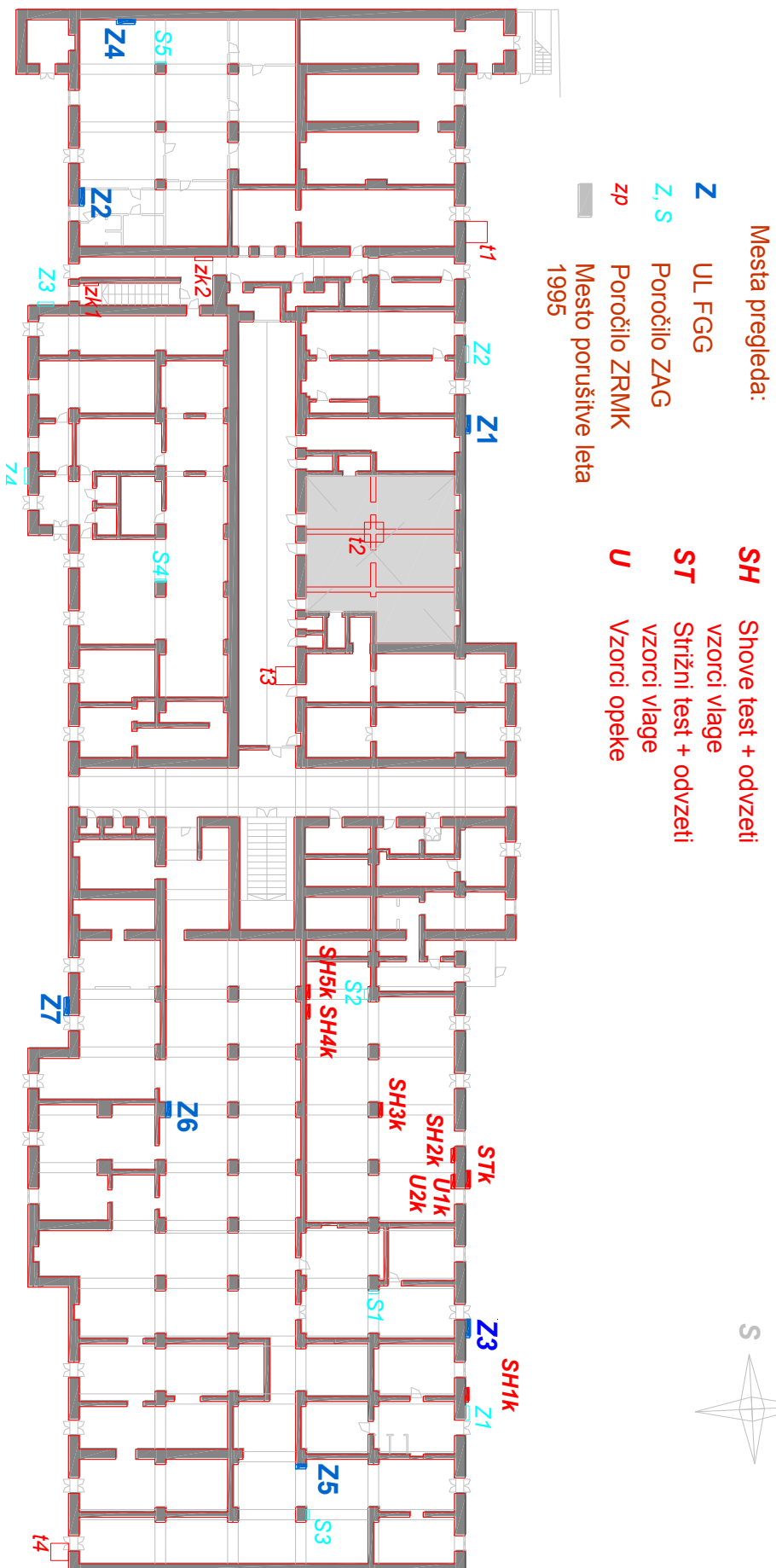
3.2 Pregledna mesta

Ker je bil objekt predviden za rušenje in ker se je že v predhodnih raziskavah pokazal vpliv pospešenega propadanja zidovine zaradi vpliva vlage in vpliva izmenjujočih se ciklov zmrzovanja/tajanja, smo se odločili izkoristiti možnosti ter izvesti tudi nekaj in-situ porušnih preiskav za ugotavljanje vpliva vlage in propadanja materiala na materialne karakteristike zidovine.

Na načrtu prikazujem v različnih nadstropjih pozicije vseh preglednih točk, na katerih smo izvajali teste in pridobili vzorce za preiskave v laboratoriju, same preiskave pa so opisane v naslednjem poglavju. V načrtu so označene tudi situacije preglednih mest raziskav drugih institucij, katerih rezultate sem primerjal z rezultati naših preiskav.

- z označbo SH so označene situacije, kjer smo opravili hitre strižne teste (»shove test«),
- ST predstavlja oznako za mesta, kjer smo izvajali strižne teste zidu (»shear test«) ter odvzeli vzorce za ugotavljanje vlažnosti zidu,
- z oznako U so označena vsa mesta, kjer smo odvzeli vzorce opeke za preiskave v laboratoriju (za tlačno trdnost opečnih prizem, cepilno natezno trdnost opeke...),
- z oznako ZID sta označeni mesti, kjer smo pridobili vzorca za tlačni preizkus,
- s temno modro oznako »Z« so označena mesta odvzema vzorcev FGG-ja leta 2008,
- z oznako »t« so označena mesta izkopa sondažnih jam za potrebe pregleda temeljev ZRMK-ja,
- s svetlo modro barvo so označena mesta odvzema vzorcev ZAG-a.

Situacija mest odvzema vzorcev KLET

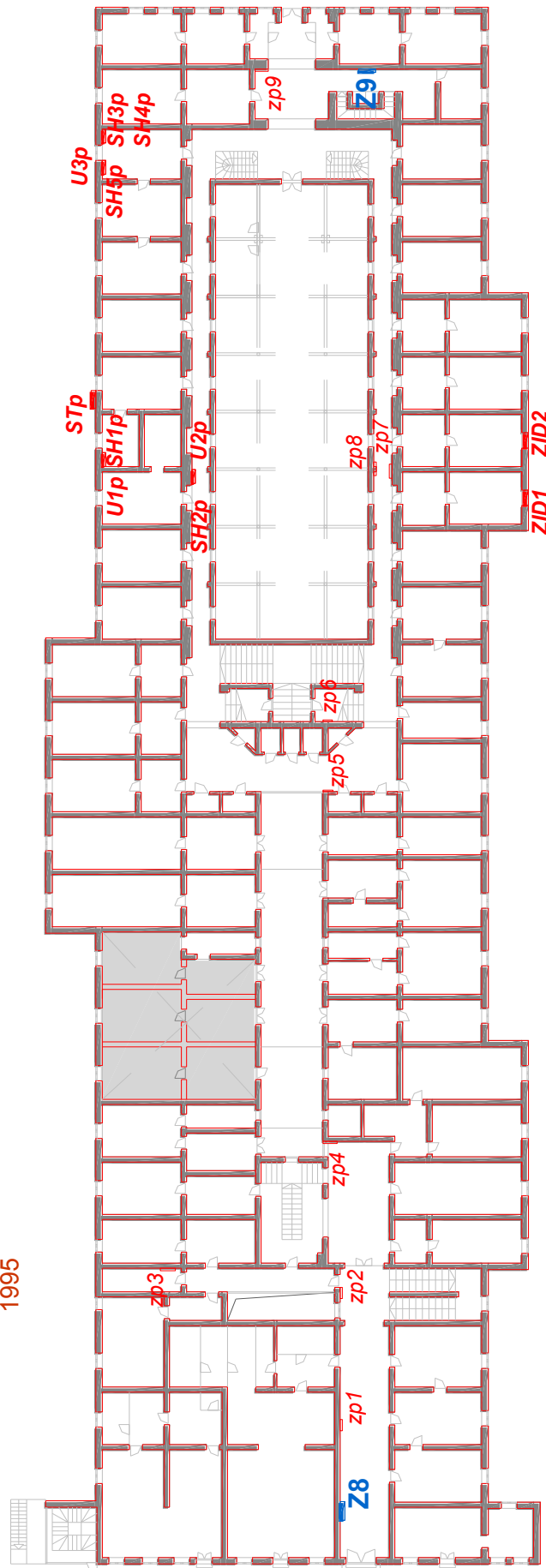


Situacija mest odvzema vzorcev PRITLIČJE

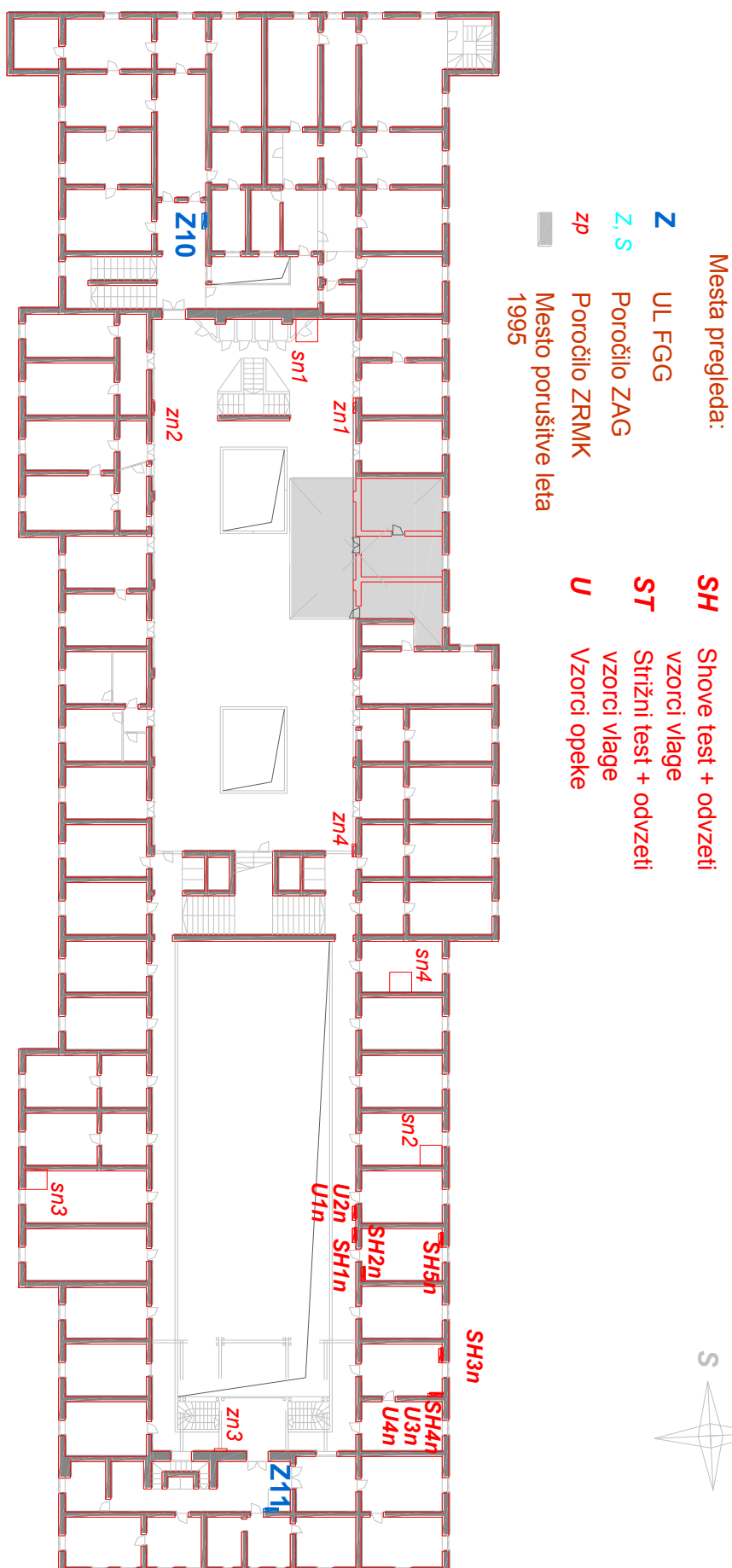
Mesta pregleda:

- Z** UL FGG
- Z, S** Poročilo ZAG
- zp** Poročilo ZRMK
- Mesto porušitve leta 1995

- SH** Shove test + odvzeti vzorci vlage
- ST** Strižni test + odvzeti vzorci vlage
- U** Vzorci opeke



Situacija mest odvzema vzorcev 1.NADSTROPJE



3.3 Stanje temeljev-povzeto po poročilu ZRMK-ja (Bergant, 1995)

Za potrebe pregleda temeljev so leta 1995 izvedli štiri sondažne izkope (Pregledna mesta, str. 7). Ugotovljeno je bilo, da je objekt stal v vkopu, kjer so temeljna tla do globine 7 m prodnata, pod prodrom se nahaja glina z gruščem in prodniki, temu pa sledijo plasti glinastega in meljastega proda. Talna voda je na globini, večji od 10 m.

Temelji obodnih zidov so bili pasovni, globine od 1,4 do 1,7 m, brez razširitve v temeljno peto. Zidani so bili iz klesanega kamna, za vezivo je bila uporabljena apnena malta, ki je služila tudi za podlago temeljev. Ostalo temeljenje je bilo opečnato, pozidano v apneni malti, dimenzij 1,2 x 1,2 m², globine 1,1 m z razširitvijo v temeljno peto. Temelji stebrov so bili točkovni in prav tako sezidani z opeko, bili so močno obremenjeni (750 kN/m²), medtem ko so bili temelji obodnih sten manj obremenjeni (230 kN/m²). Na zunanjih zidovih niso opazili večjih razpok in poškodb zidovine, je pa bilo opaženo nagibanje posameznih zidov.

3.4 Zidovje in stebri

Zidovje je bilo zidano, kot že omenjeno, z opeko starega avstrijskega formata (30 x 15 x 6 cm³), v zidarski zvezi s preklopom po širini zidaka t.i. prečni preklop (Slika 11). Tak način zidave je omogočal hitrejše zidanje, ima pa zidovje zaradi tega nekoliko zmanjšano nosilnost in monolitnost. Debelina vertikalnih in horizontalnih spojníc je močno varirala, in sicer od 4 do 30 mm. Različne debeline spojníc so posledica neenakih dimenzij opeke. Nekateri nosilni zidovi so bili oslabljeni zaradi dimniških tuljav in odtočnih cevi.

Zidovina je bila pred poružitvijo v slabem stanju zaradi številnih poškodb. Poglavitni vzroki poškodb so bili:

- prekomerno navlaževanje zidovine,
- preobremenitev posameznih konstrukcijskih elementov,
- nestrokovni posegi v nosilno konstrukcijo v preteklosti,
- nevzdrževanje objekta.

Zidovje je bilo hudo navlaženo v kletnih prostorih tako na zunanji in notranji strani. Nekateri zidovi so bili z zunanje strani povsem navlaženi, na posameznih delih je fasadni omet že povsem odpadel in so bile vidne posledice večletnega propadanja in navlaževanja tudi na opeki in malti. Na območju vertikalnih žlebov so bile vidne posledice večletnega zamakanja in propadanja zidu. Na nekaterih mestih je bil zid tako poškodovan (vpliv zmrzali), da je odpadala že druga vrsta opek po debelini zidu (Slika 3).



Slika 3: Posledice večletnega navlaževanja zidu

Na kletnem delu je bila zidovina v notranjosti močno navlažena zaradi kapilarnega dviga vode, posledice le tega so bile vidne ne le na stenah, temveč tudi na obokanem stropu (Slika 4). Posledice kapilarnega dviga vode so bile vidne predvsem tam, kjer je bila zidovina z notranje strani vertikalno hidroizolirana.



Slika 4: Posledica kapilarnega dviga vode (Bosiljkov in sod., 2008)

Obodni zid objekta je bil izpostavljen tako kapilarni vlagi kot tudi zamakanju meteorne vode na območju vertikalnih cevi žlebov. Niti zidovje niti stebri niso imeli talne hidroizolacije, posledica močnega kapilarnega dviga vode pa je bila zasičenost skoraj vseh zidnih elementov v kleti.

Na nekaterih elementih v kleti je bilo opaziti sedimentacijo soli, kot posledico cvetenja in prekritega cvetenja pa je bilo mogoče opaziti mehurjenje beleža, odpadanje ometa in tudi lupljenje opeke.



Slika 5: Cvetenje in izločanje soli iz vgrajenih materialov

Prav tako je bilo opaziti posledice dolgotrajnega navlaževanja v pritličju in nadstropjih. Na zunanjih zidovih, kjer so potekali vodi vertikalnih žlebov, so bile na notranji strani zidov vidne poškodbe v obliki odpadanja beleža in ometa ter propadanja opeke in malte. V zgornjih etažah so bile vidne posledice zamakanja vode, saj je na nekaterih delih strešna opeka povsem propadla ali pa je sploh ni bilo.



Slika 6: Stanje lesenega stropa v 1. nadstropju

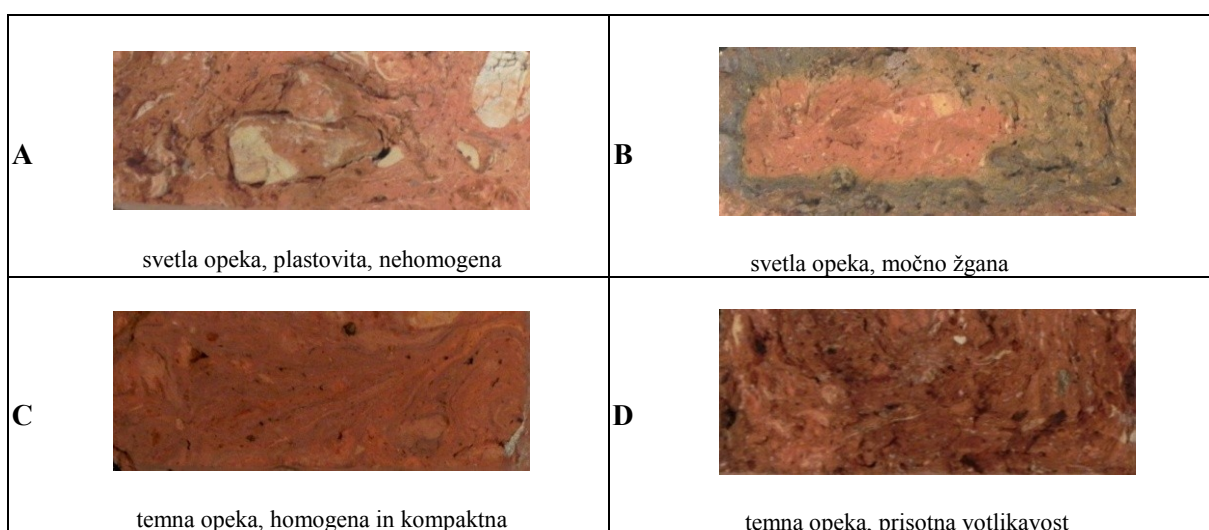
3.5 Opeka

Kot že rečeno, je bila vgrajena opeka starega avstroogrškega formata dimenzij 30 x 15 x 6 cm³. Najverjetneje so jo izdelovali ročno, saj so dimenzijska odstopanja do +/- 6 odstotna. Tudi po strukturi vsa opeka ni bila enaka, po videzu bi jo lahko razvrstili na dva glavna razreda, in sicer na temne in svetle. Temnejše opeke so že pri pripravi za različne poskuse dajale občutek tršega materiala, saj smo pri vrтанju in dolbljenju takoj opazili razliko v trdoti med obema vrstama opeke. Tudi na izpostavljenih mestih, kjer je bila opeka bolj izpostavljena navlaževanju, smo opazili razliko v ohranjenosti med svetlimi in temnimi opekami (Slika 7).



Slika 7: Izgled in primerjava propadanja med svetlo in temno opeko na fasadnem zidu

Velika večina objekta je bila sezidana iz svetlejšje opeke, v kateri strukture opazimo plastovitost in nehomogenost, kar je najverjetneje posledica izbire gline in postopka žganja opeke (Slika 8). Na spodnji sliki vidimo, da je imela tudi ista barva opeke več podvrsti. Ločijo se po strukturi, homogenosti ter po prisotnosti primesi različnih vrst.



Slika 8: Vrste opeke, uporabljene na objektu Kolizeja

Na zunanjih zidovih, ki so bili bolj izpostavljeni vlagi in zamakanju, je bilo opaziti, da je opeka na nekaterih mestih povsem propadla in preperela. Preperevala je z notranje in zunanje strani. V notranjosti zidov je bila prhka in smo jo lahko drobili z roko (Slika 9). Na zunanjih zidovih je bila opeka dodatno izpostavljena zmrzovanju in je zaradi tega še hitreje propadala. Tudi na manj izpostavljenih mestih v notranjosti objekta, kjer je delovala samo kapilarna vlaga, je opeka propadala, opaziti je bilo plastenje in izločanje soli na opeki.



Slika 9: Notranjost zidu je povsem navlažena, na zunanji strani je zid suh

Seveda ni bila vsa opeka tako močno poškodovana. Na suhih delih stavbe je bila opeka v dobrem stanju in ni bilo opaziti procesov staranja in propadanja.

3.6 Malta

Za izdelavo malte je bil uporabljen nepran rečni prod, ki je bil najverjetneje pridobljen na licu mesta in v okoliških peskokopih. Malta je bila apnena, z razmerjem apno:pesek 1:5 (Bergant in sod., 1995). Malta je vsebovala nadmerna zrna velikosti tudi do 19 mm (Lutman in Weiss, 2004), kar seveda lahko vpliva na tlačno in strižno trdnost zidu (

Slika 10). Na fasadnih zidovih je bilo na mestih, kjer je bilo zidovje dlje časa izpostavljeno vlagi, opaziti procese degradacije veziva, vidna sta bila votlikavost in erozija zaključnih fug spojnic (Slika 11). Malta je izgubila kohezivnost in je bila ponekod nevezana.



Slika 10: Nadmerna zrna v horizontalni spojnici parapetnega zidu



Slika 11: Erozija zaključnih fug spojnic na fasadnem zidu

Na kar nekaj mestih pri pregledu smo opazili odpoved stičnega območja med opeko in malto, t.i. izgubo adhezije, ki je posledica »zapečenosti« malte. Do takega stanja malte pride zaradi nepravilnega postopanja pri zidanju s higroskopičnimi materiali, kot je npr. opeka. Zaradi prevelike vpojnosti opeke se je prosta voda, ki je bila potrebna za vezanje apna, vezala na opeko. Posledica je bila razpakanost malte in izguba adhezije med stičnima površinama (Slika 12). Po tem lahko sklepamo, da se je nekaj napak naredilo že ob sami izgradnji objekta in ne samo ob kasnejšem vzdrževanju.



Slika 12: Razpokanost maltne spojnice, izguba adhezije

3.7 Ostrešje

Streha je bila v večjem delu objekta dvokapna, ostrešje je bilo izvedeno po principu trapeznega vešala. Les ostrešja je bil relativno ohranjen, le na območju zamakanj je bilo na tramovih opaziti trohnenje in propadanje lesa. Opaziti je bilo, da je bila streha na zahodni strani objekta (Pregledna mesta, str.7) pred časom v veliki meri obnovljena, zamenjane so bile letve in opečna kritina (opečnat bobrovec).

3.8 Nestrokovni posegi

Že v poglavju 3.4 smo omenili posledice nekaterih nestrokovnih posegov v konstrukcijo, glavni izmed njih so bili nenadzorovano rušenje vitalnih elementov nosilne konstrukcije, nenadzorovana sezidava sten znotraj objekta ter nestrokovno hidroizoliranje notranjih sten in stebrov v kleti.

3.8.1 Delna porušitev objekta

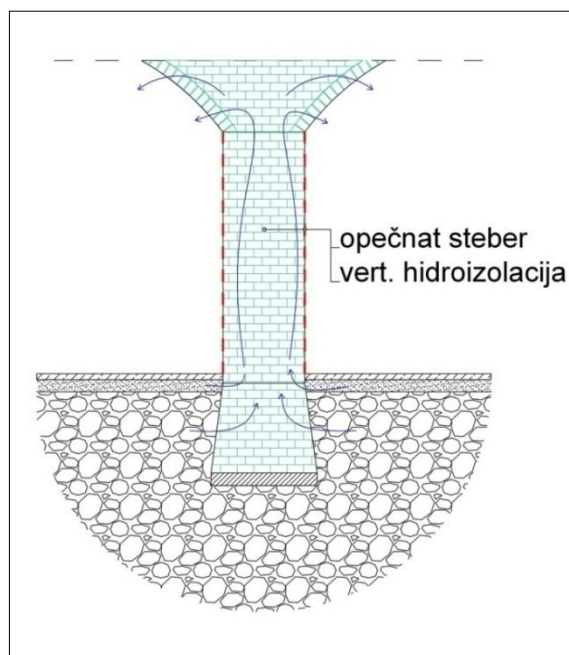
Zaradi nenadzorovanih in nestrokovnih posegov v konstrukcijo se je leta 1995 zgodila delna porušitev objekta (Slika 13), ki je oslabila okoliško nosilno zidovje, razpokanost je bilo opaziti tudi do 15 m daleč od porušenega območja (Bosiljkov in sod., 2008). Porušeni del so potem nadomestili s cevnim odrom, ki je nosil konstrukcijo ostrešja vse do porušitve v letu 2011.



Slika 13: Delna porušitev leta 1995 (Bergant, 1995)

3.8.2 Hidroizoliranje notranjih stebrov in sten v kleti

V kleti je bila na notranjih stenah in stebrih izvedena vertikalna hidroizolacija do različnih višin. Tako so bile stene in stebri izolirani večinoma do višine 1.60 m, ponekod tudi do stropa. Ta poseg je zelo vplival na samo stanje zidovine, saj so bili zidni in stebni elementi povsem zaprti, kar je onemogočalo naravno sušenje zidovine. Kapilarni dvig vode je tako segal povsem do stropa in je navlaževal tudi stropne oboke in loke (Slika 14). Posledice takega ravnanja so bile vidne tudi v notranjosti zidovja, opeka je bila povsem navlažena, malta pa je bila prhla in povsem mokra.



Slika 14: Prikaz dviga kapilarne vode iz temeljnih tal

3.9 Povzetek dosedanjih poročil o stanju objekta

Za primerjavo dobljenih rezultatov in oceno napredovanja propadanja objekta smo uporabili že v uvodu omenjena poročila, ki so bila narejena v zadnjem obdobju Kolizeja.

Vsa poročila in ocene so bili narejeni na podlagi pregleda zidovja, osnovnih in dodatnih laboratorijskih preiskav odvzetih vzorcev opeke in malte za zidanje ter na osnovi laboratorijskih preiskav trdnosti zidov, zgrajenih iz materialov podobnih kvalitete, ki so jih ustanove obravnavale do tedaj.

Za oznake karakterističnih mehanskih lastnosti zidovine uporabljamo naslednje simbole:

- Tlačna trdnost zidovine (f_w),
- natezna trdnost zidovine (f_t),
- elastični modul (E_w),
- strižni modul (G_w),
- faktor duktilnosti (μ).

Tlačno trdnost in elastični modul zidu se določa s preiskavo zidu na centrični tlak. Prvi nam pove, kolikšno maksimalno nosilnost doseže zid pri tlačni obremenitvi, drugi parameter pa nam pove razmerje med normalno napetostjo in vzdolžno deformacijo materiala. Natezna trdnost zidovja je parameter, ki določa strižno odpornost zidu pri strižni porušitvi z nastankom poševnih razpok zaradi prekoračenih nateznih napetosti v glavnih smereh. Strižni modul predstavlja razmerje med strižno napetostjo in strižno deformacijo. Faktor duktilnosti je mehanska lastnost zidu oz. celotne zidane konstrukcije, ki izraža sposobnost deformiranja v neelastičnem področju in sposobnost sipanja energije med potresom.

3.9.1 Opis vidnejših poškodb zidovine in nosilne konstrukcije

Poročila navajajo slabo stanje nosilne konstrukcije zaradi številnih poškodb, ki so posledica prekomernega navlaževanja, preobremenitve posameznih elementov ter nestrokovnih posegov v konstrukcijo. ZAG v svojem poročilu navaja, da so na več mestih opazne razpoke zaradi preobremenitev tako v opečnih lokih in obokih kot tudi v zidovih, ki so blizu mesta porušitve iz leta 1995. Prečni zidovi na območju prečnega prehoda so lokalno nagnjeni zaradi zasuka temeljev (Bergant in sod., 1995).

3.9.2 Rezultati preiskav opeke-povzeto po poročilu FGG-ja (Bosiljkov in sod., 2008)

Za potrebe preiskav in določitve stanja objekta je FGG na dvanajstih lokacijah objekta odvzela vzorce in opisala stanje zidovine (Pregledna mesta str.7). Ugotovljena je bila neenakomerna kakovost opeke

in s tem delitev le-te na dva razreda. Kvalitetnejše po videzu temnejše in homogene opeke je bilo po oceni v Kolizeju vgrajene približno 10%, vse ostalo je bila manj kvalitetna svetlejša nehomogena opeka.

Vlačnost zidakov je bila določena s sušenjem vzorcev do konstantne mase, in sicer so bili vzorci pripravljani v obliki zdroba (vrtanje opeke pod nizkimi obrati vrtalnega stroja) ter v obliki posameznih kosov opek. Primerjave med vzorci zdroba in opek so kazale približno iste vrednosti, tako da sta obe metodi pridobivanja vzorcev primerni za ugotavljanje vlažnosti opeke. Primerjava med Preglednica 1 in Preglednica 2, pokaže stopnjo zasičenja opeke na različnih preglednih mestih v kleti, pritličju in 1. nadstropju (Pregledna mesta, str.7).

Preglednica 1: Vlažnost opečnatega zdroba na posameznih mestih pregleda (Bosiljkov in sod., 2008)

Mesto preg.	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5a	Z5b	Z6	Z7a	Z7b	Z8a	Z8b	Z9	Z10
Etaža	Kl.	Kl.	Kl.	Kl.	Kl.	Kl.	Kl.	Kl.	Kl.	Pr.	Pr.	1.n.	1.n.
Vlačnost [%]	21.0	26.2	28.2	18.9	6.5	1.4	14.3	19.6	19.2	1.3	3.3	2.1	2.5

Preglednica 2: Vodovpojnost zidakov na posameznih mestih pregleda (Bosiljkov in sod., 2008)

Mesto preg.	Z1	Z2	Z3	Z7a	Z10
Etaža	Kl.	Kl.	Kl.	Kl.	1.n.
Vodovpojnost [%]	11.6	27.1	32.3	27.9	16.2

Zidaki so bili v kletnih prostorih večinoma popolnoma zasičeni, kar pa še ne pomeni, da so imeli bistveno nižjo tlačno trdnost. Večji prispevek k znižanju tlačne trdnosti gre prepisati cikličnemu zmrzovanju in tajanju, saj le to močno vpliva na notranjo strukturo opeke.

Tlačna trdnost je bila določena v skladu s standardom SIST EN 772-11. Rezultati so podani v Preglednica 3 in so bili razvrščeni v dve skupini:

- skupina, kjer tlačna trdnost varira od 21,0 do 33,9 MPa- temna opeka (Slika 8),
- skupina, kjer tlačna trdnost varira od 7,9 do 14,7 MPa- svetla opeka (Slika 8).

Preglednica 3: Rezultati preiskav tlačne trdnosti opeke (Bosiljkov in sod., 2008)

Mesto preg.	Z1	Z2		Z3	Z7			Z8				Z9		Z10		
Oznaka		a	b		a	b	c	a	b	c	d	a	b	a	b	c
Trdnost [MPa]	11.3	11.5	12.1	11.6	21.0	9.9	28.6	13.9	10.6	13.1	11.8	7.9	13.1	9.2	33.9	14.7

Za izračun normirane tlačne trdnosti zidovine za oceno odpornosti objekta je bila upoštevana samo druga skupina vzorcev, saj le ta predstavlja 90% vseh zidakov. Za izračun normirane tlačne trdnosti je bil upoštevan oblikovni faktor ($\delta = 0,73$), na osnovi katerega je bila določena tlačna trdnost suhega zidaka $f_b = 8,5$ MPa (koeficient variacije 16%). Standard SIST EN772-11 za z vlago zasičene vzorce

predvideva redukcijo tlačne trdnosti za slabih 20%, kar pomeni, da je $f_b = 0,8 \times 8,5 = 6,8$ MPa (Bosiljkov in sod., 2008).

3.9.3 Rezultati preiskav malte (Bosiljkov in sod., 2008)

Malta je dokaj nehomogena mešanica apna in peska v razmerju 1:5 (Bergant in sod., 1995). Ugotovljeni sta bili dve vrsti malte, in sicer prvotna malta rjavkaste barve, ki je slabše trdnosti (drobljiva z roko) in ima nadmerna zrna premera do 17 mm. Za agregat je bil uporabljen nepran rečni prod, malta je na vlažnih delih, se pravi v kleti in mestoma tudi v višjih nadstropjih, povsem prhla in brez vezave.

Na vzhodnem in zahodnem delu Kolizeja pa je bila lokalno zasledena tudi nekoliko drugačna malta. Bila je svetle barve z večjim procentom vsebnosti nadmernih zrn in trdnejša od prvotne rjavkaste malte. Uporabljena je bila za refugiranje in prezidavo poškodovanih zidnih slopov. Malte v višjih nadstropjih so bile v veliko boljšem stanju kot v kleti, kjer je vlaga v kombinaciji z zmrzaljo poslabšala lastnosti malte.

Preiskave tlačne trdnosti so bile izvedene na preskušancih, ki niso bili povsem pravilnih oblik, zato je bil upoštevan konverzijski faktor $\delta = 1,5$ (Stökl, 1998), s katerim je bila dobljena tlačna trdnost standardne oblike preizkušencev dimenzij $4 \times 4 \times 4$ cm³. V kletnem nivoju je bila tako izračunana povprečna tlačna trdnost malte $f_m = 1,89$ MPa (koeficient variacije 11%).

$$f_m = \frac{f_m^t}{\delta} \quad (3.1)$$

Kjer f_m^t predstavlja tlačno trdnost malte vzorca nestandardiziranih oblik.

V zgornjih etažah je bila trdnost pričakovano višja, vendar je bil raztros dobljenih rezultatov nekoliko večji. Dobljena tlačna trdnost v zgornjih etažah $f_m = 3,24$ MPa (67% koeficient variacije).

3.9.4 Ocena mehanskih lastnosti opečne zidovine (Bosiljkov in sod., 2008)

Na podlagi laboratorijskih raziskav sestavin zidovine in na podlagi primerjav z zidovino na podobnih objektih je bila po standardu EC 6 (SIST ENV 1996-1-1) določena karakteristična tlačna trdnost zidovine (f_w),

$$f_w = K f_b^{0,7} f_m^{0,3} = 2,55 \text{ MPa} \quad (3.2)$$

Kjer je $K = 0,55$ za opečnate zidake, f_b pa pomeni tlačno trdnost opeke.

V Preglednica 4 so navedeni viri in vrednosti mehanskih lastnosti stare opečnate zidovine in na osnovi in-situ preiskav dobljene vrednosti.

Preglednica 4: Pregled mehanskih lastnosti za opečno zidovino (Bosiljkov in sod., 2008)

Vir podatkov		f_w [MPa]	f_t [MPa]	E_w [MPa]	G_w [MPa]
Preiskave ZRMK					
MO 10 MM 0,5		2	0,04	250	40
MO 15 MM 2,5		2,5	0,18	800	200
Stari zid - MO 10 MM 1,0		2	0,09	800	50
Preiskave UL FGG					
Novi zid – MO15 MM 2,0		4,0	0,1-0,2	1800	120
OPCM	Min.	2,4	0,09	1200	400
	Max.	4	0,14	1800	600
Poročilo ZRMK za Kolizej		2	0,04	1000	120
Poročilo ZAG za Kolizej	Zid	1,5	0,04	1000	120
	steber	2	0,09	1000	120

MO – marka (tlačna trdnost) opeke, MM – marka malte

Na osnovi izračunane karakteristične tlačne trdnosti zidovine in vrednosti, podanih v Preglednica 4, so v Preglednica 5 prikazane izbrane mehanske lastnosti zidovine za nadaljno analizo Kolizeja, uporabljene v poročilu FGG.

Preglednica 5: Ocenjene mehanske lastnosti opečne zidovine Kolizeja (Bosiljkov in sod., 2008)

Kolizej	f_w [MPa]	f_t [MPa]	E [MPa]	G_w [MPa]
Ocenjene vrednosti	2,55	0,09	1000	120

Poročilo ZAG-a (Lutman in Weiss, 2004) navaja ugotovitve mehanskih lastnosti zidovine, predstavljene v Preglednica 6. Zaradi slabše stopnje poznavanja konstrukcije so bile upoštevane nižje vrednosti za trdnosti.

Preglednica 6: Ocenjene mehanske lastnosti opečnih zidov in opečnih stebrov (Lutman in Weiss, 2004)

karakteristike	Opečni zidovi	Opečni stebri
tlačna trdnost f_w [MPa]	1,5	2,0
natezna trdnost f_t [MPa]	0,04	0,09
elastični modul E_w [MPa]	1000	1000
strižni modul G_w [MPa]	120	120
faktor duktilnosti μ	1,5	1,0
specifična teža γ [kN/m³]	16	16

4 METODOLOGIJA DOLOČANJA STANJA KONSTRUKCIJE

4.1 Opis preiskav

V sklopu moje diplomske naloge sem opravil celo vrsto različnih preiskav. Na objektu samem smo opravili dve vrsti in-situ preiskav ter pripravili vzorce za šest različnih vrst preiskav in analiz, izvedenih v laboratoriju. Izvedli smo:

- strižne teste stikov med opeko in malto,
- strižna testa zidov,
- enoosna tlačna preizkusa zidkov,
- enoosne tlačne preizkuse opečnih prizem,
- teste cepilne natezne trdnosti opeke,
- enoosne tlačne preizkuse malte,
- izvrednotenje vsebnosti vlage in vodovpojnosti opek,
- sejalno analizo maltnih vzorcev.

4.1.1 Opis stanja v Kolizeju tekom preiskav

Preiskave na objektu Kolizeja so bile zahtevne predvsem zaradi zagotavljanja varnosti osebja, ki je izvajalo preiskave. Objekt je bil pred porušitvijo v slabem stanju. Na nekaterih mestih ni bilo varnega dostopa, saj sta se stropna in stopniščna konstrukcija zaradi dotrajanosti podirali pod lastno težo. V izredno slabem stanju so bila predvsem stopnišča v JZ delu objekta, zato v tem delu nismo opravljali preiskav. V objektu ni bilo električne napeljave, torej ni bilo luči, zato so bili nekateri odseki še posebej nevarni.



Slika 15: Primer sobe, kjer smo izvajali preizkus

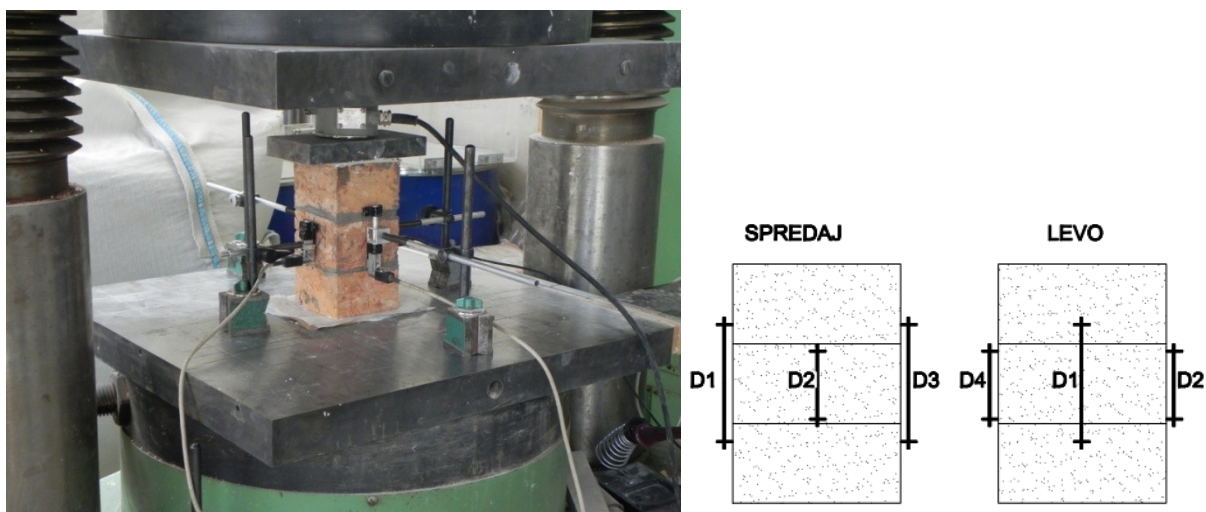
4.2 Tlačna trdnost opeke (enoosni tlačni preskus opečnih prizem)

Za potrebe ugotavljanja elastičnega modula in tlačne trdnosti opeke smo izvedli enoosne tlačne teste na opečnih prizmah. S tanko plastjo epoksidnega lepila smo zlepili po tri kose opeke za vsako prizmo, in sicer zato, da smo izničili vpliv stika na mehanske karakteristike opeke. Preiskave smo opravili na treh prizmah. Prizma 1 (P1) je bila dimenzij $10 \times 10 \times 20 \text{ cm}^3$ in svetle barve z nehomogeno strukturo materiala. Prizma 2 (P2) je bila dimenzij $10 \times 10 \times 17,7 \text{ cm}^3$, temne nehomogene sestave, vendar bolj kompaktna kot P1 in P3. Prizma 3 (P3) je bila dimenzij $10 \times 10 \times 19 \text{ cm}^3$ ter po strukturi in homogenosti enaka prizmi P1.

Preiskave so potekale na stiskalnici kapacitete 5000 kN. Hitrost vnašanja obtežbe je bila 0.2 mm/minuto. Posamezni preizkušanelec smo stiskali s konstantno hitrostjo vse do porušitve. Pred začetkom preiskav smo morali poskrbeti za pravilno naleganje plošč stiskalnice na preizkušanelec, zato smo uporabili mavec, s katerim smo zagotovili pravilen raznos obtežbe na preizkušanelec.

Za pritrditev deformetrov smo uporabili vzmeti, ki so bile vpete med deformetrom in nosilcem. Uporabili smo štiri deformetre, dva smo pritrdili tako, da sta nalegala na opeki na skrajnih robovih prizme, dva pa tako, da sta nalegala samo na srednjo opeko prizme.

Kot se vidi na Slika 16, smo za merjenje vnesene sile uporabili dozni silomer, saj naprava, ki smo jo uporabili za stiskanje, v nižjih območjih delovanja ne zagotavlja pravih odčitkov vnesene sile.



Slika 16: Prikaz postavitve deformetrov na opečnih prizmah

S to preiskavo smo pridobili modul elastičnosti opeke E_b ,

$$E_b = \frac{f_{bc}}{3 * \epsilon_V} \quad (4.1)$$

f_{bc} je tlačna trdnost opečne prizme, ki je enaka maksimalni tlačni napetosti, ε_V je povprečna vertikalna deformacija pri $1/3 f_{bc}$, to je v smeri delovanja obtežbe.

Za izračun normirane tlačne trdnosti moramo upoštevati dva faktorja, in sicer oblikovni faktor δ ter faktor vlažnosti w , kot je omenjeno že pri preiskavah tlačne trdnosti opeke.

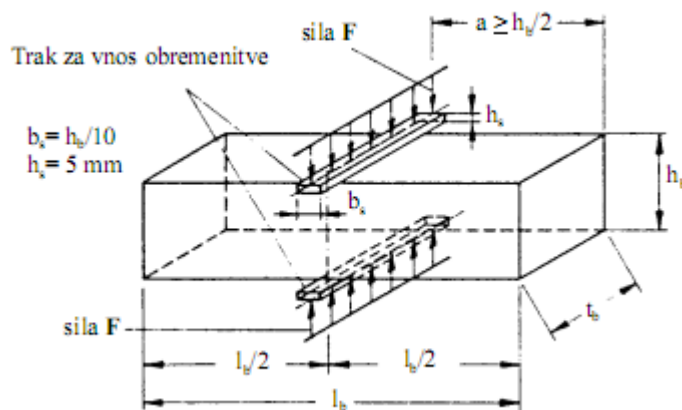
$$f_b = w * \delta * f_{bc} \quad (4.2)$$

Faktorja vlažnosti nam v našem primeru ni potrebno upoštevati, saj so bili vsi preizkušanci zračno suhi, faktorji oblike pa so v naših primerih znašali za P1 $\delta= 1,35$; za P2 $\delta= 1,28$ ter za P3 $\delta= 1,32$.

4.3 Cepilna natezna trdnost

Cepilno natezno trdnost zidaka (f_{bt}) določamo na celih opekah ali polovičkah. Služi nam za oceno dejanske natezne trdnosti zidakov. Razmerje med višino in širino preizkušancev mora biti manjše ali kvečjemu enako ena.

Mi smo izvedli 11 takih preizkusov na opekah, ki so bile odvzete v različnih etažah objekta. Preiskavo smo izvajali na napravi kapacitete 500 kN, hitrost obremenjevanja je bila 0,2 mm/min. Obtežbo se je vnašalo konstantno vse do porušitve.



Slika 17: Določevanje cepilne natezne trdnosti na opeki (Schubert, 1991)

Kot je prikazano na Slika 18, smo na stiku, kjer se preko jeklene palice premera 28 mm prenaša sila na preizkušane, namestili tanko leseno deščico, ki zagotavlja enakomeren raznos sile po opeki. Predhodno smo opeke na mestih, kjer se vnaša sila, pobrusili, da smo dobili ravno ploskev po širini opeke.



Slika 18: Opeka med in po obremenitvi

Cepilno natezno trdnost izračunamo po enačbi (4.3).

$$f_{bts} = \frac{2F}{\pi ld} \quad (4.3)$$

Kjer je F maksimalna odčitana sila pri porušitvi, l je širina zidaka, d je debelina opeke.

4.4 Vodovpojnost opeke

Vpojnost je funkcija poroznosti keramičnih materialov. V bistvu je ta lastnost odvisna izključno od odprte poroznosti materiala, ki je v primeru keramike odvisna od sestave gline in je posredno odvisna tudi od temperature pečenja.

Za to preiskavo smo vzeli štiri opeke, katere smo v peči pri temperaturi 105 °C posušili do stalne mase. Nato smo jih postavili v posodo na aluminijaste kotnike, da so lahko z vseh strani vpijale vodo. Vodo smo dotakali postopoma, da se je sproti izločal zrak, ki se je zadrževal v porah opeke. Ko smo zalili cel volumen opeke, smo vzorce pustili stati 24 ur v vodi. Po 24 urah smo vzorce prebrisali s papirnato krpo, da smo odstranili nevpito vodo s površine opeke. Sledilo je samo še tehtanje in izračun vodovpojnosti U ,

$$U = \frac{m_v - m_o}{m_o} * 100 (\%) \quad (4.4)$$

m_v pomeni maso z vodo nasičenega vzorca, m_o pa pomeni maso suhega vzorca. Merodajna je povprečna vodovpojnost, dobljena na preskušanem številu opek.

4.5 Določanje vsebnosti vlage v opeki

Na vseh področjih, kjer smo opravljali neporušne strižne teste («shove test») in pa strižna testa zidov (Pregledna mesta str.7), smo odvzeli vzorce za ugotavljanje vlažnosti opeke (Slika 19). Vzorce smo odvzeli z vrtanjem v opeko pod majhnimi obrati, tako da smo čim manj vplivali na vsebnost vlage v opeki. Prav tako smo za analizo v laboratoriju odvzeli cca. 20 posameznih celih opek ter malte.



Slika 19: Prikaz odvzemanja vzorca za ugotavljanje vlažnosti opeke

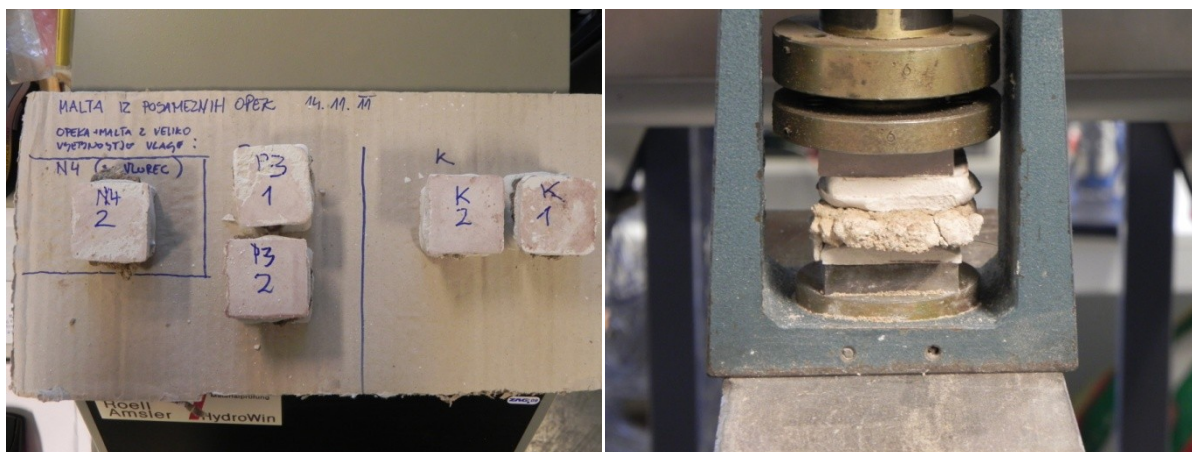
Vse vzorce opečnega zdroba smo shranili v nepredušnih PVC vrečkah, s čimer smo ohranili vlažnost vzorcev. V laboratoriju smo nato vsak vzorec stehtali ter ga osušili do stalne mase v mikrovalovni pečici. Za izračun vsebnosti vlage smo uporabili enačbo (4.4.).

4.6 Tlačna trdnost malte (enoosni tlačni preizkus)

Za potrebe ugotavljanja karakteristik malte nam je uspelo pripraviti 22 vzorcev malte v obliki tabletk različnih dimenzij in oblik. Malta je bila izredno drobljiva, imela je veliko vsebnost nadmernih zrn in jo je bilo izredno težko ločiti od opeke.

Preizkušance smo pripravili tako, da smo jih vtopili v svež mavec z obeh strani preizkušanca. Dimenzije naležne površine tabletk so bile $4 \times 4 \text{ cm}^2$, dimenzije preizkušancev pa so bile malenkost večje, pri izračunu tlačne trdnosti malte je bil upoštevan konverzijski faktor $\delta = 1,5$ (Stöckl, 1998). Na ta način smo pridobili tlačno trdnost standardizirane oblike preizkušancev f_m ($4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$).

$$f_m = \frac{f_m^t}{\delta} \quad (4.5)$$



Slika 20: Prikaz priprave in izvedba testa tlačne trdnosti malte

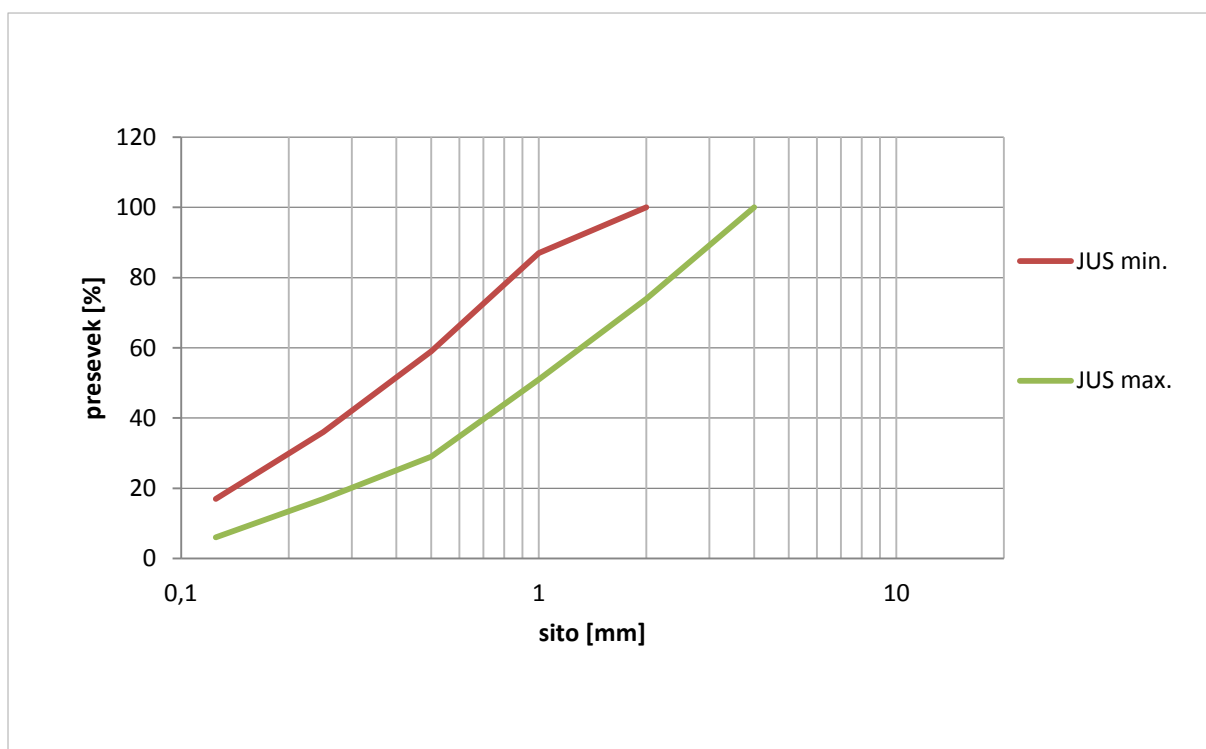
4.7 Sejalna analiza malte

Za potrebe ugotavljanja zrnastostne sestave agregata v malti smo na petih vzorcih izvedli sejalno analizo maltnega zdroba. Zdrob smo pridobili na različnih lokacijah po stavbi.

Analizo smo izvedli na standardiziranih sitih s pravokotnimi odprtinami. Sita si sledijo po velikosti odprtin v situ od največjega do najmanjšega, v našem primeru od 16 mm do 0,125 mm.

Postopek izvedemo tako, da prvo stehtamo vzorec. Najmanjša potrebna masa vzorca je odvisna od največjega zrna agregata v vzorcu, kar je v našem primeru ($D = 16$ mm) 2,6 kg. Vzorec stresemo na sita in z vibriranjem poskrbimo za transport delcev po sitih navzdol. Po končanem sejanju vsak ostanek na situ stehtamo, da lahko izračunamo presevek določene frakcije.

Dobljeni rezultat nato prikažemo na grafu, in sicer na abscisni osi prikazujemo odprtino sit v logaritemskem merilu, na ordinatni osi pa presevek v procentih. Na Slika 21, sem prikazal primere za fino zrnate peske (JUS min.) in grobozrnate agregate (JUS max.), ki so primerni za malte po določilih starega JUS standarda (Bosiljkov, 2000).



Slika 21: Prikaz krivulje zrnivosti za peske in agregate

4.8 Modul elastičnosti malte

Za izračun modula elastičnosti malte smo uporabili enačbo (Drysdale in sod., 1994),

$$E_w = \frac{1}{\frac{\delta}{E_b} + \frac{1-\delta}{E_m}} \quad (4.6)$$

kjer je E_w modul elastičnosti zidka, E_b modul elastičnosti opeke, pridobljen iz preizkusa tlačne trdnosti zidnih prizmic, E_m pa predstavlja elastični modul spoja, se pravi malte. Komponento δ izračunamo po enačbi,

$$\delta = \frac{t_b}{t_b + t_m} \quad (4.7)$$

kjer predstavlja t_b debelino ene opeke, t_m pa debelino spoja med opekama. Nato izrazimo modul elastičnosti malte E_m iz enačbe (4.6)

$$E_m = \frac{1 - \delta}{\frac{1}{E_w} - \frac{\delta}{E_b}} \quad (4.8)$$

4.9 Strižna trdnost stika med opeko in malto («Shove testi«)

Ena najpomembnejših lastnosti zidovja je njegova strižna trdnost. Ocena strižne trdnosti elementa zidovja je ključna za ugotavljanje zmožnosti prenašanja horizontalnih obremenitev zidov oz. ugotavljanje potresne odpornosti celotne zgradbe. Strižna trdnost obstoječe zidovine je odvisna od vrste vgrajenih materialov in od načina ter kvalitete vgradnje teh materialov. Zato meritve na licu mesta omogočajo vpogled v dejansko stanje zidovine.

EC 6 (SIST EN 1996) definira strižno trdnost na podlagi zdrsnega strižnega mehanizma kot seštevek začetne strižne trdnosti (strižna trdnost pri ničelni tlačni napetosti) in prirastka trdnosti zaradi tlačne napetosti v obravnavanem vodoravnem prerezu zidu, pravokotno na strig.

$$f_{vk} = f_{vko} + 0,4\sigma_d \quad (4.9)$$

V tem primeru predstavlja f_{vk} karakteristično strižno trdnost zidovja, f_{vko} začetno strižno trdnost (pri ničelni tlačni napetosti), σ_d pa predstavlja vertikalno tlačno napetost.

S pomočjo »Shove testa« (Eperson, G. in Abrams, D., 1989) posredno merimo strižno trdnost na stiku med posamezno opeko in malto, zato bomo pri izračunih uporabljali oznake za mehanske karakteristike, kot jih navaja EC 6.

4.9.1 Potek preiskave

Preizkus poteka tako, da posamezno opeko znotraj zidovja s pomočjo hidravličnega bata potiskamo vzporedno z ravnino zidu. Opeko potiskamo toliko časa, dokler se ne začne rahlo pomikati. Vse skupaj spremljamo na delovnem diagramu, ki nam sproti izrisuje vneseno silo v odvisnosti od pomika.

Izvedli smo 15 takšnih testov v različnih nivojih zgradbe. Priprave za izvedbo »shove testa« so dokaj enostavne. Prva stvar, na katero moramo biti pozorni, je izbira lokacije. Pozorni moramo biti na stanje zidu pred izvedbo testa, saj nam nepravilna izbira lokacije lahko pokvari test. Primerna lokacija za izvedbo je tam, kjer imamo za hidravličnim batom dovolj masivnega zidu, da nam reakcijska sila ne »odpre« upornega zidu. Zidak v preizkusni vrsti mora biti zidan v smeri zidu, saj lahko le v takem primeru odstranimo celo opeko iz zidu.

Po oceni in izbiri lokacije previdno odstranimo opeko, kamor bomo vstavili hidravlični bat. Zaledje za preizkušancem prav tako odstranimo v širini cca. 10 cm, s čimer preizkušancu omogočimo pomik v smeri obremenitve (Slika 22).



Slika 22: Prikaz pravilne priprave za izvedbo testa

4.10 Strižna trdnost opečnate zidovine («Shear test«)

Na podlagi pregleda in dotedanjih preiskav (Povzetek dosedanjih poročil o stanju objekta, str. 20) smo se odločili za izvedbo testa v dveh nivojih objekta, v kleti in pritličju. Namreč v kleti je bilo opaziti velik vpliv vlage na propadanje zidovine, česar v pritličju ni bilo opaziti. Zato smo naredili primerjavo mehanskih karakteristik zidov v kleti in pritličju.

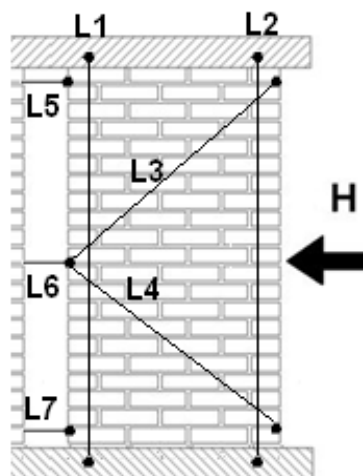
V pritličju smo pripravili zid (dim.: 100 x 254 x 62 cm³), ki je po višini segal od tal do začetka okenskega oboka. Ta del zidu je bil najbolj oslavljen zaradi okenske odprtine in je bil zato najbolj primeren za izvedbo testa. Zid se na preizkus pripravi tako, da se ga loči od matičnega zidu kot tudi od parapetnega zidu (Slika 23). Rez je bil izveden z diamantno vrvjo, tako da je preizkušanelec cca. 10 cm odmaknjen od matičnega zidu. Na strani okna pa smo parapet ločili od preizkušancea z rezom s krožno diamantno žago. S preizkušancea smo nato z notranje strani in s strani špalete okna odstranili omet. V kleti je bil zid (dim.: 88 x 320 x 100 cm³) nekoliko ožji po širini, debelejši in višji kot v pritličju.



Slika 23: Lokacija izvedbe strižnih testov in prikaz priprave na strižni test

4.10.1 Potek preiskave

Sam test smo pripravili tako, da se je ob obeh robovih po višini zidu (L1, L2) in po diagonalah polovice višine zidu (L3, L4) ter na robu dilatacije z matičnim zidovjem v horizontalni smeri na treh višinah (L5, L6, L7) pritrdilo LVDT-je (linearne diferenčne pretvornike). Ti so beležili pomike v vertikalni smeri na obeh robovih, v horizontalni smeri na levem robu zidu (zgoraj, v sredini, spodaj) ter v diagonalnih smereh zidu (Slika 24).



Slika 24: Postavitev merskih mest za strižni test

- L1 in L2, merimo globalne vertikalne deformacije na zidu,
- L3 in L4, merimo globalne diagonalne deformacije na zidu,
- L5, L6 in L7, merimo globalne horizontalne deformacije glede na obstoječi matični zid.

Vsi LVDT-ji so povezani s pretvornikom, ki s pomočjo računalniškega programa beleži podatke o dogajanju na preizkušancu. Obtežbo smo vnašali s hidravličnim batom, ki je bil postavljen na sredini zidu (Slika 25). S takim načinom vnosa sile dejansko preizkušamo dva preizkušanca; zgornji del zidu ter spodnji del zidu.

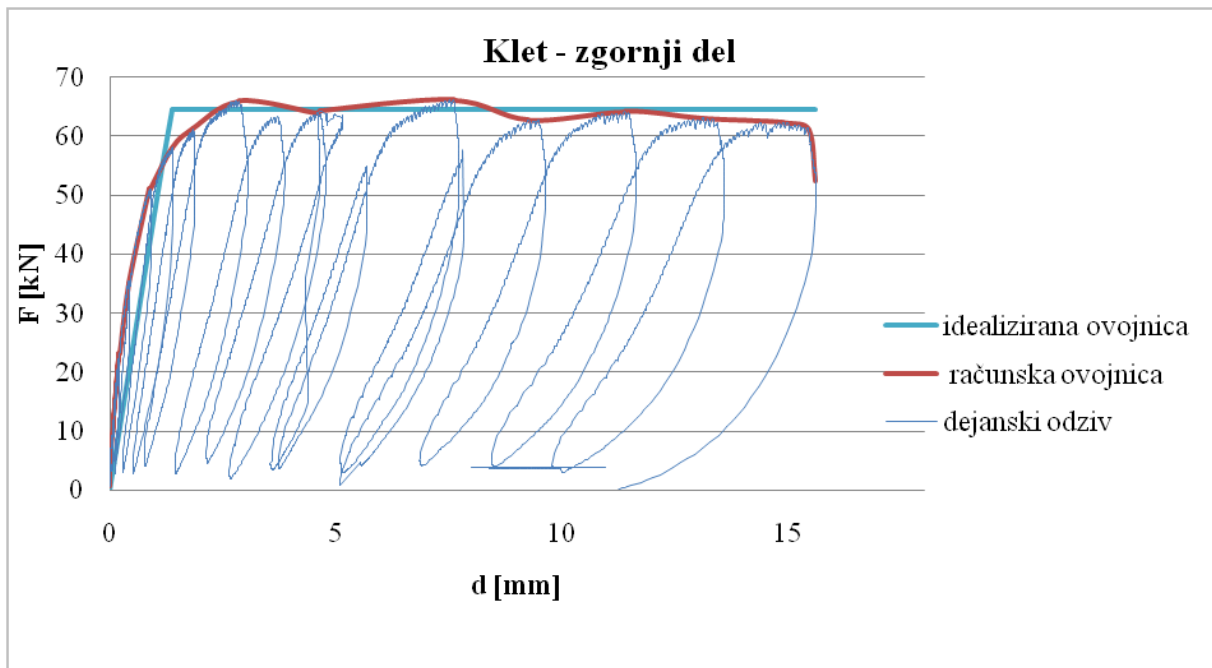


Slika 25: Prikaz izvajanja strižnega testa

Sam preiskus poteka tako, da se obtežba vnaša ciklično, in sicer se na ekranu spremlja horizontalni pomik LVDT-ja L6 (na sredini). Ko dosežemo pomik 0,25 mm, se obtežbo popusti. Nato zopet vnašamo obtežbo, da pridemo do pomika 0,5 mm, in zopet popustimo. To počnemo v korakih po 0,5 mm do 2 mm pomika, nato nadaljujemo s cikli, pri katerih je prirastek amplitude pomika 1 mm vse do 8 mm pomika. Od 8 mm naprej ciklamo s prirastkom amplitude 2 mm toliko časa, da pridemo do izrazitejšega padca odpornosti zidu (v našem primeru je horizontalni pomik na sredini zidu v pritličju znašal 20 mm, v kleti pa malo manj kot 16 mm).

4.10.2 Izvrednotenje mehanskih lastnosti iz pridobljenih podatkov

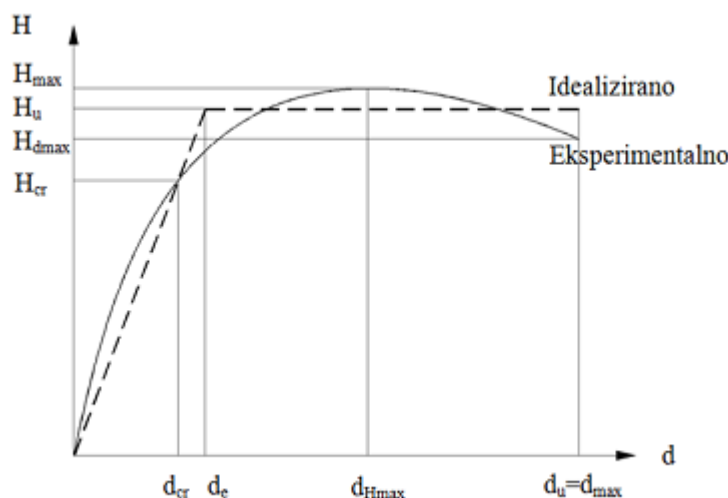
Glavni rezultat strižne preiskave (Slika 27) prikazuje odnos med vneseno horizontalno silo H in relativnim horizontalnim pomikom d , merjenim na sredini zidnega preizkušanca. Iz tega odziva izvrednotimo vrednosti karakterističnih točk odziva ter izračunamo mehanske lastnosti preiskovanega zidu.



Slika 26: Prikaz delovnega diagrama z eksperimentalno ovojnico

Za nadaljno uporabo rezultatov preiskav moramo eksperimentalno dobljeno ovojnico histereznih zank idealizirati. V našem primeru smo to storili tako, da smo dobljeno ovojnico idealizirali z bilinearno krivuljo; z elasto-plastično idealizirano histerežno ovojnico (Slika 27), ki jo določajo togost zidu, nosilnost zidu in faktor duktilnosti. Slednji predstavlja razmerje med maksimalnim pomikom in pomikom na meji elastičnosti. Pri obnašanju zidu pri strižnih obremenitvah definiramo tri karakteristična mejna stanja:

- mejo razpok, ki jo določata pomik d_{cr} in horizontalna sila H_{cr} , pri katerih pride do prvih pomembnih razpok, te spremenijo naklon ovojnice,
- maksimalno nosilnost, ki jo določa med preiskavo dosežena maksimalna nosilnost zidu H_{max} in pripadajoči pomik d_{max} ,
- mejno stanje porušitve, ki ga določata največji doseženi pomik d_{max} in pripadajoča nosilnost H_{dmax} . Računsko se ta meja določi tako, da se privzame, da pride do porušitve potem, ko nosilnost pade na 80% maksimalne nosilnosti.



Slika 27: Histerezna ovojnica in njena idealizacija (Uranjek, 2011)

Začetni naklon idealizirane ovojnice določa sekantna togost zidu pri nastanku razpok, ki jo imenujemo efektivna togost zidu K_e

$$K_e = H_{cr}/d_{cr} \quad (4.10)$$

H_{cr} smo določili na tri različne načine:

- mejo elastičnosti definiramo kot $H_{cr}^{1/3} = 1/3 * H_{max}$,
- sila H_{cr}^{up} je sila pri nastanku prvih upogibnih razpok. Določimo jo na podlagi diagramov vertikalnih deformacij panelov (L1 in L2) v odvisnosti od sile H in v odvisnosti od časa t ,
- sila H_{cr}^{st} je sila pri nastanku prvih strižnih razpok. Določimo jo na podlagi diagramov diagonalnih deformacij panelov (L3 in L4) v odvisnosti od sile H in v odvisnosti od časa t .

Ko izračunamo efektivno togost zidu lahko dobimo strižni modul:

$$G_w = \frac{K_e}{\frac{A_w}{1.2h} - \frac{a}{1.2} \frac{K_e}{E_w} \left(\frac{h}{l}\right)^2} \quad (4.11)$$

Kjer a predstavlja koeficient robnih pogojev in znaša v našem primeru $a= 1$ za na obeh koncih polno vpeti zid, h pomeni višino, l dolžino posameznega zidnega elementa. A_w je tlorisna površina preseka zidu, modul elastičnosti E pa pridobimo iz tlačnega preizkusa zidu.

Ker pa smo pri računu strižnega modula po enačbi (4.11), dobivali neprimerne vrednosti (tudi negativne), smo strižni modul ob različnih nivojih obremenitev in pomikov izračunali po osnovni definiciji, to je kot razmerje med strižno napetostjo in strižno deformacijo.

Če izračunamo idealizirano mejno horizontalno silo H_u ,

$$H_u = K_e \left(d_{max} - \sqrt{d_{max}^2 - \frac{2A_{env}}{K_e}} \right) \quad (4.12)$$

kjer je d_{max} maksimalen pomik, K_e efektivna togost zidu, A_{env} pa površina pod ovojnico odziva, potem lahko z enačbo (4.12) izračunamo natezno trdnost zidu f_t

$$f_t = -\frac{\sigma_0}{2} + \sqrt{\frac{\sigma_0^2}{4} + (b * \tau_{max})^2} \quad (4.13)$$

kjer je $\tau_{max} = H_u/A_w$ povprečna strižna napetost pri največji idealizirani vodoravni sili, σ_0 predstavlja vertikalno napetost v preskušancu, b pa vpliv geometrije zidu.

A_{env} predstavlja površino pod eksperimentalno histerezo ovojnico, ki je enaka površini pod idealizirano histerezo ovojnico (energijski pogoj $A_{env} = A_{env. ideal}$), $d_{max} = d_u$ in predstavlja maksimalni pomik pri idealizirani horizontalni sili.

Iz dobljenih podatkov smo izračunali še duktilnost zidu μ , ki je razmerje med končnim pomikom d_u in pomikom na meji elastičnosti d_e idealizirane ovojnice.

4.11 Tlačna trdnost opečnate zidovine (tlačni preizkus)

Za laboratorijske preiskave nam je uspelo v celoti pripraviti dva zidka, ki smo jih dobili na zahodni strani objekta že v času rušenja.



Slika 28: Lokacija odvzema vzorcev za tlačni preizkus

Zidke za tlačni preizkus smo iz zidovja pridobili tako, da smo v parapetni zid pod oknom z obeh strani zažagali z diamantno žago, s spodnje strani pa smo v opeko navrtali luknje, v katere smo potem vstavili jeklene navojne palice. Na zgornjo ploskev zidkov smo namestili jeklene profile in jih s povezovalnimi trakovi povezali z jeklenimi palicami na dnu zidu. Zidka smo prednapeli, da bi preprečili poškodbe med transportom. Zidke smo nato s pomočjo gradbenega stroja izvlekli iz ležišča.

ZID 1 (dim.: 76 x 53 x 30 cm³) je imel majhno vsebnost vlage in je bil že na videz boljši kot ZID 2. ZID 2 (dim.: 80 x 63 x 30 cm³) je bil bolj navlažen in propadel kot prvi, saj je bil lociran tik ob vertikalni cevi žlebu, ki je močno zamakala zidovje. Tudi propadanje je bilo veliko bolj očitno pri vzorcu ZID 2.

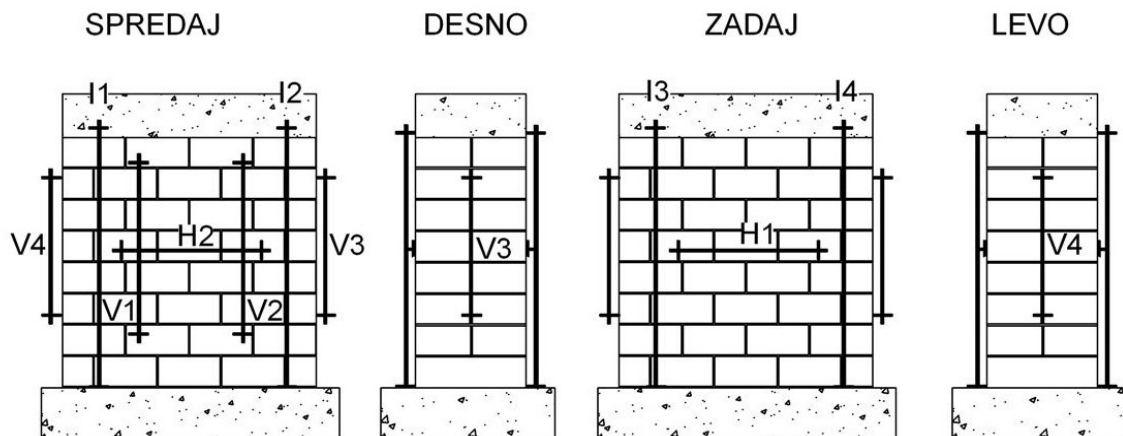
4.11.1 Priprave za preiskavo

V laboratoriju je bilo potrebno zidka predhodno pripraviti na sam preizkus. Da smo zagotovili pravilen raznos obtežbe po celotnem zidku (plošča stiskalnice je manjša od dolžine zidu) smo vsak zidek posebej na vrhu in spodaj ojačali s horizontalnimi armirano-betonskimi vezmi. Tako smo oba zidka na spodnji strani ojačali z armirano-betonskim podstavkom (dim.: 90 x 47 x 17 cm³), ki nam je služil za raznos sile in za transport z mostovnim dvigalom.



Slika 29: Prikaz namestitve preizkušanca v stiskalnico

Pred namestitvijo zidka v stiskalnico smo na preizkušane pritrčili merske instrumente, postavitev letih in njihove oznake so prikazane na Slika 30 (za ZID 1).



Slika 30: Shematični prikaz merilnih instrumentov na preizkušancu ZID 1

Z merilci deformacij smo spremljali globalne deformacije v ravnini zidka. Natančnost zajemanja rezultatov meritev je bila za deformetre 1 μm , za LVDT-je pa 10 μm .

Namen in vrsta posameznih instrumentov:

- I1, I2, I3, I4 so LVDT-ji za merjenje globalnih vertikalnih deformacij, zajemajo celotno deformacijo vzporedno z vneseno obtežbo,
- V1, V2, V3, V4 so deformetri za merjenje globalnih vertikalnih deformacij zidkov, njihov namen služi za izračun modula elastičnosti, Poissonovega koeficienta ter ostalih mehanskih lastnosti,
- H1, H2 sta deformetra, s katerima smo merili globalne deformacije zidka prečno na smer delovanja obtežbe. Z njunim povprečjem merimo deformiranje zidka prečno na delovanje obtežbe, ob upoštevanju povprečnih deformacij v vzdolžni smeri (V1-V4) pa še Poissonov koeficient.

Poleg spremljanja deformacij in vnesene tlačne sile smo beležili tudi nastanek in razvoj razpok.

Iz obdelanih podatkov smo pridobili naslednje parametre:

- maksimalna tlačna trdnost zidka (f_w),
- elastični modul zidka pri 1/3 tlačne trdnosti (E_w),
- strižni modul zidka pri 1/3 tlačne trdnosti (G_w),
- Poissonov koeficient na meji elastičnosti (ν_w).

Tlačno trdnost zidka f_w smo določili z enostavno enačbo,

$$f_w = \frac{F}{A_w} \quad (4.14)$$

Kjer je σ_w tlačna napetost, ki je enaka tlačni trdnosti, F je maksimalna sila, ki jo je zidek prenesel, A_w je tlorisna površina preseka zidka. Poissonov koeficient ν_w določimo pri 1/3 tlačne trdnosti, in sicer se izračuna kot količnik med deformacijami, ki so potekale prečno na delovanje obtežbe ε_H , in deformacijami, ki so potekale vzporedno z obtežbo ε_V .

$$\nu_w = \frac{\varepsilon_H}{\varepsilon_V} \quad (4.15)$$

Modul elastičnosti zidka pridobimo kot razmerje med tlačno napetostjo σ_w in vertikalno deformacijo ε_V pri 1/3 tlačne trdnosti zidka.

$$E_w = \frac{\sigma_w}{\varepsilon_V} \quad (4.16)$$

Ob predpostavki, da je zid homogen izotropen material, lahko strižni modul izračunamo kot:

$$G_w = \frac{E_w}{2(1 - \nu_w)} \quad (4.17)$$

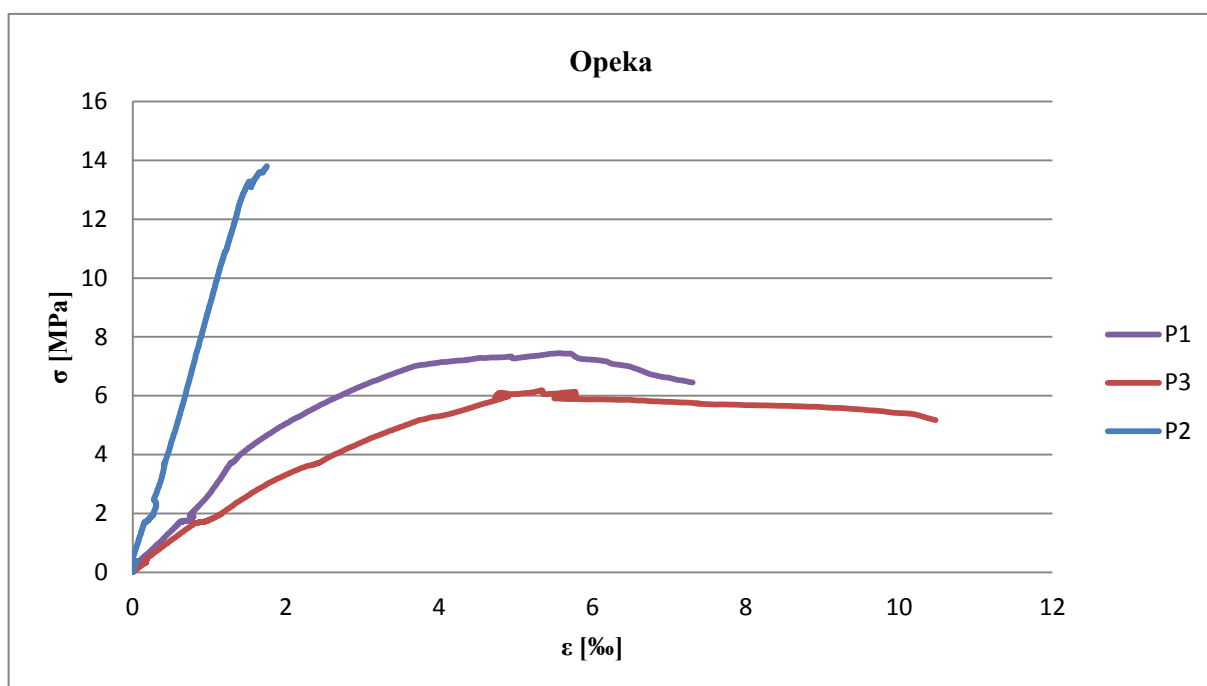
5 REZULTATI PREISKAV

5.1 Tlačni preizkus opečnatih prizem

Da bi ugotovili nekatere mehanske karakteristike opeke, smo izvedli nestandardni tlačni preizkus na treh opečnatih prizmah dimenzij 10 x 10 cm² ter višin 17,7 cm, 19 cm ter 20 cm. Opeko smo izbrali naključno iz pridobljenih vzorcev. Predstavljeni so rezultati dveh prizem (P1, P3), ki spadata v razred opeke A, ter en vzorec (P2), ki smo ga kvalificirali v razred C (Slika 8). Kot že rečeno smo za prizme upoštevali faktor oblike, kot je prikazano v enačbi (4.1).

Preglednica 7: Karakteristike opeke

Prizmica	f_{bc} [MPa]	ϵ_v [‰]	E_b [MPa]
P1 (razred A)	10,1	1,05	2503
P2 (razred C)	19,2	0,39	8008
P3 (razred A)	9,8	1,39	1958



Slika 31: Delovni diagram napetost-deformacija za opečne prizme

Pri opeki je bila porušitev veliko hitrejša kot pri zidkih, saj je opeka veliko bolj krhek material, kot je samo zidovje. Cepilne razpoke so se formirale po celem preizkušancu na prizmah P1 in P2 (Slika 32 in Slika 33), le v primeru P3 (Slika 34) se je preizkušanec nekoliko bolj deformiral na srednji opeki, tako da porušitev ni bila najbolj simetrična. Z grafa je vidna očitna razlika med temno (P2; klas.: C oz. D) in pa svetlo (P1,P3; klas.: A) opeko. Tlačna trdnost temne opeke je ravno dvakrat večja kot pri svetli opeki, modul elastičnosti pa je v primeru P2 trikrat večji kot pri P1 in štirikrat večji kot pri P3.



Slika 32: Porušitev opečne prizme P1



Slika 33: Porušitev opečne prizme P2



Slika 34: Porušitev opečne prizme P3

5.2 Cepilna natezna trdnost opeke

V spodnji preglednici prikazujemo dobljene natezne trdnosti opek, ki smo jih klasificirali v različne razrede glede na barvo in strukturo. Za vsak razred smo podali tudi povprečno natezno trdnost opeke. Oznaka f_{bs} pomeni cepilno natezno trdnost opeke, izračunali smo jo po enačbi (4.3) in nam služi za oceno dejanske natezne trdnosti.

Preglednica 8: Prikaz rezultatov cepilne natezne trdnosti opeke

oznaka	Klasifikacija (Slika 8)	F [kN]	l [cm]	d [cm]	f _{bts} [MPa]
P6	A	14	16	6,4	0,87
K2	A	18	14,4	6,9	1,15
K3	A	10	17,1	6	0,62
K4	A, mokra	8,7	15,1	5,9	0,62
P3	A	10,5	15,5	6	0,72
				Povprečje A (st. dev: 0,22)	0,8
P1	C	17,6	16,4	6	1,14
P5	C	37,8	14	5,7	3,02
				Povprečje C	2,1
P4	D	24,4	15,4	5,8	1,74
P2	D	30,8	14	5,8	2,42
				Povprečje D	2,8

Komentar preiskave

Če pogledamo povprečne rezultate vrst opeke (Preglednica 8), opazimo, da razred A odstopa od ostalih po ocenjeni natezni trdnosti, saj je povprečna vrednost skorajda trikrat manjša od razredov C in D. V razred B smo klasificirali samo eno opeko, saj nismo imeli več podobnih vzorcev. Zato za razred B ne moremo trditi, da so ti rezultati verodostojen pokazatelj karakteristike natezne trdnosti. Tudi razred C ima velik razpon v rezultatih, zato je tudi ta ocena vprašljiva. Za vse vrste opek nismo pridobili dovolj velikega vzorca za preiskavo, saj razredi B, C, D predstavljajo le okoli 10% vse opeke na objektu.

5.3 Vodovpojnost opeke

Za preiskus vodovpojnosti smo vzeli štiri karakteristične vzorce opek (2 x razred A, 1 x C in 1 x D). Rezultati so prikazani v Preglednica 9.

Preglednica 9: Vodovpojnost opeke

oznaka	teža suha (g)	teža mokra (g)	% vpojnosti	klasifikacija
N4/1	3602	4102	13,9	D
N4/2	4378	5338	21,9	B
N4/3	3566	3900	9,4	C
P2	2596	3330	28,3	A

V primeru P2 opazimo visoko vpojnost, skoraj 1/3 lastne teže, kar je seveda slabo v primeru, ko je taka opeka izpostavljena cikličnemu zmrzovanju in odtajanju. Glede na klasifikacijo opeke lahko ugotovimo, da je najbolj vpojna opeka razreda A, najmanj pa opeka, ki spada po klasifikaciji v razred C (Slika 8).

5.4 Tlačni preizkus malte

Za potrebe ugotavljanja tlačne trdnosti malte smo pripravili 12 tabletk. Nekateri vzorčki so bili vlažni, zato bom le-te prikazal v prvi skupini, suhe pa v drugi skupini. Vlažnost oz. zasičenost smo določili na vzorcih, ki so bili iz istega območja in v istih pogojih kot vzorci za tlačni preizkus.

Preglednica 10 prikazuje tlačno trdnost vzorcev brez upoštevanja oblikovnega faktorja f_m^t ter z upoštevanjem oblikovnega faktorja f_m . Za vsako skupino podajamo povprečje ter standardno deviacijo vzorca. Vzorci so bili odvzeti na mestih, kjer smo izvajali strižne teste. V poglavju Slika 2: Vzhodna fasada pred poružitvijo leta 2011

Pregledna mesta (str. 7) lahko vidimo lokacije odvzema vzorcev. Oznaka vzorca sovпада z oznako strižnega testa npr. P3 pomeni isto lokacijo, kjer se je izvajal SH3p. To velja za vse oznake v preglednici, izjema so le vzorci, katerih oznake se začnejo s črko »Z«, ti so bili odvzeti na zidkih, katera smo uporabili za tlačni preizkus (ZID 1 in ZID 2).

Preglednica 10: Tlačna trdnost malt

	oznaka	f_m^t [MPa]	f_m [MPa]
Vlažni vzorci:	P3/1	3,04	2,03
(stopnja zasičenja z vodo do 70%)	P3/2	3,83	2,55
	N4/2	3,37	2,25
	Z2/2	4,16	2,77
	Z2/4	3,61	2,41
	povp.		2,40
	st.dev.		0,28
Suhi vzorci:	Z1/1	2,89	1,92
(stopnja zasičenja z vodo do 10%)	Z1/2	4,03	2,69
	Z1/3	4,61	3,07
	Z1/4	3,39	2,26
	P2/3	3,50	2,33
	P2/5	2,38	1,59
	P2/6	3,00	2,00
	povp.		2,27
	st.dev.		0,50

Po rezultatih lahko sklepamo, da sama vlaga nima opaznejšega vpliva na tlačno trdnost malte, bolje bi prikazali vpliv vlage na zunanjih delih objekta, saj le-tu vlaga zaradi zmrzovanja in odtajanja močno pospeši propadanje in se s tem zmanjšuje tlačna trdnost malte. Žal nam takih vzorcev niti ni uspelo pripraviti za preizkus, ker so se preveč drobili že pri sami pripravi. Kjer je bila zidovina močno izpostavljena vlagi, je bila malta povsem zasičena z vodo. Pripravljeni suhi vzorci so vsebovali do 1% vlažnosti oz. 10% zasičenost, vlažni vzorci pa so imeli nekje 7% vlažnost oz. 70% zasičenost z vodo.

5.4.1 Modul elastičnosti malte (E_m)

Z enačbo (4.8) smo izračunali modul elastičnosti za malto E_m , v Preglednica 11 pa sta prikazana rezultata ocene modula elastičnosti malte za ZID 1 in ZID 2 (4.11).

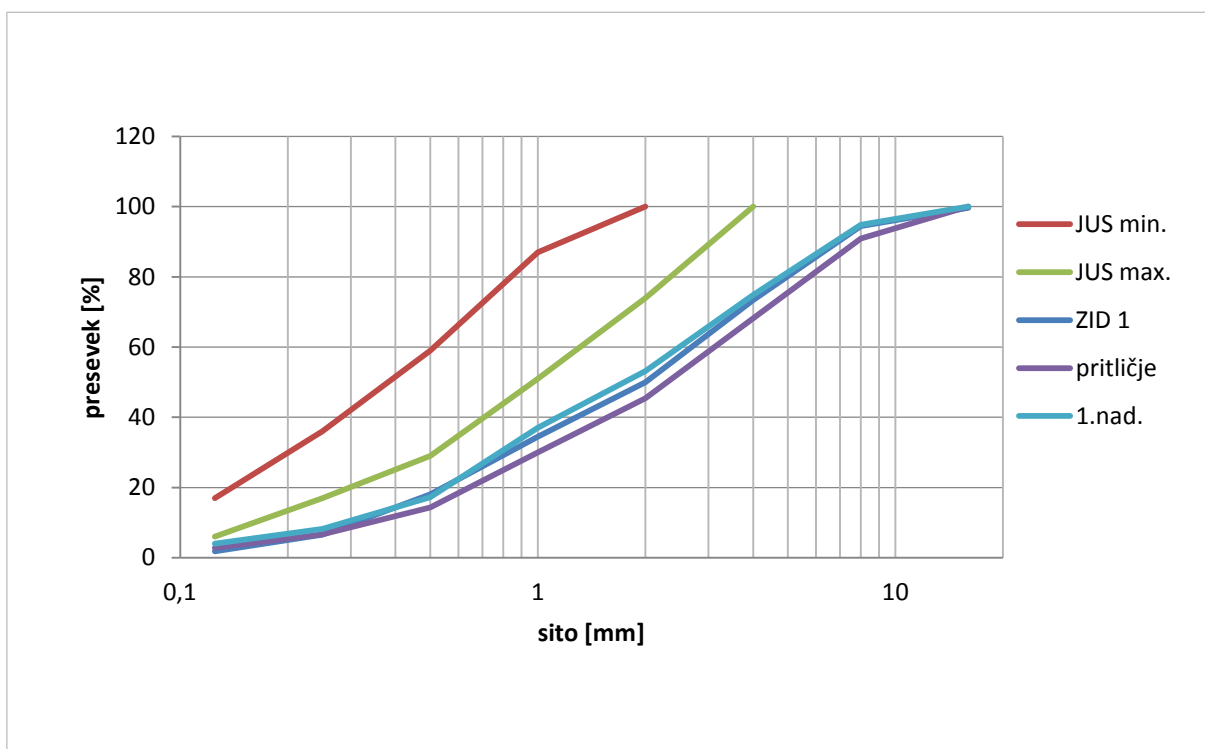
Za modul elastičnosti zidu E_w smo vzeli pripadajoče vrednosti, ki smo jih dobili pri tlačnih preizkusih zidkov, katerih rezultati so podani v nadaljevanju. Za elastični modul opeke E_b smo vzeli vrednost, ki smo jo pridobili s tlačnim preizkusom opečnih prizem kot povprečje tlačnih trdnosti prizmic iz svetle opeke razreda A, torej prizmic P1 in P3 (poglavje 5.1).

Preglednica 11: Modul elastičnosti malte

oznaka	E_w [MPa]	E_b [MPa]	E_m [MPa]
ZID 1	196	2231	46
ZID 2	73	2231	17

5.5 Sejalna analiza maltnih mešanic

Za prikaz zrnastostne sestave maltne mešanice smo izvedli sejalno analizo treh vzorcev. Rezultate smo primerjali s krivuljami zrnastostne sestave za peske in agregate po standardu JUS U.M2.010, ki predpisuje minimalne in maksimalne vrednosti presevkov, primerne za maltne mešanice.



Slika 35: Prikaz krivulje zrnastosti za apneno maltno mešanico

V vseh treh primerih smo s krivuljo izven določil za zrnastostno sestavo grobozrnate ali fino zrnate maltne mešanice. Naši vzorci so vsebovali veliko nadmernih zrn (4-16 mm), saj kar 30% vzorca predstavljajo nadmerna zrna. Tudi pri manjših frakcijah je presejek manjši, kot bi moral biti za ustrezno maltno mešanico.

5.6 Strižni test stika med opeko in malto («In-situ shove test»)

Podatke, ki smo jih pridobili iz preiskav, sem razdelil po etažah, tako si tudi sledijo preglednice in komentarji, začenši s kletjo.

5.6.1 Rezultati testov za klet

V prvem stolpcu Preglednica 12 je prikazana oznaka posameznega testa ter višina v etaži, na kateri se je izvedel test. Drugi stolpec podaja klasifikacijo opeke po Slika 8, tretji stolpec podaja procent zasičenja z vodo preizkušene opeke, četrti strižno trdnost naležne spojnice med opeko in malto (f_v), peti prikazuje začetno strižno trdnost pri ničelni tlačni napetosti (f_{v0}), zadnja dva stolpca pa prikazujeta togost (K_e), pri čemer so v zadnjem stolpcu prikazani rezultati tistih testov, pri katerih ni prišlo do napak v elastičnem območju diagrama (zaklinjanje, porušitev opeke...).

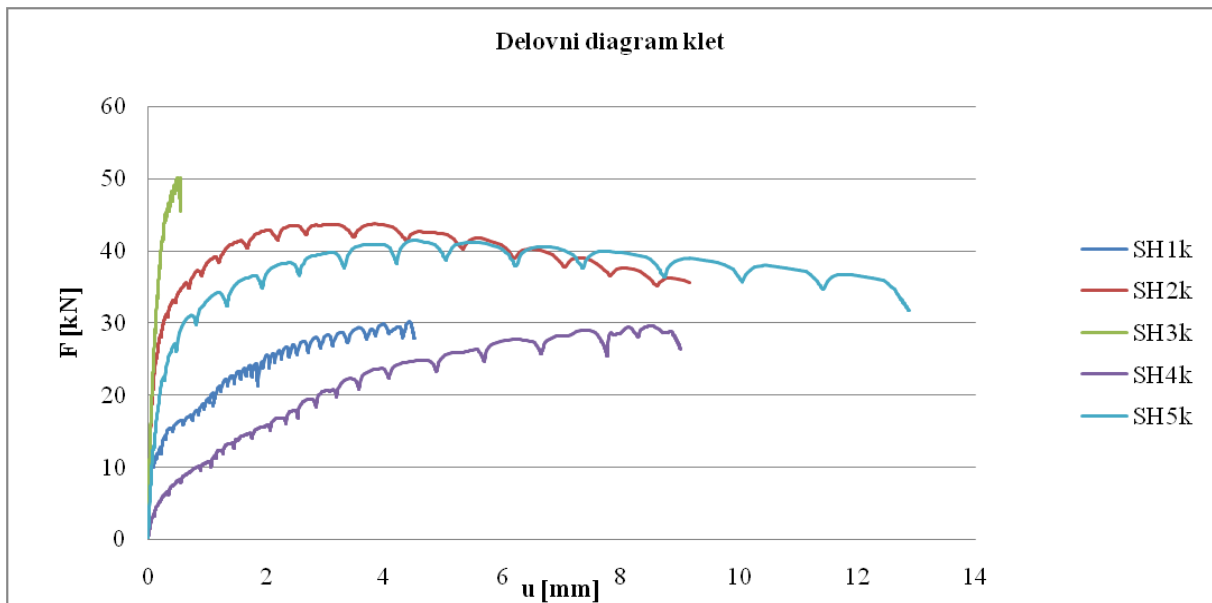
Slika 37 prikazuje delovni diagram vnesenih horizontalnih silv odvisnosti od horizontalnih pomikov preizkušancev. Opazimo, da je diagram valovit, kar je posledica ročne regulacije vnašanja sile, ki ni bila povsem enakomerna in monotona.

Kot je razvidno iz tretjega stolpca (Preglednica 12), je procent zasičenosti zelo variiral, to je seveda zaradi različnih vodovpojnosti med vrstami opeke. S stopnjo zasičenosti, podano v procentih, lahko ocenimo, v kolikšni meri je bilo zidovje na območju testa izpostavljeno vlagi. Če opazujemo razmerje med f_{v0} in K_e , opazimo, da sta f_{v0} in K_e zelo odvisna drug od drugega. Izjema je le SH1k, ki ima kljub nizki vrednosti τ_0 visoko efektivno togost. To razmerje (za primer SH1k) je posledica popuščanja zalednega zidu v srednji tretjini poteka testa. V prvi tretjini je test potekal normalno (območje, kjer se izračunava K_e), zaradi česar prvi primer odstopa od ostalih.

Če si pozorno ogledamo Slika 36, se nekje na območju 2/3 vnesene sile pojavi stopnica (primera SH1k in SH4k), kar kaže na nekakšno spremembo v trenju med opeko in malto. Ta sprememba v poteku diagrama je najverjetneje posledica zaklinjanja posameznih kosov agregata v spojnici med opekama. Zato smo pri izračunu strižne odpornosti upoštevali vrednosti, ki so dosežene tik pred bistvenejšo spremembo v naklonu posameznega diagrama.

Preglednica 12: Rezultati strižnih preizkusov stikov med opeko in malto v kleti

KLET:	klasifikacija	% zasičenosti	f_v [MPa]	f_{v0} [MPa]	K_e [kN/mm]	K_e [kN/mm]
SH1k (80 cm)	C	14	0,17	0,07	280	280
SH2k (80 cm)	B	81	0,35	0,26	387	
SH3k (80 cm)	C	76	0,52	0,26	361	361
SH4k (80 cm)	A	68	0,12	0,1	44	
SH5k (80 cm)	C	58	0,31	0,11	184	
			povprečje	0,16	251	320
			st.dev.	0,093	140	57



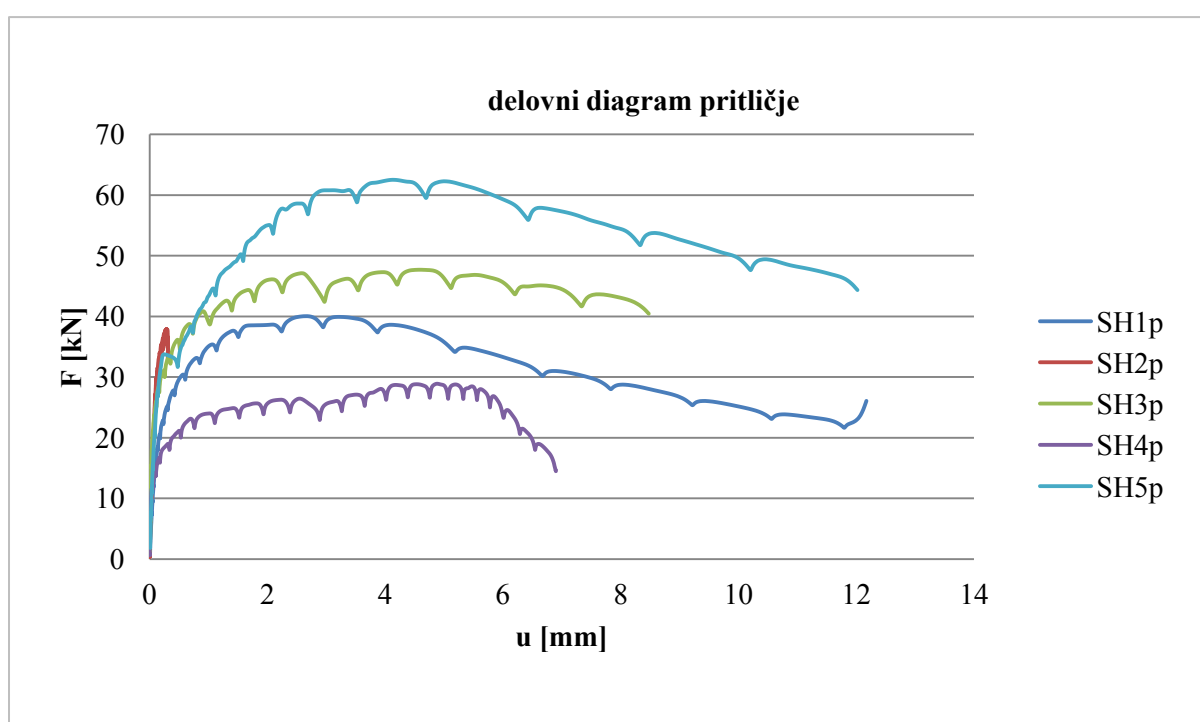
Slika 36: Prikaz delovnih diagramov za strižne preizkuse stikov med opeko in malto v kleti

5.6.2 Rezultati testov za pritličje

Podatki v preglednici so podani in izbrani na enak način kot v primeru kleti. Če prvo opišemo razmere okolja za primere v Preglednica 13, bomo lažje komentirali dobljene rezultate. Preizkus SH1p je bil narejen v suhem okolju, vprašljiv pa je prenos vertikalne obtežbe na preizkušane, saj je bila opeka nad preizkušancem nekoliko poškodovana. Že po rezultatu f_{v0} v primeru SH2p vidimo, da ta primer odstopa od ostalih. Ta preizkušane je bil sorazmerno manjših dimenzij kot v ostalih primerih in je kljub temu vse do sile 32 kN dobro prenašal horizontalni potisk bata. Tudi vsebnost vlage kaže na to, da je bil preizkušane kvalitetnejši od povprečja. Po 32 kN vnesene sile in pomiku cca. 0,5 mm je preizkušane oz. stik med opeko in malto popustil, zato v tem območju vidimo padec sile in pomika (Slika 37). Primer SH3p je dosegel visoko togost (K_e) in sorazmerno visoko začetno strižno odpornost f_{v0} glede na povprečje, kljub temu, da je bil lociran v zelo vlažnem okolju. Odziv preizkušanca SH4p je dober indikator stanja, v katerem je le-ta bil. Zidovje je namreč bilo močno razmočeno, locirano je bilo tik ob poškodovani vertikali žleba, ki je močno zamakala zid. Preizkušane se je med samim testom zdrobil, saj je bil povsem razmočen in prhek. Primer SH5p se je najbolj približal povprečju stanja izvedenih testov. Imel je prav tako veliko vsebnost vlage, vendar kljub temu primerljive rezultate s suhimi vzorci.

Preglednica 13: Rezultati strižnih preizkusov stikov med opeko in malto v pritličju

PRITLIČJE:	klasifikacija	% zasičenosti	f_v [MPa]	f_{v0} [MPa]	K_e [kN/mm]	K_e [kN/mm]
SH1p (80 cm)	A	31	0,46	0,36	205	
SH2p (80 cm)	A	1	0,56	0,46	352	352
SH3p (100 cm)	C	100	0,46	0,36	871	
SH4p (130 cm)	A	78	0,29	0,2	428	428
SH5p (40 cm)	A	56	0,37	0,28	303	303
			povprečje	0,33	431	219
			st.dev.	0,09	258	63



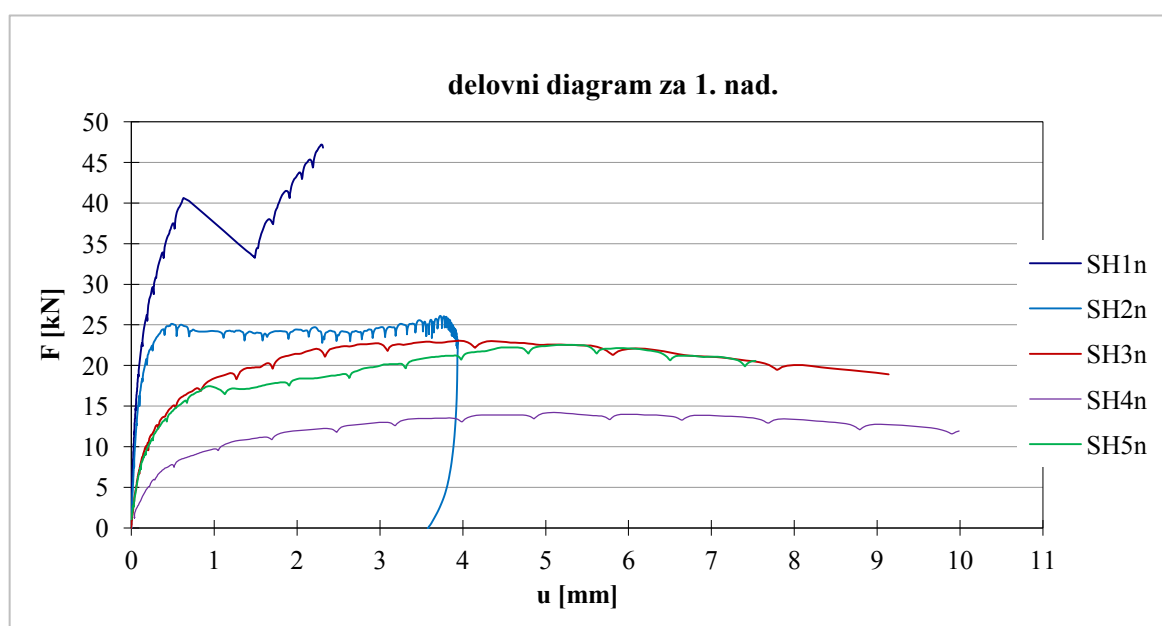
Slika 37: Prikaz delovnih diagramov za strižne preizkuse stikov med opeko in malto v pritličju

5.6.3 Rezultati testov za 1. nadstropje

Podatki v preglednici so podani in izbrani na enak način kot v primeru kleti. Prvo, kar opazimo, je, da se procent zasičenosti opeke precej zmanjša v primerjavi s pritličjem in kletjo, izjema je le primer SH4n, ki je bil lociran v zidu z vertikalno hidroizolacijo. Opazimo majhno togost (K_e), kar je tudi posledica manjše vertikalne napetosti na stiku med opeko in malto.

Preglednica 14: Rezultati strižnih preizkusov stikov med opeko in malto v 1. nadstropju

1.NADSTROPJE	klasifikacija	% zasičenosti	f_v [MPa]	f_{v0} [MPa]	Ke [kN/mm]	Ke [kN/mm]
SH1n (125 cm)	A	3	0,41	0,36	208	
SH2n (105 cm)	C	3	0,24	0,18	207	207
SH3n (70 cm)	D	50	0,28	0,24	53	
SH4n (150 cm)	B	90	0,19	0,17	20	
SH5n (100 cm)	A	2	0,21	0,16	63	63
			Povprečje	0,22	110	90
			St. dev.	0,08	91	102



Slika 38: Prikaz delovnih diagramov za hitri strižni test v 1. nadstropju

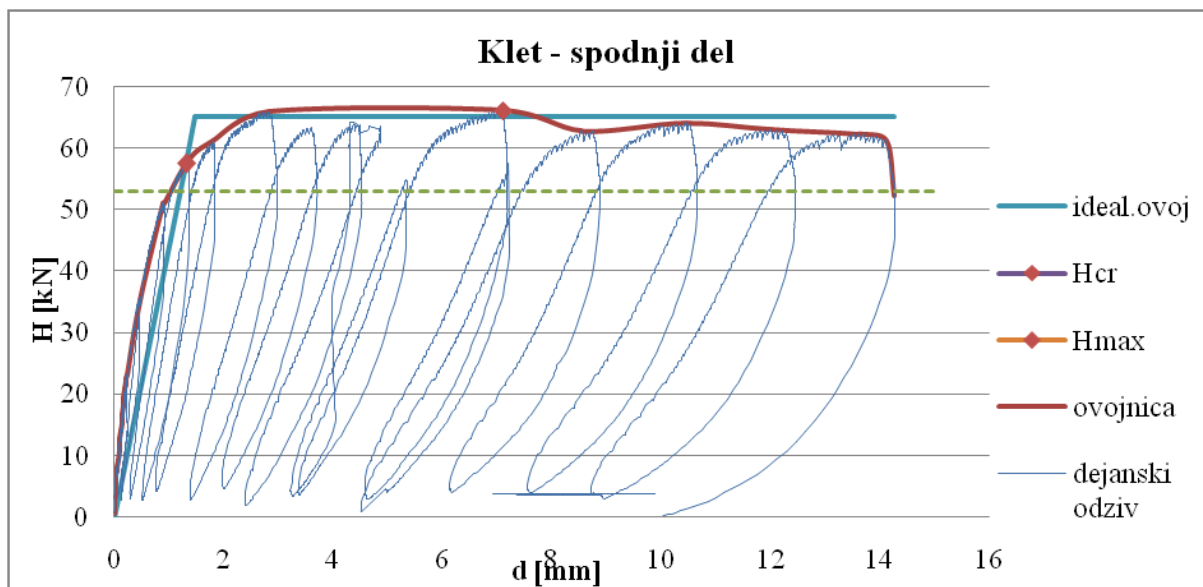
5.7 Strižna trdnost opečnatega zidovja (»In-situ shear test«)

Ta preizkus smo opravili na zidu v kleti in zidu v pritličju. Vsak zid se obravnava po polovicah glede na višino zidu. V naslednjih dveh poglavjih podajamo vrednosti mehanskih lastnosti za povsem vlažen zid v kleti in sorazmerno suh zid v pritličju. Postopki računanja in enačbe so prikazane v poglavju 4.10.2.

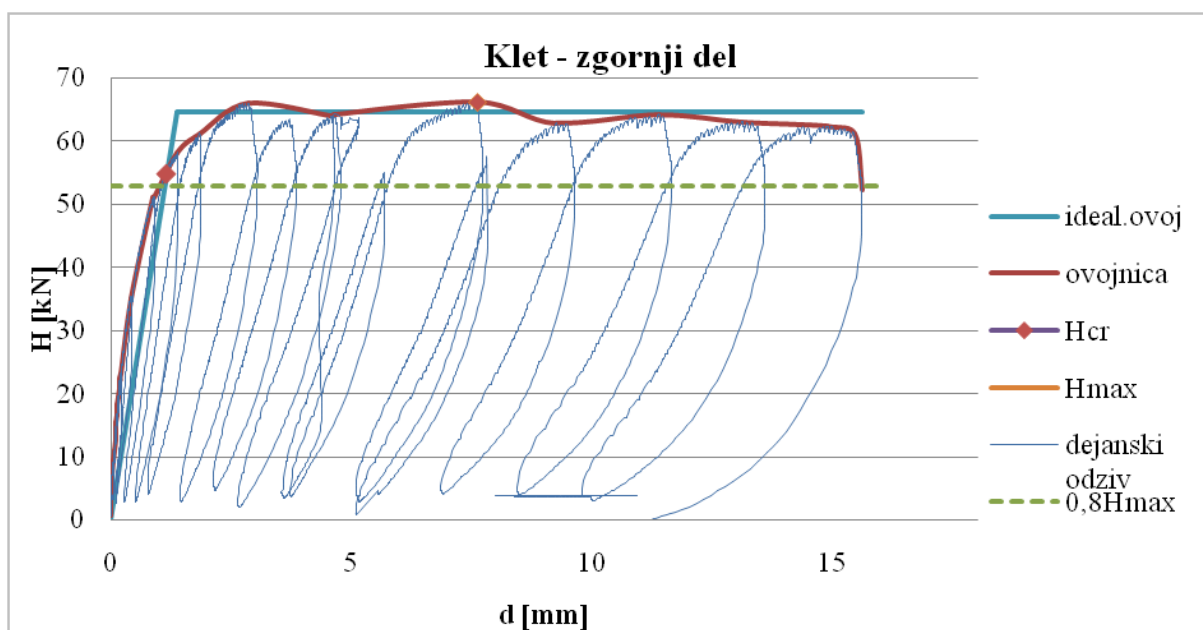
5.7.1 Rezultati testa v kleti

V kleti smo preizkušali močno navlažen zid. Opeka je bila na zunanji strani zidu mestoma precej poškodovana, opaziti je bilo preperelost in visoko stopnjo propadanja opeke in malte v okolici preizkusnega zidu.

Na Slika 39 in Slika 40 prikazujemo potek strižne preiskave, kjer, kakor že rečeno, graf prikazuje odnos med vneseno horizontalno silo H in relativnim horizontalnim pomikom d , merjenim na sredini zidnega preizkušanca. Oznaka H_{max} označuje maksimalno doseženo silo obremenitve pri testu, H_{cr} pa označuje doseženo silo pri pojavu prve vidne razpoke. $0,8 H_{max}$ označuje mesto omejitve pomikov za idealizacijo ovojnice. Iz teh grafov po idealizaciji iz vrednotimo mehanske lastnosti preskušane zidu (poglavje 4.10.1).



Slika 39: Prikaz delovnega diagrama za strižni test-klet spodnji del



Slika 40: Prikaz delovnega diagrama za strižni test-klet zgornji del

V Preglednica 15 smo prikazali mejna stanja in pripadajoče strižne module (G_w) za spodnji del zidu (S) ter zgornji del zidu (Z).

Preglednica 15: Rezultati karakterističnih mejnih stanj za klet-spodnji in zgornji del zidu

	Meja razpok		G_w	Maksimalna nosilnost		G_w	Mejno stanje porušitve	
	d_{cr}	H_{cr}		d_{Hmax}	H_{max}		d_{max}	H_{dmax}
	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]	[kN]
S	1,31	57,5	80	7,10	66,1	17	14,27	52,3
Z	1,16	54,7	86	7,61	66,1	16	15,60	52,3

Preglednica 16: Rezultati strižnega preizkusa zidu v kleti-vrednosti idealizacije ter natezna trdnost zidu

Oznaka zidu		Klet sp.	Klet zg.
Horizontalna odpornost	H_u [MPa]	65,1	64,5
Efektivna togost	K_e [kN/mm]	44	47
Pomik na meji elastičnosti	d_e [mm]	1,48	1,37
Mejni pomik	d_u [mm]	14,3	15,6
Duktilnost	μ	9,63	11,4
Natezna trdnost	f_t [MPa]	0,05	0,05
Strižna napetost	τ_{max} [MPa]	0,11	0,11

Komentar za preiskave v kleti

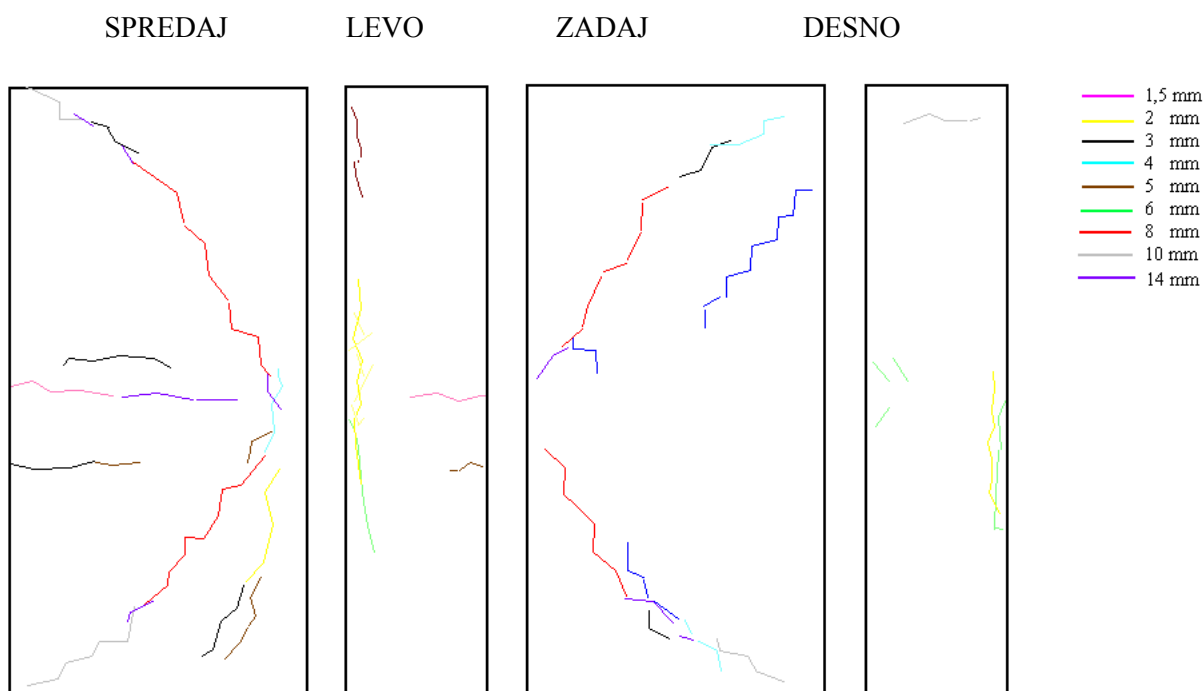
Po navedbah nekaterih avtorjev je priporočilo pri preverjanju potresne odpornosti zidanih stavb duktilnost zidov pri nearmirani zidovini enaka $\mu=1,5$ (Tomažević, 1987). V našem primeru za klet je $\mu=11,4$. Ker pa je duktilnost po definiciji določena z razmerjem d_u/d_e in ker mejo elastičnosti (d_e) težko točno določimo, lahko pri primerjavi rezultatov dobimo velik raztros ocenjenih vrednosti faktorja duktilnosti.

Togost K_e konstrukcijskega elementa je odvisna od mehanskih lastnosti zidovja (E_w , G_w) kot tudi od geometrije obravnavanega elementa in načina vpetja v konstrukcijo. Natezna trdnost f_t je primerljiva s podatki, ki so bili navedeni v Preglednica 1, in je nekako v skladu s karakteristikami primerljivih zidov.

Na Slika 41 je prikazan potek razpok in porušitev med obremenjevanjem zidu, za vsak cikel obremenjevanja je prikazana razpoka z drugo barvo.

Najprej se je formirala razpoka na sredini preizkušanca (pri amplitudi pomika 1,5 mm), to je tako imenovana upogibna razpoka, ki je začela ločevati zid na zgornji in spodnji del. Pri nadaljevanju z

obremenjevanjem so se na obeh polovicah zidu začele pojavljati diagonalne razpoke (amplitude pomikov 4, 5, 6 mm). Formacija razpok je začela kazati tipično strižno razpokanost, ki je potekala od horizontalne obtežbe bata pa vse do skrajnih robov zidu ob vpetju. V nadaljevanju, ko so se formirale vse razpoke (amplituda večja od 6 mm), so se le te začele širiti in so se razprle skozi obe diagonali spodnjega in zgornjega dela zidu. Na zadnji strani zidu so postajale razpoke vidne šele pri večjih pomikih (večjih od 8 mm), saj je bil zid na zunanji strani zaradi zamakanja precej poškodovan.



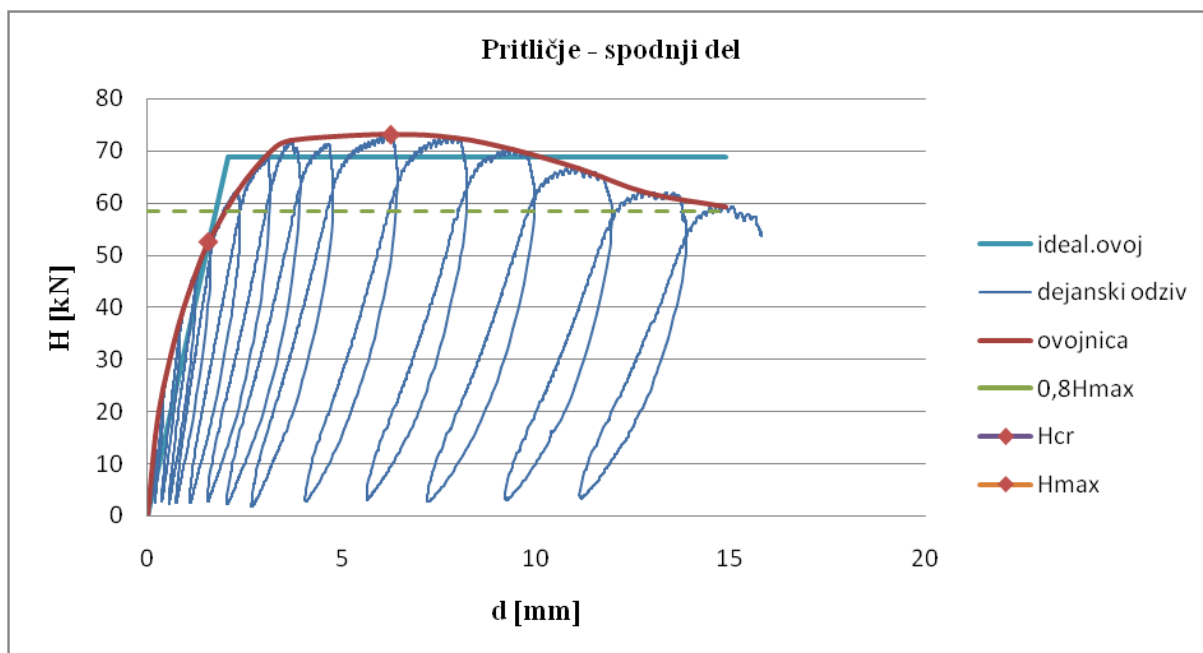
Slika 41: Shema razpok in porušitev na preizkušancu v kleti



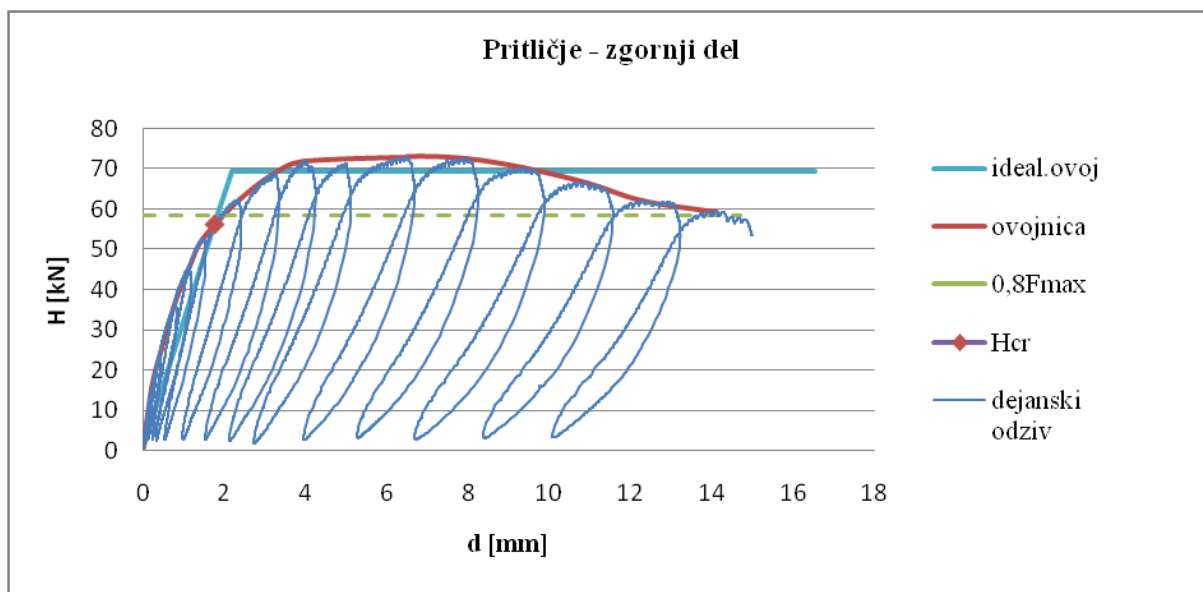
Slika 42: Prikaz izvajanja testa v kleti

5.7.2 Rezultati testa v pritličju

Rezultati so podani enako kot v primeru kleti, diagrama odziva za oba dela zidu sta prikazana na Slika 43 in Slika 44, v Preglednica 17 so podani rezultati karakterističnih mejnih stanj za oba dela zidu ter v Preglednica 18 vrednosti idealizacije in natezna trdnost zidu.



Slika 43: Prikaz delovnega diagrama za strižni test pritličje-spodnji del



Slika 44: Prikaz delovnega diagrama za strižni test pritličje-zgornji del

Preglednica 17: Rezultati karakterističnih mejnih stanj za pritličje-spodnji in zgornji del

	Meja razpok		G_w	Maksimalna nosilnost		G_w	Mejno stanje porušitve	
	d_{cr}	H_{cr}		d_{Hmax}	H_{max}		d_{max}	H_{dmax}
	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]	[kN]	[MPa]	[mm]	[kN]
S	1,57	52,5	69	6,25	73,1	24	17,52	53,0
Z	1,77	56,2	65	6,49	73,1	23	16,53	53,0

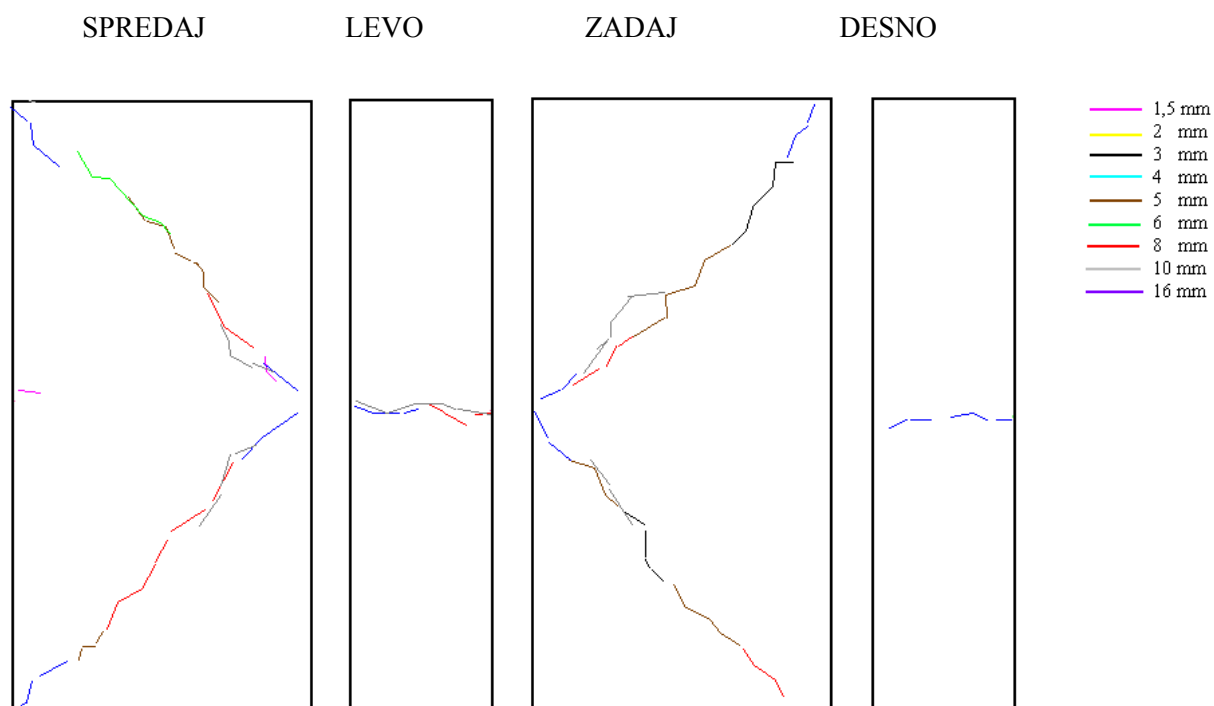
Preglednica 18: Rezultati strižnega preizkusa za pritličje-vrednosti idealizacije ter natezna trdnost zidu

Oznaka zidu		Pritličje sp.	Pritličje zg.
Horizontalna odpornost	H_u [MPa]	68,8	69,9
Efektivna togost	K_e [kN/mm]	33	32
Pomik na meji elastičnosti	d_e [mm]	2,06	2,18
Mejni pomik	d_u [mm]	14,9	14,1
Duktilnost	μ	7,22	6,47
Natezna trdnost	f_t [MPa]	0,07	0,07

Komentar za preiskave v pritličju

V pritličju je bil odziv zidu na obremenitev nekoliko drugačen kot v kleti. Porušitev je bila bolj »čista« kot v kleti, namreč razpoke potekajo povsem po diagonalah polovic zidu (Slika 46). Razpoka je potekala tako po spojnicah, kot tudi čez opeko. Na Slika 43 vidimo, da je potisna sila po H_{max} začela hitreje padati, kar se v primeru kletnega zidu ni zgodilo, to je dokaz manjše duktilnosti v primerjavi s kletnim zidom.

V pritličju so se razpoke začele formirati nekoliko kasneje kot v kleti, saj so se prve razpoke pokazale šele pri 4 mm pomika (Slika 45). Tudi kasneje razpoke niso tako intenzivno naraščale kot v kleti. Na zadnji strani zidu smo prve strižne in upogibne razpoke opazili pri 3 mm pomika. Zid je bil na zunanji strani ometan, zato so bile razpoke zunaj bolj in prej vidne kot z notranje strani. Celoten spekter razpok (od 1-18 mm) je bil v pritličju veliko bolj linearen po diagonalah kot v kleti (strižne razpoke).



Slika 45: Shema razpok in porušitev na preizkušancu v pritličju



Slika 46: Zid v pritličju po končanem testu

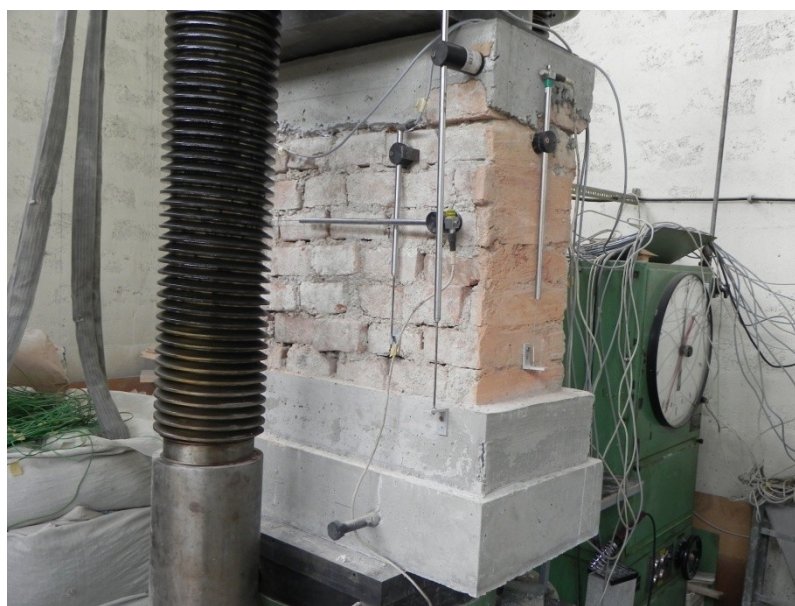
5.8 Tlačna trdnost opečnatih zidkov

Enoosni tlačni preizkus zidkov smo opravili na stiskalnici v laboratoriju Katedre za preizkušanje materialov in konstrukcij Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani. Preiskavo smo spremljali tako, da smo na obrazce beležili nastanek prvih razpok ter širjenje razpok. Vsaki poglobitni spremembi smo prepisali silo, pri kateri se je le-ta zgodila.

5.8.1 Rezultati za ZID 1

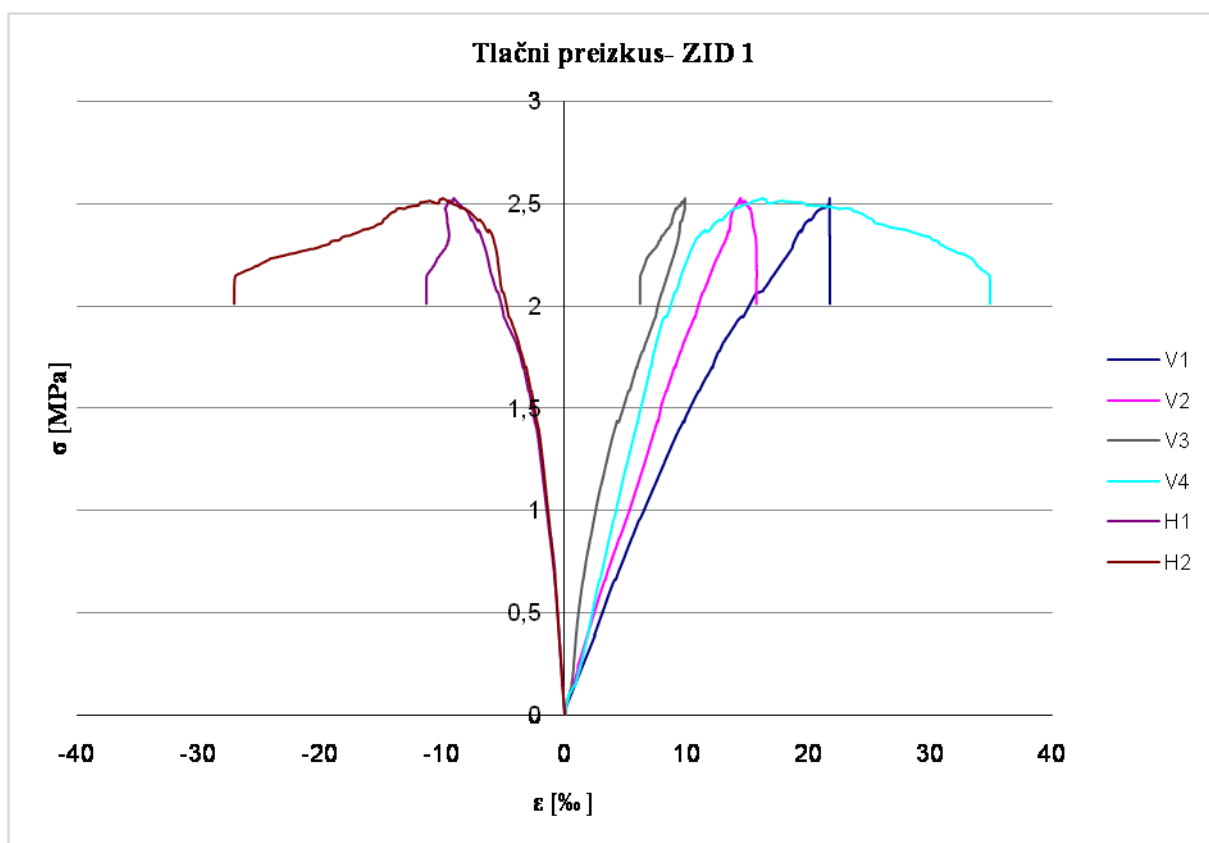
Rezultate mehanskih karakteristik za oba zida smo dali v Preglednica 19, kjer primerjamo rezultate naših preiskav in ocene zidovine ZRMK-ja za Kolizej. Vlažnost opeke zidka je bila 2,6%.

Kvaliteta izdelave zidka je v tem primeru slaba, začetna razpokanost je bila srednja, povprečno ena vertikalna spojnica na vrsto je bila pomanjkljivo zapolnjena z malto. Na zadnji strani zidka nismo odstranili ometa, zaradi nevarnosti, da bi preveč poškodovali sam zidek.

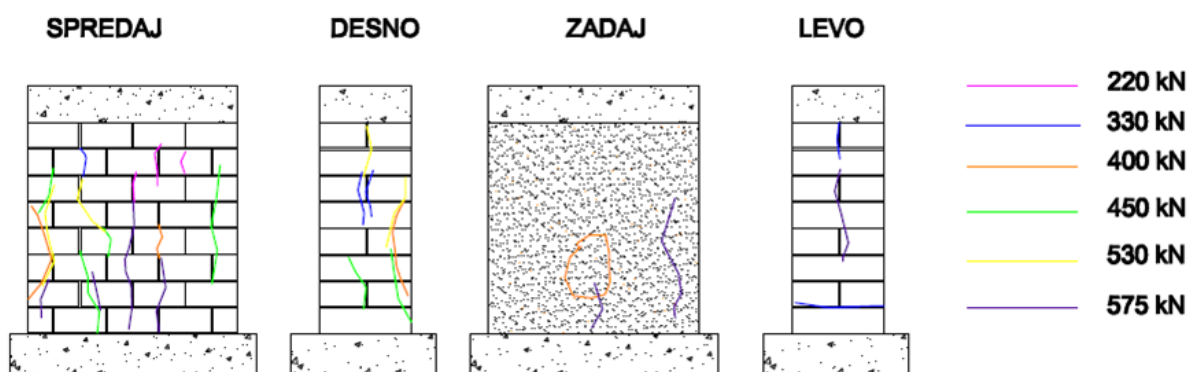


Slika 47: ZID 1 pred obremenjevanjem

Na Slika 48 imamo prikazane na levi strani horizontalne deformacije, na desni strani pa vertikalne deformacije. Ker smo pri testu ZID-a 2 imeli težave z nasedanjem deformetrov, smo v primeru ZID-a 1 za merjenje deformacij uporabil samo LVDT-je (Stran 62).



Slika 48: Graf napetost-deformacije za ZID 1



Slika 49: Shema razpok za ZID 1

Komentar testa za ZID 1

Prvo razpoko smo opazili pri 0,97 MPa tlačne napetosti (38% σ_{\max}), nastala je na oslabiljenih vertikalnih spojnica. V nadaljevanju se je pri tlačni napetosti 1,14 MPa (45% σ_{\max}) začel omet ločevati od opeke. Pri napetosti 1,44 MPa (57% σ_{\max}) so se na desnem delu zidu formirale razpoke, potekale so po spojnica ter čez opeko. Pri 1,76 MPa (70% σ_{\max}) je začel omet odpadati, saj se je

zaplata zaklinila, ometna plošča pa se je začela napihovati. Pri 1,97 MPa (78% σ_{\max}) so se v velikem obsegu formirale razpoke na prvi strani zidu, v osrednjem delu so se začele pojavljati natezne napetosti, tlak je prehajal v nateg, desna in leva stran zidu sta se začeli napihovati. Razpoke so potekale vertikalno, kot je za tlačno obremenitev značilno, vendar se na simetričnih straneh zidu niso pojavljale enakomerno, kar kaže na nehomogenost pozidave. Levi spodnji rob na prednji strani zidu je začel popuščati pri 2,33 MPa (92% σ_{\max}). Maksimalno napetost smo dosegli pri 2,52 MPa, od tu naprej so se razpoke začele širiti in s tem je napetost začela hitro upadati.

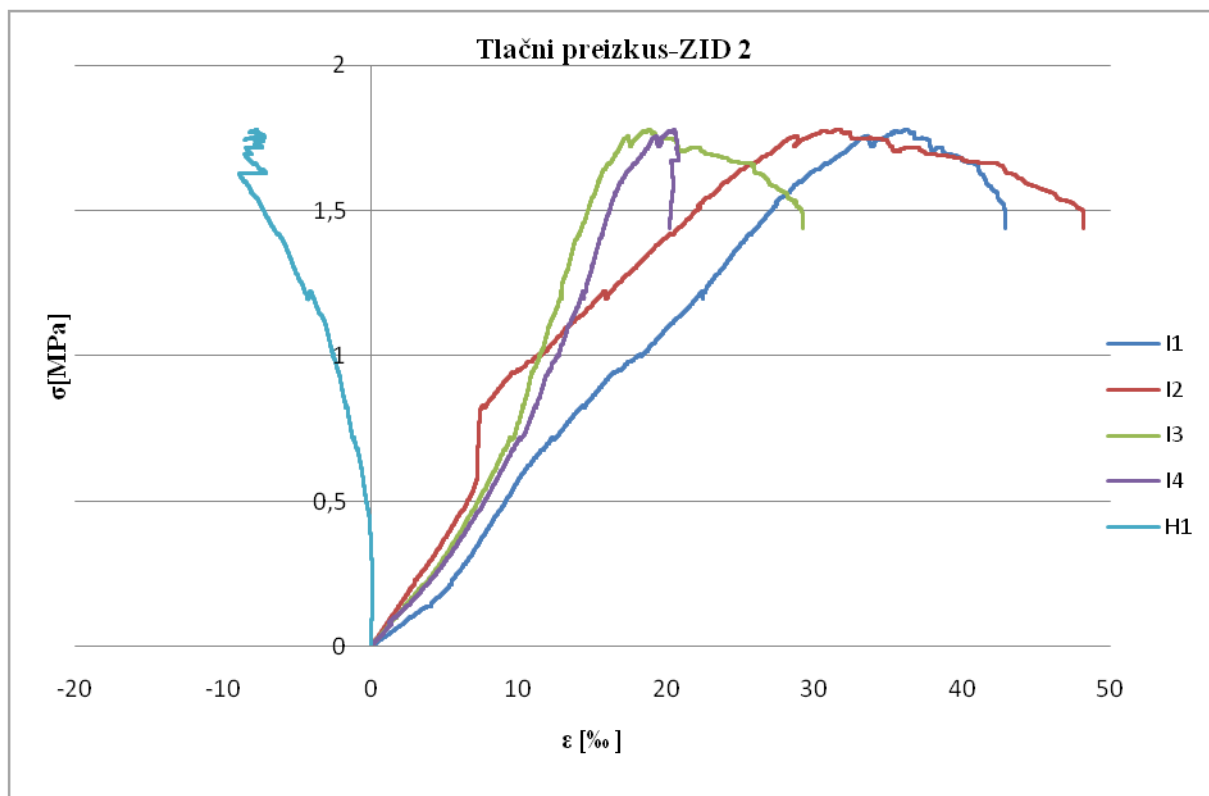
5.8.2 Rezultati za ZID 2

Kvaliteta izdelave zidka je bila slaba, začetna razpokanost pa velika. Vlažnost opeke zidu je bila 9,3%. Razpokane so bile vertikalne in naležne spojnice. Stopnja razpokanosti je prikazana na Slika 50.



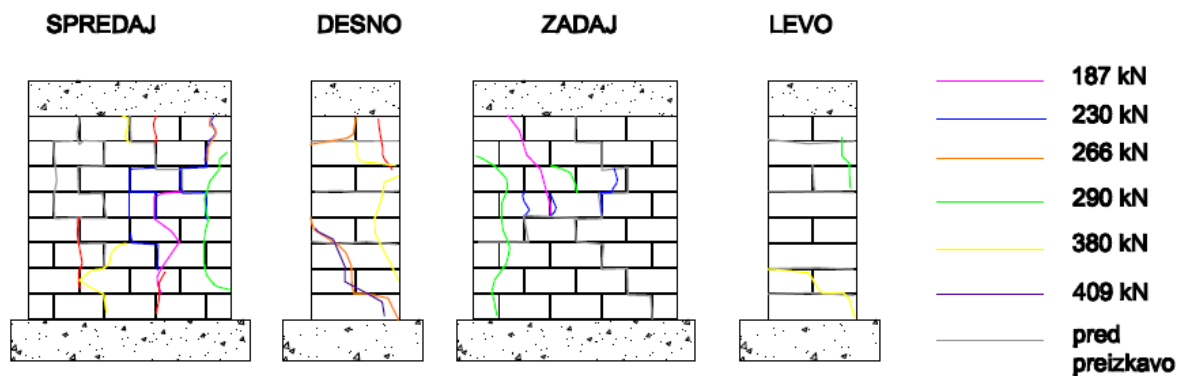
Slika 50: Prikaz razpokanosti na ZID-u 2 pred obremenitvijo

V primeru preizkušanca ZID 2 smo imeli kar nekaj težav z merilci deformacij, namreč deformetri so nam začeli nasedati nekje pri 80% maksimalne obremenitve (pri 4,38 mm pomika). O nasedanju govorimo takrat, ko pride do pomikov, večjih od kapacitete zaznavanja deformacij merilne naprave. Kljub temu smo mehanske lastnosti izračunali iz podatkov, ki smo jih pridobili s pomočjo deformetrov.



Slika 51: Delovni diagram za ZID 2

Na Slika 52 prikazujemo shemo poteka razpok, tu smo zabeležili tudi razpoke, ki so bile prisotne že pred obremenitvijo (siva barva).



Slika 52: Shema razpok za ZID 2

Komentar testa za ZID 2

Na Slika 51 opazimo, da sta merilca, pritrjena na zadnji strani zidka (I3 in I4), začela beležiti manjše deformacije kot tista na prednji strani nekje pri 0,50 MPa (30% σ_{max}), kar kaže na neenakomerno deformiranje zidka. Prvo novonastalo razpoko smo opazili šele pri 45% maksimalne napetosti, in sicer

so se začele tvoriti vertikalne razpoke, ki so potekale po sredini zidu. Tu lahko govorimo že o vplivu nateznih napetosti, saj so se stranice zidka (na Slika 52, leva in desna stran) že začele napihovati. Naslednje razpoke so se pojavile pri 1 MPa napetosti (56% σ_{\max}), tudi te so potekale vertikalno. Pri 1,15 MPa (65% σ_{\max}) se je desna stranica zidka začela odpirati po diagonali, kar je najverjetneje posledica predhodne razpokanosti. Pri 1,25 MPa (71% σ_{\max}) se je desni rob na prednji strani zidka začel ločevati skorajda po celi vertikali, razpoke sopotekale po spojnica kot tudi čez opeko. Pokanje opeke je najverjetneje posledica tankih naležnih spojníc (< 10 mm) in pa prisotnosti nadmernih zrn agregata (do 16 mm premera) v maltnih spojnica. Pri 1,4 MPa (81% σ_{\max}) so se do tedaj nastale razpoke združile v linijske, ki so potekale po celotni vertikali. Pri 90% σ_{\max} se je srednja tretjina zidu na desni strani odcepila od matičnega zidka. Po doseženi maksimalni napetosti (1,78 MPa) je le-ta začela počasi upadati, kljub temu, da je bil zidek že povsem razpokan.

Preglednica 19: Primerjava rezultatov za ZID 1 in ZID 2 z drugimi rezultati

Kolizej	f_w [MPa]	v	E_w [MPa]	G_w [MPa]
ZID 2	1,78	0,07	73	34
ZID 1	2,52	0,23	176	72
ZRMK				
MO 10 MM 0,5	2		250	40
MO 15 MM 2,5	2,5		800	200
Stari zid - MO 10 MM 1,0	2		800	50

Iz preglednice je razvidno, da je ZID 2 slabši od zidka ZID 1 tako glede dosežene tlačne trdnosti kot tudi glede elastičnega modula. Karakteristike so manjše tudi od primerljivih vrednosti iz drugih poročil. Za to je krivo predvsem stanje, v kakršnem je bil zidek. Je pa res, da smo za izračun elastičnega modula uporabili povprečne deformacije LVDT-jev V1 in V2.

6 SKLEP

Če naredimo pregled celotnih preiskav, ki smo jih izvedli na objektu Kolizej v Ljubljani z namenom študije vpliva vlage in propadanja materiala na mehanske lastnosti zidovine, začenši z gradniki zidovja, opeko in malto, pridemo do naslednjih ugotovitev; opeko smo zaradi večje preglednosti klasificirali v štiri razrede. Osnovni kriterij klasifikacije je bil vizualni izgled. Vizualno smo opeko ločili po barvi in njeni strukturi, ločili smo jo na svetle (klas. A in B) in temne (klas. C in D) ter po strukturi na homogene (klas. C) in nehomogene (klas. A, B, D) (Slika 8). Razred A po poročilu FGG predstavlja 90% vse opeke na objektu. Ostalih 10% predstavljajo ostali razredi po naši klasifikaciji. Drugi kriterij klasifikacije je bila velikost tlačne trdnosti in pa ocena natezne trdnosti opeke. Tu se najbolj izrazito ločita dva razreda opeke, in sicer razred A in C. Prvi je dosegel pri preiskavi na opečnatih prizmicah tlačno trdnost $f_b = 10,1$ MPa ter na cepilno natezno trdnost $f_{bis} = 0,8$ MPa, drugi pa $f_b = 19,2$ MPa, ter $f_{bis} = 2,1$ MPa. Ta razlika v mehanskih karakteristikah se tudi prosto vidi pri propadanju materiala, namreč na izpostavljenih nezaščitenih delih fasade ter na kletni zidovini, kjer je prisoten kapilarni dvig vlage, je na istih mestih opaziti večjo propadlost opeke razreda A kot razreda C (Slika 7). Razliko v kakovosti je povzročila slabša kakovost gline (prisotnost primesi), votlikavost ter neenakomerna zapečenost opeke, kar je opaziti predvsem pri opeki razreda B.

Naslednji zgoraj omenjeni gradnik je malta. Ta je bila po podatkih ZRMK-ja narejena v razmerju apno:pesek 1:5, torej govorimo o malti, ki ni bogata z vezivom. Za polnilo je bil uporabljen nepran rečni prod (Bergant, 1995), ki je imel slabo granulacijsko sestavo. V polnilu je bilo namreč prisotnih kar 50% agregata zrnivosti večje od 2 mm (priporočila za malte: 10-30%). V granulacijski sestavi opazimo zrna agregata, ki so večja od 10 mm, kar je povsem neprimerno za maltne mešanice, ki se uporabljajo za zidanje z opeko.

S tlačnimi testi maltnih vzorcev smo ugotovili, da sama vlaga nima neposrednega vpliva na tlačno trdnost, saj so vlažni vzorci dosegli v povprečju ($f_m = 2,4$ MPa) nekoliko višjo trdnost, kot suhi vzorci ($f_m = 2,3$ MPa). Za prikaz vpliva vlage na propadanje malte in posredno na doseženo tlačno trdnost nam ni uspelo pripraviti vzorcev, saj je bila malta, ki je bila v območju zidovine, ki je bila skorajda 100% zasičena z vodo, povsem prhla in nevezana.

Izvedba našega testa določanja tlačne trdnosti malte ni v skladu s predpisi standarda (SIST EN 1015-11: Metode za preizkušanje malte...), vendar bi kljub temu lahko naredili primerjavo s predpisom, ki velja pri nas, da bi lažje ocenili dejansko kakovost malte. Ker EC 8-3 za enkrat še nima definiranih mejnih vrednosti za mehanske lastnosti vgrajenih materialov, smo naredili primerjavo z zahtevami za novogradnje po EC 8-1 (Nacionalni dodatek). Po tem veljavnem standardu v Sloveniji morajo malte na potresnih območjih zadostiti minimalni trdnostni razred M5 ($f_{m,min} = 5$ MPa). Se pravi, da bi malta iz Kolizeja po današnjih predpisih zadostila le 45% predpisane minimalne tlačne trdnosti.

Če smo govorili o gradnikih zidovine in samem zidovju, moramo biti pozorni tudi na stik, ki povezuje te gradnike v zidovje, to je stik med opeko in malto. Za ugotavljanje karakteristik stika smo uporabili metodo, ki sta jo opisala Eperson in Abrams (1989), poimenovana je »Shove test«. S to metodo določamo strižno trdnost stika med opeko in malto in s tem tudi oceno strižne trdnosti zidovja. Če primerjamo rezultate po nadstropjih, začenši s kletjo, smo tu pri 59% povprečni zasičenosti vzorcev ocenili začetno strižno trdnost zidovja f_{v0} na 0,16 MPa. V pritličju smo pri 53% zasičenosti ocenili f_{v0} = 0,33 MPa, v 1. nadstropju pa smo izračunali povprečno f_{v0} = 0,22 MPa pri 30% zasičenosti. Zasičenost se z nadstropji manjša, saj se vpliv kapilarne vlage z oddaljenostjo od tal zmanjšuje. Če smo v pritličju pri 53% zasičenosti dobili boljše vrednosti ocenjene začetne strižne trdnosti kot v 1. nadstropju pri 30% zasičenosti, bi lahko trdili, da vlaga nima tolikšnega vpliva na mehanske lastnosti stika. Če pa primerjamo rezultat kleti s pritličjem, pa vidimo, da so razlike v začetni strižni trdnosti stika veliko večje pri manjši razliki zasičenosti kot v prvi primerjavi, saj je v pritličju kar dvakrat večja začetna strižna trdnost kot v kleti pri le 3% razliki v zasičenosti z vodo. Tudi ta primerjava potrjuje prej rečeno trditev, da vlaga ni poglavitni vzrok slabših rezultatov. Najverjetneje je vlaga le posredni krivec za slabše rezultate kleti. Če iščemo vzroke za razliko v dobljenih rezultatih mehanskih lastnosti, lahko trdimo, da je propadlost materiala, ki je posledica dolgotrajne izpostavljenosti vlagi in zmrzovanju, glavni vzrok za poslabšanje strižne trdnosti zidovja.

Za pridobitev mehanskih lastnosti zidovine smo izvedli dva različna testiranja zidovine – tlačne in strižne preiskave. V laboratoriju smo izvedli dva enoosna tlačna preizkusa opečnatih zidkov. ZID 1 je predstavnik zidovine, ki ni bila konkretno izpostavljena vlagi. Opeka ZID-u 1 je imela v povprečju 2,6% vlažnost, tlačna trdnost zidu f_k pa je bila 2,52 MPa. Modul elastičnosti E_w je znašal 176 MPa, strižni modul zidka G_w pa 72 MPa. ZID 2 je predstavnik vlažne zidovine, sicer ni bil lociran v kleti, ampak ob poškodovani vertikalni meteorni kanalizaciji, kjer ga je dalj časa zalivala meteorna voda. Vlažnost opeke tega zidu je bila po opravljenem testu 9,3%. Tlačna trdnost tega zidu je bila 1,78 MPa, E_w je znašal 73 MPa, G_w pa 34 MPa. Je bil pa ZID 2 na splošno bolj poškodovan kot ZID 1, zato ne moremo z veliko gotovostjo trditi, da je odraz razlike v dobljenih rezultatih samo propadlost materiala in vpliv vlage. Namreč kar nekaj razpok je na preizkušancu ZID 2 nastalo ob odvzemu vzorca in kasneje v laboratoriju pri pripravi na preizkus. Seveda pa je bil prvi vzorec izpostavljen enakim pogojem (odvzem, transport, priprava) kot primer 2, samo da je zaradi boljšega stanja pač bolje prenesel vse obremenitve odvzema.

Na objektu smo izvedli in-situ strižno preiskavo v dveh nivojih stavbe, zopet zaradi primerjave materialnih karakteristik in odziva pri različnih stopnjah propadanja in različni prisotnosti vlage. Kar najprej opazimo pri primerjavi rezultatov kleti in pritličja je, da imamo v kleti visoko duktilnost μ = 11,4 in pa velik strižni modul G = 86 MPa. Le-ta v pritličju znašata 7,2 in pa 65 MPa. V kleti je efektivna togost za 40% večja kot v pritličju. V primeru strižne trdnosti (τ_{max}), in pa natezne trdnosti

(f_t) pa smo pri zidu v pritličju dobili boljše vrednosti, namreč τ_{\max} je znašal v pritličju 0,11 MPa, v kleti 0,074 MPa, f_t pa v pritličju 0,073 MPa ter v kleti 0,046 MPa. Oba rezultata sta primerljiva z rezultati opravljenih testov ZRMK-ja na starih zidovih, elastični in pa strižni modul pa v našem primeru odstopata od primerljivih zidovin, sta namreč precej manjša. Torej, če povzamemo ugotovitve vseh preiskav, pridemo do naslednjih zaključkov: zidovina je predvsem v kletnem delu bila močno dotrajana, dolgoletni vpliv kapilarne vlage in pa meteorne vode je v kombinaciji z nestrokovnimi gradbenimi posegi ter zmrzovanjem/tajanjem naredil veliko škode na zidovini. Po drugi strani pa smo v pritličju in višjih nadstropjih dokazali manjše propadanje zidovine. Propadanje materiala se pokaže tako na zmanjšanju mehanskih karakteristik konstituentov zidov, kot tudi na tlačni in strižni trdnosti zidovine kot kompozitnega materiala.

VIRI

Bergant, M. 1995. Poročilo o pregledih, preiskavah in kontrolah elementov nosilne konstrukcije stavbe Kolizej v Ljubljani z oceno statične varnosti in stabilnosti objekta in predlogom za njegovo konstruktivno sanacijo in ojačitev« (DN 15260111/95). Ljubljana, Zavod za raziskavo materiala in konstrukcij, Inštitut za materiale, zgradbe in okolje: 82 str.

Bosiljkov, V., Čepon F., Kržan M., Žarnić, R. 2008. Poročilo št. P003/06/08, Statična ocena in analiza potresne odpornosti objekta Kolizej v Ljubljani. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 72 str.

Bosiljkov, V. 2000. Eksperimentalne in računske raziskave vpliva modificiranih malt na mehanske lastnosti opečne zidovine. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba V. Bosiljkov): 323 str.

Epperson, G., Abrams, D. 1989. Document No. 89-26-03. Nondestructive evaluation of masonry buildings. Advanced construction technology center. University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois: 208 str.

Lutman, M., Weiss, P. 2004. Poročilo št. P 436/06-650-1, Analitična ocena varnosti objekta Kolizej v Ljubljani na podlagi pregleda in preiskav nosilnega zidovja ter analize potresne odpornosti. Ljubljana, Zavod za gradbeništvo Slovenije: str. 1-19.

O.P.C.M. 3274: 2003, Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica.

Tomaževič, M. 1987. Zidane zgradbe na potresnih območjih, Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo in gradbeništvo in geodezijo: 135 str.

Slovenski standard. 2006. SIST EN 1996-1-1: 2006, Evrokod 6: Projektiranje zidanih konstrukcij – 1-1. Del: Splošna pravila za armirano in nearmirano zidovje. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo: 123 str.

Slovenski standard. 2006. SIST EN 1996-3: 2006, Evrokod 6: Projektiranje zidanih konstrukcij – 3. del: Poenostavljene računske metode za nearmirane zidane konstrukcije. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo: 40 str.

Slovenski standard. 2005. SIST EN 1998-1: 2005, Evrokod 8: Projektiranje potresno odpornih konstrukcij – 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo: 229 str.

Slovenski standard. 2005. SIST EN 1998-3: 2005, Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 3. del: Ocena in prenove stavb. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo: 89 str.

Slaček, M. 2006. Kolizej – Projekt za odstranitev objekta – tlorisi posameznih etaž, št. projekta 6035

Stöckl, S., Beckhaus, K., Fritsche, T. 1998. Influence of Test Method on the Results of Deformation Measurements on Uniaxially Loaded Mortar Specimens. Masonry International Vol 12, No 1.

Šuštar, B. 1996. *Spodnja Šiška - pušeljci Ljubljane*: Arhivski zapisi s poti vasi v predmestje 1885 – 1914. Zgodovinski arhiv Ljubljana, 296 str.

http://sl.wikipedia.org/wiki/Kolizej,_Ljubljana(Pridobljeno 10.2.2012)

Uranjek, M. 2011. Propadanje in trajnostna obnova ovoja stavbne dediščine. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Uranjek): str.: 166.