

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:

Milikič, N., 2014. Analiza potresne odpornosti gradu Grm glede na različne ravni poznavanja konstrukcije. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Bosiljkov, V., somentorica Kržan, M.): 87 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:

Milikič, N., 2014. Analiza potresne odpornosti gradu Grm glede na različne ravni poznavanja konstrukcije. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bosiljkov, V., co-supervisor Kržan, M.): 87 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidatka:

NINA MILIKIČ

**ANALIZA POTRESNE ODPORNOSTI GRADU GRM
GLEDE NA RAZLIČNE RAVNI POZNAVANJA
KONSTRUKCIJE**

Diplomska naloga št.: 3379/KS

**SEISMIC ASSESSMENT OF THE GRM CASTLE
CONSIDERING DIFFERENT KNOWLEDGE LEVELS
OF THE STRUCTURE**

Graduation thesis No.: 3379/KS

Mentor:

izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentorica:

asist. Meta Kržan

Član komisije:

doc. dr. Simon Schnabl

prof. dr. Igor Planinc

izr. prof. dr. Jože Panjan

Ljubljana, 28. 03. 2014

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisana Nina Milikič izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom »Analiza potresne odpornosti gradu Grm glede na različne ravni poznavanja konstrukcije«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 7.3.2014

Nina Milikič

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 624.042.7:728.81(497.4)(043.2)
- Avtor:** Nina Milikič
- Mentor:** izr. prof.dr. Vlatko Bosiljkov
- Somentorica:** asist. Meta Kržan
- Naslov:** Analiza potresne odpornosti gradu Grm glede na različne ravni poznavanja konstrukcije
- Tip dokumenta:** diplomska naloga-univerzitetni študij
- Obseg in oprema:** 87 str., 29 pregl., 82 sl., 4 graf., 31 en.
- Ključne besede:** grad Grm, potresna odpornost, nelinearna statična analiza, programsko orodje 3Muri, obnova kulturne dediščine, materialne karakteristike, ravni poznavanja konstrukcije, podajni stropovi

Izvleček

V diplomski nalogi je analizirana potresna odpornost gradu Grm. Stavbe kulturne dediščine običajno najbolj prizadene potres, saj v času izgradnje objekta horizontalne obremenitve konstrukcije niso bile upoštevane. Poleg potresa pa so propadanje materiala, razvoj poškodb na nosilni konstrukciji, številne predelave skozi uporabo in navsezadnje nove potrebe uporabnikov vzroki za temeljitejšo obnovo gradu. Posebnost starih stavb so podajni stropovi. Za analizo objekta je bil uporabljen program 3Muri, razvit na Univerzi v Genovi, ki za račun odpornosti konstrukcije izvede nelinearno statično analizo. Analizirana sta bila dva različna modela konstrukcije, in sicer eden s podajnimi stropovi in drugi s togimi. Na objektu ni bilo opravljenih ustreznih preiskav zidov, zato so bile vrednosti materialnih karakteristik privzete iz dveh različnih virov, in sicer iz italijanskih standardov (NTC, 2008) in iz preiskav podobnega objekta v Sloveniji. Zaradi negotovosti glede materialnih karakteristik in nepoznavanja detajlov nosilne konstrukcije so bili predpostavljeni različni nivoji poznavanja konstrukcije, skladno s standardi. Višji nivo poznavanja konstrukcije pomeni manjšo redukcijo mehanskih lastnosti materialov. Analize so pokazale, da se lahko pri spremembi ravni poznavanja konstrukcije z najslabše stopnje na najboljšo potresna odpornost stavbe v smislu pospeška, ki ga je konstrukcija sposobna prenesti, izboljša celo do 30%. Dobro poznavanje lastnosti obstoječega objekta je zato ključnega pomena, saj lahko majhne razlike pri vhodnih podatkih pomenijo velike razlike pri rezultatih. Pričakovano je odpornost konstrukcije s togimi stropovi boljša od tiste s podajnimi. V današnji praksi v starih stavbah podajnih stropov ne nadomeščamo več s togimi betonskimi, zato je primernost programov, ki delujejo na podlagi etažnega mehanizma in upoštevajo toge diafragme, vprašljiva. Hkrati pa sodobnejša metoda, kot je prevedba makroelementov na ekvivalenten okvir, v nekaterih primerih za podajne stropove ne da povsem zanesljivih rezultatov.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	624.042.7:728.81(497.4)(043.2)
Author:	Nina Milikič
Supervisor:	Assoc. Prof. Vlatko Bosiljkov, PhD
Cosupervisor:	Assist. Meta Kržan
Title:	Seismic assessment of the Grm castle considering different knowledge levels of the structure
Document type:	Graduation thesis – University studies
Scope and tools:	87 p., 29 tab., 82 fig., 4 graph., 31 eq.
Keywords:	Grm castle, seismic resistance, nonlinear static analysis, 3Muri numerical tool, rehabilitation of heritage buildings, material properties, knowledge levels of the structure, flexible floors

Abstract

In the present Graduation thesis, seismic resistance of the Grm castle is evaluated. At the time of the castle's construction, lateral loads were not considered. Consequently, earthquakes can cause significant damage to historical buildings. Furthermore, degradation of material, visible damages and cracks on structural elements, numerous rebuildings during its use, and new conditions of use result in a need to structurally retrofit the building. In existing masonry structures, floors are usually flexible. The 3Muri software, developed at the University of Genova, was used in the seismic assessment of the castle. 3Muri performs nonlinear pushover static analysis. Two types of structures were modelled, one with flexible floors and the other with rigid floors. Regarding material properties, no appropriate experimental tests on building materials were carried out. The material properties in model were adopted from two different sources: from the Italian national technical code (NTC, 2008) and from an investigation of a similar building in Slovenia. Considering uncertainties related to the characteristics of the constituent materials, various knowledge levels were adopted. A higher knowledge level is reflected in a lower reduction factor for material properties, and consequently, better material properties result in higher seismic resistance of the building. Comparing models with lowest and highest knowledge levels, results can vary up to 30% in terms of peak ground acceleration. An exhaustive preliminary investigation of the structure's characteristics is therefore of great importance. As expected, the resistance of a structure with rigid floors is greater than the one with flexible floors. In the past, a common repairing technique used in historical buildings was substitution of flexible floors with rigid concrete floors. As this is no longer a practice, modelling this type of buildings by means of methods based on storey mechanism and rigid diaphragms, is questionable. On the other hand, new methods, such as the equivalent frame method, seem not to give completely reliable results in some cases with flexible floors.

ZAHVALA

Najlepše se zahvaljujem mentorju izr. prof.dr. Vlatku Bosiljkovu za strokovno pomoč in nasvete pri obravnavi gradu Grm ter za strokovno voden obisk objekta, kar je neprecenljiva izkušnja za neizkušenega študenta.

Somentorici asist. Meti Kržan se zahvaljujem za vso pomoč pri razumevanju delovanja programskega orodja, reševanju težav in za potrpežljivost pri odgovarjanju na številna vprašanja. Bila je somentor, kakršnega bi si želel vsak študent pri svojem delu.

Zahvalila bi se tudi Tomažu Golobu z Zavoda za kulturno dediščino Slovenije za dokumentacijo, čas in vodstvo po objektu, ki mi ga je namenil pri obiskih na gradu Grm.

Tematika obnavljanja kulturne dediščine na realnem objektu mi je bila v izziv in zadovoljstvo.

Rada bi se zahvalila tudi svoji družini, prijateljem in kolegom za podporo, pomoč in nepozabna študentska leta.

KAZALO VSEBINE

Stran za popravke, Errata	I
Izjave	II
Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček.....	III
Bibliographic-documentalistic-information and abstract	IV
Zahvala	V
Kazalo vsebine.....	VI
Kazalo preglednic	VIII
Kazalo grafikonov	IX
Kazalo slik.....	X
1 UVOD	1
2 GRAD GRM.....	2
2.1 Lega in nastanek gradu	2
2.2 Zgodovina.....	2
2.3 Stavbni razvoj.....	3
2.4 Stanje gradu ter opis dosedanjih sanacijskih in utrditvenih ukrepov.....	4
3 PRENOVA OBJEKTOV POD SPOMENIŠKIM VARSTVOM	9
3.1 Grad Grm, spomenik lokalnega pomena	9
3.2 Obnova spomenikov med teorijo in prakso	9
3.3 Stopnja kulturnega pomena gradu Grm.....	9
4 DOLOČILA IN ZAHTEVE STANDARDOV EVROKOD.....	11
4.1 Evrokod 1, 1. del: Vplivi na konstrukcije.....	11
4.2 Evrokod 8, 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe.....	11
4.3 Evrokod 8, 3. del: Ocena in prenova stavb.....	13
4.3.1 Splošni del	13
4.3.2 Določila za zidane konstrukcije.....	14
5 UGOTAVLJANJE MATERIALNIH LASTNOSTI NA OBSTOJEČI KONSTRUKCIJI.....	16
5.1 Delno porušne metode	16
5.1.1 Sondiranje in vzorčenje	16
5.1.2 Metoda vrtnja luknje.....	17
5.1.3 Preiskava z eno jekleno blazino.....	17
5.1.4 Preiskava z dvema jeklenima blazinama	18
5.2 Porušne metode	19
5.2.1 In-situ tlačni preizkus	19
5.2.2 In-situ strižni preizkus	19
5.2.3 In-situ diagonalni preizkus	20
5.2.4 In-situ strižni preizkus z jekleno blazino	20
5.2.5 In-situ zdrsni preizkus	21

6 PROGRAMSKO ORODJE ZA OBRAVNAVO ZIDANIH STAVB	22
6.1 Načini modeliranja zidanih stavb	22
6.2 Programsko orodje 3Muri	23
6.2.1 Splošno o programu	23
6.2.2 Nelinearna »pushover« analiza	27
6.2.3 Kontrole.....	27
6.2.4 Primer izpisa iz programa	28
6.3 N2 metoda kot povezava med spektri odziva in kapaciteto konstrukcije.....	29
7 KONSTRUKCIJSKI SISTEM GRADU GRM	33
7.1 Splošno o konstrukcijskem sistemu in gradbenih materialih	33
7.2 Vertikalna konstrukcija	33
7.3 Horizontalna konstrukcija	33
8 MODEL GRADU V PROGRAMU 3MURI	41
8.1 Modeliranje vertikalnih nosilnih elementov.....	41
8.2 Modeliranje horizontalnih nosilnih elementov.....	43
8.3 Obtežba	45
8.3.1 Lastna teža stropov.....	45
8.3.2 Koristna obtežba.....	48
8.3.3 Potresna obtežba.....	48
8.4 Materialne karakteristike zidovine	49
9 REZULTATI POTRESNE ODPORNOSTI GRADU GRM.....	52
9.1 Primerjava deformacijskih oblik	54
9.2 Rezultati za <i>X</i> smer analize	60
9.2.1 Primer <i>ITL_KL3</i>	63
9.2.2 Primer <i>OPT_KL3</i>	67
9.3 Rezultati za <i>Y</i> smer	70
9.3.1 Primer <i>ITL_KL3</i>	72
9.3.2 Primer <i>OPT_KL3</i>	76
9.4 Stolp	80
10 KOMENTAR REZULTATOV	82
11 ZAKLJUČEK.....	84
VIRI.....	86

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 4.1: Vplivi na konstrukcije in kombinacijski faktorji, upoštevani pri analizi gradu Grm	11
Preglednica 4.2: Vrednosti parametrov za elastični spekter odziva tipa 1 za tip tal A.....	12
Preglednica 4.3: Kategorije pomembnosti in faktorji pomembnosti, ki pridejo v upoštevanje pri analizi gradu Grm	12
Preglednica 6.1 Primernost različnih metod za analizo posameznih tipov konstrukcij.....	23
Preglednica 8.1: Višine etaž v modelu gradu Grm	41
Preglednica 8.2. Lastna teža stropa sestave 2	45
Preglednica 8.3. Lastna teža stropa sestave 3	46
Preglednica 8.4. Lastna teža stropa sestave 4	46
Preglednica 8.5. Lastna teža stropa sestave 8	46
Preglednica 8.6: Lastna teža stropa sestave 9	47
Preglednica 8.7. Lastna teža stropa sestave 10	47
Preglednica 8.8. Lastna teža stropa sestave 11	47
Preglednica 8.9. Lastna teža stropa sestave 12	48
Preglednica 8.10. Obtežba strešne konstrukcije	48
Preglednica 8.11: Koristne obtežbe prostorov gradu Grm in pripadajoči kombinacijski faktorji	48
Preglednica 8.12: Vrednosti materialnih karakteristik za različne nivoje poznavanja konstrukcije	50
Preglednica 8.13: Materialne karakteristike, ugotovljene na gradu Pišece, z upoštevanjem različnih nivojev poznavanja konstrukcije	50
Preglednica 8.14: Materialne karakteristike za masivne kamnite stebre glede na različne nivoje poznavanja konstrukcije	51
Preglednica 9.1: Pospešek $ULSPG$ in koeficient potresne odpornosti SRC_u za model z materialnimi karakteristikami, povzetimi po italijanskih standardih.....	53
Preglednica 9.2 :Pospešek $ULSPG$ in koeficient potresne odpornosti stavbe SRC_u za model z materialnimi karakteristikami, ugotovljenimi na gradu Pišece	54
Preglednica 9.3: Deformacijske oblike za model s podajnimi stropovi in s karakteristikami, povzetimi po italijanskih standardih	55
Preglednica 9.4: Deformacijske oblike za model s togimi stropovi in s karakteristikami, povzetimi po italijanskih standardih	56
Preglednica 9.5: Deformacijske oblike za model s podajnimi stropovi in s karakteristikami, ugotovljenimi na gradu Pišece	58
Preglednica 9.6: Deformacijske oblike za model s togimi stropovi in s karakteristikami, ugotovljenimi na gradu Pišece.....	59
Preglednica 9.7: Rezultati potresne analize konstrukcije za model z materialnimi karakteristikami, povzetimi po italijanskih standardih za X smer.....	61
Preglednica 9.8: Rezultati potresne analize konstrukcije za model z materialnimi karakteristikami, ugotovljenimi na gradu Pišece za X smer.....	62
Preglednica 9.9: Rezultati potresne analize konstrukcije za model z materialnimi karakteristikami, povzetimi po italijanskih standardih za Y smer	70
Preglednica 9.10: Rezultati potresne analize konstrukcije za model z materialnimi karakteristikami, ugotovljenimi na gradu Pišece za Y smer	71
Preglednica 9.11: Koeficient potresne odpornosti SRC_u za model stolpa z materialnimi karakteristikami, ugotovljenimi na gradu Pišece za X in Y smer	80

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 9.1: Idealizirane krivulje kapacitete za modele z materialnimi karakteristikami, povzetimi po italijanskih standardih za X smer.....	61
Grafikon 9.2: Idealizirane krivulje kapacitete za modele z materialnimi karakteristikami, ugotovljenimi na gradu Pišece za X smer	63
Grafikon 9.3: Idealizirane krivulje kapacitete za modele z materialnimi karakteristikami, povzetimi po italijanskih standardih za Y smer.....	71
Grafikon 9.4: Idealizirane krivulje kapacitete za modele z materialnimi karakteristikami, ugotovljenimi na gradu Pišece za Y smer.....	72

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Grad Grm s pripadajočim gospodarskim poslopjem	2
Slika 2.2: Valvasorjeva upodobitev gradu	3
Slika 2.3: Stavbni razvoj gradu Grm	3
Slika 2.4: Pogled na severno in vzhodno fasado gradu	4
Slika 2.5: Obokan strop s štukaturami v stolpni dvorani v prvem nadstropju	5
Slika 2.6: Obokan strop med vmesnimi železnimi nosilci v pritličju	5
Slika 2.7: Severna fasada notranjega dvorišča	5
Slika 2.8: V nadstropju pozidani arkadni loki	6
Slika 2.9: Del severnega arkadnega hodnika v pritličju	6
Slika 2.10: Zazidani arkadni loki	6
Slika 2.11: Nevarno povešen lesen strop	7
Slika 2.12: Injektirana stena stolpa nad stolpno dvorano	7
Slika 2.13: Vidna zidna železna vez na fasadi	7
Slika 2.14: Vodoravna razpoka na fasadi zahodnega trakta	8
Slika 2.15: Sestava zidu v južnem traktu	8
Slika 2.16: Stik novejše opečne stene s starejšo kamnito	8
Slika 5.1: Rezultat sondiranja	17
Slika 5.2: Namestitev merilnih lističev na kamniti blok	17
Slika 5.3: Potek preiskave z eno jekleno blazino	18
Slika 5.4: Preiskava z dvema jeklenima blazinama	18
Slika 5.5: Tlačni preiskus zidu	19
Slika 5.6: Strižni preizkus zidu	20
Slika 5.7: Diagonalni preizkus zidu	20
Slika 5.8: Strižni preizkus z eno jekleno blazino	21
Slika 5.9: Preizkus zdrsa zidakov	21
Slika 6.1: Idealizirana krivulja odpornosti	24
Slika 6.2: Krivulja kapacitete s prikazom stanj poškodovanosti konstrukcije	24
Slika 6.3: Primer krivulje kapacitete s fazami	24
Slika 6.4: Mreža makroelementov in ekvivalentni okvir	25
Slika 6.5: Sestavljeni končni elementi	26
Slika 6.6: Razlika pri prenosu sil na stene pri togih in podajnih stropovih	26
Slika 6.7: Končni elementi za podajne stropove	26
Slika 6.8: Faze konstrukcije pri povečevanju horizontalne obtežbe in pripadajoča krivulja kapacitete	27
Slika 6.9: Prikaz parametrov, ki jih program upošteva pri računu	28
Slika 6.10: Prikaz izpisa vseh analiz	28
Slika 6.11: Prikaz izpisa rezultatov posamezne analize	29
Slika 6.12: Stopnje in način poškodovanosti konstrukcije	29
Slika 7.1: Načrt kleti gradu	34
Slika 7.2: Načrt pritličja gradu	34
Slika 7.3: Načrt nadstropja gradu	35
Slika 7.4: Strop sestave 1	35
Slika 7.5: Strop sestave 2	36
Slika 7.6: Strop sestave 3	36
Slika 7.7: Strop sestave 4	36
Slika 7.8: Strop sestave 5, prerez vzdolž glavnega oboka	37

Slika 7.9: Strop sestave 5, prerez čez obočna polja čeških čepic	37
Slika 7.10: Strop sestave 6	38
Slika 7.11: Strop sestave 7	38
Slika 7.12: Strop sestave 8	38
Slika 7.13: Strop sestave 9	39
Slika 7.14: Strop sestave 10	39
Slika 7.15: Strop sestave 11	39
Slika 7.16: Strop sestave 12	40
Slika 8.1: Model gradu v programu	42
Slika 8.2 Mreža makroelementov gradu	42
Slika 8.3: Mreža makroelementov za vrhni dve nadstropji stolpa	42
Slika 8.4: Prikaz podajnih stropov iz knjižnice programa.....	43
Slika 8.5: Prikaz podajanja lastnosti obokanega stropa v program.....	43
Slika 8.6: Primer podajanja lesenega stropa v program	44
Slika 8.7: Orientiranost stropov v pritličju.....	44
Slika 8.8: Orientiranost stropov v nadstropju.....	45
Slika 8.9: Podajanje potresne obtežbe v program	49
Slika 9.1: Tloris mreže elementov modela z oznakami glavnih sten	53
Slika 9.2: Dejanska krivulja kapacitete in idealizirana v <i>X</i> smeri za model z materialnimi karakteristikami <i>ITL_KL3</i> in podajnimi stropovi	64
Slika 9.3: Deformacijska oblika in porušitve sten v <i>X</i> smeri za model z materialnimi karakteristikami <i>ITL_KL3</i> in podajnimi stropovi	65
Slika 9.4: Dejanska krivulja kapacitete in idealizirana v <i>X</i> smeri za model z materialnimi karakteristikami <i>ITL_KL3</i> in togimi stropovi	65
Slika 9.5: Deformacijska oblika in porušitve sten v <i>X</i> smeri za model z materialnimi karakteristikami <i>ITL_KL3</i> in togimi stropovi	66
Slika 9.6: Dejanska krivulja kapacitete in idealizirana v <i>X</i> smeri za za model z materialnimi karakteristikami <i>OPT_KL3</i> in podajnimi stropovi.....	67
Slika 9.7: Deformacijska oblika in porušitve sten v <i>X</i> smeri za model z materialnimi karakteristikami <i>OPT_KL3</i> in podajnimi stropovi.....	68
Slika 9.8: Dejanska krivulja kapacitete in idealizirana v <i>X</i> smeri za model z materialnimi karakteristikami <i>OPT_KL3</i> in togimi stropovi	68
Slika 9.9: Deformacijska oblika in porušitve sten v <i>X</i> smeri za model z materialnimi karakteristikami <i>OPT_KL3</i> in togimi stropovi	69
Slika 9.10: Dejanska krivulja kapacitete in idealizirana v <i>Y</i> smeri za model z materialnimi karakteristikami <i>ITL_KL3</i> in podajnimi stropovi	73
Slika 9.11: Deformacijska oblika in porušitve sten v <i>Y</i> smeri za model z materialnimi karakteristikami <i>ITL_KL3</i> in podajnimi stropovi	74
Slika 9.12: Dejanska krivulja kapacitete in idealizirana v <i>Y</i> smeri za model z materialnimi karakteristikami <i>ITL_KL3</i> in togimi stropovi	74
Slika 9.13: Deformacijska oblika in porušitve sten v <i>Y</i> smeri za model z materialnimi karakteristikami <i>ITL_KL3</i> in togimi stropovi	76
Slika 9.14: Dejanska krivulja kapacitete in idealizirana v <i>Y</i> smeri za model z materialnimi karakteristikami <i>OPT_KL3</i> in podajnimi stropovi.....	76
Slika 9.15: Deformacijska oblika in porušitve sten v <i>Y</i> smeri za model z materialnimi karakteristikami <i>OPT_KL3</i> in podajnimi stropovi.....	78
Slika 9.16: Porušitve najbolj obremenjenih prečnih sten v severnem traktu v <i>Y</i> smeri za model z materialnimi karakteristikami <i>OPT_KL3</i> in podajnimi stropovi	78

Slika 9.17: Dejanska krivulja kapacitete in idealizirana v <i>Y</i> smeri za model z materialnimi karakteristikami <i>OPT_KL3</i> in togimi stropovi.....	79
Slika 9.18: Deformacijska oblika in poružitve sten v <i>Y</i> smeri za model z materialnimi karakteristikami <i>OPT_KL3</i> in togimi stropovi	80
Slika 9.19: Deformacijska oblika in poružitve sten v <i>X</i> smeri za model stolpa z materialnimi karakteristikami <i>OPT_KL3</i>	81
Slika: 9.20: Deformacijska oblika in poružitve sten v <i>Y</i> smeri za model stolpa z materialnimi karakteristikami <i>OPT_KL3</i>	81

1 UVOD

Gradovi s svojo pestro zgodovino in vlogo v prostoru predstavljajo narodno bogastvo. Vendar pa materiali začnejo sčasoma propadati, na konstrukciji se začnejo pojavljati razpoke, lesni škodljivci napadejo stropne konstrukcije, vprašljiva je povezanost konstrukcije. Kadar je stavba v uporabi, pogosto pride tudi do problema uporabnosti prostorov, saj niso prilagojeni sodobnim zahtevam. Omenjene težave se pojavljajo tudi na gradu Grm. V gradu so poleg pisarn tudi restavratorske delavnice in arhivski prostori, za katere so predpisani posebni klimatski in protipožarni pogoji. Našteti razlogi kažejo, da je grad Grm potreben celovite obnove.

Za objekte pod spomeniškim varstvom veljajo glede obnove posebne zahteve. Pojavita se vprašanji, kako obnoviti in v katere dele konstrukcije je dovoljeno oziroma ni dovoljeno posegati. Tako je pred začetkom obnove potrebna obširna zgodovinska in stavbna raziskava, s katero se določi pomembnost elementov objekta; konstrukcijskih in nekonstrukcijskih. Gradbeni projektant pa mora poiskati rešitve utrditvenih ukrepov, ki bi zadostile predpisanim pogojem.

Ključnega pomena za projektanta je dobro poznavanje nosilne konstrukcije. Potrebno je raziskati sestavo zidov, stropnih konstrukcij, njihovo medsebojno povezanost ter njihove materialne karakteristike. Predpis za projektiranje potresnoodpornih konstrukcij, ki se nanaša na oceno in utrjevanje obstoječih objektov (Evrokod 8-3), omogoča, da lahko z višjo stopnjo poznavanja konstrukcije upoštevamo boljše materialne karakteristike. Boljše materialne karakteristike pa bistveno vplivajo na izračunano odpornost konstrukcije. Zato je smiselno nekaj več finančnih sredstev vložiti v predhodne raziskave, saj s tem zmanjšamo obseg utrditvenih ukrepov in posledično celotne stroške.

Najbolj kritično obtežbo pri starih zidanih stavbah ponavadi predstavlja potres. V času nastanka analiziranega gradu (16. stoletje) so graditelji vedeli, da mora biti konstrukcija sposobna prenesti vertikalne obremenitve. Zato najdemo v gradu zidove, debele tudi več kot en meter. Horizontalna povezanost take konstrukcije je vprašljiva. Če izvzamemo nekaj naknadno vgrajenih armiranobetonskih stropov, so primarne stropne konstrukcije gradu Grm opečni oboki in leseni stropovi.

V diplomski nalogi je bila konstrukcija analizirana s programom 3Muri, ki za določitev potresne odpornosti izvede nelinearno statično analizo. S pomočjo N2 metode je možno primerjati zahteve, ki jih poda Evrokod 8-1, del standarda za projektiranje potresnoodpornih konstrukcij (SIST EN 1998-1: 2005), z izračunano odpornostjo objekta. Za primerjavo in študijo vpliva podajnosti stropov sta bila analizirana dva tipa modelov, in sicer modeli s podajnimi in modeli s togimi stropovi. Z izbiro različnih materialnih karakteristik in faktorjev zaupanja je bil preverjen vpliv le-teh na rezultate.

2 GRAD GRM

Opisi in podatki o gradu Grm so povzeti po Konservatorskem načrtu gradu Grm (ZVKDS, 2011).

2.1 Lega in nastanek gradu

Grad Grm leži na griču južno od srednjeveškega Novega mesta. Gradnja se je začela v drugi polovici 16. stoletja (verjetno okoli 1586). Mogočna štiriraktna graščina je zidana, enonadstropna stavba, nad njenim vhodom s severne strani se v višino dveh dodatnih etaž vzdiguje stolp.



Slika 2.1: Grad Grm s pripadajočim gospodarskim poslopjem

(Vir: http://www.dolenjskilist.si/2009/11/12/21418/novice/dolenjska/Drzava_bo_kupila_grad_Grm/)

2.2 Zgodovina

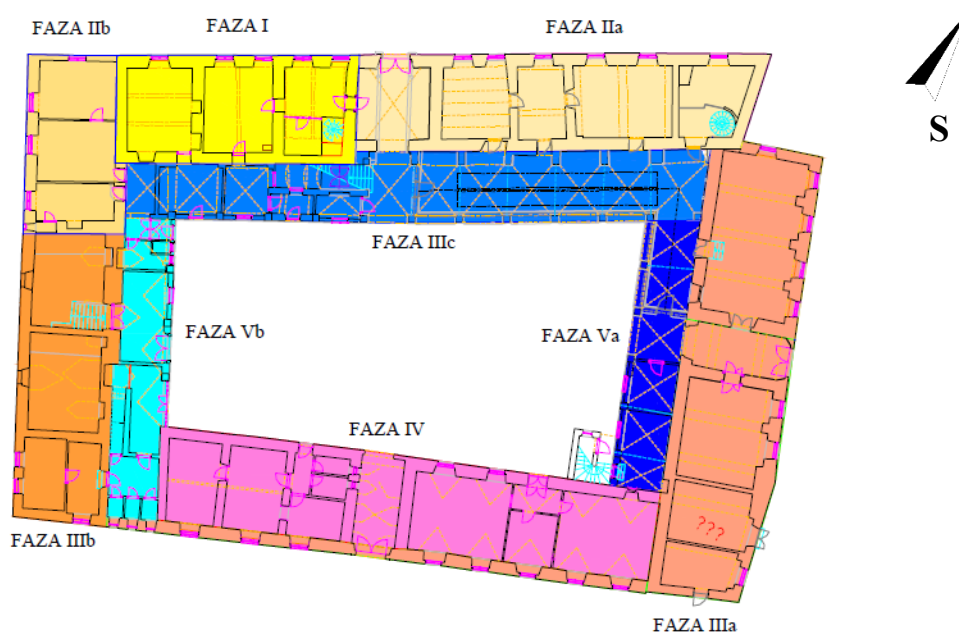
Lastniška struktura gradu priča o številnih prezidavah in prenovah. Prvotni lastniki so bili Mordaksi (od konca 16. do začetka 18. stoletja), nato je lastništvo prišlo pod Siegfrieda Baltazarja Gallenberga (med 1709 in 1753), kasneje je grad in posestvo kupila družina Zois (med 1753 in 1810). Od leta 1810 do 1886 je na gradu gospodarila družina Smola, zatem pa je dežela Kranjska na gradu uredila prostore za Kmetijsko šolo (med 1886 in 1983). Grad je kasneje prešel v družbeno lastnino in Industrija motornih vozil IMV Novo mesto na gradu uredila pisarne. Z letom 1994 sta postala najemnika gradu Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije in Zgodovinski arhiv Ljubljane. Prostore so uredili v pisarne in depoje, v severovzhodnem delu pritličja pa je bila urejena restavratorska delavnica.



Slika 2.2: Valvasorjeva upodobitev gradu iz Topografije sodobne Vojvodine Kranjske iz leta 1679 (skenirano iz faksimilirane izdaje Mladinske knjige, Branko Reisp, 1995)

2.3 Stavbni razvoj

Grad je bil zgrajen v več fazah. Njegov začetek in razvoj sta še precej nejasna. Iz zgodovinskih opisov je predvidevati, da je bil najprej zgrajen zahodni del severnega trakta (FAZA I). Trinadstropni stolp in vzhodni del severnega trakta, sta bila kasneje prizidana k najstarejšemu delu objekta (FAZA IIa). Zanesljivih dokazov o tem, ali je bil ta del gradu prvotno pritličjen ali nadstropen, ni. Najnovejše raziskave kažejo, da je bilo prvo nadstropje zgrajeno istočasno s pritličjem, le da je bilo v 18. ali na prehodu v 19. stoletje nadvišano. V prvi polovici 17. stoletja je bil dozidan vsaj še en trakt in gospodarsko poslopje. Možno je torej, da sta bila vhodni stolp z vzhodnim delom severnega trakta (FAZA IIa) in severni del zahodnega trakta (FAZA IIb) sezidana v približno istem obdobju. V drugi polovici 17. stoletja sta bila do konca pozidana vzhodni (FAZA IIIa) in zahodni (FAZA IIIb) trakt, tako je tloris gradu dobil podkvasto obliko. Na južni strani so pravokotno dvorišče zaprli z zidom. Ob koncu tega obdobja je bil najverjetneje pozidan tudi severni arkadni hodnik (FAZA IIIc). V drugi polovici 18. stoletja so bili zgrajeni južni trakt gradu (FAZA IV) ter vzhodni in zahodni arkadni hodnik (FAZA Va in FAZA Vb). Domnevno je bilo v 18. ali na prehodu v 19. stoletje nadstropje nadzidano za 50 cm.



Slika 2.3: Stavbni razvoj gradu Grm (vir ZVKDS, 2011)

S to nadzidavo so bili izgubljeni originalni stropovi, ki so verjetno bili leseni, podobni stropu, ki je ohranjen v drugem nadstropju stolpa. Nadomestile so jih lesene ometane stropne konstrukcije. Stene in stropovi so bili v stanovanjskih prostorih poslikani, okna pa povečana do današnjih dimenzij. Nekaj prezidav in sprememb je bilo izvedenih v času, ko je bil grad v lasti družine Smola. Domnevajo, da so takrat zazidali loke arkadnih hodnikov, saj jih je Kmetijska šola ob vselitvi našla zazidane. Sedanjo zunanjo podobo je grad dobil ob koncu 19. stoletja, ko je v njem dobila prostore Kmetijska šola. Glede na takratne potrebe so notranjost večkrat prilagajali in spreminjali. Spremembe v notranjosti je naredila tudi tovarna IMV.

2.4 Stanje gradu ter opis dosedanjih sanacijskih in utrditvenih ukrepov

V drugi svetovni vojni je bil ob eksploziji poškodovan jugozahodni vogal gradu. Po vojni so ta del ponovno pozidali z opečnimi stenami, naredili so nove stropove, del kleti so zasuli. Istočasno so sanirali tudi poškodbe v prostorih vzhodno in zahodno od stolpa (natančnejših opisov poškodb in vrst sanacijskih ukrepov ni navedenih). Med leti 1995 in 2002 je bil prostor v severovzhodnem vogalu pritličja urejen za potrebe restavratorskih delavnic. Injektirali so vse stene prostora in obočno stropno konstrukcijo so povezali z vezmi. Loke v delu severnega in vzhodnega arkadnega hodnika v pritličju so takrat odprli in zasteklili. Del stolpa so že utrdili, in sicer so injektirali stene drugega in tretjega nadstropja ter horizontalno povezali stropove. V letih 2008 in 2009 je bila izvedena delna sanacija stropov v vzhodnem in severnem arkadnem hodniku v prvem nadstropju. Prvo nadstropje stolpa, kjer je dvorana poslikana in okrašena s štukaturami, še ni bilo obnovljeno. Pri obnovi bo potrebno predhodno fugirati razpoke in izvesti mikroinjektiranje ometa, nato pa injektirati stene z zunanje strani. Nekaj stropov v gradu je vidno potrebnih obnove, saj so se pojavile razpoke na ometu ali pa so že nevarno povešeni, ker jih uničuje lesna goba. Na fasadah gradu so vidne razpoke, navpične razpoke so predvsem na stikih različnih faz objekta, poševne med okenskimi odprtinami, vodoravne pa nad temelji; njihov vzrok je lahko talna voda ali pa premiki temeljnih tal (grad se nahaja na vrhu griča).



Slika 2.4: Pogled na severno in vzhodno fasado gradu



Slika 2.5: Obokan strop s štukaturami v stolpni dvorani v prvem nadstropju. Prostor bo po prenovi namenjen protokolarnim dogodkom in porokam.



Slika 2.6: Obokan strop med vmesnimi železnimi nosilci (pruska čepica) v pritličju vzhodno od stolpa. Strop je okrašen s poslikavami.



Slika 2.7: Severna fasada notranjega dvorišča (vir ZVKDS, 2013b).

Del arkadnih lokov so pri urejanju restavratorskih delavnic odprli. V pritličju arkadni loki slonijo na masivnih kamnitih stebrih



Slika 2.8: V nadstropju pozidani arkadni loki slonijo na opečnih stebrih.



Slika 2.9: Del severnega arkadnega hodnika v pritličju, ki je bil prenovljen za potrebe restavratorskih delavnic. Pri obnovi so bile nameščene železne vezi. (vir Stopar, 2000)



a)



b)

Slika 2.10: Zazidani arkadni loki: a) v nadstropju, pogled od znotraj, b) v pritličju, pogled z dvorišča.



Slika 2.11: Nevarno povešen lesen strop zaradi lesne gobe.



Slika 2.12: Injektirana stena stolpa nad stolpno dvorano.



Slika 2.13: Vidna zidna železna vez na fasadi.



Slika 2.14: Vodoravna razpoka na fasadi zahodnega trakta.



Slika 2.15: Sestava zidu v južnem traktu; kamniti bloki, nepravilnih oblik z debelimi vmesnimi spojnicami in vključki opek ter manjših kamnov.



Slika 2.16: Stik novejšje opečne stene s starejšo kamnito na severni fasadi severnega trakta (vir ZVKDS, 2013b).

3 PRENOVA OBJEKTOV POD SPOMENIŠKIM VARSTVOM

3.1 Grad Grm, spomenik lokalnega pomena

Grad je bil leta 1992 razglašen za spomenik lokalnega pomena (Register nepremične kulturne dediščine, 2014). Zakon o varstvu kulturne dediščine (ZVKD-1, 2008) določa, da je za posege v tako konstrukcijo potrebno pridobiti kulturnovarstveno soglasje. Kadar gre za posege v konstrukcijske elemente spomenika, je vedno potreben konservatorski načrt. Soglasje se izdaja kot projektno soglasje v skladu s predpisi, ki urejajo graditev. Zavod za varstvo kulturne dediščine s kulturnovarstvenimi pogoji določi zahteve, ki jih mora izpolnjevati projekt za pridobitev gradbenega dovoljenja.

3.2 Obnova spomenikov med teorijo in prakso

Poglavje temelji na doktorski disertaciji z naslovom Rekonstrukcijski posegi v historičnih urbanih naselbinah na Slovenskem (Sapač, 2008).

Avtor izpostavlja, da so upravičene le znanstveno podprte rekonstrukcije. Rekonstrukcijski poseg (v različno velikem obsegu) prinaša vrsto restavratorskih, zgodovinskih in umetnostnih vprašanj. Začne se z znanstveno raziskavo, dokumentacijo in interpretacijo originalnih podatkov. Stavbe, ki so kulturna dediščina ali kulturni spomeniki, zahtevajo posebne metode načrtovanja, raziskav in gradbenih posegov. Natančno poznavanje spomenika in njegovega zgodovinskega, umetniškega in kulturnega pomena je osnovni pogoj za ustrezno obravnavo. Kadar se stavbe pred posegi ne raziščejo, grozi uničenje številnih podatkov.

Pred začetkom izvajanja raziskav je na osnovi ocene vloge spomenika potrebna odločitev o načinu, obsegu in ciljnih raziskav. Potrebno je narediti načrt raziskav. Izdela se natančni arhitekturni posnetek celotnega spomenika, kjer morajo biti razvidne gradbene faze, kartirane poškodbe in stiki gradbenih faz. Sledi celostna analiza za razumevanje zgodovine in tehnologije spomenika, pri kateri sodelujejo strokovnjaki različnih področij (arhitekti, umetnostni zgodovinarji, arheologi, zgodovinarji, sociologi in etnologi, gradbeniki, urbanisti). Najprej se izvedejo nedestruktivne raziskave stavbnega razvoja in gradbenega stanja spomenika (poškodbe, materialna struktura). Nedestruktivne raziskave so predpogoj za kasnejše destruktivne, ki naj jih bo čim manj. Nato sledijo destruktivne arheološke in stavbnozgodovinske raziskave (določitev gradbenih faz) ter destruktivne raziskave materialov in konstrukcije (ugotovitev gradbenega stanja, materialne strukture, vrste poškodb, trdnosti materialov, kemične sestave malt in ometov, stanja lesenih stropov). Na koncu se določijo dokončni pogoji za prenovo spomenika oz. se izdela konservatorski načrt.

Načelo pri fizičnih posegih v spomenik je: »manj je več«. Z razvojem tehnologij in gradbenih predpisov se marsikdaj statične sanacije, izvedene v preteklosti, pokažejo kot neustrezne. Cilj gradbenega restavriranja je gradbena utrditev, ki naj se izvede s tradicionalnimi materiali, kolikor je mogoče, konstrukcijske rešitve naj čim manj posegajo v avtentično gradbeno substanco in naj bodo reverzibilne v prihodnosti. Potrebno se je izogibati armiranobetonskim konstrukcijam, čisti cementni injekcijski masi in nereverzibilnim utrjevalcem materiala in disperzijskih premazov.

3.3 Stopnja kulturnega pomena gradu Grm

Glede na čas izgradnje in umetniško vrednost so različni deli gradu različnega pomena. Stopnje kulturnega pomena so določene v konservatorskem načrtu (ZVKSD, 2011). Izjemnega pomena so stolpna soba s štukaturo in poslikavo v prvem nadstropju, lesen strop v drugem nadstropju stolpa, polžasto stopnišče, ki vodi iz nadstropja na podstrešje, ter arkadni hodniki. Srednjega pomena je prvo

nadstropje vzhodnega in južnega trakta. Nizkega pomena oz. brez pomena sta podstrešje in gospodarsko poslopje poleg gradu.

Nižjega pomena kot je element, večji posegi so dovoljeni v njegovo strukturo. Južni trakt je bil zgrajen najkasneje, v tem traktu tudi ni stenskih poslikav. Zato je predvidena selitev arhiva v omenjen trakt, saj se tam lahko največ posega v konstrukcijo (arhivski prostori morajo izpolnjevati posebne klimatske in protipožarne pogoje).

Konservatorski načrt gradu Grm predpisuje še nekaj dodatnih zahtev:

- Malte in ometi morajo biti narejeni na osnovi materiala, ki je kompatibilen s starimi apnenimi. V dvajsetem stoletju je bilo na gradu več posegov na fasadah izvedenih s cementnimi maltami in ometi, ki uničujejo apnene.
- Sanacijske in obnovitvene posege je potrebno načrtovati tako, da jih je vedno mogoče zamenjati oziroma odstraniti, ne da bi pri tem poškodovali originalno gradivo, torej morajo biti reverzibilni. Posebno skrb je treba posvetiti načrtovanju in izvedbi v delih gradu, ki imajo izjemen in visok kulturni pomen.
- Statično sanacijski ukrepi morajo biti načrtovani tako, da se z njimi ne bo poškodovalo stenskih poslikav v prostorih prvega nadstropja, s štukaturami okrašenega stropa v stolpu kot tudi vseh poslikav na ometanih lesenih stropnih konstrukcijah prvega nadstropja. Te je potrebno ohraniti in sanirati.

4 DOLOČILA IN ZAHTEVE STANDARDOV EVROKOD

4.1 Evrokod 1, 1. del: Vplivi na konstrukcije

Povzeto po (SIST EN 1991-1-1: 2004).

Evrokod 1-1 določa glede na namembnost prostorov velikost koristne obtežbe in kombinacijske faktorje, s katerimi jih kombiniramo z drugimi vplivi.

Preglednica 4.1: Vplivi na konstrukcije in kombinacijski faktorji, upoštevani pri analizi gradu Grm

Vpliv	Kombinacijski faktor ψ_2	Koristna obtežba [kN/m ²]
Kategorija B: pisarne	0,3	3
Kategorija C: stavbe, kjer se zbirajo ljudje (C5- kjer lahko pride do gneče)	0,6	5
Kategorija E: skladišča (E1- skladišča knjig in drugih dokumentov)	0,8	7,5
Kategorija H: strehe	0	0,4

4.2 Evrokod 8, 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe

Osnovni zahtevi v Evrokodu 8 za projektiranje potresnoodpornih konstrukcij sta zahteva po neporušitvi in zahteva po omejitvi poškodb. Potrebno je preveriti mejno stanje nosilnosti in mejno stanje uporabnosti.

Potresno nevarnost določa referenčna vrednost največjega pospeška na tleh tipa A. Referenčni največji pospešek a_{gR} ustreza referenčni povratni dobi potresnega vpliva z zahtevo po neporušitvi (ali, enakovredno, referenčni verjetnosti prekoračitve v 50 letih). Tej referenčni povratni dobi ustreza faktor pomembnosti γ_1 , enak 1,0. Pri nas velja za referenčno povratno dobo 475 let oz. referenčna verjetnost prekoračitve 10%. Potresno gibanje na določenem mestu na površini je predstavljeno v obliki elastičnega spektra pospeškov (t.i. elastični spekter odziva).

Za vodoravno komponento potresnega vpliva je elastični spekter odziva $S_e(T)$ določen z naslednjimi enačbami (Enačbe 4.1-4.4):

$$0 \leq T \leq T_B : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right] \quad (4.1)$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \quad (4.2)$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right] \quad (4.3)$$

$$T_D \leq T \leq 4s : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right] \quad (4.4)$$

kjer so:

- $S_e(T)$ elastični spekter odziva,
 T nihajni čas linearnega sistema z eno prostostno stopnjo,
 a_g projektni pospešek za tla tipa A ($a_g = \gamma_1 \cdot a_{gR}$),
 T_B spodnja meja nihajnega časa na območju spektra, kjer ima spektralni pospešek konstantno vrednost,
 T_C zgornja meja nihajnega časa na območju spektra, kjer ima spektralni pospešek konstantno vrednost,
 T_D vrednost nihajnega časa, pri kateri se začne območje konstantne vrednosti spektralnega pomika
 S faktor tal,
 η faktor za korekcijo vpliva dušenja z referenčno vrednostjo $\eta = 1$ pri 5% viskoznega dušenja.

Preglednica 4.2: Vrednosti parametrov za elastični spekter odziva tipa 1 za tip tal A

Tip tal	S	T_B [s]	T_C [s]	T_D [s]
A	1,0	0,1	0,4	2,0

Pri določanju potresnega vpliva je potrebno upoštevati mase, povezane z vsemi težnostnimi silami, ki so vključene v naslednji kombinaciji vplivov:

$$\sum G_{k,j} + \sum \psi_{E,i} \cdot Q_{k,i} \quad (4.5)$$

kjer je:

$\psi_{E,i}$ koeficient za kombinacijo za spremenljiv vpliv i .

Ta koeficient upošteva verjetnost, da obtežba $Q_{k,i}$ ni prisotna po celotni konstrukciji v času potresa.

Stavbe so razvrščene v kategorije pomembnosti glede na posledice, ki jih ima porušitev za življenja ljudi glede na njihovo pomembnost za varnost ljudi in na civilno zaščito neposredno po potresu ter glede na socialne in ekonomske posledice porušitve. Glede na kategorijo pomembnosti je določen faktor pomembnosti, ki vpliva na projektni pospešek.

Preglednica 4.3: Kategorije pomembnosti in faktorji pomembnosti, ki pridejo v upoštevanje pri analizi gradu Grm

Kategorija pomembnosti	Stavbe	Faktor pomembnosti γ_1
II	Običajne stavbe, ki ne sodijo v druge kategorije	1
III	Stavbe katerih potresna odpornost je pomembna glede na posledice porušitve npr. šole, dvorane za srečanja, kulturne ustanove ipd.	1,2

Pri analizi zidanih stavb se uporablja togost razpokanega prereza, s čimer se upošteva vpliv nastanka razpok na deformacije in ustrezneje aproksimira naklon prve veje bilinearnega modela odvisnosti sila-deformacija konstrukcijskega sistema.

Prav tako je v modelu potrebno upoštevati naključno ekscentričnost zaradi negotovosti v zvezi s položajem mas in s prostorskim spreminjanjem potresnega gibanja. V vsaki etaži se masno središče premakne za:

$$e_{ai} = \pm 0,05 \cdot L_i \quad (4.6)$$

kjer sta:

e_{ai} naključna ekscentričnost mase v etaži i glede na nazivni položaj. Upošteva se v isti smeri v vseh etažah,

L_i tlorisna dimenzija etaže, pravokotna na smer potresnega vpliva.

Evrokod glede na značilnosti konstrukcije stavbe omogoča sledeče vrste analize: metodo z vodoravnimi silami, modalno analizo s spektrom odziva, nelinearno statično analizo in nelinearno dinamično analizo časovnega vpliva.

Pri nelinearni statični analizi je potrebno uporabiti najmanj dve porazdelitvi vodoravne obtežbe po višini:

- »enakomerno« porazdelitev, kjer so vodoravne sile sorazmerne masam ne glede na višino (ustreza enakomerni porazdelitvi pospeškov),
- »modalno« porazdelitev, kjer so vodoravne sile sorazmerne vodoravnim silam v obravnavani smeri, določenim z elastično analizo.

Za zidane stavbe (nearmirano zidovje) velja omejitev faktorja obnašanja q 1,5. To je vrednost, s katero se upošteva dodatna nosilnost.

4.3 Evrokod 8, 3. del: Ocena in prenova stavb

Povzeto po (SIST EN 1998-3: 2005).

4.3.1 Splošni del

Osnovne zahteve se nanašajo na stopnjo poškodovanosti konstrukcije, ki so definirane s tremi mejnimi stanji: mejnim stanjem blizu porušitve (NC, ang. near collapse), mejnim stanjem velikih poškodb (SD, ang. significant damage) in mejnim stanjem omejitve poškodb (DL, ang. damage limitation).

V mejnem stanju blizu porušitve je konstrukcija močno poškodovana in ima le še malo preostale nosilnosti in togosti, vendar so navpični elementi še sposobni prenašati navpično obtežbo. Konstrukcija je na meji porušitve in se pri naslednjem potresu lahko povsem poruši.

V mejnem stanju velikih poškodb (SD) je konstrukcija poškodovana, ima še nekaj preostale nosilnosti in togosti, navpični elementi so še sposobni prenašati navpično obtežbo. Konstrukcija lahko prenese popotrese zmerne jakosti. Mejno stanje nosilnosti, definirano v Evrokodu 8-1, ustreza mejnemu stanju velikih poškodb.

V mejnem stanju omejitve poškodb (DL) je konstrukcija lažje poškodovana. Do plastifikacije nosilnih elementov ne pride, ti obdržijo svojo nosilnost in togost.

Za račun kapacitet elementov se za lastnosti obstoječega materiala uporabljajo povprečne vrednosti. Te so dobljene s preiskavami na objektu in iz dodatnih virov informacij. Dobljene vrednosti so zmanjšane s faktorji zaupanja CF (ang. confidence factor), ki upoštevajo doseženo raven znanja.

Predhodno je potrebno konstrukcijo temeljito preiskati in zbrati vse razpoložljive podatke. Potrebni vhodni podatki so sledeči:

- identifikacija vrste temeljev stavbe,
- identifikacija pogojev temeljenja,
- podatki o dimenzijah in lastnostih prečnih prerezov elementov stavbe ter o mehanskih lastnostih in stanju vgrajenih materialov,
- podatki o ugotovljenih pomanjkljivostih v materialu in o neustreznem detajliranju,
- opis sedanje in/ali načrtovane uporabe stavbe,
- podatki o tipu in obsegu prejšnje in sedanje škode na konstrukciji,
- podatki o opravljenih popravilih.

Količina in kvaliteta zbranih podatkov določa raven poznavanja konstrukcije in s tem različne vrednosti faktojev zaupanja.

Ločimo tri ravni poznavanja konstrukcije:

- KL1: Omejeno poznavanje,
- KL2: Normalno poznavanje,
- KL3: Popolno poznavanje.

Faktorji, ki določajo ustrezno raven so: geometrija (geometrijske lastnosti konstrukcijskega sistema in nekonstrukcijskih elementov), detajli (stiki medetažnih konstrukcij z nosilno konstrukcijo za prenos vodoravne obtežbe, opečne zveze in spojnice z malto pri zidovih, značilnosti utrditvenih elementov v zidovju) in materiali (mehanske lastnosti vgrajenih materialov).

Vrednosti, pripisane faktorjem zaupanja, so sledeče: za omejeno znanje 1,35 (CF_{KL1}), za normalno znanje 1,2 (CF_{KL2}) in za popolno znanje 1,0 (CF_{KL3}).

Kapaciteta se pri globalni analizi nanaša na pomik vrha stavbe. Največji oz. mejni pomik je dosežen, ko celotna prečna sila pade pod 80% maksimalne nosilnosti.

Mejno stanje omejitve poškodb je pri nelinearni analizi definirana kot točka na meji tečenja idealiziranega elasto-idealno plastičnega diagrama ekvivalentnega SDOF sistema.

4.3.2 Določila za zidane konstrukcije

Kapacitete elementov veljajo za mejno stanje velikih poškodb. Pri porušitvi je lahko merodajen upogib ali strig.

Kapaciteta nearmirane zidane stene je kontrolirana z upogibom v smislu medetažnega zamika (ang. drift) in znaša $0,008H_0/D$ za primarne potresne stene.

Strižna odpornost nearmiranega zidovja, obremenjenega s tlačno silo N , pri kontroli upogiba znaša:

$$V_f = \frac{D \cdot N}{2 \cdot H_0} \cdot (1 - 1,15 \cdot \nu_d) \quad (4.7)$$

kjer so:

D dolžina stene,

H_0 razdalja od prereza, kjer se računa upogibna odpornost, do ničelne točke momentov,

$\nu_d = \frac{N}{D \cdot t \cdot f_d}$ normirana tlačna sila,

t debelina zidu,

$f_d = \frac{f_m}{CF_m}$ povprečna tlačna trdnost, deljena s faktorjem zaupanja.

Kapaciteta nearmirane zidane stene je kontrolirana s strigom v smislu medetažnega zamika in znaša 0,004 za primarne potresne stene.

Strižna odpornost znaša:

$$V_f = f_{vd} \cdot D' \cdot t \quad (4.8)$$

kjer so:

D' dolžina tlačnega dela prereza,

t debelina stene,

f_{vd} strižna trdnost zidu pri prisotnosti vertikalne obtežbe:

$$f_{vd} = f_{vm0} + 0,4 \cdot \frac{N}{D' \cdot t} \leq 0,065 \cdot f_m \quad (4.9)$$

kjer sta:

f_{vm0} začetna strižna trdnost zidu,

f_m normirana tlačna trdnost zidu.

5 UGOTAVLJANJE MATERIALNIH LASTNOSTI NA OBSTOJEČI KONSTRUKCIJI

Evrokod 8, 3. del, kot že omenjeno, določa, da z boljšim poznavanjem lastnosti vgrajenega materiala, detajlov stikovanja in geometrije (nosilne) konstrukcije, lahko uporabimo nižjo vrednost faktorja zaupanja pri analizi odpornosti objekta. Za boljše poznavanje je potrebno narediti preiskave na objektu. Glede na stopnjo poseganja v konstrukcijo ločimo neporušne, delno porušne in porušne metode. Z metodami, opisanimi v nadaljevanju, ocenimo lastnosti vgrajenega materiala (trdnostne in deformacijske karakteristike).

Delno porušne metode (ang. Minor destructive techniques):

- Sondiranje in vzorčenje (ang. Coring and sampling)
- Metoda vrtanja luknje (ang. Hole drilling method)
- Preizkus z eno jekleno blazino (ang. Single flat jack)
- Preizkus z dvema jeklenima blazinama (ang. Double flat jack)

Porušne metode (ang. Destructive techniques):

- Tlačni in-situ preizkus (ang. In-situ compressive test)
- Strižni in-situ preizkus (ang. In-situ shear test)
- Diagonalni in-situ preizkus (ang. In-situ diagonal test)
- Strižni in-situ preizkus z jekleno blazino (ang. In-situ shear test with flat jack)
- Zdrsni in-situ preizkus (ang. In-situ shove test)

Opis metod v nadaljevanju je povzet po (Bosiljkov, V. et al, 2010).

5.1 Delno porušne metode

5.1.1 Sondiranje in vzorčenje

Rezultat preiskave so lahko sledeče materialne karakteristike: tlačna trdnost malte, elastični modul, tlačna trdnost in natezna trdnost opečnih zidakov ali kamnitih blokov.

Najprej je potrebno odvzeti reprezentativne vzorce materiala na konstrukciji. Pri sondiranju se prevrta zid in se poskuša dobiti jedra, ki so v čim večji meri še cela. Podobno velja tudi pri odvzemu celih opek ali kamnitih blokov, saj morajo biti vzorci nepoškodovani. Pri tem je potrebno paziti, da se vzorci odvzamejo iz suhega in nepopravljenega delu zidu. Odvzeti vzorci predstavljajo lokalno morfološko stanje dela zidu, vendar pa se ob zadostnem številu lahko predpostavi dobljene lastnosti tudi za ostalo zidovje. Nato se vzorce pripravi za testiranja v laboratoriju. Preiskave morajo biti opravljene tako na nepoškodovanih vzorcih kot tudi na tistih, kjer je struktura materiala že začela propadati. Število vzorcev mora biti dovolj veliko, da predstavljajo dovolj velik statistični vzorec (v skladu s procedurami).



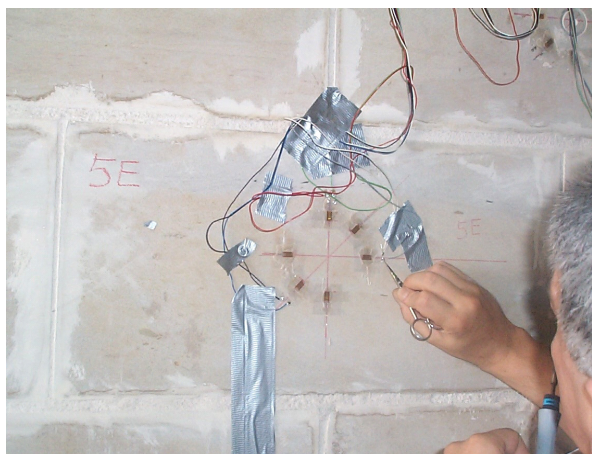
Slika 5.1: Rezultat sondiranja: a) pregled strukture zidu vzdolž celotne debeline in b) odvzem valjev kamnitih blokov, primernih za nadaljne preiskave v laboratoriju

5.1.2 Metoda vrtanja luknje

Metoda je primerna za določitev napetostnega stanja na površini kamnitih blokov v zidu. Glavne napetosti so dobljene iz efektivnih deformacij, ki ustrezajo napetostim ob vrtanju luknje skozi površino kamna.

Tri merilne lističe (lahko tudi več) se namesti okoli predvidene luknje. Izvede se meritev pred in po vrtanju luknje. Efektivne deformacije so razlika deformacij pred in po vrtanju. Glavne napetosti se izračunajo s pomočjo efektivnih deformacij ob upoštevanju dveh konstant A in B (ki sta dobljeni eksperimentalno s kalibracijskim testom). Konstanti sta odvisni od mehanskih materialnih lastnosti in geometrije testa.

Omejitev testa predstavljajo kamniti bloki, ki morajo biti dovolj veliki, da se lahko namesti vse tri merilne lističe v predpisanih razdaljah na en blok.



Slika 5.2: Namestitev merilnih lističev na kamniti blok

5.1.3 Preiskava z eno jekleno blazino

Rezultat preiskave je ocena lokalnih tlačnih napetosti v obstoječem zidu.

Na reprezentativnem vzorcu zidu določimo merske točke. Izmerimo razdalje med njimi (točke se nahajajo nad in pod predvideno režo). Izrežemo režo in izmerimo nove razdalje med točkami. Z meritvami preverimo, koliko se je reža po izrezu zmanjšala oz. zaprla. V režo vstavimo jekleno

blazino, v kateri postopoma povečujemo pritisk, dokler ni doseženo prvotno deformacijsko stanje (pred izrezom reže).

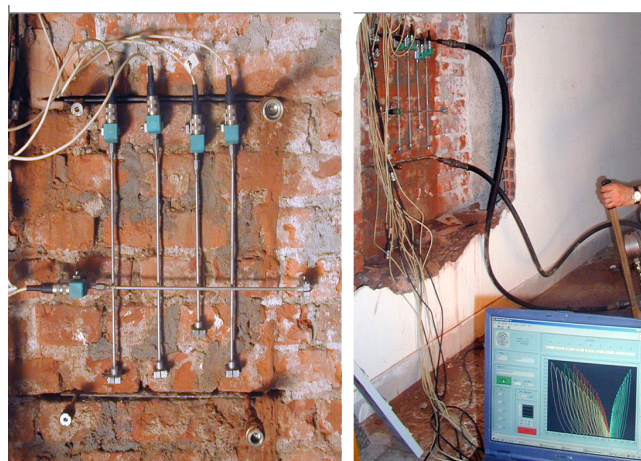


Slika 5.3: Potek preiskave z eno jekleno blazino

5.1.4 Preiskava z dvema jeklenima blazinama

Rezultat preiskave je ocena deformacijskih karakteristik zidu (tangenti elastični modul in sekantni elastični modul) in tlačne trdnosti zidu.

Preiskava poteka podobno kot preizkus z eno jekleno blazino, le da izrežemo dve vzporedni reži na določeni medsebojni razdalji. Del zidu med dvema blazinama je v vertikalni smeri ločen od preostalega zidu. Tako blazini poustvarjata enosno napetnostno stanje v vzorcu. Z merilniki deformacij merimo vertikalne in horizontalne pomike. S testom je možno izvesti tlačni preizkus na neobremenjenem vzorcu zidovja. Prav tako je pri več ciklih obremenjevanja in razbremenjevanja možno določiti elastični modul.



Slika 5.4: Preiskava z dvema jeklenima blazinama

5.2 Porušne metode

5.2.1 In-situ tlačni preizkus

Rezultat preiskave so tlačna trdnost, elastični modul, Poissonov količnik zidu ter diagram odvisnosti napetosti od deformacij.

Del zidu, ki je predmet preiskave, je potrebno izžagati od ostalega zidu na treh straneh. Vertikalno obtežbo nanašamo monotono naraščajoče ali ciklično (z vmesnim razbremenjevanjem) na vrhu panela. Vertikalne relativne pomike merimo v središčnem delu panela z merilniki deformacij.



Slika 5.5: Tlačni preizkus zidu

5.2.2 In-situ strižni preizkus

Rezultat preiskave so strižna trdnost (natezna v ravnini), togost, strižni modul in duktilnost zidu.

Panel zidu, ki je predmet preiskave, izoliramo od ostalega zidu z dvema rezoma. Panel lahko ostane vertikalno obremenjen z obstoječim zidom nad njim, ali pa ga ločimo in prednapnemo v tlaku. Tako ločimo direktni strižni test (obstoječa vertikalna obtežba) in tlačno-strižni test (panel, prednapet v tlaku). Horizontalno obtežbo nanašamo na sredini panela. Obtežbo povečujemo po korakih, pri čemer kontroliramo pomike. Vodoravno silo vsiljujemo, dokler le-ta ne pade na 80% maksimalne dosežene sile oziroma je nadaljevanje ocenjeno za prenevarno. Privzame se, da pri 80% maksimalne sile pride do porušitve panela. Deformacije merimo z merilniki pomikov, ki so nameščeni na panel v diagonalnih smereh.



Slika 5.6: Strižni preizkus zidu

5.2.3 In-situ diagonalni preizkus

Rezultat preiskave so strижna trdnost (natezna v ravnini), togost in strижni modul zidu.

Kvadraten panel ločimo od preostalega zidu s štirimi rezi. Tlačno obtežbo vnašamo po korakih v panel po njegovi diagonali. V panelu se pojavijo diagonalne strижne razpoke. Obtežbo nanašamo do porušitve panela. Relativne pomike merimo z merilniki pomikov, ki so nameščeni diagonalno na panelu.



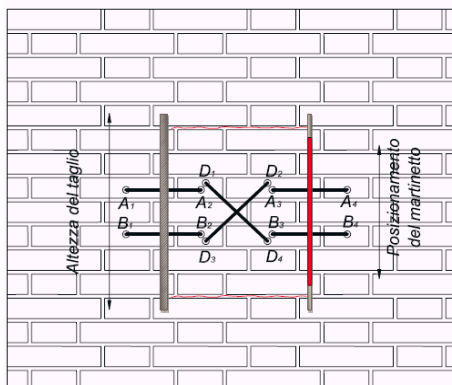
Slika 5.7: Diagonalni preizkus zidu

5.2.4 In-situ strижni preizkus z jekleno blazino

Z metodo določimo kohezijo in koeficient trenja zidu glede na Mohr-Coulomb-ov kriterij za določitev strижne trdnosti v povezavi s pojavom strижnega drsenja.

V zid naredimo dva vzporedna vertikalna reza na določeni medsebojni razdalji. V eno rego namestimo jekleno ploščo. Druga rega mora biti dovolj velika, da omogoča zdrs zidakov. Horizontalno obtežbo nanašamo monotono s povečevanjem pritiska v jekleni blazini do pojava plastičnega obnašanja

zidakov. Merilnike pomikov, ki merijo zdrs, namestimo pravokotno na vertikalni regi ter med njimi še v diagonalni smeri.



Slika 5.8: Strižni preizkus z eno jekleno blazino

5.2.5 In-situ zdrsni preizkus

Metoda je primerna za določitev odpornosti na zdrs vzdolž rege za malto in koeficienta trenja za opečni zid.

Za test je potrebno iz zidu odstraniti opeko in odstraniti malto iz rege za naslednjo opeko v zidu. Na mesto, kjer smo odstranili opeko, vstavimo hidravlični bat. Bat potiska sosednjo opeko proti izraznjeni maltni regi. Sila, potrebna za zdrs opeke, je povezana z zdrsno trdnostjo zidu. Če isti postopek ponovimo pri različnih nivojih vertikalne obremenitve, lahko izračunamo koeficient trenja.



Slika 5.9: Preizkus zdrsa zidakov

6 PROGRAMSKO ORODJE ZA OBRAVNAVO ZIDANIH STAVB

6.1 Načini modeliranja zidanih stavb

Poglavje je povzeto po (Calderini, C. et al., 2010).

Stavbe različnih arhitekturnih tipov se med potresi različno obnašajo. Obstaja več vrst programskih orodij, ki na različne načine opišejo njihovo obnašanje. Zidane konstrukcijske elemente lahko obravnavamo s sledečimi metodami: z metodo končnih elementov, kjer je material za večje enote zidov opisan s homogeniziranimi konstitutivnimi zakoni (ang. Continuous Constitutive Law Models - CCLM); z metodo končnih elementov, kjer so bloki in maltni stiki med njimi natančneje modelirani (ang. Discrete Interface Models - DIM); kot ekvivalentne okvirje s slopovi in prekladnimi deli (ang. Structural Elements Models – SEM) ter z modeli, ki definirajo makro bloke sestavljene iz tipičnih konstrukcijskih elementov objektov (ang. Macro-Block Models - MBM).

Arhitekturne tipe stavb lahko razdelimo na sedem skupin:

- A. stavbe, za katere je značilno škatlasto obnašanje (prenos vodoravnih sil pretežno na elemente v ravnini obremenitev), če so zidovi in stropovi dobro povezani (palače, gradovi, sakralni objekti),
- B. stavbe, za katere so značilni veliki prostori brez vmesnih stropov in pri katerih je možno razbrati posebne konstrukcijske sklope (cerkve, mošeje, templji, mavzoleji, gledališča),
- C. objekte, pri katerih je vertikalna dimenzija veliko večja od ostalih dveh in za katere je značilno upogibno obnašanje (stolpi, zvoniki, minareti, svetilniki, dimniki),
- D. objekte, pri katerih je glavni konstrukcijski element lok ali obok (slavoloki, akvedukti, mostovi, samostani),
- E. masivne konstrukcije, kjer so debeline sten večje od običajnih in se jih ne da idealizirati z ravninskim modelom ter je merodajna lokalna porušitev (utrdbе, obrambno mestno obzidje),
- F. samostojne, izolirane arhitektonske oblike (stebri, obeliski, arheološke razvaline),
- G. historična središča mest, kjer pride do interakcije sosednjih stavb med potresom.

V nadaljevanju je prikazana preglednica (6.1), ki prikazuje primernost različnih metod za analizo posameznih tipov konstrukcij.

Preglednica 6.1 Primernost različnih metod za analizo posameznih tipov konstrukcij (povzeto po Calderini, 2010)

Tip konstrukcije		Model			
		CCLM	SEM	DIM	MBM
A	Konstrukcije, kjer prevladajo porušitve v ravnini	Možno	Globalno	Možno	Lokalno
B	Konstrukcije, kjer prevladajo porušitve izven ravnine	Možno		Možno	
C	Konstrukcija z enodimenzijskimi elementi	Možno			Možno
D	Obočne konstrukcije s porušitvijo v ravnini	Možno		Možno	
E	Masivne konstrukcije, kjer prevladajo lokalne porušitve	Možno			
F	Konstrukcije, izpostavljene prevračanju			Možno	
G	Grajen sistem, podvržen kompleksni porušitvi		Globalno	Možno	Lokalno

 Možno

 Standardno

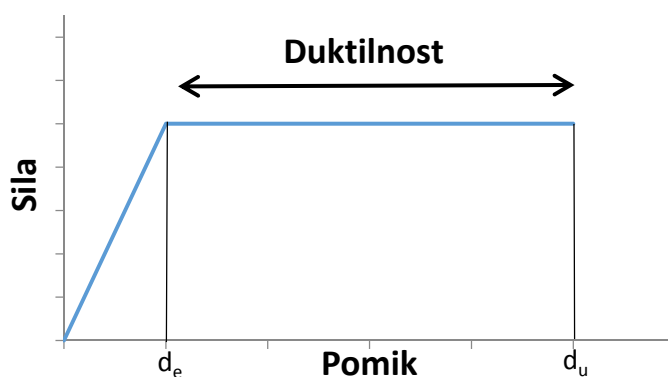
6.2 Programsko orodje 3Muri

Opis programa je povzet po (Lagomarsino, S. et al, 2013) in (S.T.A. Data, 2014).

6.2.1 Splošno o programu

Program za analizo zidanih konstrukcij 3Muri izračuna odpornost konstrukcije na vertikalno obtežbo in potresno odpornost z nelinearno »pushover« analizo. Izračun temelji na FME metodi (ang. Frame by Macro Elements). FME metoda izvira iz opazovanja resničnega obnašanja stavb in mehanizmov poškodb zidanih konstrukcij, povzročenih pri potresih.

V primerjavi z ostalimi konstrukcijami (jeklenimi, betonskimi in lesenimi) je obnašanje zidanih konstrukcij težje opisati, še posebej, ko zapustijo elastično območje. Potresno obtežbo konstrukcije prenašajo z duktilnostjo. Duktilnost je definirana kot razmerje med največjim doseženim pomikom konstrukcije pred porušitvijo in pomikom na meji elastičnosti.

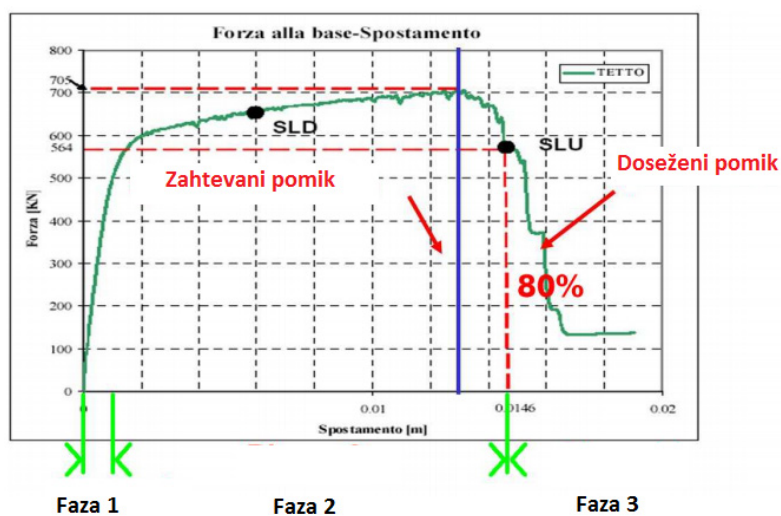


Slika 6.1: Idealizirana krivulja odpornosti



Slika 6.2: Krivulja kapacitete s prikazom stanj poškodovanosti konstrukcije (vir S.T.A Data)

Obnašanje konstrukcije lahko razdelimo v tri faze. V prvi fazi je obnašanje elastično, kar pomeni, da je pomik prenosorazmeren s silo. V drugi fazi pride do plastičnega obnašanja. Deli konstrukcije zapuščajo elastično fazo, togost konstrukcije se zmanjšuje, zato sila počasi narašča ob hitrejšem naraščanju pomikov. Ko sila doseže maksimalno vrednost, začne padati, vendar se pomiki še vedno povečujejo. Padec sile na 80% njene maksimalne dosežene vrednosti pomeni porušitev konstrukcije. V tretji fazi se torej konstrukcija poruši. Mejno stanje nosilnosti (MSN oz. ang. ULS- Ultimate limit state) je potemtakem doseženo pri padcu sile na 80%. Hkrati ta točka predstavlja mejo varovanja človeških življenj (ang. Lifesaving limit state). Program ima najverjetneje vgrajen še dodaten kriterij za porušitev, morda največji pomik etaže, vendar pa tega v opisu programa ni navedeno.

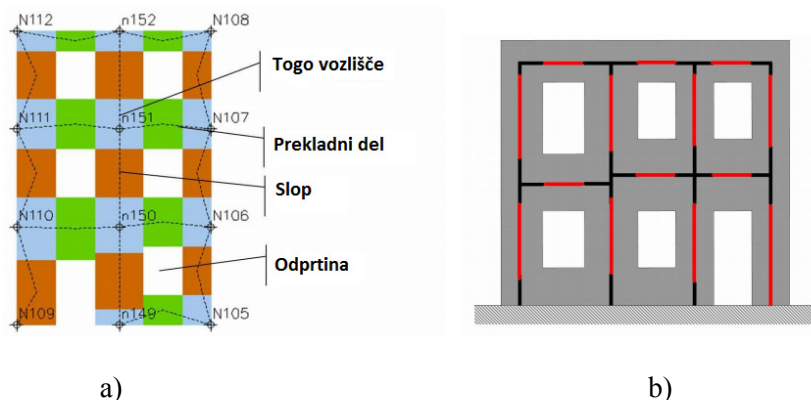


Slika 6.3: Primer krivulje kapacitete s fazami (vir S.T.A Data)

Program izvednoti največji pomik, ki ga je konstrukcija sposobna doseči pred porušitvijo. Ta pomik nato primerja z zahtevanim pomikom, določenim s standardi Evrokod, ki je pogojen z lokacijo objekta in s karakteristikami konstrukcije. Če je največji pomik, ki ga je konstrukcija sposobna prenesti, večji od zahtevanega s standardi, potem je zahteva globalne odpornosti izpolnjena. Poleg globalne kontrole pa program preveri tudi odpornost in pomike vsakega posameznega elementa, za katerega je prikazano v kakšnem stanju se nahaja v posameznem koraku analize (ali je v elastičnem ali v plastičnem stanju ali pa pride do porušitve). To nam omogoča enostavno spremljanje poškodb in porušitev elementov konstrukcije v vsakem koraku analize.

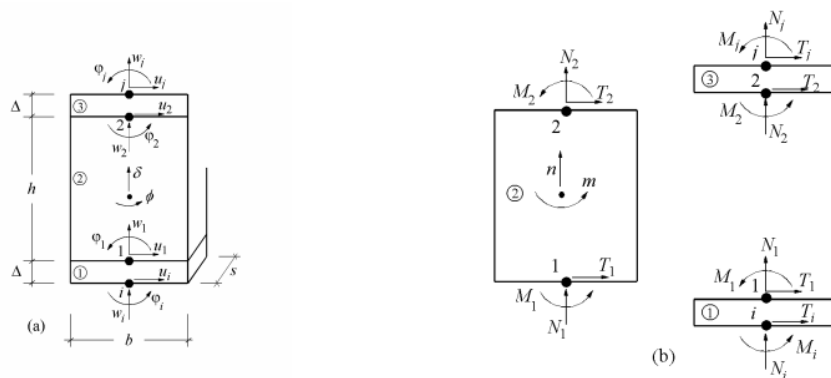
V programu je predpostavljeno škatlasto obnašanje konstrukcije. To pomeni, da horizontalne sile prenašajo stene, strižno obremenjene v svoji ravnini, za kar je pogoj, da so vsi elementi ustrezno povezani (tako stene s stenami kot tudi stropovi s stenami).

Porušitve sten pri potresu se kažejo v treh tipičnih oblikah: strižna porušitev, porušitev zaradi tlačnega upogiba in drobljenja robov ter porušitev zaradi zdrsa. Do porušitve pride v najšibkejših delih stene, to je med ali nad odprtinami. Zaradi te predpostavke lahko stene opišemo z makroelementi. Stene so razdeljene v elementarne dele: slopove (ang. piers), prekladne dele (ang. spandrel beams) in toge elemente. Slopovi se nahajajo levo in desno od odprtin, prekladni deli pa nad in pod odprtinami. Vsi ostali elementi (ki niso med odprtinami) so v primerjavi z omenjenima neskončno togi. Slopove in prekladne dele lahko obravnavamo kot ekvivalentne linearne elemente. Program mrežo iz makroelementov pretvori v ekvivalenten okvir. S tem se število prostostnih stopenj zmanjša in čas računanja je zato krajši.



Slika 6.4: Mreža makroelementov (a) in ekvivalentni okvir (b) (vir S.T.A Data)

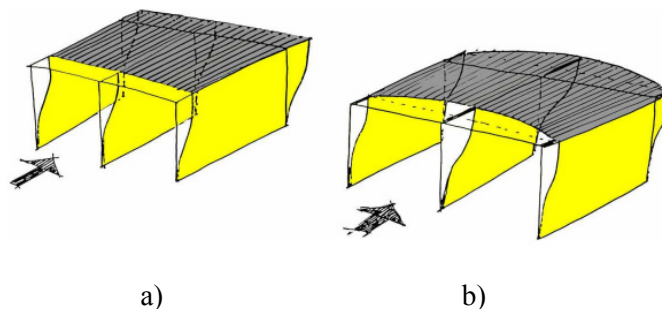
Prevedba ravninskih elementov v linijske zahteva definiranje posebnih končnih elementov z nelinearnim obnašanjem. Tak element je sestavljen iz treh delov. Osnova deformabilnost je zajeta v dveh zunanjih poljih z infinitezimalno debelino, neskončno togih na strižno obtežbo. Nasprotno je tangencialna deformabilnost skoncentrirana v središčnem polju, ki pa ni osno in upogibno deformabilen.



Slika 6.5: Sestavljeni končni elementi (vir S.T.A Data)

Porušitev elementa (na strig ali upogib) je v standardu Evrokod 8-3 predpisana z maksimalno deformacijo. Če je ta vrednost prekoračena, se privzame, da element ni več zmožen prenašati horizontalne sile, temveč le še statično vertikalno obtežbo. V modelu se tak element nadomesti s palico.

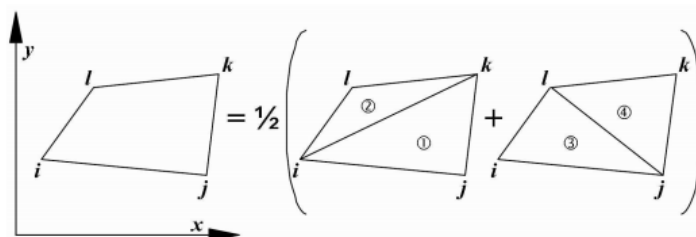
3Muri ima možnost podajanja podajnih stropov. Vloga stropov je prenašanje horizontalne obtežbe na stene.



Slika 6.6: Razlika pri prenosu sil na stene a) pri togih in b) podajnih stropovih (vir S.T.A Data)

Toge stropne plošče prenašajo obtežbo na zidove enakomerno, medtem ko so pri podajnih stropovih nekateri zidovi bolj obremenjeni. V starih obstoječih stavbah najdemo večinoma podajne stropove. Nadomeščanje podajnih stropov s togimi betonskimi je ponavadi nesmiselno, saj večja teža pomeni večje vztrajnostne sile, hkrati pa je tudi izvedba zelo zahtevna.

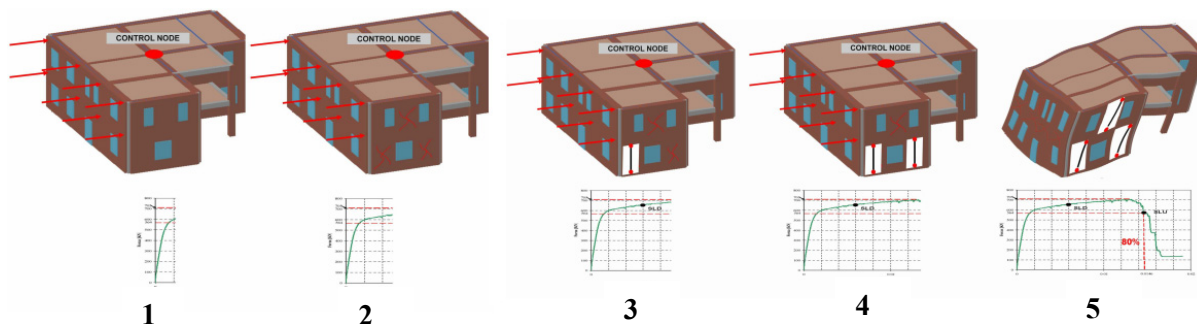
3Muri za stropne elemente uporablja ravninske končne elemente z membranskim obnašanjem. Ti elementi so sposobni prenašati obtežbo le v svoji ravnini (imajo togost v ravnini). Možna je uporaba izotropnih stropov, kar pomeni, da je upoštevana različna togost v dveh glavnih smereh. S tem program omogoča raznovrstno uporabo stropov, tako lesenih kot tudi obokov.



Slika 6.7: Končni elementi za podajne stropove (vir S.T.A Data)

6.2.2 Nelinearna »pushover« analiza

Rezultat nelinearne statične »pushover« analize je krivulja kapacitete, ki predstavlja potresno odpornost sistema. Statična analiza se imenuje, ker se sila nanaša statično, nelinearna pa zato, ker je odziv konstrukcijskih elementov nelinearen (iz elastičnega stanja preidejo v plastičnega vse do porušitve).



Slika 6.8: Faze konstrukcije pri povečevanju horizontalne obtežbe in pripadajoča krivulja kapacitete (vir S.T.A Data)

S krivuljo kapacitete zajamemo vsa stanja konstrukcije: nepoškodovano-elastično (slika 1), prehajanje elementov v plastično stanje (slika 2), stanje, kjer posamezni deli konstrukcije odpovejo in se jih nadomesti s paličjem (slika 3 in 4), pri padcu sile na 80% največje dosežene vrednosti je privzeto, da se konstrukcija poruši (slika 5).

V skladu s predpisi program upošteva obe predpisani porazdelitvi horizontalne obtežbe na konstrukcijo (enakomerno in obtežbo proporcionalno prvi nihajni obliki konstrukcije). Horizontalno obtežbo v obliki pomikov monotonno povečuje.

6.2.3 Kontrole

V skladu s standardi program naredi dve potrebni kontroli. Prva velja za mejno stanje nosilnosti, druga za mejno stanje uporabnosti.

Elementi zidovja so sposobni prenašati horizontalne sile, dokler ne dosežejo maksimalnega strižnega ali upogibnega pomika. Ko dosežejo to vrednost, so sposobni prenašati le še vertikalno obtežbo. Poškodbe v konstrukciji še zmeraj naraščajo, dokler ne dosežejo limitne vrednosti, ko se iz vrednosti maksimalni pomik konstrukcije. Na tem mestu se lahko izračuna nihajni čas ekvivalentnega sistema, s čimer lahko na podlagi spektrov iz standardov izračuna zahtevani pomik za določeno stopnjo potresa na dani lokaciji.

Kontrola za mejno stanje nosilnosti:

Zahtevan pomik, določen s potresnim dogodkom, mora biti manjši od pomika, ki ga je konstrukcija sposobna prenesti: $D_{max}(MSN) < D_u$.

Program izračuna tudi faktor obnašanja q^* , ki mora biti manjši od tistega, določenega v predpisih.

Kontrola za mejno stanje uporabnosti:

Pomik na meji elastičnosti, mora biti manjši od pomika, določenega s standardi: $D_{max}(MSU) < D_d$.

Program izvednosti tudi pospešek, ki ga je konstrukcija sposobna prenesti, tako za mejno stanje nosilnosti kot tudi za mejno stanje uporabnosti.

6.2.4 Primer izpisa iz programa

»Pushover« analiza se izvrši v X in Y smeri, upošteva se ekscentričnost masnega središča in dve razporeditvi horizontalne obtežbe po višini (tj. enakomerna in sorazmerna prvi nihajni obliki).

Bilinear elastic segment and pushover intersection 75 [%]

ULS limit value: Decay (80 [%]), First element failed. q^d limit: 1,5. Displacement reduction factor: 1.

DLS limit value: Drift, Shear, both drift and shear. Storey height drift limit: 0,003.

Materials:

Existing:

Drift: Shear (0,004), Compression-bending (0,008).

Confidence factor: Knowledge level 1 (1,35), Knowledge level 2 (1,2), Knowledge level 3 (1).

New - Drift: Shear (0,004), Compression-bending (0,008).

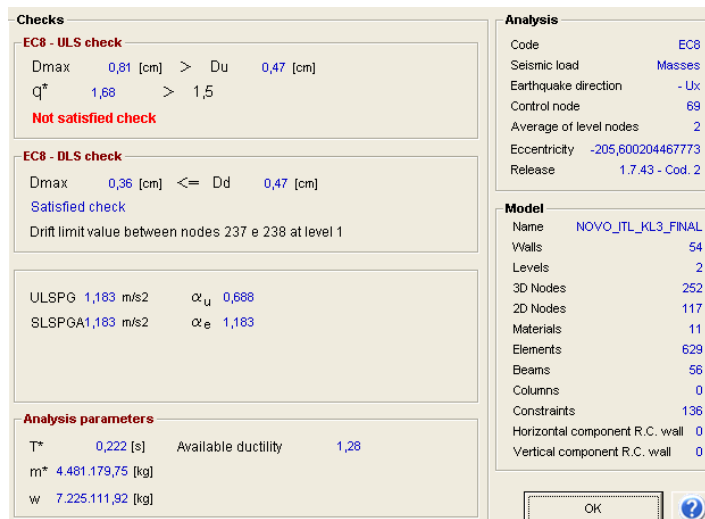
Slika 6.9: Prikaz parametrov, ki jih program upošteva pri računu

No.	Insert in report	Earthquake	Uniform pattern of lateral load	Ecc. [cm]	Dmax ULS [cm]	Du ULS [cm]	q^d ULS	Dmax DLS [cm]	Dd DLS [cm]	Alpha u	Alpha e
1	<input type="checkbox"/>	+X	Masses	0,0	0,84	0,93	1,582	0,38	0,45	1,082	1,132
2	<input type="checkbox"/>	+X	First mode	0,0	1,03	1,10	1,975	0,50	1,04	1,056	1,736
3	<input type="checkbox"/>	-X	Masses	0,0	0,80	1,12	1,558	0,36	0,71	1,294	1,582
4	<input type="checkbox"/>	-X	First mode	0,0	0,99	1,25	1,812	0,47	0,73	1,207	1,359
5	<input type="checkbox"/>	+Y	Masses	0,0	0,75	1,42	1,493	0,34	0,60	1,623	1,484
6	<input type="checkbox"/>	+Y	First mode	0,0	1,00	0,83	1,851	0,48	0,69	0,867	1,305
7	<input type="checkbox"/>	-Y	Masses	0,0	0,81	1,66	1,475	0,38	1,58	1,741	2,881
8	<input type="checkbox"/>	-Y	First mode	0,0	1,03	0,83	1,775	0,49	0,74	0,842	1,328
9	<input type="checkbox"/>	+X	Masses	205,6	0,86	0,87	1,746	0,38	0,79	1,006	1,605
10	<input type="checkbox"/>	+X	First mode	-205,6	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,000	0,000
11	<input type="checkbox"/>	+X	First mode	205,6	1,05	1,10	2,177	0,52	0,97	1,042	1,608
12	<input type="checkbox"/>	+X	First mode	-205,6	1,06	0,96	1,797	0,51	0,73	0,922	1,289
13	<input type="checkbox"/>	-X	Masses	205,6	0,83	0,88	1,765	0,36	0,76	1,051	1,615
14	<input type="checkbox"/>	-X	Masses	-205,6	0,81	0,47	1,884	0,36	0,47	0,688	1,183
15	<input type="checkbox"/>	-X	First mode	205,6	1,03	1,27	1,889	0,50	0,92	1,188	1,573
16	<input type="checkbox"/>	-X	First mode	-205,6	0,95	1,11	1,753	0,44	0,94	1,132	1,711
17	<input type="checkbox"/>	+Y	Masses	299,8	0,74	1,39	1,541	0,33	0,53	1,605	1,369
18	<input type="checkbox"/>	+Y	Masses	-299,8	0,77	1,53	1,534	0,35	0,58	1,700	1,415
19	<input type="checkbox"/>	+Y	First mode	299,8	0,98	0,93	1,636	0,46	0,77	0,961	1,436
20	<input type="checkbox"/>	+Y	First mode	-299,8	1,01	0,92	1,782	0,48	0,74	0,932	1,361
21	<input type="checkbox"/>	-Y	Masses	299,8	0,76	1,46	1,585	0,33	1,37	1,657	2,717
22	<input type="checkbox"/>	-Y	Masses	-299,8	0,75	1,66	1,516	0,34	1,66	1,849	3,181
23	<input type="checkbox"/>	-Y	First mode	299,8	1,01	0,84	1,651	0,49	0,76	0,867	1,376
24	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	First mode	-299,8	1,06	0,82	1,605	0,51	0,70	0,821	1,249

Colour legend: ■ Satisfied, ■ Not satisfied, ■ Self weight not converging

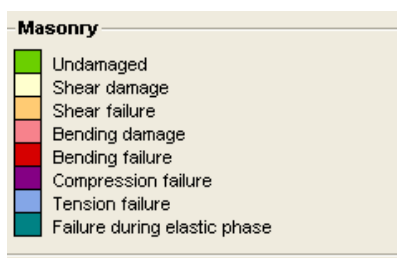
Slika 6.10: Prikaz izpisa vseh analiz

Za vsako analizo program izračuna kapaciteto konstrukcije (pomik pri mejnem stanju nosilnosti in pri mejnem stanju uporabnosti ter največji pospešek) in jo primerja z zahtevami, določenimi s standardi. Izpiše tudi duktilnost, maso konstrukcije, nihajni čas in maso ekvivalentnega sistema z eno prostostno stopnjo (Slika 6.11).



Slika 6.11: Prikaz izpisa rezultatov posamezne analize

Program izriše tudi poškodovanost posameznih elementov, ki so obarvani glede na način in stopnjo poškodovanosti (Slika 6.12).



Slika 6.12: Stopnje in način poškodovanosti konstrukcije

6.3 N2 metoda kot povezava med spektri odziva in kapaciteto konstrukcije

Program 3 Muri uporablja N2 metodo za določitev ciljnih pomikov. Opis N2 metode je povzet po (Fajfar, 2002).

Nelinearne analize običajno izvajamo na računskih modelih konstrukcij, ki imajo več prostostnih stopenj. Potresna obremenitev pa se določi iz projektnega spektra, ki velja za sisteme z eno prostostno stopnjo. N2 metoda (N za nelinearna, 2 za dva matematična modela) predpisuje transformacijo iz sistema z več prostostnimi stopnjami na ekvivalenten sistem z eno prostostno stopnjo. Pri primerjavi rezultatov potresnih obremenitev in kapacitete konstrukcije se uporablja AD format (odnos med pomikom in pospeškom).

Matematični model za običajno linearno elastično analizo je potrebno dopolniti s podatki o nelinearnem odnosu med obtežbo in deformacijo za posamezne elemente konstrukcije.

Pri nelinearni statični analizi spremljamo odnos med celotno prečno silo (v spodnji etaži konstrukcije), ki je enaka vsoti vseh vodoravnih sil v posameznih etažah, in pomikom na vrhu konstrukcije. Razporeditev sil po višini, s katero obremenimo konstrukcijo, je lahko različna. Pri elastični analizi velja, da je razporeditev sil enaka nihajni obliki, uteženi z masami v posameznih etažah m_i :

$$P = M \cdot \phi \quad (6.1)$$

kjer so:

- P** vektor vodoravne obtežbe,
M matrika mas posameznih etaž,
 ϕ vektor nihajne oblike.

Pri nelinearni analizi se nihajne oblike spreminjajo s stopnjo plastifikacije konstrukcije, stopnja plastifikacije pa se spreminja s časom. Zato razporeditev sil po višini ni samoumevna. Kot že omenjeno, 3Muri upošteva dve porazdelitvi sil po višini, skladno s standardi Evrokod 8-1.

Sistem z več prostostnimi stopnjami (ang. multi degree of freedom ali MDOF) je potrebno pretvoriti v sistem z eno prostostno stopnjo (ang. single degree of freedom ali SDOF). Enačba za pretvorbo sil in pomikov je sledeča:

$$F^* = \frac{V}{\Gamma} \quad (6.2)$$

$$D^* = \frac{D_t}{\Gamma} \quad (6.3)$$

kjer so:

- F^* sila ekvivalentnega sistema z eno prostostno stopnjo,
 D^* pomik ekvivalentnega sistema z eno prostostno stopnjo,
 Γ faktor za pretvorbo,
 D_t ciljni pomik,
 V celotna prečna sila.

Faktor za pretvorbo je odvisen od predpostavljenega približka nihajne oblike in razporeditve mas:

$$\Gamma = \frac{m^*}{\sum m_i \cdot \phi_i^2} \quad (6.4)$$

$$m^* = \sum m_i \cdot \phi_i \quad (6.5)$$

kjer je m^* masa ekvivalentnega sistema z eno prostostno stopnjo.

Pri pretvorbi se oblika odnosa med obtežbo in deformacijo ohrani (spremeni se le merilo), ohranijo se tudi togosti in nihajni čas. V enačbah je upoštevano, da je deformacijska oblika normirana tako, da znaša pomik na vrhu modela 1.

Odnos med silo in pomikom ekvivalentnega sistema idealiziramo tako, da ga pretvorimo v bilinearno obliko (elastičnemu območju sledi plastično brez utrditve). V Evrokodu 8-1 je podano pravilo za idealizacijo: ploščini pod originalnim in idealiziranim odnosom med silo in pomikom morata biti enaki.

Nihajni čas idealiziranega sistema v elastičnem območju:

$$T^* = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m^* \cdot D_y^*}{F_y^*}} \quad (6.6)$$

kjer so:

- T^* nihajni čas ekvivalentnega sistema z eno prostostno stopnjo,
 D_y^* pomik na meji elastičnosti,
 F_y^* nosilnost na meji elastičnosti.

Idealiziran odnos med silo in pomikom ekvivalentnega sistema primerjamo z zahtevami potresa v AD formatu. Graf ekvivalentnega sistema prevedemo v AD format:

$$S_a = \frac{F^*}{m^*} \quad (6.7)$$

kjer je S_a pospešek ekvivalentnega sistema.

Potresna obtežba je v predpisih podana v obliki elastičnega spektra pospeškov (za sistem z eno prostostno stopnjo) v odvisnosti od nihajnega časa T (Poglavje 4.2, Enačbe 4.1-4.4). Pri določanju nihajnega časa je predvideno, da se upošteva razpokane prereze.

Spekter pomikov:

$$S_{de} = \frac{T^2}{4 \cdot \pi^2} \cdot S_{ae} \quad (6.8)$$

kjer so:

S_{de} elastičen spekter pomikov,

S_{ae} elastičen spekter pospeškov.

Pri projektiranju na potresnih območjih dopuščamo poškodbe. Energija se sipa s poškodbami. Duktilnost konstrukcije zajamemo tako, da zmanjšamo zahtevano nosilnost konstrukcije z redukcijskim faktorjem R (v Evrokodu 8 je to faktor obnašanja q). Velikost redukcijskega faktorja je odvisna od duktilnosti in dodatne nosilnosti. Duktilnost je sposobnost konstrukcije, da se deformira v neelastičnem območju. Dodatna nosilnost (ang. overstrength) je dodatna nosilnost nad računsko potrebno nosilnostjo. Z redukcijskim faktorjem zmanjšamo vrednost elastičnih pospeškov v spektru (v redukcijskem faktorju upoštevamo le duktilnost).

Za neelastičen sistem z bilinearnim odnosom med silo in pomikom velja:

$$S_a = \frac{S_{ae}}{R_\mu} \quad (6.9)$$

$$S_d = \frac{\mu}{R_\mu} \quad (6.10)$$

$$S_{de} = \frac{\mu}{R_\mu} \cdot \frac{T^2}{4 \cdot \pi^2} \quad (6.11)$$

$$S_{ae} = \mu \cdot \frac{T^2}{4 \cdot \pi^2} \cdot S_a \quad (6.12)$$

$$R_\mu = (\mu - 1) \cdot \frac{T}{T_c} + 1 \quad \text{za } T < T_c \quad (6.13)$$

$$R_\mu = \mu \quad \text{za } T > T_c \quad (6.14)$$

kjer so:

S_a spekter pospeškov neelastičnega sistema,

R_μ redukcijski faktor,

μ duktilnost,

S_d spekter pomikov neelastičnega sistema,

T nihajni čas linearnega sistema z eno prostostno stopnjo,

T_c zgornja meja nihajnega časa na območju spektra, kjer ima spektralni pospešek konstantno vrednost.

Če je T večji od T_c , potem je pomik neelastičnega sistema enak pomiku elastičnega z enakim nihajnim časom.

Potresno obremenitev ekvivalentnega sistema z eno prostostno stopnjo se določi na način opisan v nadaljevanju.

Redukcijski faktor R predstavlja razmerje med pospeški elastičnega in neelastičnega sistema:

$$R_\mu = \frac{S_{ae}(T^*)}{S_{ay}} \quad (6.15)$$

kjer je S_{ay} pospešek na meji tečenja.

Če je $T^* > T_c$ velja:

$$S_d = S_{de}(T^*) \quad (6.16)$$

$$R_\mu = \mu \quad (6.17)$$

Če je $T^* < T_c$ velja:

$$\mu = (R_\mu - 1) \cdot \frac{T_c}{T^*} + 1 \quad (6.18)$$

Pomiki konstrukcije:

$$S_d = \mu \cdot D_y = \frac{S_{de}}{R_\mu} \cdot \left(1 + (R_\mu - 1) \cdot \frac{T_c}{T^*}\right) \quad (6.19)$$

Pomik ekvivalentnega sistema z eno prostostno stopnjo pomnožimo s faktorjem za transformacijo Γ in dobimo pomik na vrhu sistema z več prostostnimi stopnjami.

N2 metoda je primerna za konstrukcije, ki nihajo pretežno v eni sami nihajni obliki. Velja za dvojno simetrične konstrukcije, ki jih je mogoče obravnavati z ravniskimi modeli.

7 KONSTRUKCIJSKI SISTEM GRADU GRM

Opis vertikalne in horizontalne nosilne konstrukcije gradu Grm ter gradbenih materialov temelji na konservatorskem načrtu gradu Grm (ZVKDS, 2011), poročilu o analizi materialno-tehničnega stanja in potresne odpornosti konstrukcije gradu Grm (IRMA, 2001) in načrtih obstoječega stanja gradu Grm (ZVKDS, 2013a). Načrti tlorisa pritličja, tlorisa prvega nadstropja in dveh prerezov gradu so priloženi na koncu diplomske naloge (priloge A, B in C).

7.1 Splošno o konstrukcijskem sistemu in gradbenih materialih

Vertikalni nosilni sistem je kombinacija vzdolžnih in prečnih zidov. Nosilni zidovi so večinoma grajeni iz mešanice kamna in opeke, v kateri prevladuje kamen. Iz opeke je v celoti sezidanih nekaj sten v zahodnem traktu. Pozicija teh sten je razvidna iz slike 8.1, kjer so označene z rjavo barvo. Temelji so zidani iz kamna, kot vezivo je uporabljena apnena malta. Stropne konstrukcije so zelo raznolike, v kleti najdemo kamnite banjaste oboke, v pritličju češke čepice, banjaste in križne oboke, segmentne opečne oboke na jeklenih nosilcih (t.i. pruska čepica), z izjemo nekaj lesenih in armiranobetonskih stropov, v nadstropju pa večinoma lesene stropove. Izjema je le obokani strop v stolpni dvorani. Drugi tip vertikalne nosilne konstrukcije je odprti arkadni hodnik, ki je bil prizidan k zahodni in severni dvoriščni fasadi v pritličju in nadstropju. Ob vzhodni fasadi je bil arkadni hodnik odprt samo v pritličju, medtem ko je v nadstropju nad arkadnimi loki polna stena z okni. Arkadni hodniki so bili prvotno odprti in prehodni, v pritličju severnega in vzhodnega trakta so svodeni s križnimi oboki, v zahodnem pa z banjastim obokom s sosvodnicami. V nadstropju so nad arkadnimi hodniki ravni leseni tramovni stropovi ali stropovi iz lesenih brun. Strešna konstrukcija je trapezno vešalo z naklonom strešine med 40° in 53° ter višino med 580 cm in 590 cm (različno glede na trakt). Kritina je opečni bobrovec.

7.2 Vertikalna konstrukcija

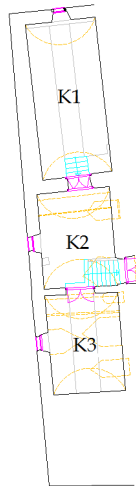
Vertikalno nosilno konstrukcijo sestavljajo zidovi različnih debelin, ki se z višino tanjšajo. V pritličju so stene debelin od 67 cm do 108 cm, v nadstropju pa od 50 cm do 85 cm. Novejše opečne stene v zahodnem traktu so debelin 43 cm (severna) in približno 73 cm (na južni strani).

Višine prostorov znotraj ene etaže niso enakih višin, pritlični prostori so višine med 262 cm in 380 cm, prostori v nadstropju pa med 318 cm in 349 cm.

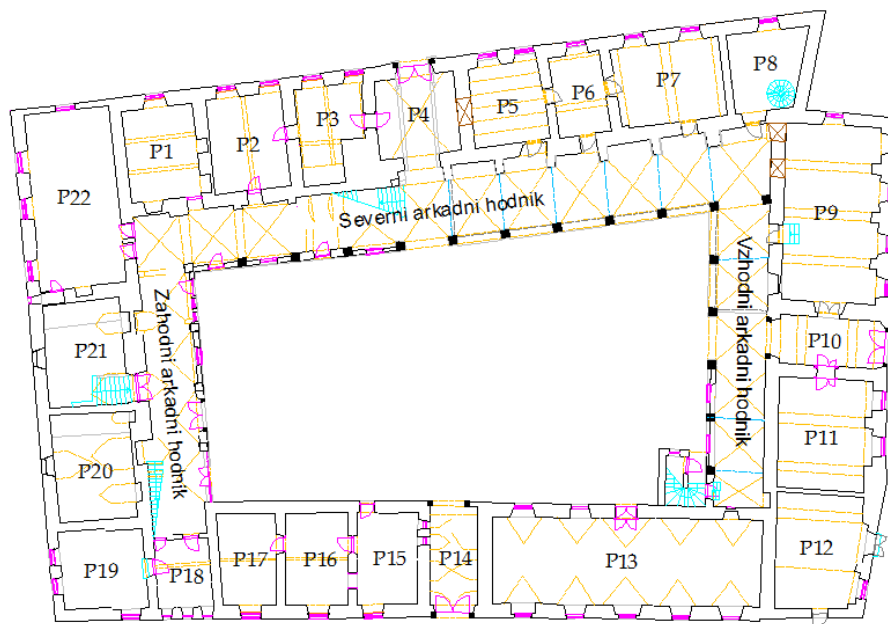
Loki arkadnih hodnikov, ki so bili k obstoječi stenasti konstrukciji prizidani kasneje, slonijo na stebrih kvadratnega prereza 54 x 54 cm. V pritličju severnega in vzhodnega arkadnega hodnika so stebri masivni kamniti, visoki približno 141 cm od tal do vrha kapitela, samo telo stebrov brez baze in kapitela pa je visoko 90 cm. V zahodnem arkadnem hodniku so stebri zgrajeni iz opeke (v pritličju in nadstropju), enako velja tudi v nadstropju severnega arkadnega hodnika. V nadstropju nad vzhodnim arkadnim hodnikom je polna zidana stena z okni, brez arkadnih lokov. Razponi lokov so različnih dimenzij, od 222 cm do 360 cm, višine pa so med 135 cm in 145 cm.

7.3 Horizontalna konstrukcija

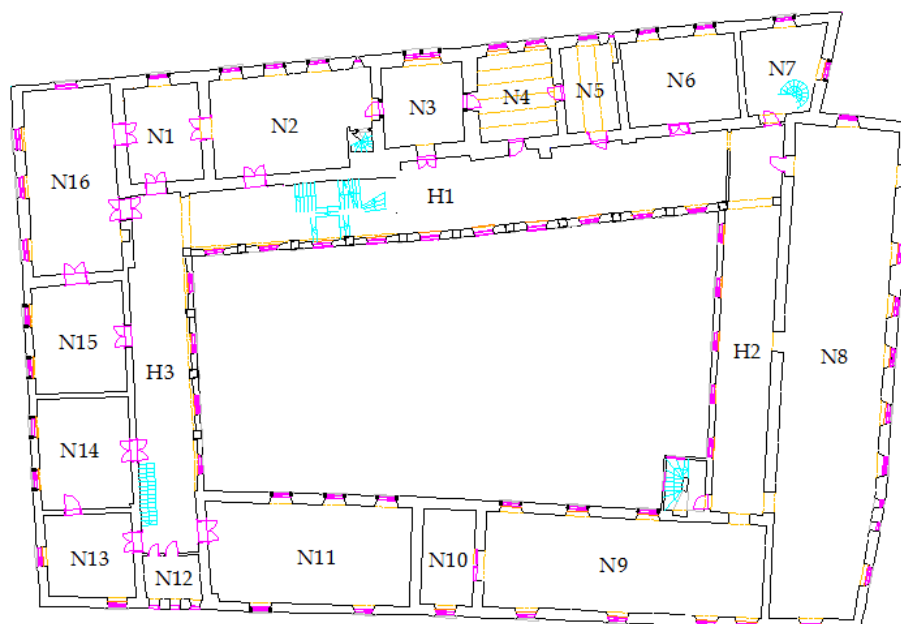
Na slikah v nadaljevanju so prikazani tlorisi kleti, pritličja in prvega nadstropja z označenimi prostori.



Slika 7.1: Načrt kleti gradu (povzeto po ZVKDS, 2013a)



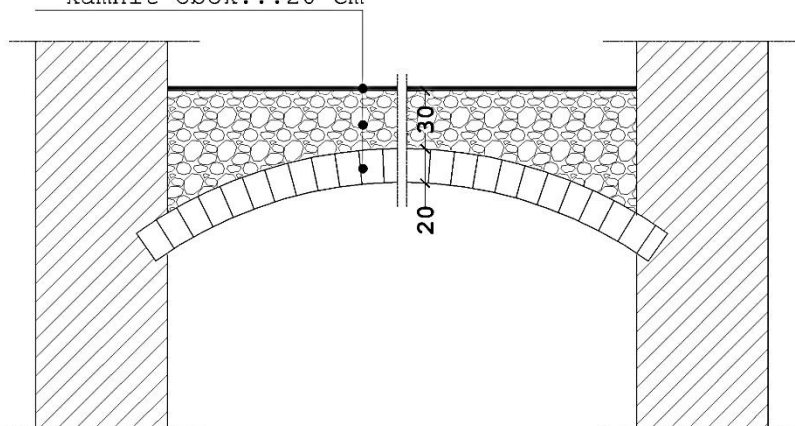
Slika 7.2: Načrt pritličja gradu (povzeto po ZVKDS, 2013a)



Slika 7.3: Načrt nadstropja gradu (povzeto po ZVKDS, 2013a)

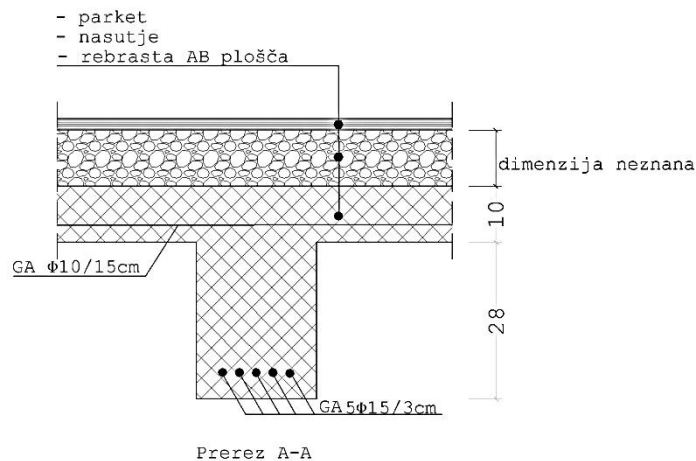
Zahodni trakt gradu je edini, ki je podkleten. Obsega tri prostore. V prostoru K1 je strop banjasti obok. Strop v prostorih K2 in K3 je ravno tako banjasti obok, vendar pa višinsko klet sega skozi dve etaži do stropa nad pritličjem. Prostor K3 se je nekoč raztezal do južne fasade, vendar je bil v bombnem napadu leta 1945 poškodovan. Del prostora so zasuli, ostali del pa zasilno obnovili. Oboki so kamniti. Sestava stropa nad prostoroma K2 in K3 je naslednja:

- parket
- nasutje
- kamnit obok...20 cm



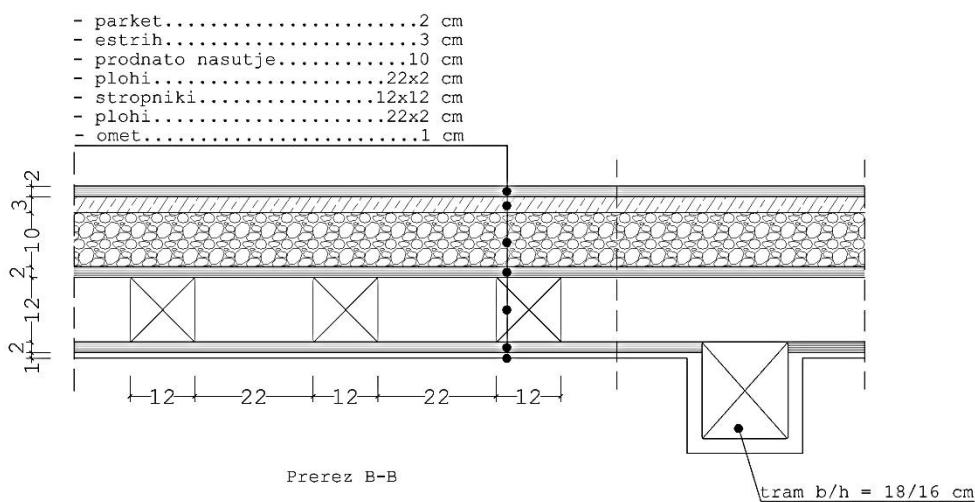
Slika 7.4: Strop sestave 1 (povzeto po IRMA, 2001)

V pritličju so sestave stropov zelo različne, kar priča o gradnji v večih fazah in številnih kasnejših predelavah ter obnovah. V prostoru P1 je novejša armiranobetonska rebrasta plošča (slika 7.4).



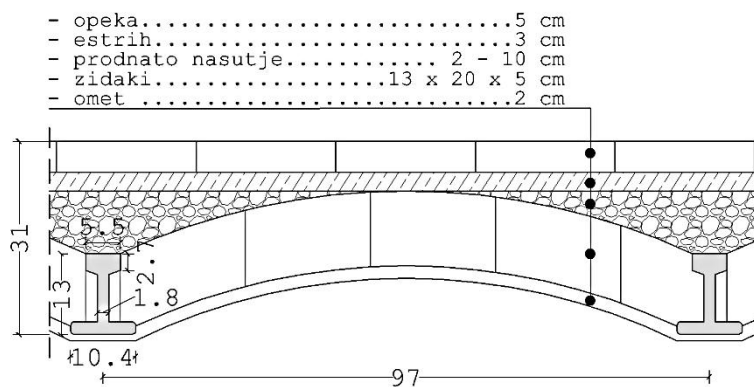
Slika 7.5: Strop sestave 2 (povzeto po IRMA, 2001)

V prostorih P2 in P3 je strop lesen, tramovi so položeni v smeri sever-jug. V prerezu B-B so vidni stropniki manjših prerezov, ki slonijo na večjih tramovih (prerez C-C). Sestava stropa je prikazana na naslednji sliki (slika 7.6).



Slika 7.6: Strop sestave 3 (povzeto po IRMA, 2001)

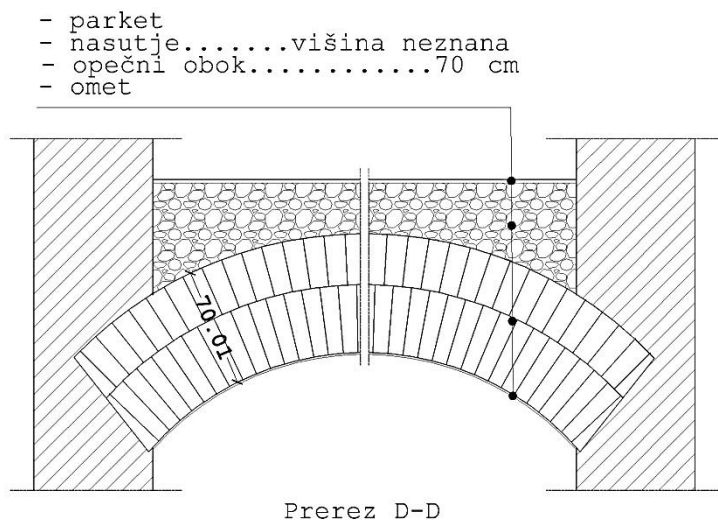
V prostoru P5 poleg vhodne veže je strop novejši, sestavljen iz petih železnih travverz, na katerih slonijo plitvi segmentni oboki. Enak strop je tudi v nadstropju v prostoru N4 (slika 7.7).



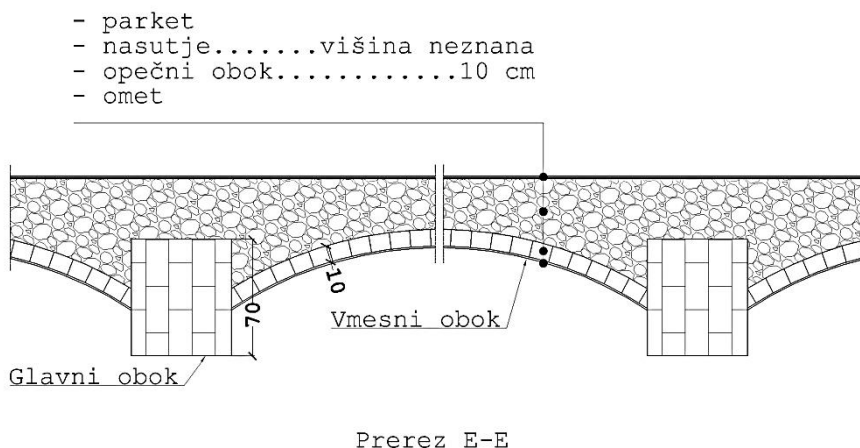
Slika 7.7: Strop sestave 4 (vir: ZVKDS, 2013c)

V prostorih P6, P7, P9 in P11 je strop obokan, sestavljen iz obočnih polj čeških čepic. V prerezu D-D je prikazan eden izmed glavnih obokov (slika 7.8), na katerega se naslanjajo vmesni oboki (prerez E-E, slika 7.9). Strop je sestave tipa 5.

Prostor P9 je bil leta 2002 urejen za potrebe restavratorske delavnice. V smeri glavnih obokov so namestili vezi, stene pa injektirali.

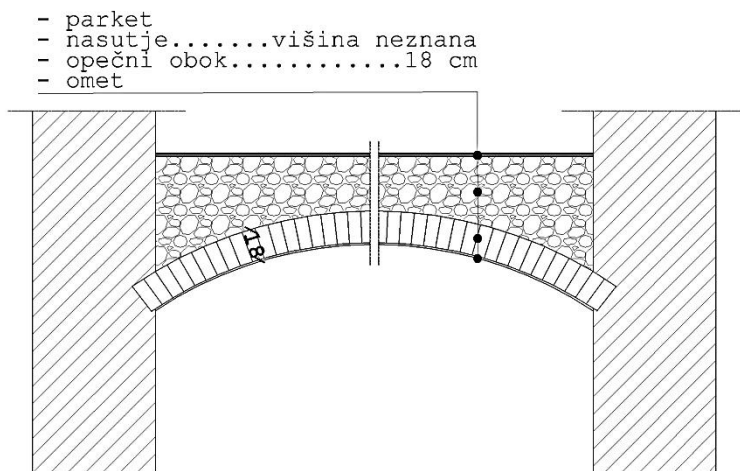


Slika 7.8: Strop sestave 5, prerez vzdolž glavnega oboka (povzeto po IRMA, 2001)



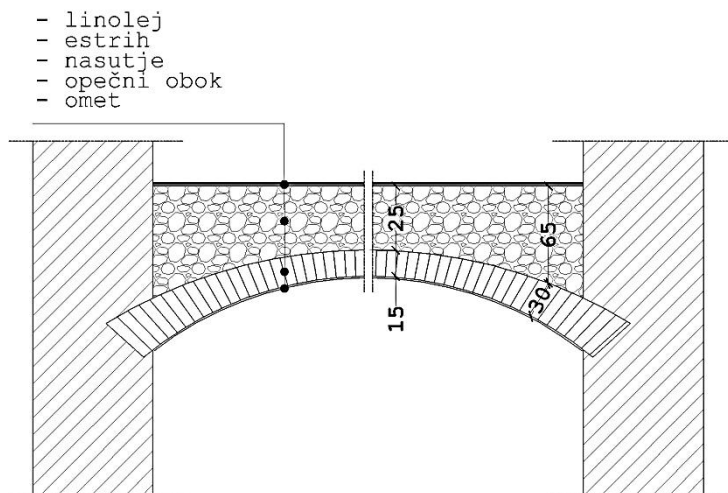
Slika 7.9: Strop sestave 5, prerez čez obočna polja čeških čepic (povzeto po IRMA, 2001)

Del severnega arkadnega hodnika je bil prenovljen za potrebe restavratorske delavnice. V obnovitvenih posegih so bili odprti arkadni loki in nameščene železne vezi za povezavo med dvoriščno steno arkadnega hodnika in osnovnim objektom. V severnem in vzhodnem arkadnem hodniku je strop križni obok. Strop je sestave 6 (Slika 7.10)



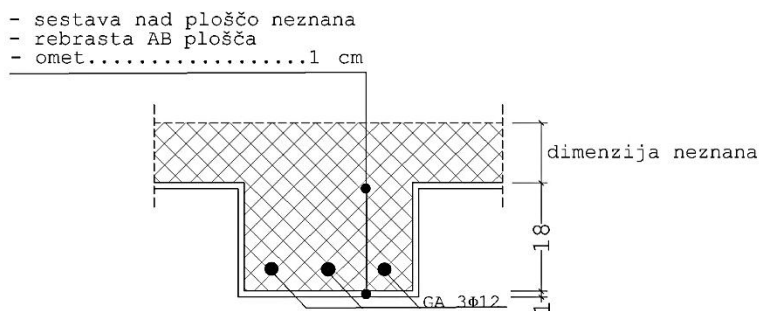
Slika 7.10: Strop sestave 6 (povzeto IRMA, 2001)

V prostoru P13 je ohranjen banjasti obok s sosvodnicami nad okni. Sestava stropa je prikazana na sliki 7.11.



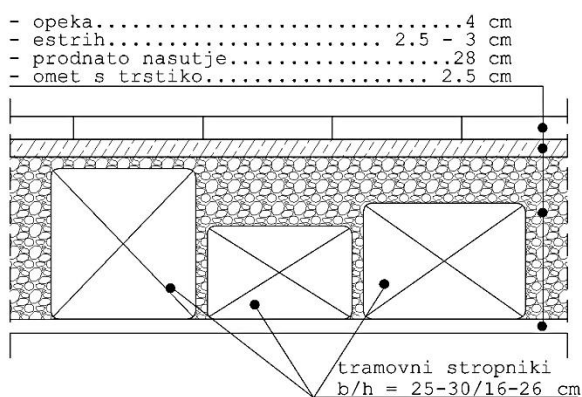
Slika 7.11: Strop sestave 7 (povzeto IRMA, 2001)

V prostoru P18 je današnje stanje rezultat obnovitvenih del po poškodbi v drugi svetovni vojni, ko porušeni obok arkadnega hodnika ni bil rekonstruiran, temveč je bila izvedena armiranobetonska rebrasta plošča (sestava 8).



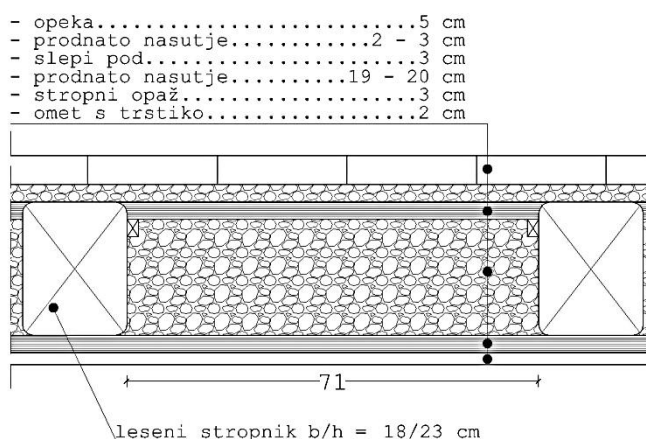
Slika 7.12: Strop sestave 8 (povzeto po IRMA, 2001)

V nadstropju gradu se nahajajo večinoma leseni stropovi. V prostorih N1, N2, N5, N6 ter hodnikih (H1, H2, H3) je zmožničen lesen strop sestave 9.



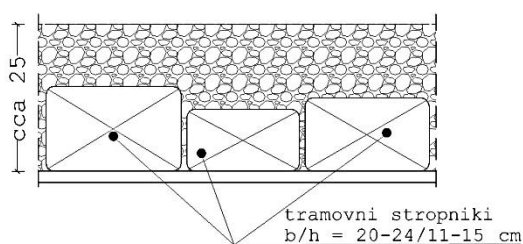
Slika 7.13: Strop sestave 9 (vir: posredovano gradivo od ZVKDS, 2013c)

Severni del prostora N8 je bil urejen istočasno z ureditvijo restavratorskih delavnic v pritličju. Za strop velja sestava 10.



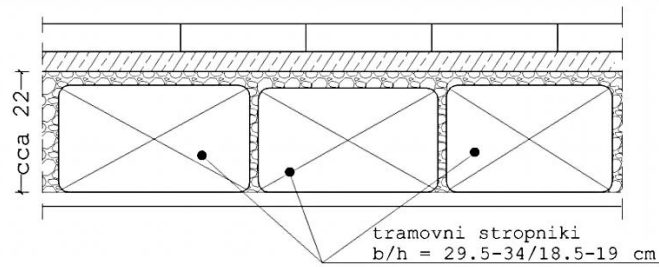
Slika 7.14: Strop sestave 10 (vir: posredovano gradivo od ZVKDS, 2013c)

V prostorih N9, N10 in N11 najdemo zmozničene lesene stropove, sestave 11.



Slika 7.15: Strop sestave 11 (vir: ZVKDS, 2013c)

Prostor N13 je bil med drugo svetovno vojno porušen. Kasneje so del gradu obnovili, zgradili so opečne stene in lesen strop enake sestave kot v sosednjih prostorih. V prostorih N13, N14, N15 in N16 je zmozničen lesen strop sestave 12.



Slika 7.16: Strop sestave 12 (vir: ZVKDS, 2013c)

Za ostale prostore podrobnejši opis sestave stropov ne obstaja. Tako je znano le, da so v vhodnih vežah P4, P10 in P14 oboki opečni, v prostoru P8 je armiranobetonska plošča, v P22 je lesen strop.

V prostorih P15, P16 in P17, ki so bili med vojno porušeni, so naredili lesen strop, neznane sestave, katerega dodatno podpira I profil v smeri vzhod-zahod. Stolpna dvorana N13 ima obokan strop s štukaturami, sestava oboka je neznana. V prostoru N7 so pri obnovitvenih delih nad lesen strop vgradili armiranobetonsko ploščo.

V drugem nadstropju stolpa je dotrajan lesen strop na dveh tramovih v smeri vzhod-zahod. Dimenzije tramov so 25 x 30 cm. Predvidevajo, da so bili takšni stropovi nad celotnim nadstropjem, preden so nadstropje povišali in jih nadomestili z novimi. V tretjem nadstropju stolpa so manjši prečni tramovi dimenzij 15 x 25 cm.

8 MODEL GRADU V PROGRAMU 3MURI

8.1 Modeliranje vertikalnih nosilnih elementov

Pri modeliranju konstrukcije je bilo potrebno, zaradi omejitev programa, določene stvari poenostaviti oziroma privzeti najbolj smiselne vrednosti. Grad je bil zgrajen v več fazah in doživel nekaj predelav, kar je verjetno razlog, da se v isti etaži razlikujejo višine, na katerih se nahajajo stropovi. V program je možno podati le eno višino za celotno etažo, zato sem definirala povprečne etažne višine, podane v preglednici 8.1. Zgornji dve nadstropji stolpa sem obravnavala posebej, tj. v samostojnem modelu.

Preglednica 8.1: Višine etaž v modelu gradu Grm

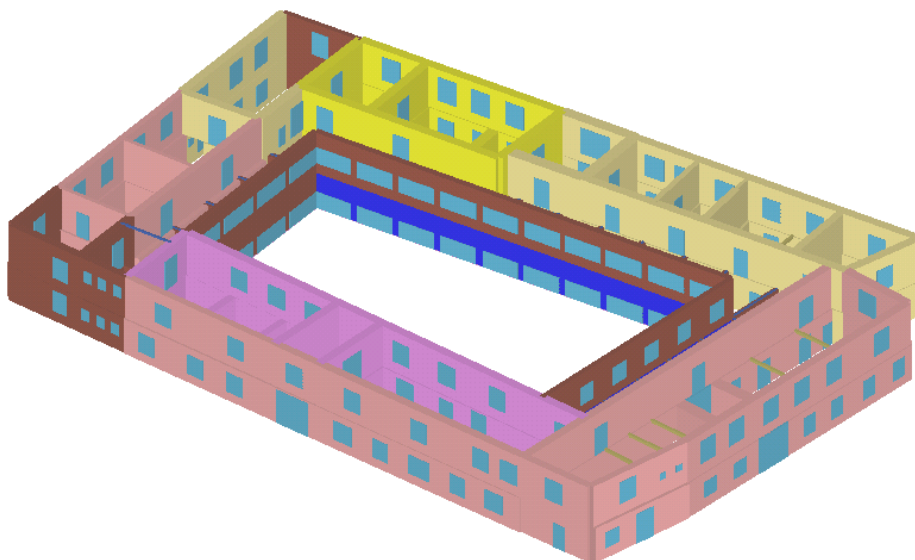
Višina [cm]	Grad	Stolp
Pritličje	300	/
1. nadstropje	350	/
2. nadstropje	/	490
3. nadstropje	/	330

Program ne omogoča, da bi bil podkleten le del objekta, zato kleti v modelu nisem upoštevala. Večji del kleti je pod nivojem tal, zato pri potresu ni kritičen.

V model sem vnesla izmerjene dimenzije sten, upoštevala sem različne debeline sten pod in nad okni ter kot odprtine v modelu definirala vse zazidane odprtine in niše

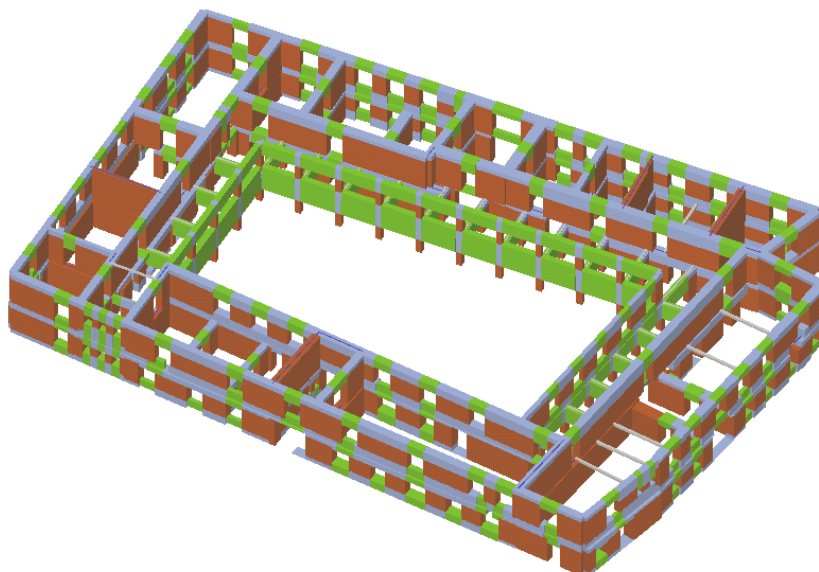
Pri modeliranju arkadnih hodnikov je bilo potrebnih kar nekaj prilagoditev, saj program ne omogoča podajanja kratkih stebrov. Naredila sem več enostavnih modelov, ker sem: a) upoštevala samo stebre različnih višin, b) modelirala stene z velikimi odprtinami, c) kombinirala stebre in stene. Stene z velikimi odprtinami so se izkazale kot najbolj neugodna varianta (glede največje sile in tudi najmanjšega pospeška, ki so ju sposobne prenesti). Tako sem arkadne hodnike modelirala kot stene z odprtinami, ki predstavljajo stebre. Ker program ni deloval s tako velikimi odprtinami, sem dodala še nosilce nad opečno steno. Kjer so stebri kamniti, lokovi pa opečni, sem za material stene podala karakteristike masivnega kamna, nad odprtino pa karakteristike opečnih zidov.

Na sliki 8.1 je prikazan model vertikalne konstrukcije gradu. Opečne stene so obarvane z rjavo barvo, deli iz masivnega kamna pa z modro (program prikaže celotno steno modre barve, čeprav je del nad odprtino definiran kot opečni). Za ostale barve, ki predstavljajo različne faze gradnje, je definiran isti material, tj. mešan zid iz kamna in opeke. Arkadni hodniki so modelirani kot stene z odprtinami.

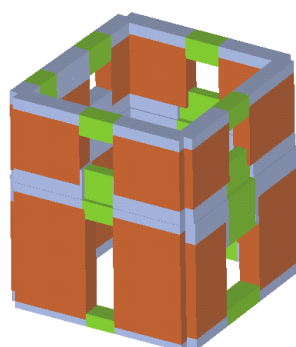


Slika 8.1: Model gradu v programu (vertikalna konstrukcija)

Program definira mrežo makroelementov: stropovi so rjave barve, prekladni deli zelene in toga vozlišča modre barve.



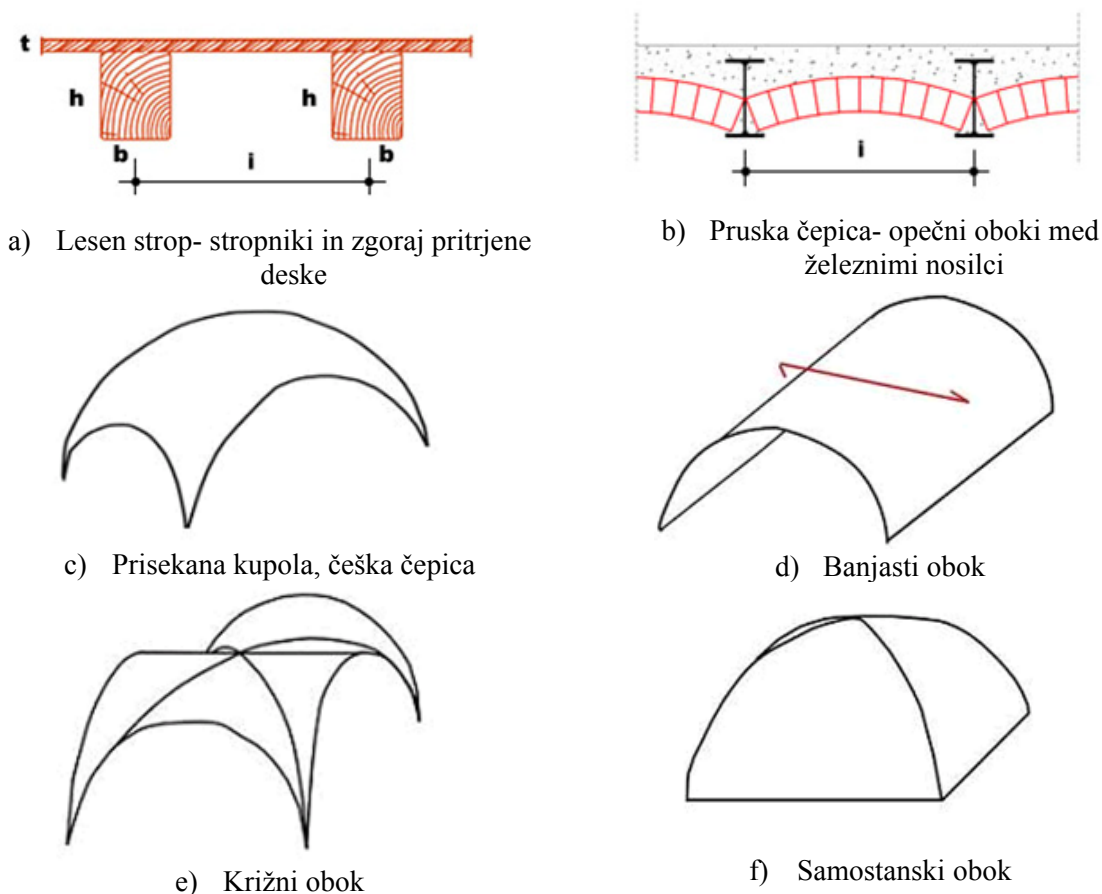
Slika 8.2 Mreža makroelementov gradu



Slika 8.3: Mreža makroelementov za vrhnji dve nadstropji stolpa

8.2 Modeliranje horizontalnih nosilnih elementov

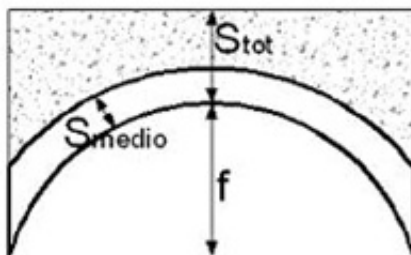
Armiranobetonske plošče sem v modelu upoštevala kot toge diafragme. V knjižnici podajnih stropov 3Muri ponuja na izbiro različne vrste ravnih in obokanih stropov. Na sliki 8.4 so prikazani modeli, ki sem jih uporabila pri definiranju horizontalne nosilne konstrukcije. Kot je že omenjeno pri opisu programa je namen teh stropov prenos obtežbe na vertikalne elemente.



Slika 8.4: Prikaz podajnih stropov iz knjižnice programa

Karakteristike, s katerimi 3Muri opiše obok:

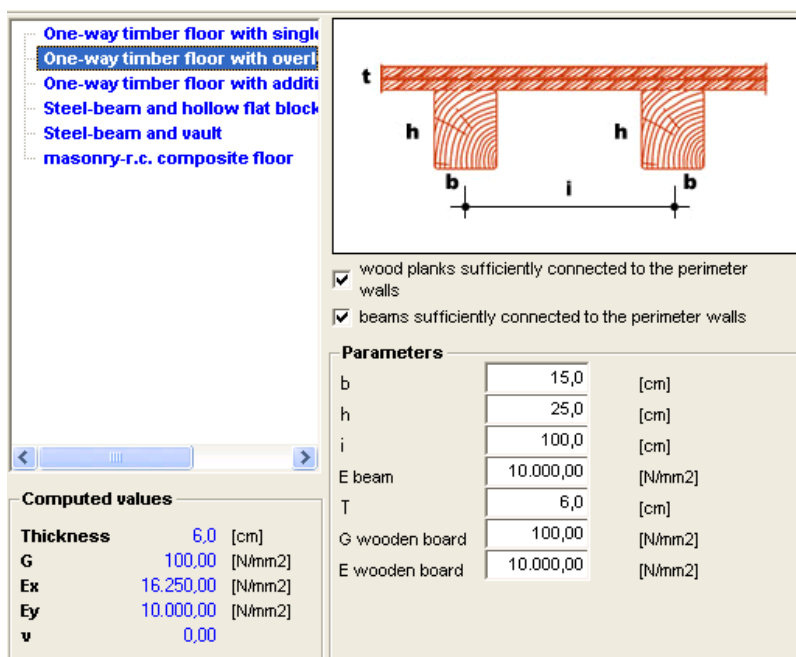
- višina oboka f ,
- konstrukcijska višina nosilnega sloja S_{med} ,
- vsota višine nosilnega sloja in višine nasutja S_{tot} .



Slika 8.5: Prikaz podajanja lastnosti obokanega stropa v program

Lesene stropove, prusko čepico, križne in banjaste oboke sem brez težav modelirala. Za obok v stolpni dvorani ni navedeno, katere vrste je, po pregledu na objektu sem se odločila za samostanski obok. Nekaj več težav sem imela pri modeliranju stropov z češkimi čepicami. Kot je vidno iz prerezov v prejšnjem poglavju, se češke čepice naslanjajo na vmesne opečne loke. Loke sem modelirala kot nosilce, na katere sem potem naslonila češke čepice.

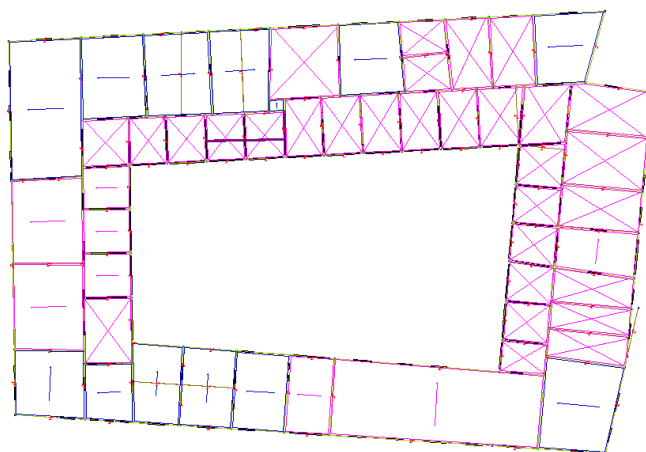
Program za vse podajne stropove izvednoti nadomestno debelino, togost v x in y smeri, strižni modul ter Poissonov količnik.



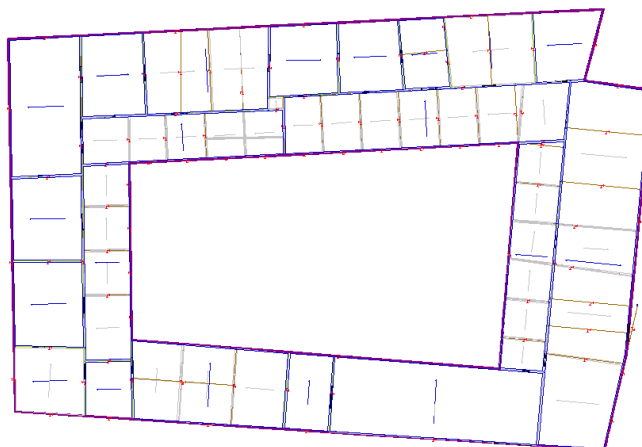
Slika 8.6: Primer podajanja lesenega stropa v program

Za vse lesene stropove sem upoštevala (manjšo) togost tudi v smeri, ki ni nosilna.

Nekatere lesene stropne konstrukcije so sestavljene iz tramov različnih dimenzij (sestava 9, sestava 11 in sestava 12). Če bi upoštevala večjo dimenzijo, bi to pomenilo, večjo togost stropa in manjšo težo (manjša višina nasutja). V primeru, da bi upoštevala manjšo izmed vrednosti, bi to pomenilo manjšo togost in večjo obtežbo na stene. Ker se togosti v primeru minimalne oz. maksimalne vrednosti razlikujejo za približno 30%, sem upoštevala povprečne vrednosti višine tramov.



Slika 8.7: Orientiranost stropov v pritličju



Slika 8.8: Orientiranost stropov v nadstropju

8.3 Obtežba

8.3.1 Lastna teža stropov

Program izračuna težo obokanih stropov, za ostale tipe stropov sem lastno težo vnesla ročno. Pri izračunu prispevka teže linijskih elementov sem njihovo dimenzijo preračunala na celoten tloris prostora. V preglednicah v nadaljevanju (8.2-8.10) so debeline slojev, upoštevanih pri izračunu lastne teže, označene z d , njihova karakteristična površinska lastna teža pa z g_k .

Preglednica 8.2. Lastna teža stropa sestave 2 na enoto površine

Sestava 2	d [cm]	g_k [kN/m ²]
parket	2,0	0,14
nasutje	10,0	1,80
rebrasta AB plošča	12,0	3,00
skupaj		~ 5,00

Preglednica 8.3. Lastna teža stropa sestave 3 na enoto površine

Sestava 3	d [cm]	g_k [kN/m ²]
parket	2,0	0,14
estrih	3,0	0,60
nasutje	10,0	1,80
plohi	2,0	0,14
stropniki 12 cm x 12 cm	4,0	0,28
plohi	2,0	0,14
tramovi 18 cm x 16 cm	0,6	0,04
skupaj		~3,15

Preglednica 8.4. Lastna teža stropa sestave 4 na enoto površine

Sestava 4	d [cm]	g_k [kN/m ²]
opeka	5,0	0,80
estrih	3,0	0,60
nasutje	6,0	1,08
zidaki	13,0	2,08
I profil A=52 cm ²	0,5	0,40
skupaj		~5,00

Preglednica 8.5. Lastna teža stropa sestave 8 na enoto površine

Sestava 8	d [cm]	g_k [kN/m ²]
parket	2,0	0,14
estrih	3,0	0,60
rebrasta AB plošča	11,0	2,75
skupaj		~3,50

Preglednica 8.6: Lastna teža stropa sestave 9 na enoto površine

Sestava 9	d [cm]	g_k [kN/m ²]
opeka	4,0	0,64
estrih	3,0	0,60
nasutje	7,0	1,26
stropniki 28 cm x 21 cm	21,0	1,47
skupaj		~ 4,00

Preglednica 8.7: Lastna teža stropa sestave 10 na enoto površine

Sestava 10	d [cm]	g_k [kN/m ²]
opeka	5,0	0,80
nasutje	3,0	0,54
deske	3,0	0,21
nasutje	20,0	3,60
deske	3,0	0,21
stropniki 18 cm x 23 cm	6,0	0,42
skupaj		~ 5,80

Preglednica 8.8: Lastna teža stropa sestave 11 na enoto površine

Sestava 11	d [cm]	g_k [kN/m ²]
opeka	5,0	0,80
nasutje	12,0	2,16
deske	4,0	0,28
stropniki 22 cm x 13 cm	13,0	0,91
skupaj		~4,15

Preglednica 8.9. Lastna teža stropa sestave 12 na enoto površine

Sestava 12	d [cm]	g_k [kN/m ²]
opeka	5,0	0,80
estrih	3,5	0,70
nasutje	3,0	0,54
stropniki 32 cm x 19 cm	19,0	1,33
skupaj		~3,40

Preglednica 8.10. Obtežba strešne konstrukcije na enoto površine

Strešna konstrukcija	g_k [kN/m ²]	
kritina	0,75	
špirovci, lege	0,50	
skupaj		~1,25

8.3.2 Koristna obtežba

Glede na namembnost prostorov se vrednost koristne obtežbe spreminja. V Programski nalogi za celovito prenovo gradu Grm (ZVKDS et. al., 2010) so opisane nove namembnosti prostorov. Stolpna dvorana N3 (strop s štukaturami) in prostor vzhodno N4 sta glede na novo namembnost predvidena za protokolarne dogodke in poroke. Zato sem za ta dva prostora in del arkadnega hodnika H1, potrebna za dostop, upoštevala vrednosti za kategorijo uporabnosti C. Prostori za arhiv so predvideni v prvem nadstropju južnega trakta, za njih velja kategorija uporabnosti E. Ostali prostori so pisarne, vključno s prostori na podstrešju, ki trenutno niso uporabni. Za pisarne velja kategorija uporabnosti B. Vrednosti koristnih obtežb za različne namembnosti prostorov in pripadajoči kombinacijski faktorji, upoštevani pri analizi gradu, so zbrani v preglednici (8.11)

Preglednica 8.11: Koristne obtežbe prostorov gradu Grm in pripadajoči kombinacijski faktorji

	Pisarne	Prostori za protokol	Arhiv
Koristna obtežba [kN/m ²]	3,0	5,0	7,5
Kombinacijski faktor ψ_2	0,3	0,6	0,8

Obtežbo predelnih sten sem upoštevala linijsko in znaša 11,2 kN/m.

8.3.3 Potresna obtežba

V program je potrebno podati refrenčni pospešek tal za dano lokacijo. Za področje Novega mesta velja $a_{gR} = 0,175$ $g = 1,72$ m/s². To velja za mejno stanje nosilnosti. Potrebno je podati tudi pospešek za

mejno stanje uporabnosti, katerega povratna doba je 95 let. V Evrokodu je podan približen izračun s sledečo enačbo:

$$H(a_{gR}) \sim k_0 \cdot a_{gR}^{-k} \quad (8.1)$$

kjer sta:

$H(a_{gR})$ letna pogostnost prekoračitve referenčne vrednosti največjega pospeška tal

k eksponent, odvisen od seizmičnosti, vendar ima na splošno vrednost okrog 3.

V mojem primeru pospešek za povratno dobo 95 let znaša $a_g(95 \text{ let}) = 0,102 \text{ g} = 1,00 \text{ m/s}^2$.

Iz poročila Inštituta za raziskavo materialov in aplikacije (IRMA, 2001) je razvidno, da je kvaliteta tal tipa A. S tem so določeni koeficienti za spekter pospeškov.

Ker bo del gradu odprt tudi za javnost (protokolarni dogodki, poroke, prireditve na dvorišču), spada stavba v kategorijo pomembnosti III in faktor pomembnosti znaša 1,2. Ta faktor ustreza povratni potresni dobi 780 let.

The image shows a software window titled 'EC8' with several input fields. Under the 'Zone' section, there are two columns: 'ULS' and 'DLS'. The 'ULS' column has a value of '1,72' with units '[m/s2]'. The 'DLS' column has a value of '1,00' with units '[m/s2]'. Under the 'Soil type' section, there is a dropdown menu set to 'A'. To its right, there are four input fields: 'S' with value '1', 'T_b' with value '0,1', 'T_C' with value '0,4', and 'T_D' with value '2'. At the bottom, there is an 'Importance Factor' field with the value '1,2'.

Slika 8.9: Podajanje potresne obtežbe v program

8.4 Materialne karakteristike zidovine

Ker na objektu ni bilo izvedenih preiskav, s katerimi bi ugotovili trdnostne in deformacijske lastnosti zidov, Evrokod 8-3 pa ne vsebuje priporočil za materialne karakteristike, sem poiskala vrednosti iz drugih virov. V kolikor je možno smiselno upravičiti virov, Evrokod 8-3 to dopušča. Predpostavila sem dve različni varianti. Prva varianta so vrednosti iz italijanskih standardov (NTC, 2008). Standard podaja za določene tipe zidov zgornjo in spodnjo mejo trdnostnih ter deformacijskih karakteristik. Za posamezne nivoje poznavanja konstrukcije (KL1, KL2 in KL3) predpisuje, katere vrednosti karakteristik je potrebno izbrati; zgornjo, spodnjo ali vmesno vrednost.

Preglednica 8.12: Vrednosti materialnih karakteristik za različne nivoje poznavanja konstrukcije (povzeto po NTC 08)

	Mešan zid			Opečni zid		
	<i>KL1</i>	<i>KL2</i>	<i>KL3</i>	<i>KL1</i>	<i>KL2</i>	<i>KL3</i>
E [N/mm ²]	690	870	870	1200	1600	1600
G [N/mm ²]	115	145	145	200	250	250
w [kN/m ³]	20	20	20	16	16	16
f_c [N/cm ²]	74	117	180	178	267	400
τ [N/cm ²]	1,48	2,17	3,20	4,44	6,33	9,2

Druga varianta so karakteristike, ki so bile ugotovljene na gradu Pišece (Bosiljkov et al., 2004). Ugotovljene vrednosti sem upoštevala za raven poznavanja KL3 (velja redukcijski faktor $CF_{KL3} = 1,0$), za nižje ravni poznavanja konstrukcije pa sem trdnostne karakteristike ustrezno zmanjšala (glej poglavje 4.3: Evrokod 8-3).

Preglednica 8.13: Materialne karakteristike, ugotovljene na gradu Pišece, z upoštevanjem različnih nivojev poznavanja konstrukcije

	Mešan zid			Opečni zid		
	<i>KL1</i>	<i>KL2</i>	<i>KL3</i>	<i>KL1</i>	<i>KL2</i>	<i>KL3</i>
E [N/mm ²]	1500	1500	1500	649	649	649
G [N/mm ²]	355	355	355	210	210	210
w [kN/m ³]	20	20	20	16	16	16
f_c [N/cm ²]	74	83	100	96	108	130
τ [N/cm ²]	6,90	7,75	9,30	3,50	3,90	4,70

Za kamnite stebre arkadnih hodnikov smo predpostavili vrednosti, prikazane v preglednici 8.14. Vrednosti tlačnih trdnosti so bile ugotovljene pri tlačnih preiskavah kamnitih vzorcev v laboratoriju KPMK, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo (Kržan, 2012), ostale karakteristike (natezno trdnost in deformacijske lastnosti) pa smo predpostavili glede na splošna priporočila za razmerja med mehanskimi karakteristikami, ugotovljena v številnih eksperimentalnih preiskavah.

Preglednica 8.14: Materialne karakteristike za masivne kamnite stebre glede na različne nivoje poznavanja konstrukcije

	Kamniti stebri		
	<i>KL1</i>	<i>KL2</i>	<i>KL3</i>
<i>E</i> [N/mm ²]	171500	171500	171500
<i>G</i> [N/mm ²]	68600	68600	68600
<i>w</i> [kN/m ³]	26	26	26
<i>f_c</i> [N/cm ²]	12704	14291	17150
<i>τ</i> [N/cm ²]	334	381	457

9 REZULTATI POTRESNE ODPORNOSTI GRADU GRM

Nelinearna statična analiza modela se izvrši v dveh med seboj pravokotnih smereh, pri čemer se upošteva različne ekscentričnosti in dve porazdelitvi horizontalne obtežbe po višini konstrukcije, skladno s standardi Evrokod 8-1.

Pri preverjanju potresne odpornosti lahko primerjamo več parametrov. Primerjamo lahko: a) dosežene in zahtevane pomike (enako kot izpis v 3Muriju), b) mejne pospeške, ki jih konstrukcija prenese in zahtevane projektne pospeške c) razmerje med celotno prečno silo, ki deluje na konstrukcijo, ter težo ekvivalentnega sistema in zahtevano potresno silo, normirano na težo. Slednja kontrola se v praksi pri kontroli potresne odpornosti še vedno, kljub njenim pomankljivostim, največ uporablja in je razložena v nadaljevanju.

Tomažević (Tomažević, 2009) podaja kot kontrolo primerjavo koeficienta potresne odpornosti stavbe (SRC_u) s koeficientom zahtevane celotne prečne sile v pritličju (BSC_u). Da bi bila konstrukcija sposobna prenesti predviden potres, mora veljati:

$$SRC_u \geq BSC_u \quad (9.1)$$

kjer sta:

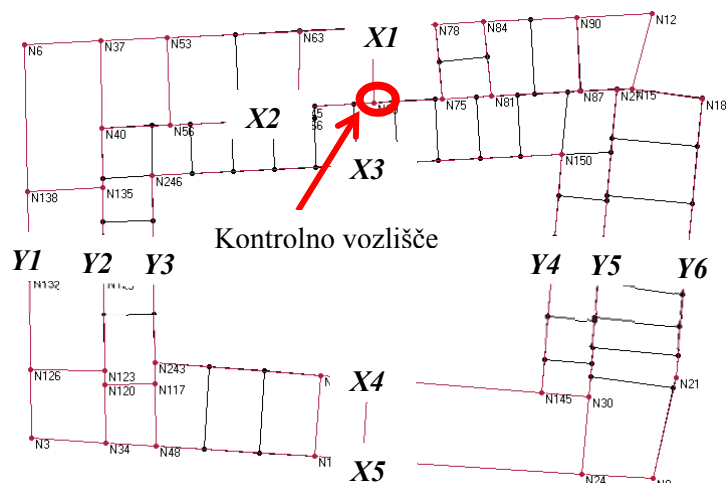
SRC_u razmerje med idealizirano maksimalno silo, ki jo je konstrukcija sposobna prenesti, in težo ekvivalentnega sistema

BSC_u razmerje med zahtevano potresno obtežbo in težo konstrukcije, ki v našem primeru znaša 0,292:

$$BSC_u = \frac{a_g \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_0}{q} = \frac{0,175 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2,5}{1,5} = 0,292 \quad (9.2)$$

V našem primeru podajamo potresno odpornost gradu na dva načina: a) s primerjavo koeficientov SRC_u in BSC_u in b) s primerjavo največjega pospeška, ki ga je konstrukcija sposobna prenesti (ang. Ultimate limit state peak ground acceleration ali $ULSPG$), z zahtevo iz standarda $a_{gR} = 0,175g$.

Rezultati vseh analiz, predstavljenih v diplomski, veljajo za kontrolno vozlišče 69, ki se nahaja na vrhu prvega nadstropja severnega trakta (označeno na sliki 9.1). Kontrolnega vozlišča ni bilo mogoče izbrati v središču mas zaradi notranjega dvorišča, najboljši približek je bil zato na simetrijski osi gradu na steni bližje notranjemu dvorišču. Na sliki so označene tudi glavne stene v modelu (v vodoravni smeri $X1$ do $X5$, v navpični smeri $Y1$ do $Y6$), katerih porušitev je prikazana v nadaljevanju.



Slika 9.1: Floris mreže elementov modela z oznakami glavnih sten

V preglednici 9.1 so podane vrednosti merodajnega pospeška $ULSPG$ in koeficient potresne odpornosti stavbe SRC_u za posamezne smeri potresne analize. Materialne karakteristike v analizah so povzete po italijanskih standardih NTC08 glede na različne nivoje poznavanja konstrukcije (KL1, KL2 in KL3). Primerjala sem rezultate modela stavbe s podajnimi stropovi in modela s togimi stropovi. Poudarjene vrednosti v preglednici ne izpolnjujejo zahtev standarda.

Preglednica 9.1: Pospešek $ULSPG$ in koeficient potresne odpornosti SRC_u za model z materialnimi karakteristikami, povzetimi po italijanskih standardih

	$ULSPG$		SRC_u	
	X smer [g]	Y smer [g]	X smer	Y smer
PODAJNI				
<i>ITL_KL1</i>	0,083	0,105	0,201	0,202
<i>ITL_KL2</i>	0,091	0,122	0,230	0,232
<i>ITL_KL3</i>	0,121	0,144	0,300	0,274
TOGI				
<i>ITL_KL1</i>	0,164	0,158	0,264	0,283
<i>ITL_KL2</i>	0,188	0,177	0,262	0,335
<i>ITL_KL3</i>	0,202	0,186	0,375	0,394

Vidimo, da se z višanjem nivoja poznavanja konstrukcije (boljše materialne karakteristike zaradi manjše redukcije), potresna odpornost konstrukcije izboljšuje. Zakonitosti glede obnašanja konstrukcije v X ali Y smeri, ne moremo najti. Če spremljamo $ULSPG$ se konstrukcija s podajnimi stropovi bolje obnaša v Y smeri, medtem ko konstrukcija s togimi ploščami v X smeri. Če spremljamo SRC_u , dobimo v Y smeri boljše rezultate tako pri podajnih kot tudi pri togih ploščah. Z gotovostjo pa lahko trdimo, da ima konstrukcija s togimi ploščami višjo potresno odpornost tako v smislu mejnih pospeškov kot tudi maksimalnih sil. Hkrati opazimo, da spremljanje različnih parametrov, ne poda enoznačnih odgovorov glede odpornosti na potres. Če konstrukcija prenese predviden pospešek, to ne pomeni nujno, da izpolni zahtevo tudi glede koeficienta BSC_u in obratno.

V naslednji preglednici so predstavljeni rezultati, ki sem jih dobila z upoštevanjem materialnih karakteristik zidov na podobnem objektu (grad Pišece).

Preglednica 9.2 Pospešek $ULSPG$ in koeficient potresne odpornosti stavbe SRC_u za model z materialnimi karakteristikami, ugotovljenimi na gradu Pišece

	$ULSPG$		SRC_u	
	X smer [g]	Y smer [g]	X smer	Y smer
PODAJNI				
OPT_KL1	0,290	0,231	0,340	0,301
OPT_KL2	0,308	0,293	0,338	0,329
OPT_KL3	0,313	0,273	0,259	0,430
TOGI				
OPT_KL1	0,275	0,342	0,304	0,379
OPT_KL2	0,283	0,340	0,312	0,375
OPT_KL3	0,295	0,350	0,327	0,407

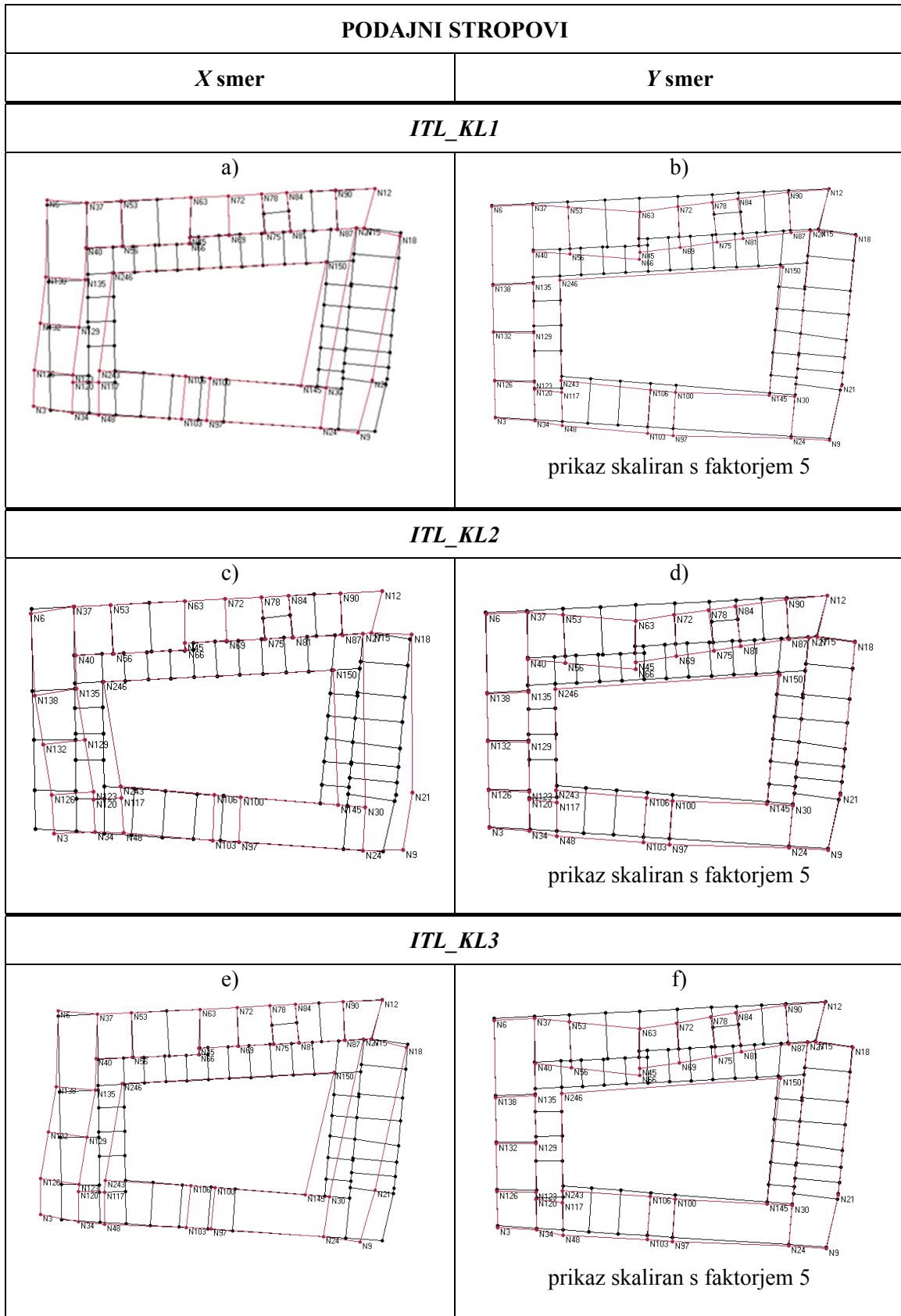
Pri vseh analizah ima objekt zadostno potresno odpornost. Tokrat lahko opazimo, da se vrednosti $ULSPG$ ali SRC_u ne zvišujejo tako konsistentno z višanjem nivoja poznavanja konstrukcije kot pri materialnih karakteristikah, povzetih po italijanskih standardih. Prav tako konstrukcija s togimi ploščami ne daje nujno boljših rezultatov od tiste s podajnimi.

9.1 Primerjava deformacijskih oblik

V preglednicah 9.3 do 9.6. so za vse obravnavane analize zbrane deformacijske oblike v X in Y smeri obremenjevanja.

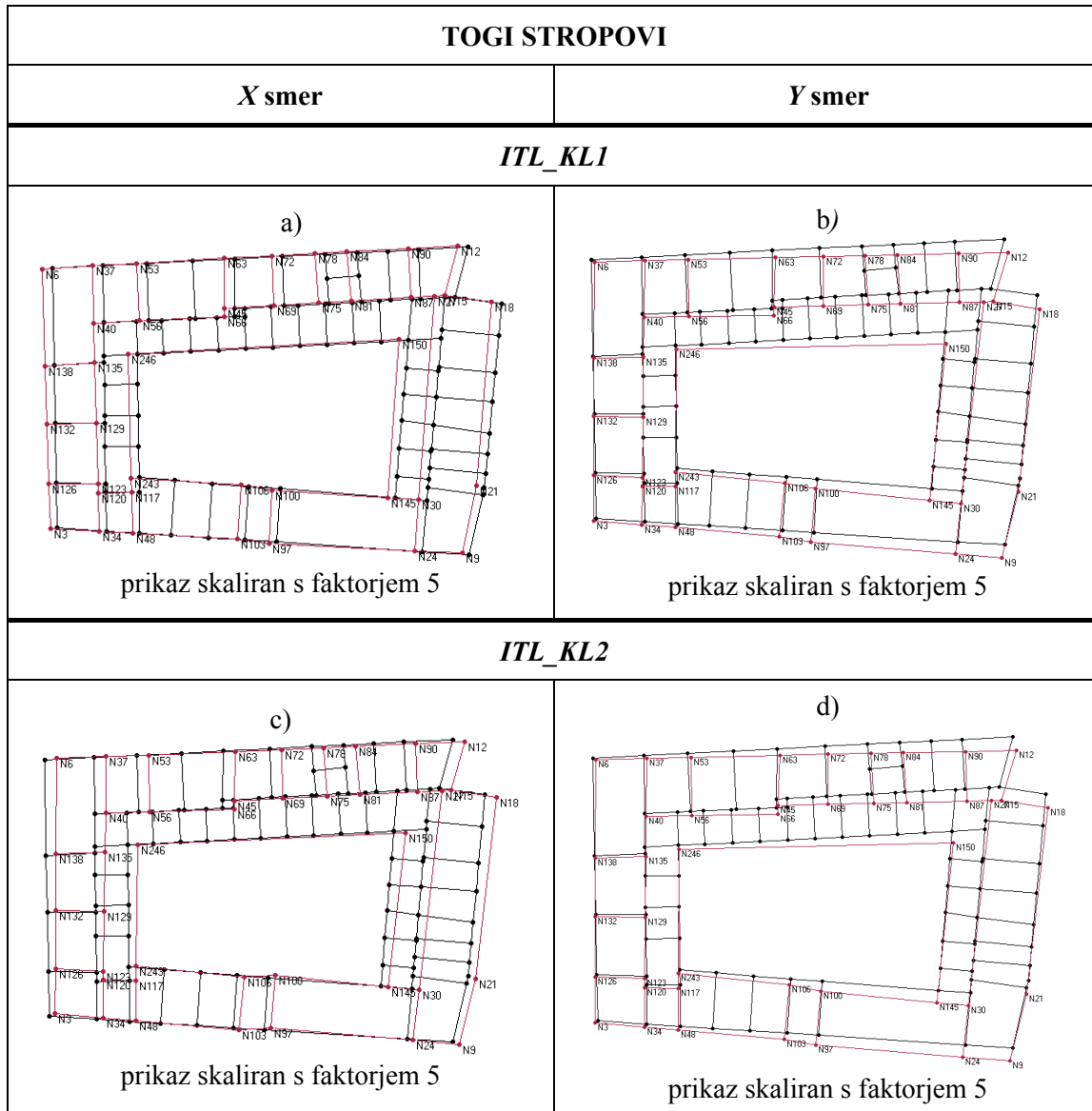
V naslednji preglednici so prikazane deformacijske oblike za model s podajnimi stropovi in materialnimi karakteristikami, povzetimi po italijanskih standardih. Opazimo, da so deformacijske oblike za X smer obremenjevanja nekoliko nenavadne, kar se potrди tudi pri pregledu porušitev sten (slika 9.3). Severni trakt ostane na mestu, medtem ko se južni nekoliko pretirano deformira (primeri a), c) in e)). V Y smeri pride do deformacij bolj lokalno, na mestu kontrolnega vozlišča (primeri b), d) in f)).

Preglednica 9.3: Deformacijske oblike za model s podajnimi stropovi in s karakteristikami, povzetimi po italijanskih standardih



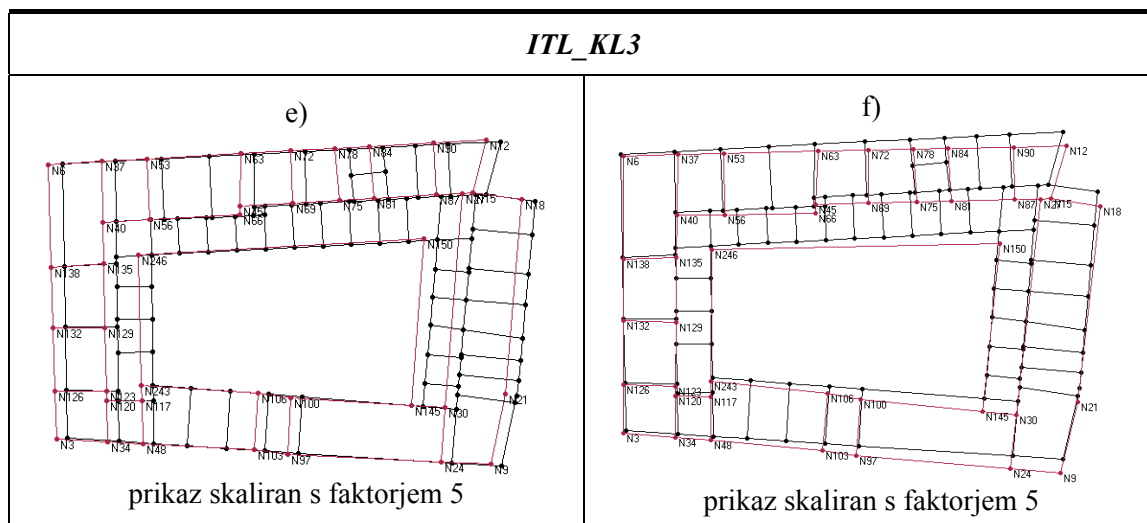
Pri modelu s togimi ploščami pride do translatorskih pomikov v X smeri (primeri a), c) in e)) in manjših zasukov v Y smeri (primeri b), d) in f)).

Preglednica 9.4: Deformacijske oblike za model s togimi stropovi in s karakteristikami, povzetimi po italijanskih standardih



se nadaljuje...

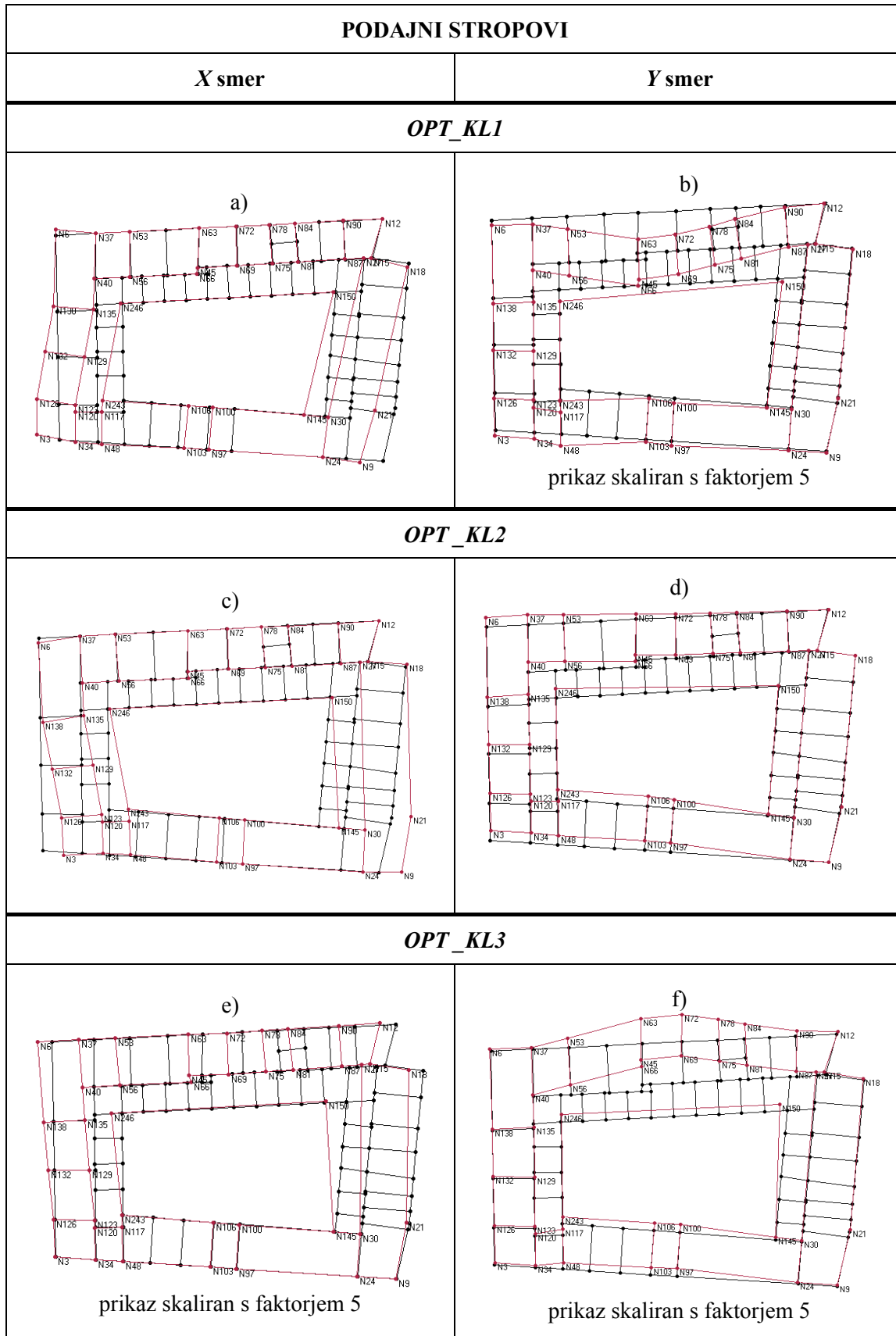
... nadaljevanje preglednice 9.4



Modeli s podajnimi stropovi, ne glede na tip materialnih karakteristik, se v X smeri deformirajo na podoben način. Izjema je le primer *OPT_KL3* (preglednica 9.5, primer e)), kjer deformacije niso pretirane. Razlog za to lahko iščemo v merodajni analizi, saj je pri analizah *ITL* (*KL1*, *KL2* in *KL3*) in *OPT* (*KL1* in *KL2*) merodajna analiza, kjer so sile enakomerno porazdeljene po višini (t.i. masna porazdelitev), v primeru *OPT_KL3* pa je merodajna analiza, kjer so sile porazdeljene po višini v sorazmerju s prvo nihajno obliko (preglednici 9.7 in 9.8).

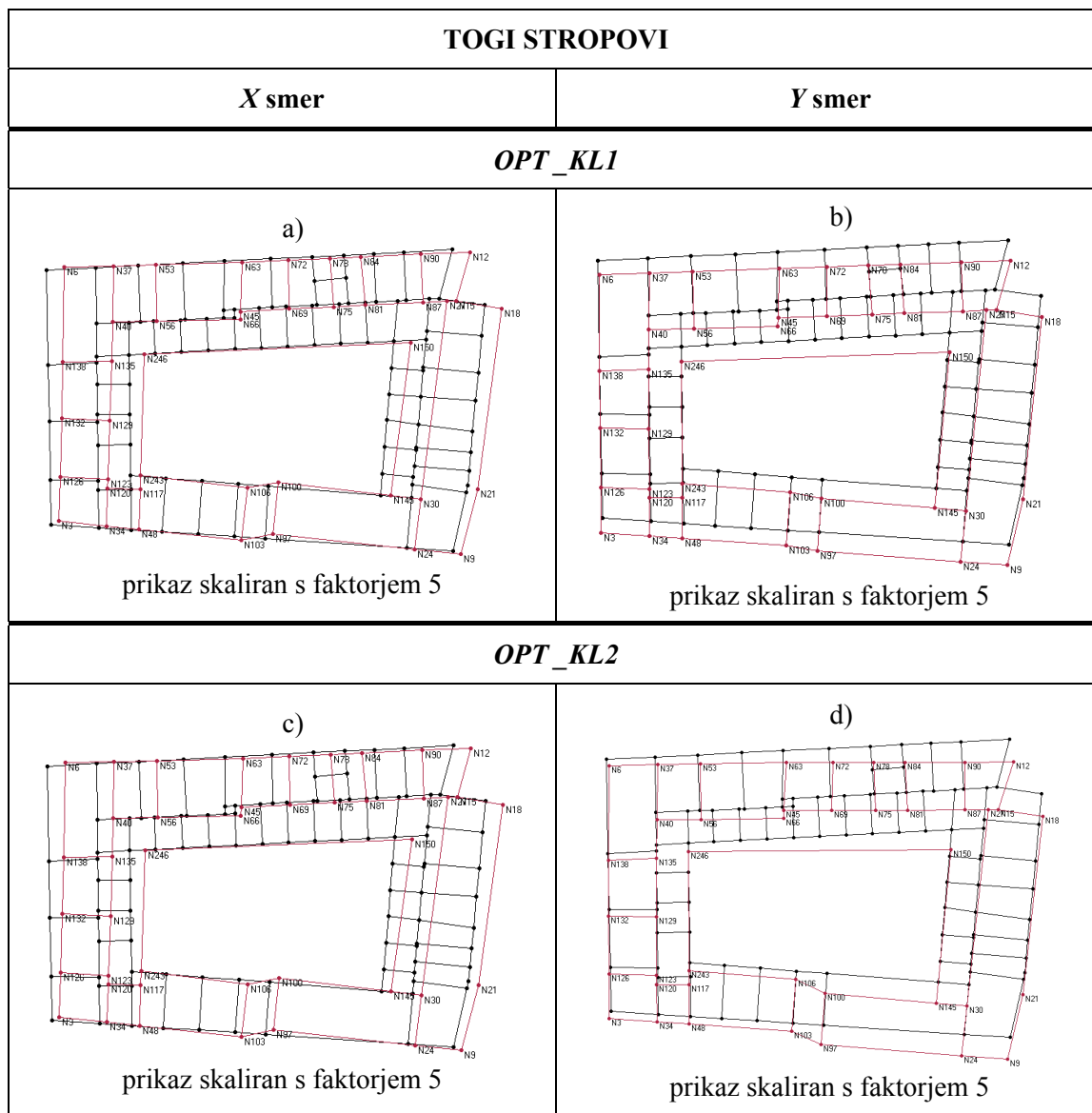
V Y smeri obremenjevanja modela s podajnimi stropovi in materialnimi karakteristikami, ugotovljenimi na gradu Pišece, se deformacijske oblike razlikujejo. Primer *OPT_KL2* (preglednica 9.5, primer d)) očitno odstopa od ostalih dveh (primerov b) in f)). V variantah *OPT_KL1* in *OPT_KL2* (v Y smeri) sta merodajni analizi, kjer je porazdelitev sil sorazmerna prvi nihajni obliki, v varianti *OPT_KL3* pa analiza z razporeditvijo sorazmerno masam etaž (glej preglednico 9.10).

Preglednica 9.5: Deformacijske oblike za model s podajnimi stropovi in s karakteristikami, ugotovljenimi na gradu Pišce



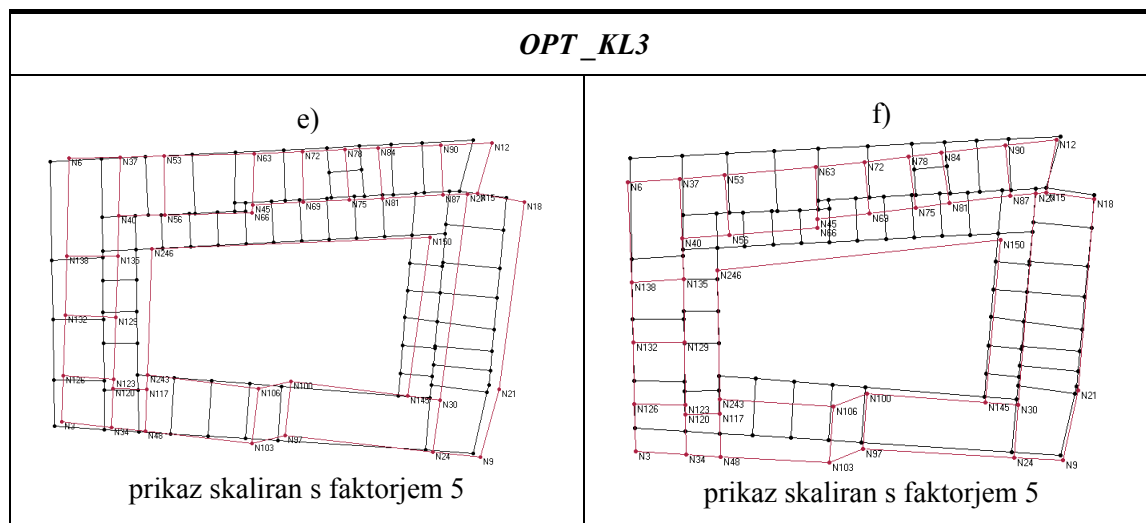
Pri variantah s togimi ploščami in karakteristikami, ugotovljenimi na gradu Pišce v *X* smeri obremenjevanja pride do translatornih pomikov in tudi minimalnih zasukov (preglednica 9.6, primeri a), c), e)), v *Y* smeri pa večinoma do translatornih pomikov (pri *OPT_KL2* in *OPT_KL3* se model na določeni točki prelomi in premakne, preglednica 9.6, primera d) in f)).

Preglednica 9.6: Deformacijske oblike za model s togimi stropovi in s karakteristikami, ugotovljenimi na gradu Pišce



se nadaljuje...

... nadaljevanje preglednice 9.6



Iz rezultatov lahko zaključimo, da izbrane različne kombinacije materialnih karakteristik vplivajo na odziv modela in način deformiranja oziroma drugače, pri različnih materialnih karakteristikah so različni tipi analiz merodajni (glede na horizontalnih porazdelitev sil, smer obremenjevanja, ekscentričnost).

Za boljši pregled rezultatov v nadaljevanju podajam še nekatere bistvene parametre, ki jih izračuna program, v odvisnosti od smeri analize. V preglednicah 9.7 do 9.10 so podane izračunane karakteristične vrednosti krivulj kapacitete ter kritični primeri (razporeditev obtežbe ter smer obremenjevanja: + ali -), dobljene idealizirane krivulje kapacitete so za primerjavo tudi zrisane na grafih (grafikoni 9.1 do 9.4) Nato pa so prikazane tipične porušitve v obravnavani smeri ob predpostavki podajnih oziroma togih stropov.

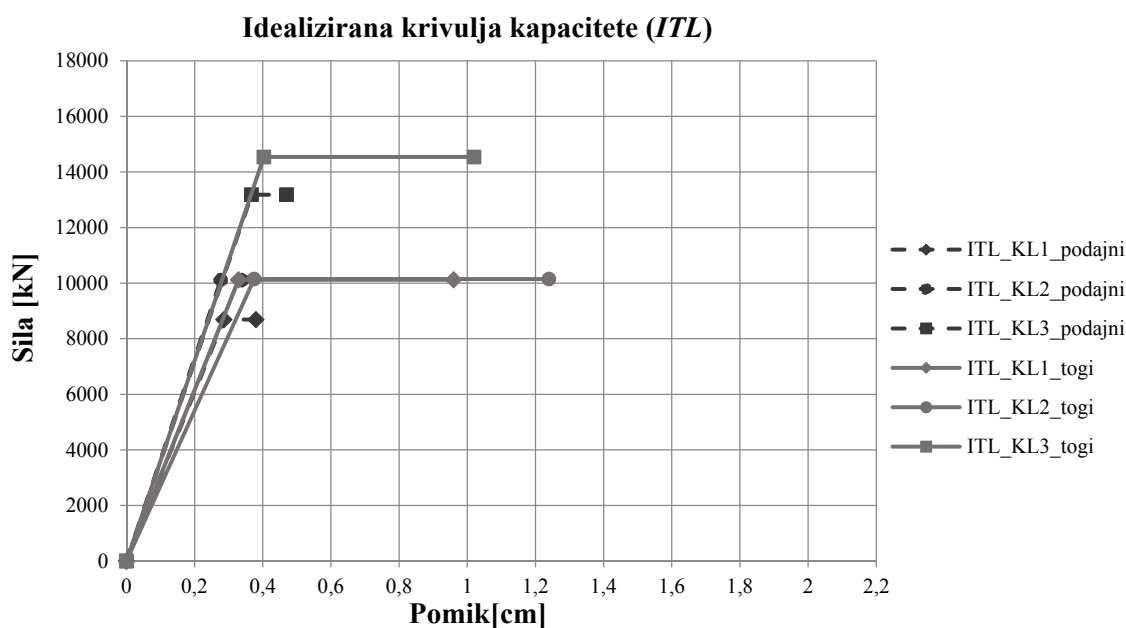
9.2 Rezultati za X smer analize

Najprej podajam preglednico rezultatov analize za konstrukcijo, kjer sem materialne karakteristike privzela iz italijanskih standardov. V preglednici so prikazani: kapaciteta konstrukcije v smislu pomikov (D_u), zahteva določena s standardom v smislu pomikov (D_{max}), največji pospešek v smislu kapacitete konstrukcije ($ULSPG$), največja sila, ki jo je konstrukcija sposobna prenesti (F_y , velja za idealizirano bilinearno krivuljo kapacitete), faktor obnašanja q^* (ki ga program izvednosti kot lastnost konstrukcije, velja za ekvivalenten sistem), duktilnost konstrukcije, nihajni čas ekvivalentnega sistema (T^*) in merodajno analizo, pri kateri pride najprej do porušitve (glede na obliko porazdelitve sil po višini in smeri vsiljevanja).

Preglednica 9.7: Rezultati potresne analize konstrukcije za model z materialnimi karakteristikami, povzetimi po italijanskih standardih za X smer

	PODAJNI STROPOVI			TOGI STROPOVI		
	<i>ITL_KL1</i>	<i>ITL_KL2</i>	<i>ITL_KL3</i>	<i>ITL_KL1</i>	<i>ITL_KL2</i>	<i>ITL_KL3</i>
Pomik D_u [cm]	0,38	0,34	0,47	0,96	1,24	1,02
Pomik D_{max} [cm]	1,02	0,86	0,81	1,04	1,14	0,84
<i>ULSPG</i> [g]	0,083	0,091	0,121	0,164	0,188	0,202
F_y [kN]	8688	10104	13181	10121	10146	14536
Faktor obnašanja q^*	2,52	2,16	1,68	2,22	2,23	1,56
Duktilnost μ	1,33	1,23	1,28	2,92	3,31	2,53
Nihajni čas T^* [s]	0,239	0,220	0,222	0,224	0,240	0,208
Merodajna analiza (smer)	masna (-)	masna (+)	masna (-)	masna (-)	1. nihajna (+)	masna (-)

Kapaciteta konstrukcije (D_u) mora biti večja od zahteve (D_{max}). Vidimo, da ima zadostno odpornost šele konstrukcija s togimi stropovi, kjer je predpostavljen višji nivo poznavanja, *ITL_KL2*.



Grafikon 9.1: Idealizirane krivulje kapacitete za modele z materialnimi karakteristikami, povzetimi po italijanskih standardih za X smer

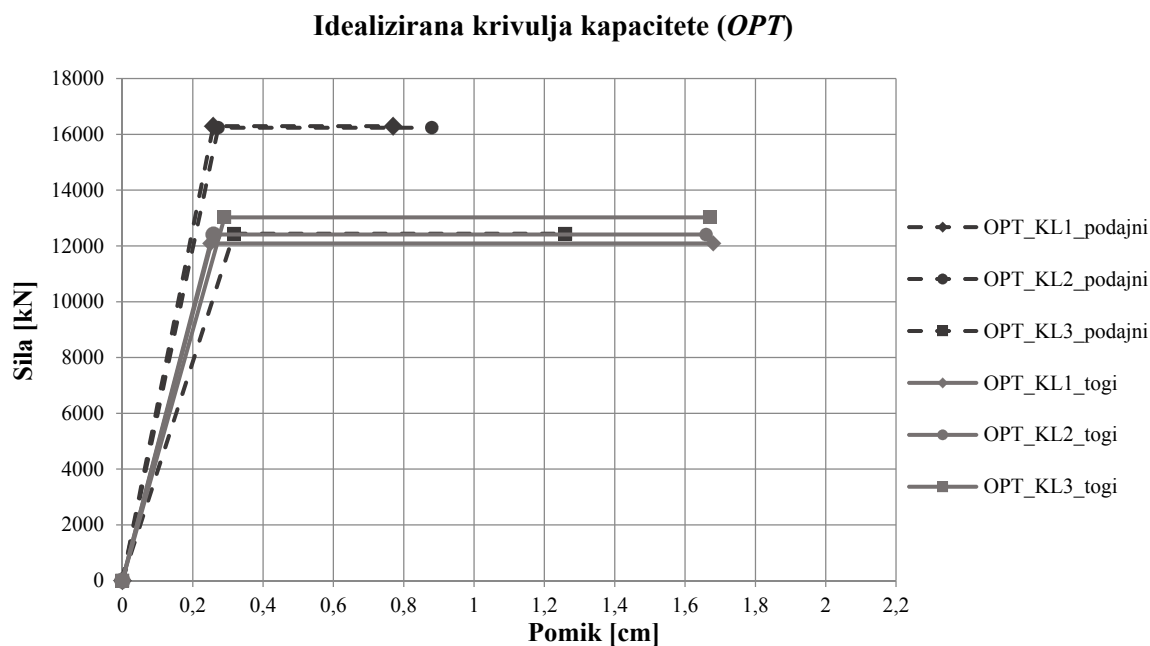
Kot sem že zgoraj omenila, boljše karakteristike pomenijo večjo odpornost. Iz zgornjih grafov in preglednice bi lahko zaključili, da konstrukcija s togimi ploščami zaradi nastalega drugačnega porušnega mehanizma izkaže večjo duktilnost.

V sledeči preglednici so predstavljeni rezultati analize, kjer sem za materialne karakteristike predpostavila vrednosti ugotovljene na gradu Pišece.

Preglednica 9.8: Rezultati potresne analize konstrukcije za model z materialnimi karakteristikami, ugotovljenimi na gradu Pišece za X smer

	PODAJNI STROPOVI			TOGI STROPOVI		
	<i>OPT_KL1</i>	<i>OPT_KL2</i>	<i>OPT_KL3</i>	<i>OPT_KL1</i>	<i>OPT_KL2</i>	<i>OPT_KL3</i>
Pomik D_u [cm]	0,77	0,88	1,26	1,68	1,66	1,67
Pomik D_{max} [cm]	0,34	0,35	0,59	0,75	0,75	0,77
<i>ULSPG</i> [g]	0,290	0,308	0,313	0,275	0,283	0,295
F_y [kN]	16292	16237	12435	12089	12405	13023
Faktor obnašanja q^*	1,13	1,14	1,48	1,91	1,86	1,78
Duktilnost μ	2,98	3,23	3,97	6,72	6,4	5,75
Nihajni čas T^* [s]	0,175	0,180	0,222	0,182	0,183	0,189
Merodajna analiza (smer)	masna (-)	masna (+)	1. nihajna (-)	1. nihajna (+)	1. nihajna (+)	1. nihajna (+)

Konstrukcija ima v vseh variantah zadostno odpornost, vendar pa je zanimivo, da s predpostavljenimi materialnimi karakteristikami v primerih s togimi ploščami dobimo manjše vrednosti za *ULSPG*.



Grafikon 9.2: Idealizirane krivulje kapacitete za modele z materialnimi karakteristikami, ugotovljenimi na gradu Pišece za X smer

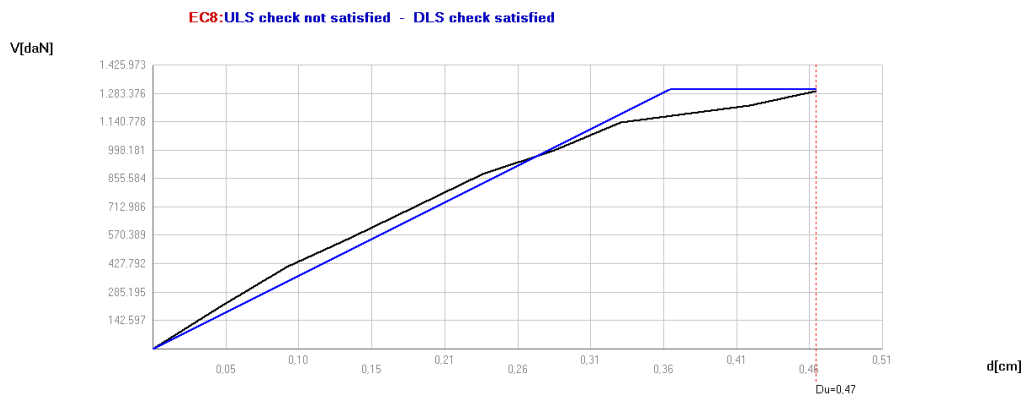
Pri primerjavi rezultatov s togimi in podajnimi stropovi s predpostavljenimi mehanskimi karakteristikami, ugotovljenimi na gradu Pišece, imenovane tudi kot »optimalne« variante, vidimo, da varianti *OPT_KL1* in *OPT_KL2* za podajne stropove odstopata od ostalih variant (opazna drugačna togost). Razlog za to bi lahko iskali v različnih tipih merodajnih analiz, saj je pri teh dveh variantah v nasprotju z ostalimi merodajna porušitev pri enakomerni porazdelitvi sil po višini (premosorazmerna z masami).

V nadaljevanju podajam za primera *ITL_KL3* in *OPT_KL3* poleg idealiziranih krivulj tudi dejanske krivulje kapacitete (izris iz programa) in primere porušitev sten za oba analizirana tipa stropov.

9.2.1 Primer *ITL_KL3*

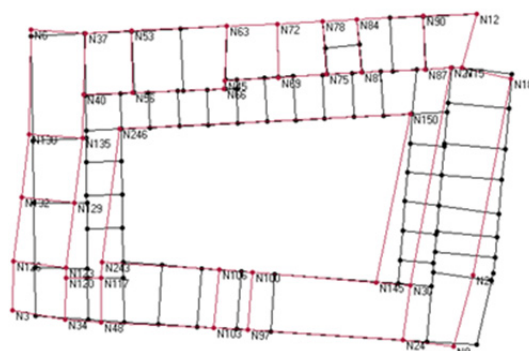
Podajni stropovi

Na sliki 9.2 sta prikazani dejanska krivulja kapacitete (s črno črto) in idealizirana krivulja kapacitete (z modro črto).

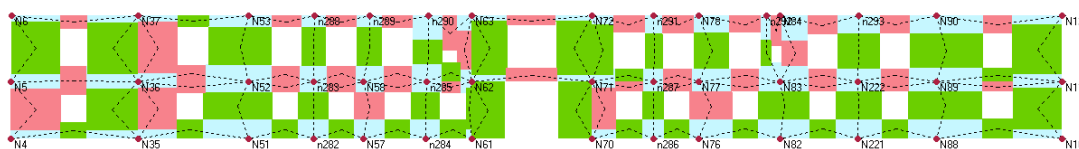


Slika 9.2: Dejanska krivulja kapacitete in idealizirana v X smeri za model z materialnimi karakteristikami ITL_KL3 in podajnimi stropovi

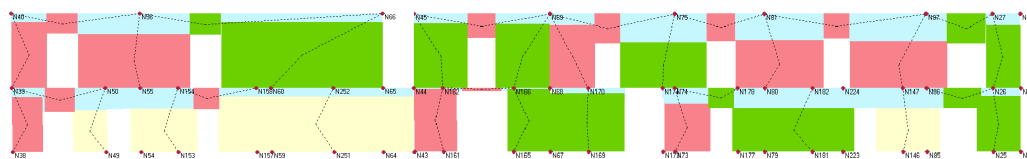
Vidimo, da do padca krivulje nosilnosti konstrukcije ne pride, ampak program ustavi izračun, ko krivulja kapacitete še narašča. Poleg kriterija padca nosilnosti na 80% za porušitev konstrukcije, ima program vgrajen dodaten kriterij za določitev mejnega stanja, najverjetneje program upošteva ali mejne etažne zasuke ali deformacije posameznih elementov. Če so ti preseženi, program ustavi izračun. Dokumentacije oziroma natančnejših zapisov o dodatnem kriteriju v programu nismo našli. Na sliki 9.3 so prikazani deformacijska oblika zgornje etaže objekta in porušitve glavnih sten v X smeri za mejno stanje pri pomiku D_u . Na enak način so podani tudi rezultati ostalih prikazanih primerov analize.



a) Deformacijska oblika

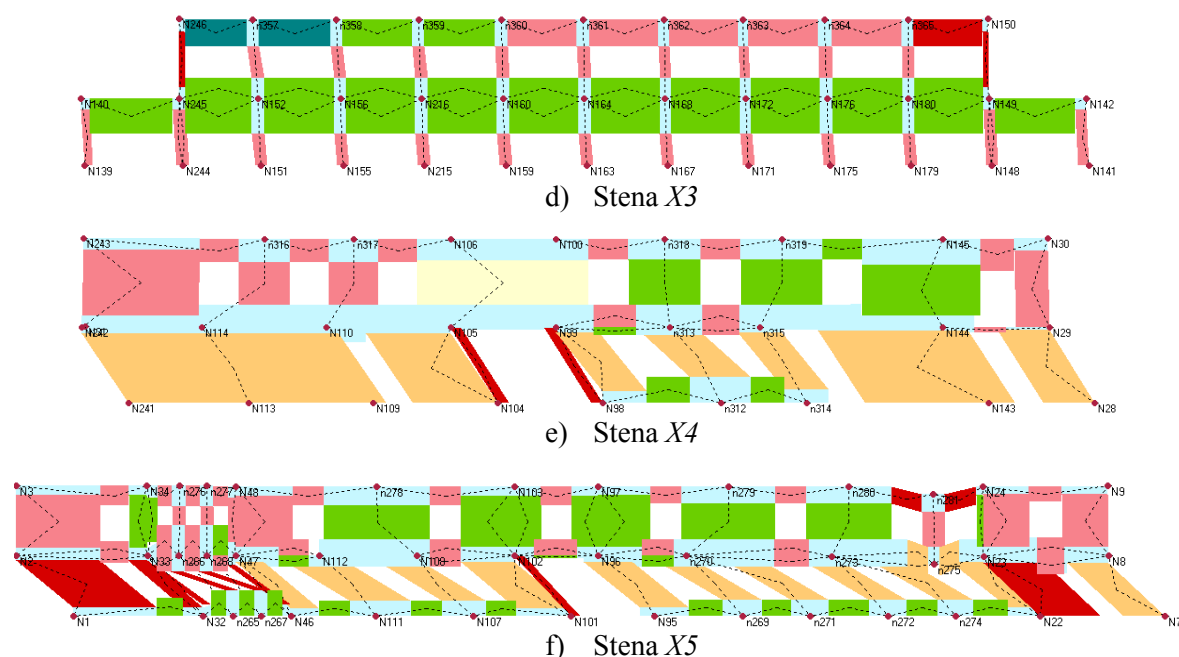


b) Stena $X1$



c) Stena $X2$

...se nadaljuje



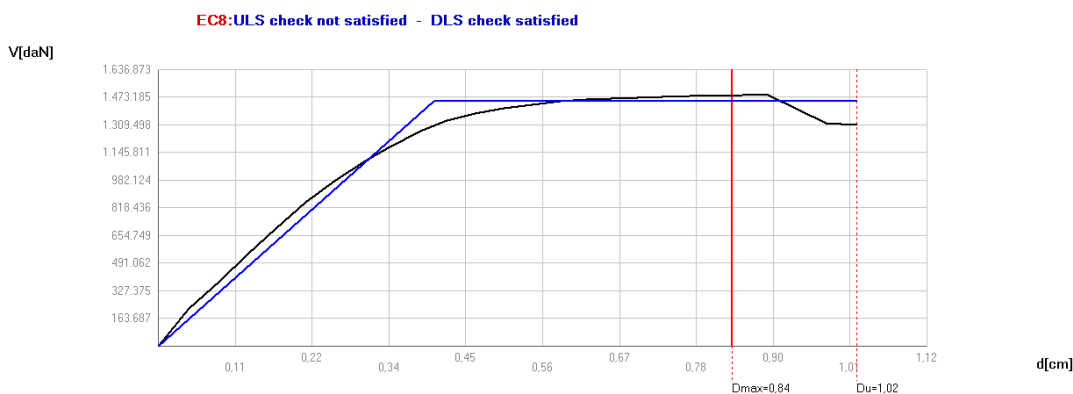
Slika 9.3: Deformacijska oblika in porušitve sten v X smeri za model z materialnimi karakteristikami *ITL_KL3* in podajnimi stropovi

Pri porušitvi opazimo nelogičnosti, saj severni trakt ostane na mestu, nepoškodovan, v južnem traktu pa pride do velikih pomikov in stene so močno poškodovane. To je verjetno tudi razlog, zakaj program ustavi izračun v trenutku, ko krivulja kapacitete še narašča. V oranžno obarvanih elementih pride do do strižne porušitve sten, v rdeče obarvanih pa do upogibne. Kritična je spodnja etaža južnega trakta.

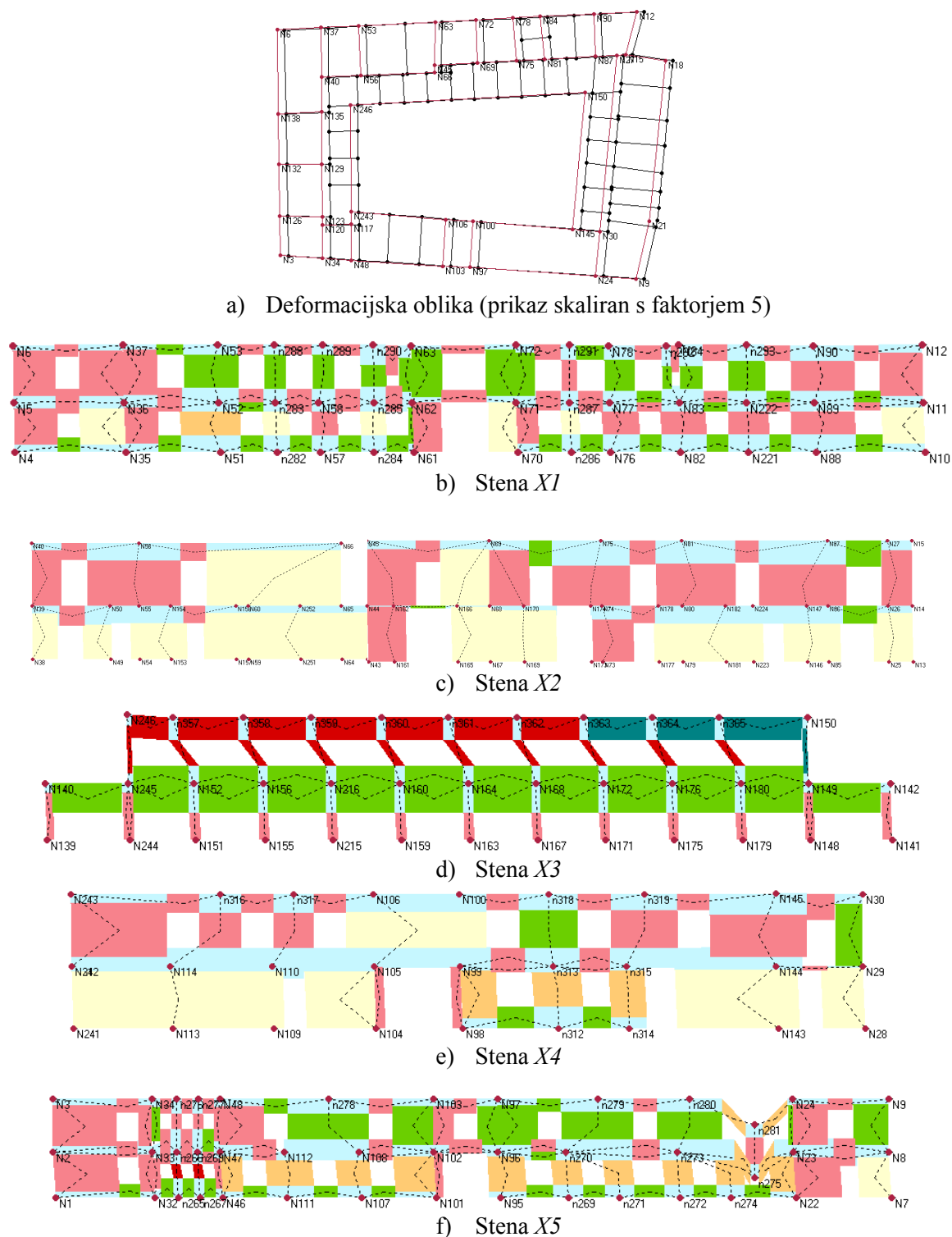
V nadaljevanju je opisan primer *ITL_KL3* s togimi ploščami.

Togi stropovi

Na sliki 9.4, kjer sta prikazani dejanska krivulja kapacitete in idealizirana krivulja kapacitete, vidimo, da za razliko od primera s podajnimi stropovi, v tem primeru pride do padca krivulje. Z polno rdečo črto je označen zahtevan pomik, določen s standardom, z rdečo črtkano črto pa pomik konstrukcije v smislu kapacitete.



Slika 9.4: Dejanska krivulja kapacitete in idealizirana v X smeri za model z materialnimi karakteristikami *ITL_KL3* in togimi stropovi



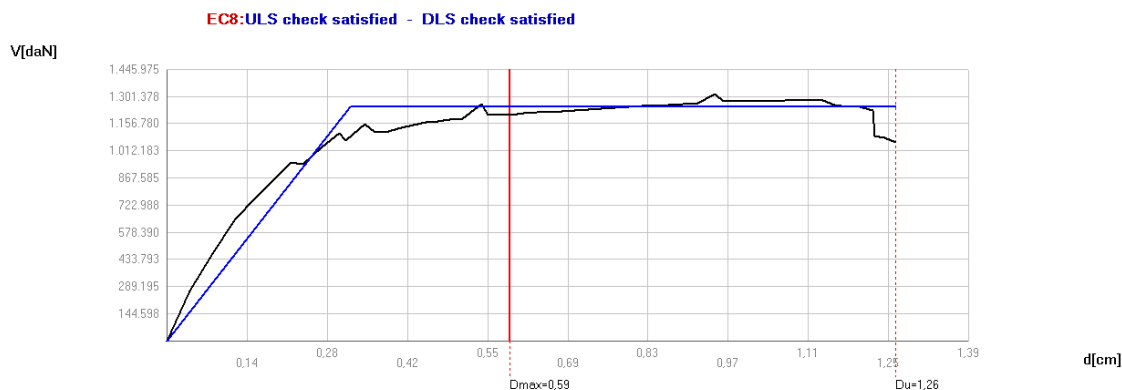
Slika 9.5: Deformacijska oblika in porušitve sten v X smeri za model z materialnimi karakteristikami *ITL_KL3* in togimi stropovi

V primeru s togimi ploščami pride do translatornega pomika celotnega objekta, vse stene so aktivirane pri prenašanju obtežbe. Za najbolj kritičen del objekta se izkažejo arkadni hodniki v zgornji etaži severnega trakta (stena X3).

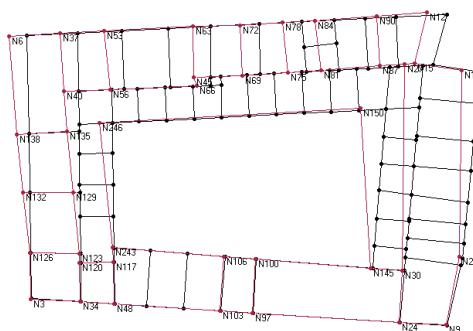
9.2.2 Primer *OPT_KL3*

Podajni stropovi

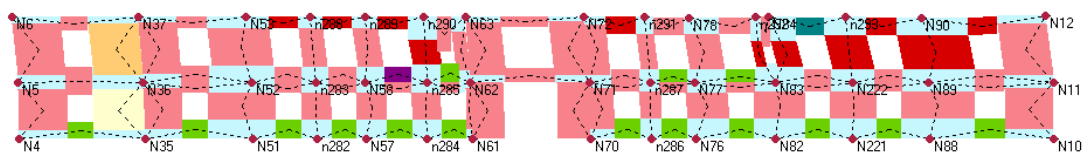
Dejanska in idealizirana krivulja kapacitete, za model s podajnimi stropovi in materialnimi karakteristikami, ugotovljenimi na gradu Pišece, sta razvidni iz slike 9.6.



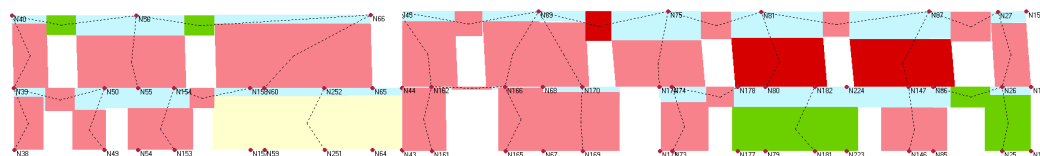
Slika 9.6: Dejanska krivulja kapacitete in idealizirana v *X* smeri za za model z materialnimi karakteristikami *OPT_KL3* in podajnimi stropovi



a) Deformacijska oblika (prikaz skaliran s faktorjem 5)

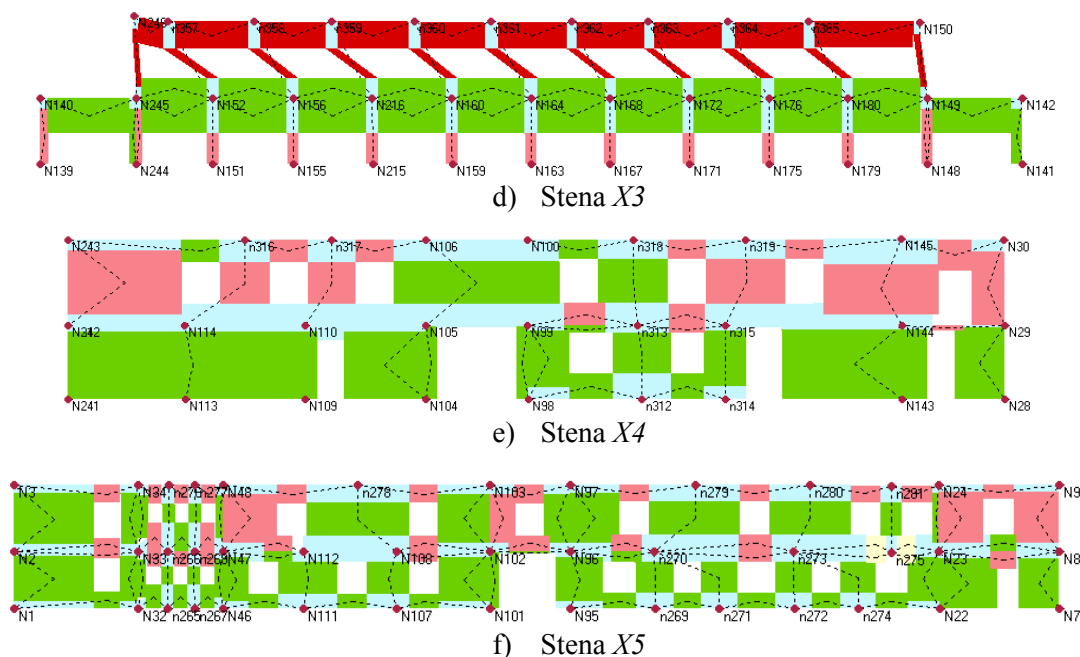


b) Stena *X1*



c) Stena *X2*

se nadaljuje...

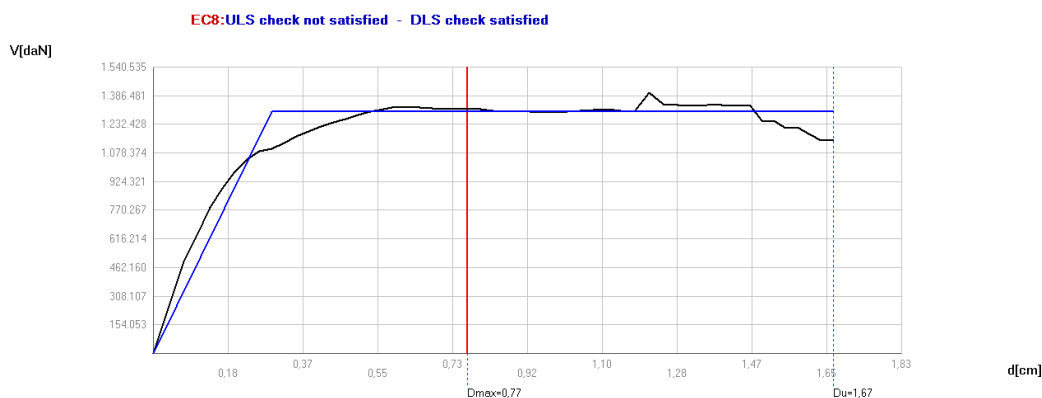


Slika 9.7: Deformacijska oblika in porušitve sten v X smeri za model z materialnimi karakteristikami OPT_KL3 in podajnimi stropovi

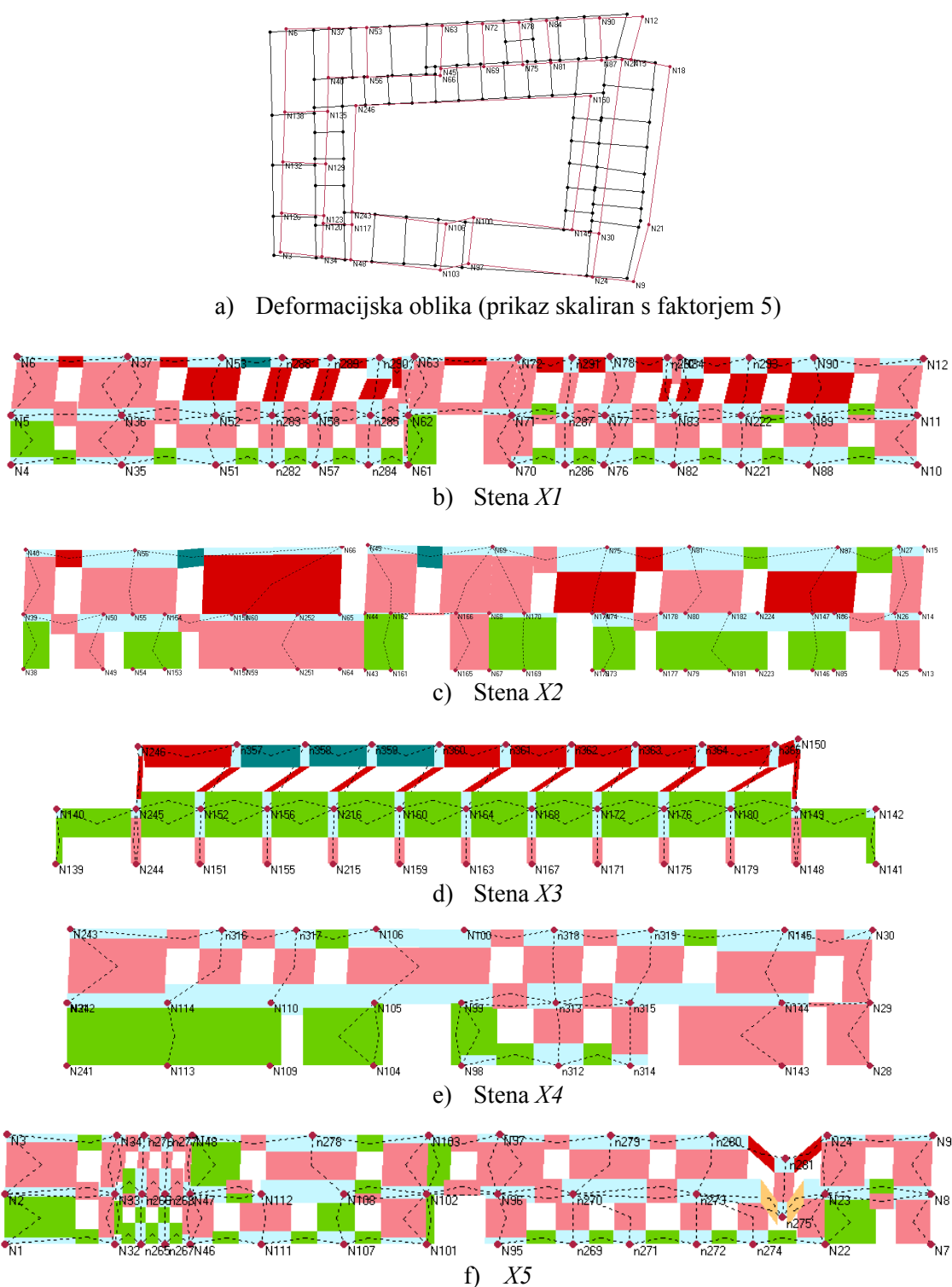
V tem primeru opazimo, da je bolj obremenjen severni del konstrukcije, kar se vidi tudi iz porušitev sten. Zopet pride do porušitve zgornje etaže arkadnih hodnikov v severnem traktu gradu (stena $X3$). Južni del objekta pa se le malo poškoduje.

Togi stropovi

Dejanska in idealizirana krivulja kapacitete, za model s togimi stropovi in materialnimi karakteristikami, ugotovljenimi na gradu Pišcece, sta razvidni iz slike 9.8.



Slika 9.8: Dejanska krivulja kapacitete in idealizirana v X smeri za model z materialnimi karakteristikami OPT_KL3 in togimi stropovi



Slika 9.9: Deformacijska oblika in porušitve sten v X smeri za model z materialnimi karakteristikami *OPT_KL3* in togimi stropovi

Pri porušitvi pride do translacije in manjše rotacije, severne stene so nekoliko bolj obremenjene, pri čemer je večina porušitev upogibnih (v zgornji etaži). V roza obarvanih stenah pride do poškodb zaradi upogiba.

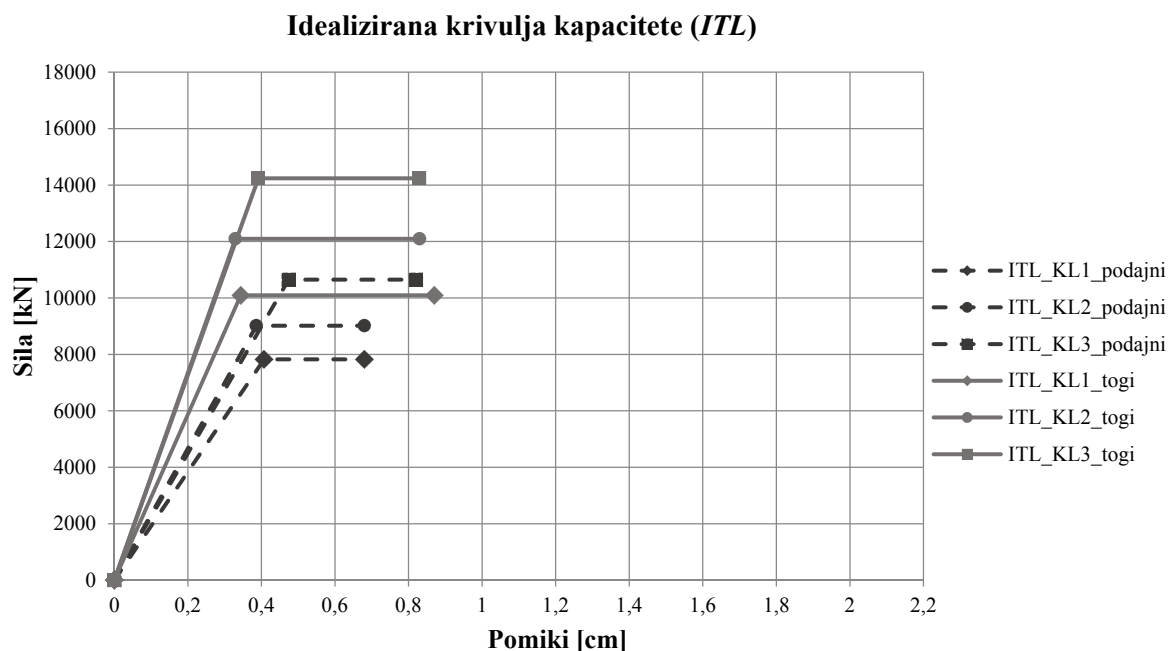
9.3 Rezultati za *Y* smer

Rezultati za *Y* smer analize (v nadaljevanju) so podani na enak način kot za *X* smer.

Preglednica 9.9: Rezultati potresne analize konstrukcije za model z materialnimi karakteristikami, povzetimi po italijanskih standardih za *Y* smer

	PODAJNI STROPOVI			TOGI STROPOVI		
	<i>ITL_KL1</i>	<i>ITL_KL2</i>	<i>ITL_KL3</i>	<i>ITL_KL1</i>	<i>ITL_KL2</i>	<i>ITL_KL3</i>
Pomik D_u [cm]	0,68	0,68	0,82	0,87	0,83	0,83
Pomik D_{max} [cm]	1,25	1,07	1,06	1,00	0,82	0,77
<i>ULSPG</i> [g]	0,105	0,122	0,144	0,158	0,177	0,186
F_y [kN]	7822	9015	10645	10090	12094	14233
Faktor obnašanja q^*	2,46	2,14	1,80	2,04	1,74	1,48
Duktilnost μ	1,67	1,76	1,73	2,53	2,52	2,12
Nihajni čas T^* [s]	0,285	0,259	0,264	0,221	0,199	0,200
Merodajna analiza (smer)	1. nihajna (-)	1. nihajna (-)	1. nihajna (-)	masna (-)	masna (-)	masna (-)

V tem primeru zopet opazimo, da konstrukcija s togimi ploščami prenese večje pospeške. Prav tako z boljšimi materialnimi karakteristikami (tj. z boljšim poznavanjem konstrukcije) izračunana odpornost konstrukcije narašča.



Grafikon 9.3: Idealizirane krivulje kapacitete za modele z materialnimi karakteristikami, povzetimi po italijanskih standardih za Y smer

Na zgornjih grafih je opazno povečevanje odpornosti konstrukcije z višanjem nivoja poznavanja konstrukcije in očitno višjo odpornost pri modelih s togimi ploščami. Lahko sklepamo, da se vrednosti z višjim nivojem poznavanja konsistentno večajo, ker so merodajni enaki tipi analiz (pri modelu s podajnimi stropovi so merodajne analize, kjer je porazdelitev sil sorazmerna prvi nihajni obliki, pri modelu s togimi ploščami pa masna porazdelitev).

Preglednica 9.10: Rezultati potresne analize konstrukcije za model z materialnimi karakteristikami, ugotovljenimi na gradu Pišece za Y smer

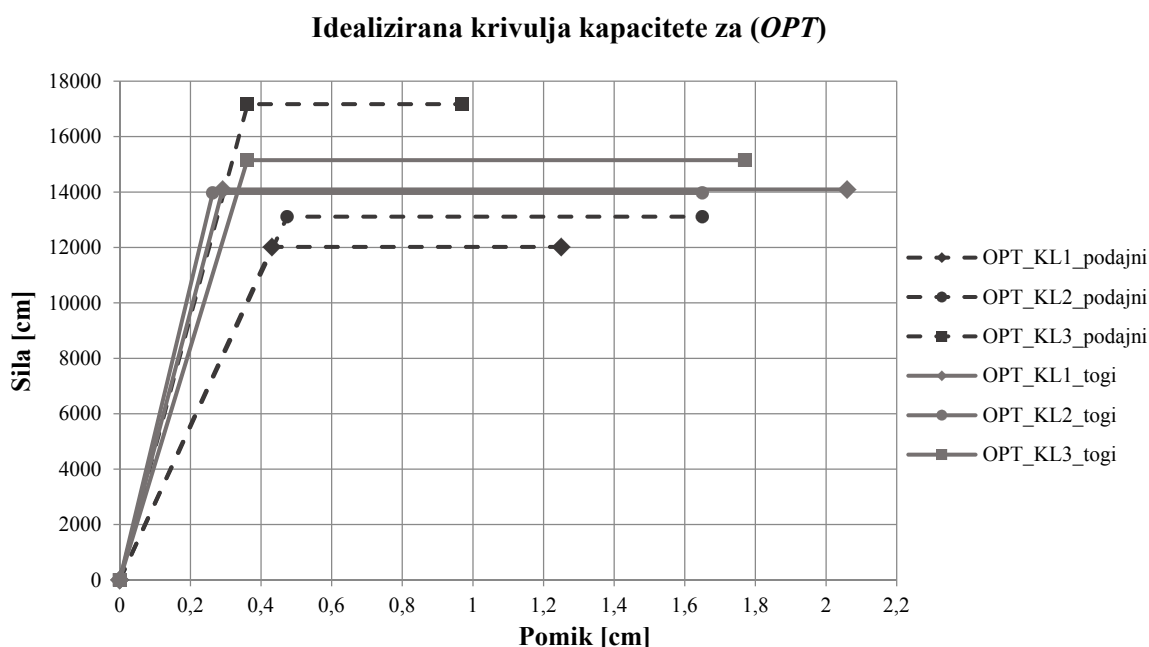
	PODAJNI STROPOVI			TOGI STROPOVI		
	<i>OPT_KL1</i>	<i>OPT_KL2</i>	<i>OPT_KL3</i>	<i>OPT_KL1</i>	<i>OPT_KL2</i>	<i>OPT_KL3</i>
Pomik D_u [cm]	1,25	1,65	0,97	2,06	1,65	1,77
Pomik D_{max} [cm]	0,88	0,86	0,47	0,65	0,61	0,68
<i>ULSPG</i> [g]	0,231	0,293	0,273	0,342	0,340	0,350
F_y [kN]	12016	13109	17167	14090	13966	15147
Faktor obnašanja q^*	1,63	1,49	1,14	1,54	1,55	1,42
Duktilnost μ	2,90	3,48	2,68	7,07	6,27	4,90

se nadaljuje...

... nadaljevanje preglednice 9.10

Nihajni čas T^* [s]	0,240	0,241	0,184	0,176	0,168	0,189
Merodajna analiza (smer)	1. nihajna (-)	1. nihajna (+)	masna (+)	1. nihajna (-)	1. nihajna (-)	1. nihajna (-)

Ponovno opazimo, da se z višjim nivojem znanja, v večini primerov veča tudi pospešek, ki ga je konstrukcija sposobna prenesti. Izjema je le primer *OPT_KL3* s podajnimi stropovi. Razlog za to lahko iščemo v merodajnem mehanizmu porušitve (v tem primeru je merodajna masna porazdelitev horizontalne obtežbe, v vseh ostalih primerih pa porazdelitev premosorazmerna prvi nihajni obliki). Primeri z »optimalnimi« karakteristikami zidu nam tokrat pokažejo, da je konstrukcija s togimi stropovi sposobna prenesti večje pospeške. Modeli z »optimalnimi« karakteristikami imajo na splošno višjo odpornost kot tisti s karakteristikami, povzetimi po italijanskih standardih.



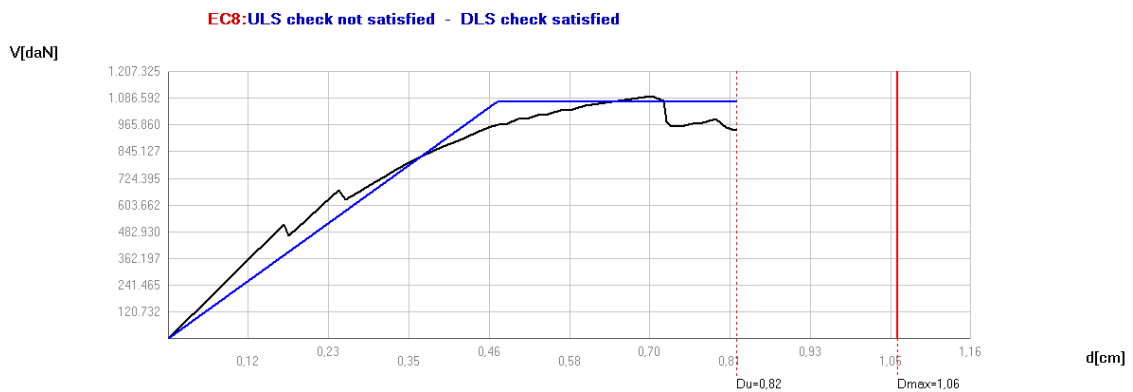
Grafikon 9.4: Idealizirane krivulje kapacitete za modele z materialnimi karakteristikami, ugotovljenimi na gradu Pišece za Y smer

Modeli z materialnimi karakteristikami, ugotovljenimi na gradu Pišece, izkazujejo v Y smeri tako največje dosežene pomike kot tudi največjo nosilnost.

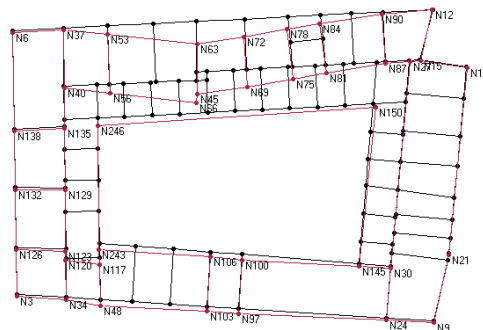
9.3.1 Primer *ITL_KL3*

Podajni stropovi

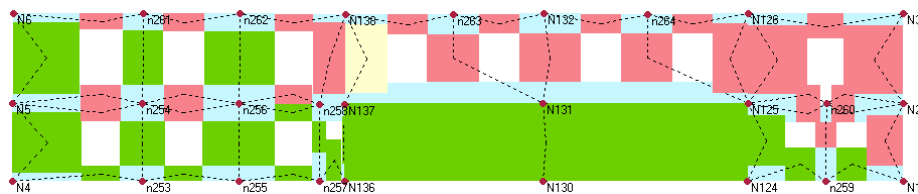
Dejanska krivulja kapacitete in idealizirana krivulja kapacitete, za model s togimi stropovi in materialnimi karakteristikami, ugotovljenimi na gradu Pišece, sta razvidni iz slike 9.11.



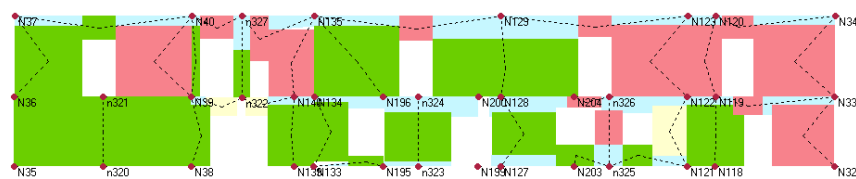
Slika 9.10: Dejanska krivulja kapacitete in idealizirana v *Y* smeri za model z materialnimi karakteristikami *ITL_KL3* in podajnimi stropovi



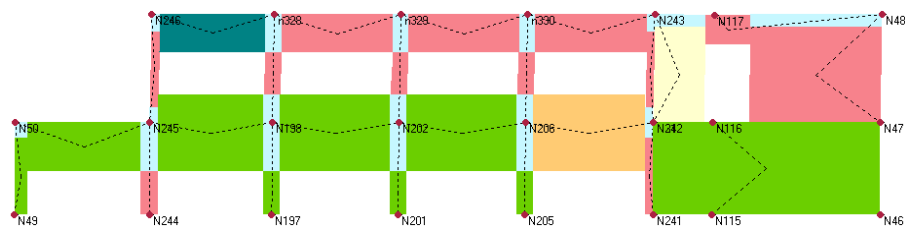
a) Deformacijska oblika (prikaz skaliran s faktorjem 5)



b) Stena Y1

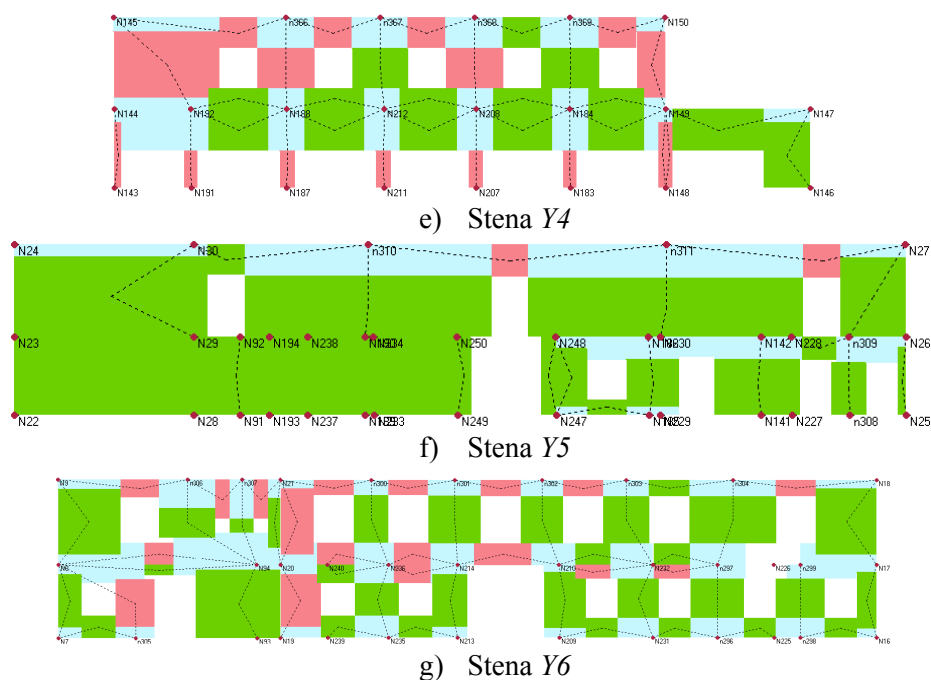


c) Stena Y2



d) Stena Y3

se nadaljuje...

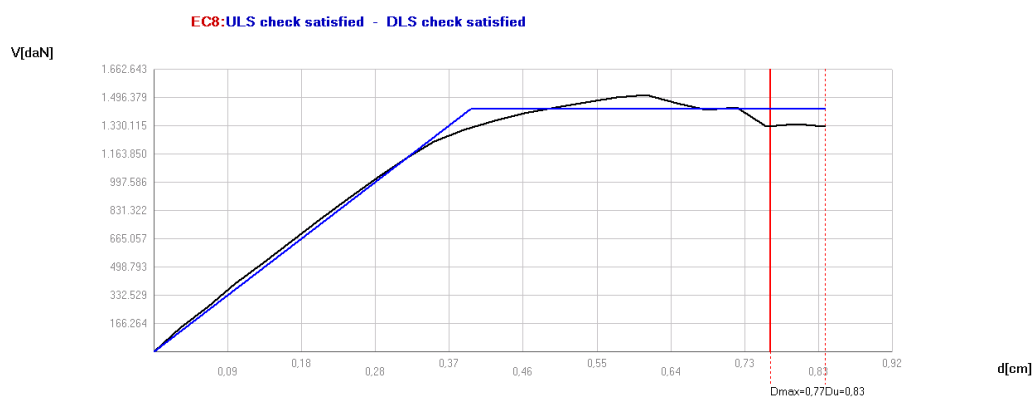


Slika 9.11: Deformacijska oblika in porušitve sten v Y smeri za model z materialnimi karakteristikami ITL_KL3 in podajnimi stropovi

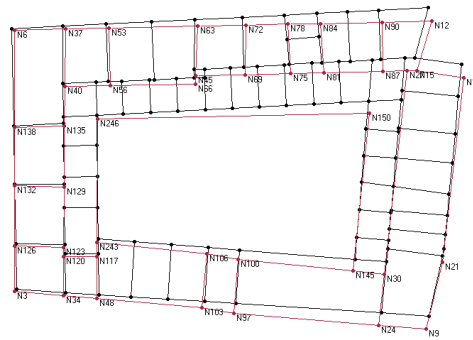
Večina elementov glavnih sten v Y smeri ostane nepoškodovanih, nekoliko bolj so obremenjene stene lokalno, v bližini kontrolnega vozlišča.

Togi stropovi

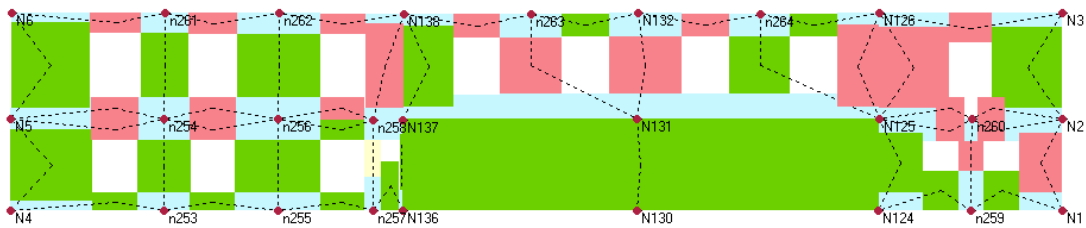
Na sliki 9.13 sta prikazani dejanska krivulja kapacitete in idealizirana krivulja kapacitete za model s togimi stropovi in materialnimi karakteristikami, povzetimi po italijanskih standardih.



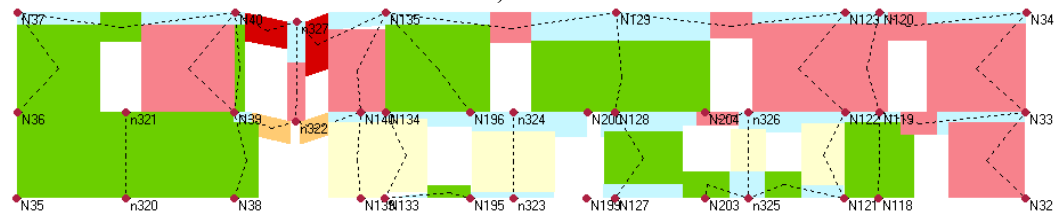
Slika 9.12: Dejanska krivulja kapacitete in idealizirana za primer ITL_KL3 s togimi stropovi



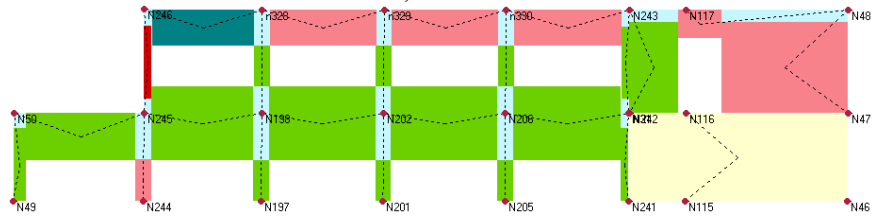
a) Deformacijska oblika (prikaz skaliran s faktorjem 5)



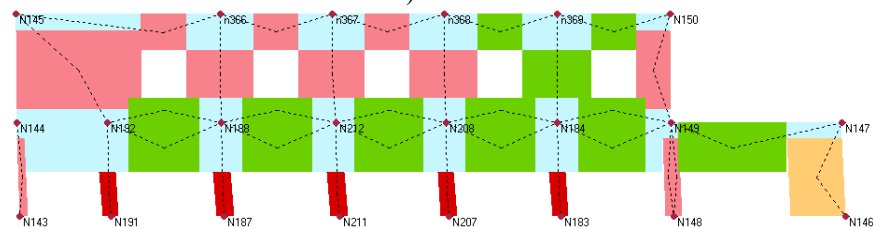
b) Stena Y1



c) Stena Y2

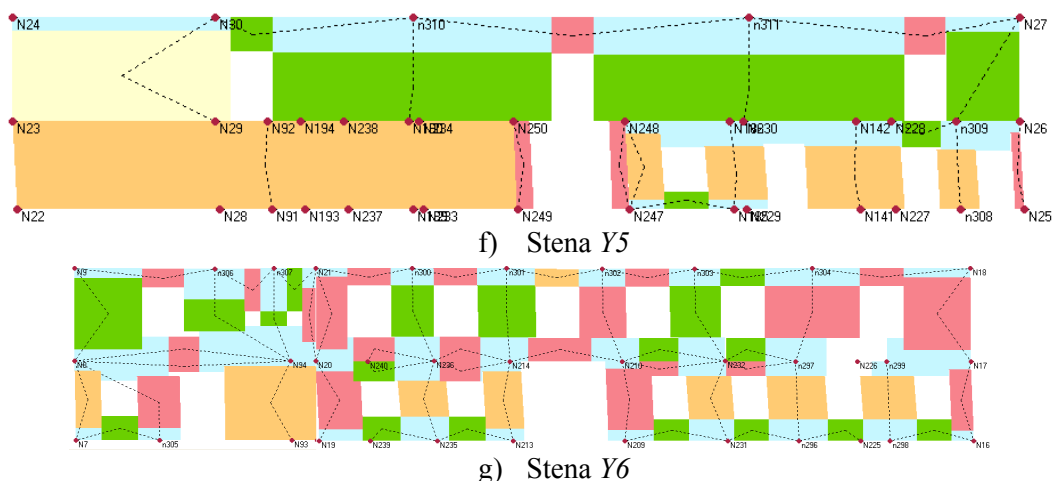


d) Stena Y3



e) Stena Y4

... se nadaljuje



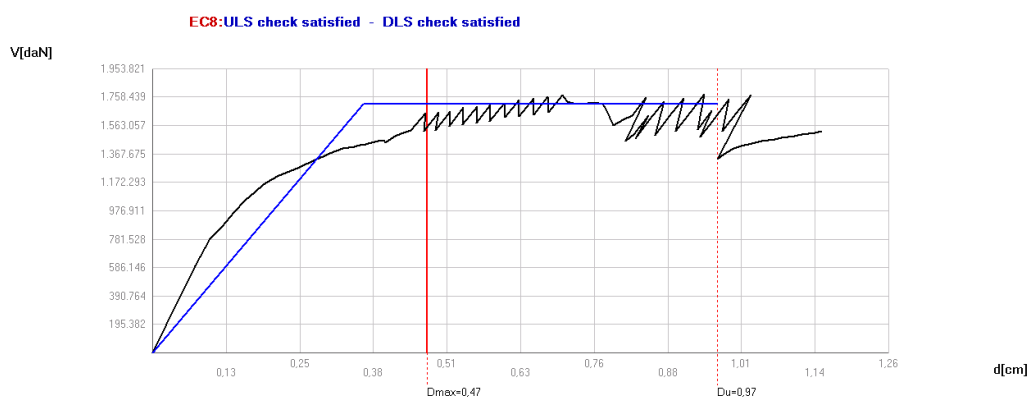
Slika 9.13: Dejanska krivulja kapacitete in idealizirana v Y smeri za model z materialnimi karakteristikami ITL_KL3 in togimi stropovi

Iz deformacijske oblike in porušitev sten opazimo, da je kritičen vzhodni del objekta. Do strižne porušitve pride v stenah spodnje etaže vzhodnega trakta, z izjemo arkadnega hodnika, kjer pride do upogibne porušitve stebrov (stena Y4).

9.3.2 Primer *OPT_KL3*

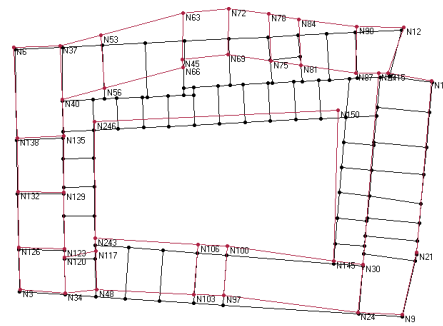
Podajni stropovi

Na naslednji sliki sta prikazani dejanska krivulja kapacitete in idealizirana za primer s podajnimi stropovi in karakteristikami, ugotovljenimi na gradu Pišece.

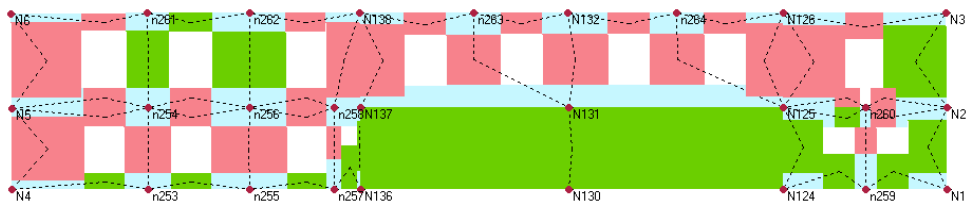


Slika 9.14: Dejanska krivulja kapacitete in idealizirana v Y smeri za model z materialnimi karakteristikami *OPT_KL3* in podajnimi stropovi

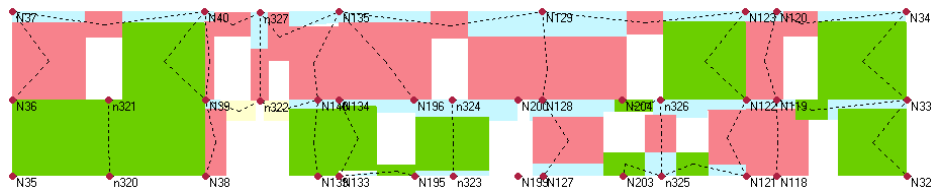
V analiziranem primeru je vidno postopno odpovedovanje posameznih elementov (krivulja črne barve).



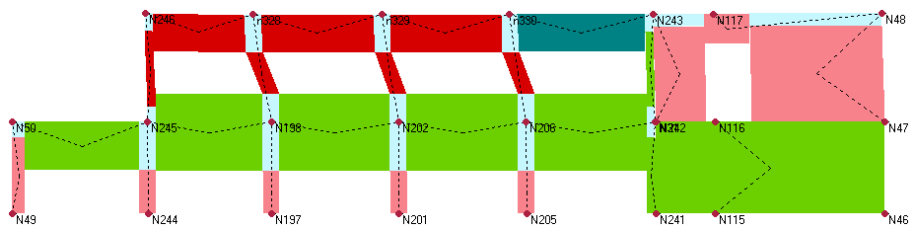
a) Deformacijska oblika (prikaz skaliran s faktorjem 5)



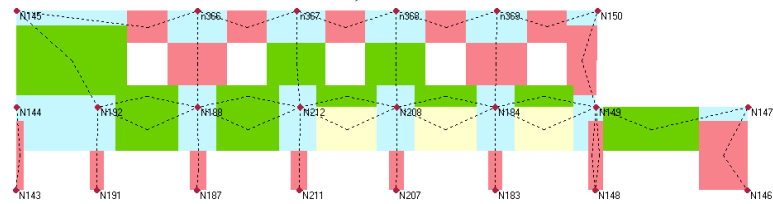
b) Stena Y1



c) Stena Y2

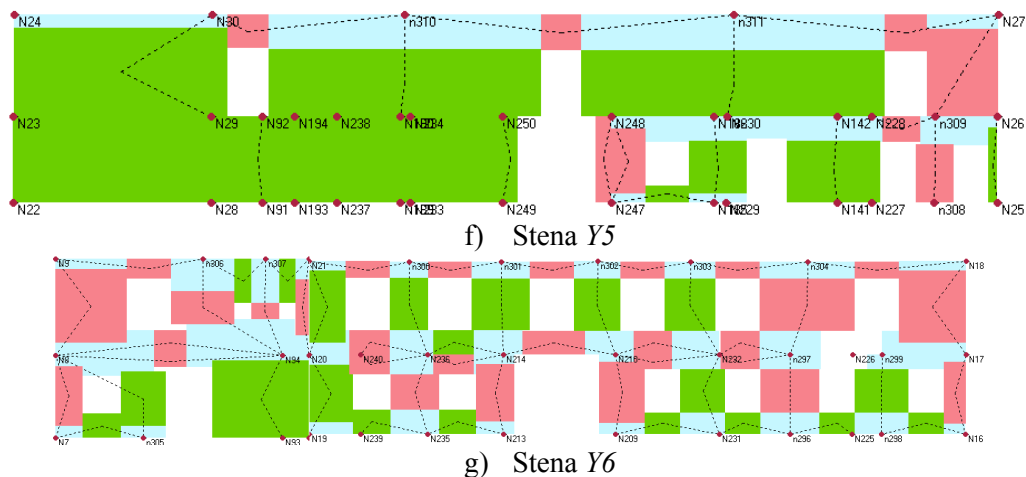


d) Stena Y3



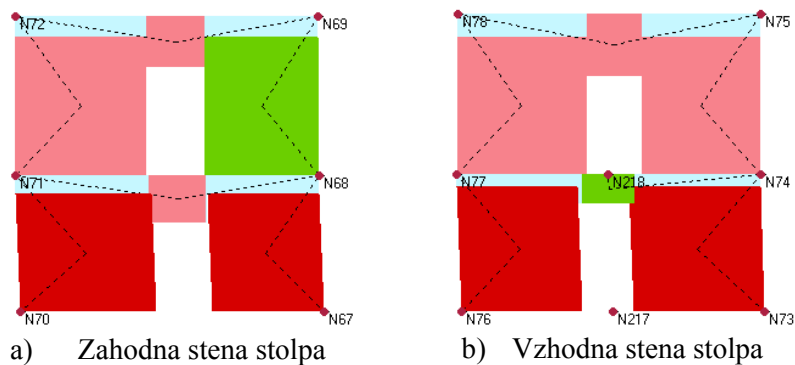
e) Stena Y4

...se nadaljuje



Slika 9.15: Deformacijska oblika in porušitve sten v Y smeri za model z materialnimi karakteristikami *OPT_KL3* in podajnimi stropovi

Največje deformacije dobimo lokalno, v severnem traktu, v bližini kontrolnega vozlišča. Do upogibnih porušitev pride v opečnih stebrih in arkadnih lokih v prvem nadstropju zahodnega trakta. Porušitve najbolj obremenjenih sten v Y smeri v severnem traktu so prikazane na naslednji sliki.

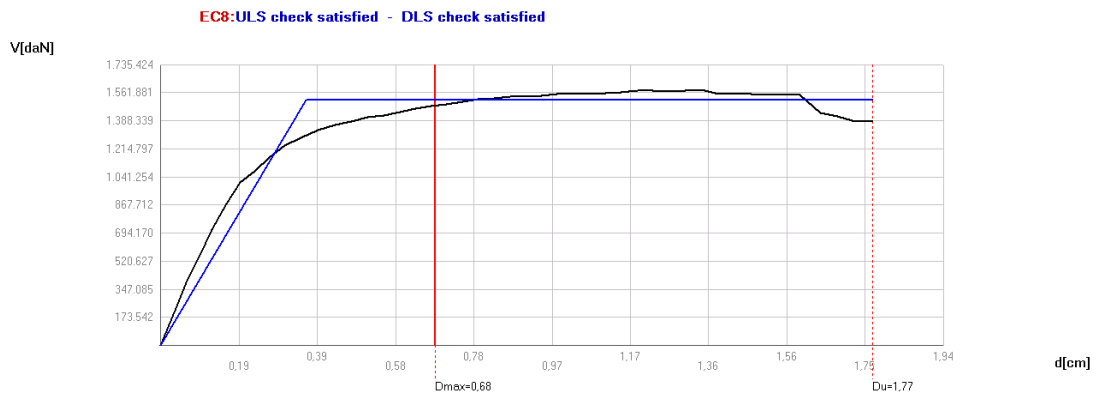


Slika 9.16: Porušitve najbolj obremenjenih prečnih sten v severnem traktu v Y smeri za model z materialnimi karakteristikami *OPT_KL3* in podajnimi stropovi

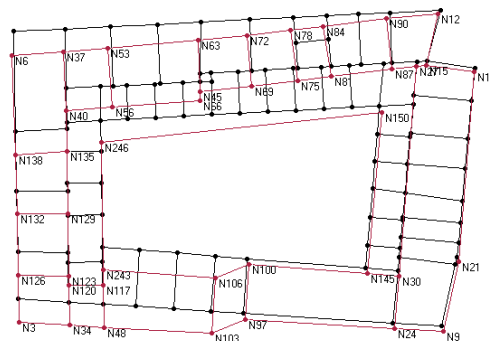
Vidimo, da pride do upogibne porušitve sten pritličja.

Togi stropovi

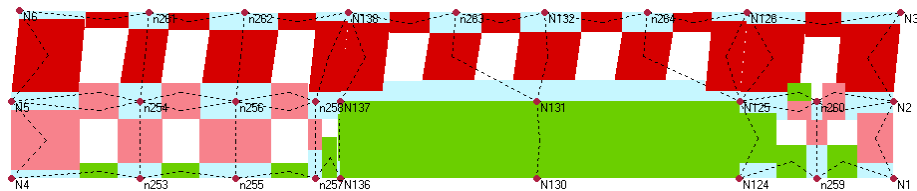
Krivulji kapacitet (dejanska in idealizirana) za primer modela z materialnimi karakteristikami, ugotovljenimi na gradu Pišece in togimi ploščami sta prikazani na naslednji sliki.



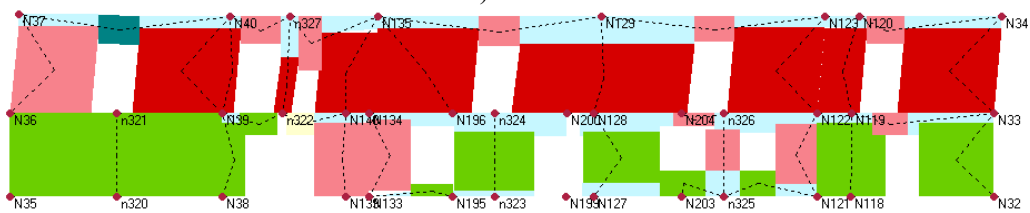
Slika 9.17: Dejanska krivulja kapacitete in idealizirana v Y smeri za model z materialnimi karakteristikami *OPT_KL3* in togimi stropovi



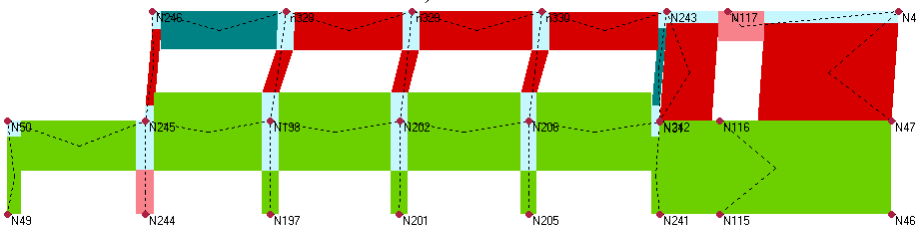
a) Deformacijska oblika (prikaz skaliran s faktorjem 5)



b) Stena Y1

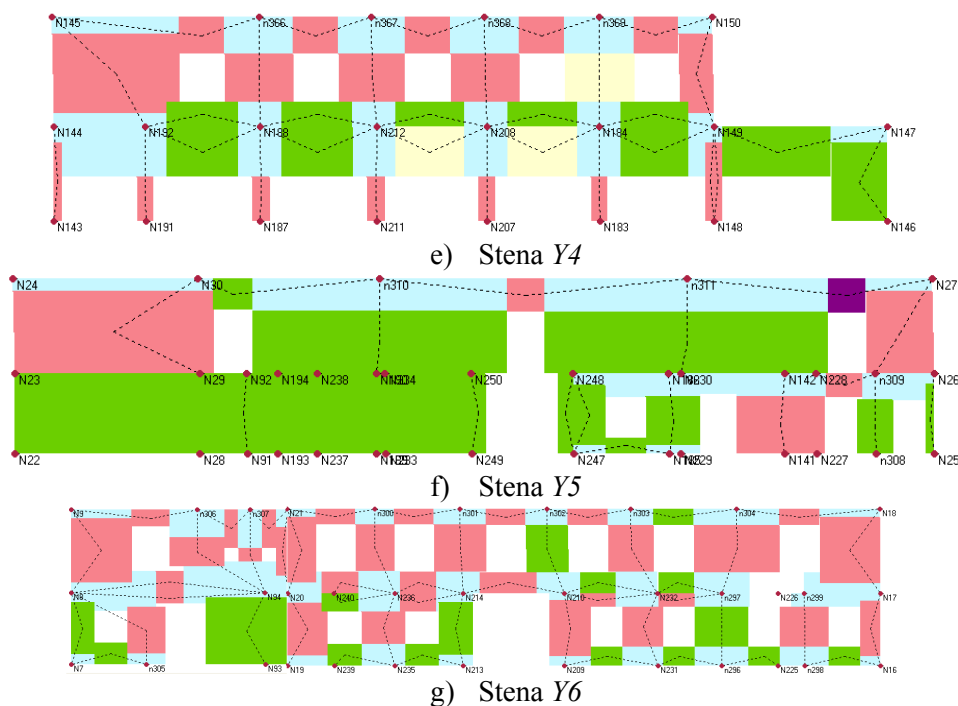


c) Stena Y2



d) Stena Y3

... se nadaljuje



Slika 9.18: Deformacijska oblika in porušitve sten v Y smeri za model z materialnimi karakteristikami OPT_KL3 in togimi stropovi

Iz deformacijske oblike razberemo, da so deformacije v vzhodnem traktu minimalne. V ostalih traktih pa pride do upogibnih porušitev sten v prvem nadstropju. Tudi v arkadnih hodnikih prvega nadstropja pride do upogibnih porušitev opečnih stebrov in lokov.

9.4 Stolp

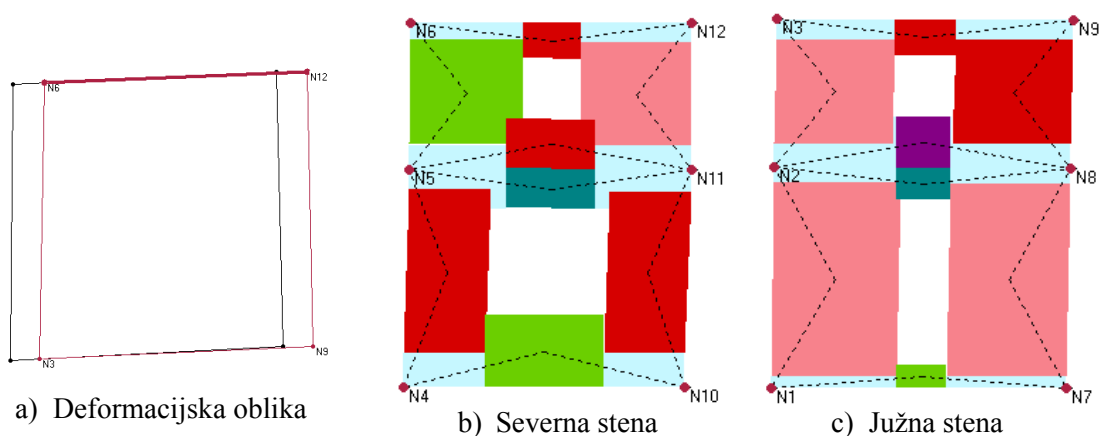
Prvi dve etaži stolpa sem obravnavala v sklopu analize celotnega gradu. Zgornji dve etaži sem obravnavala samostojno. V modelu sem upoštevala le materialne karakteristike, ki so bile ugotovljene na gradu Pišcece, in podajne stropove. Za kontrolo potresne odpornosti podajam koeficient SRC_u .

Preglednica 9.11: Koeficient potresne odpornosti SRC_u za model stolpa z materialnimi karakteristikami, ugotovljenimi na gradu Pišcece za X in Y smer

	SRC_u	
	X smer	Y smer
OPT_KL1	0,139	0,151
OPT_KL2	0,143	0,146
OPT_KL3	0,151	0,165

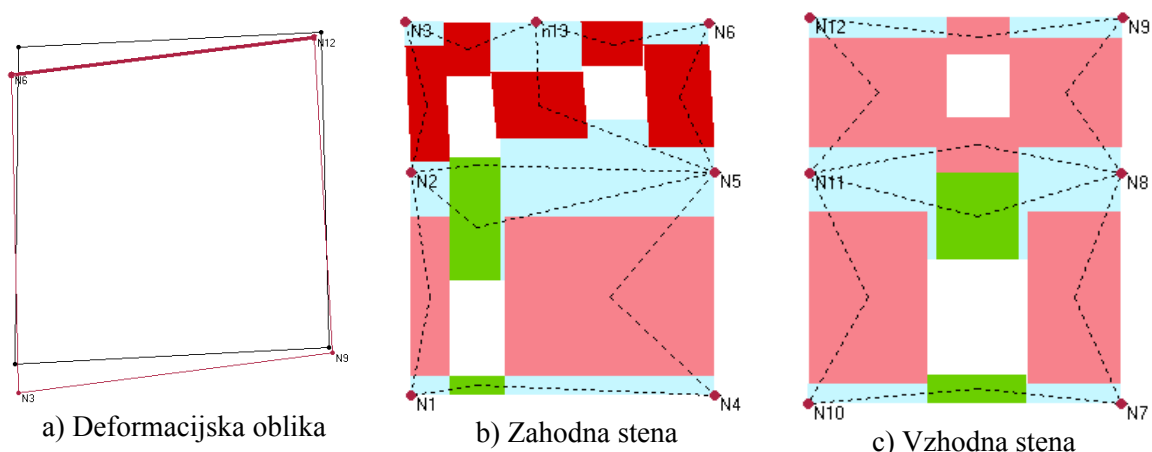
Zgornji dve etaži stolpa z obravnavanimi materialnimi karakteristikami ne dosegata zahtevane potresne odpornosti ($BSC_u = 0,292$).

Na slikah v nadaljevanju so prikazane deformacijske oblike in porušitve sten za X in Y smer obremenjevanja.



Slika 9.19: Deformacijska oblika in porušitve sten v X smeri za model stolpa z materialnimi karakteristikami OPT_KL3

Pri analizi v X smeri pride do translatorsnega pomika stolpa. Na severni steni pride do upogibnih porušitev slopov v nižjem nadstropju in prekladnih delov, na južni steni pa pride do upogibnih porušitev v zgornjem nadstropju.



Slika 9.20: Deformacijska oblika in porušitve sten v Y smeri za model stolpa z materialnimi karakteristikami OPT_KL3

Pri analizi v Y smeri pride do torzije stolpa. Kritična je stena v zgornjem nadstropju zahodne stene.

Metoda ekvivalentnega okvirja ni najbolj primerna za analizo stolpa. V prvi fazi bi bilo smiselno analizirati stolp z metodo makroelementov (glej poglavje 6.1), ki upošteva porušitev izven ravnine. Za bolj natančno analizo pa bi bila primerna metoda končnih elementov.

10 KOMENTAR REZULTATOV

Modeli gradu z materialnimi karakteristikami, ugotovljenimi na gradu Pišece, dosegajo zahtevano potresno odpornost (tako s togimi stropovi kot tudi s podajnimi). Modeli s podajnimi stropovi in karakteristikami, povzetimi po italijanskih standardih, ne dosegajo zahtevane potresne odpornosti. Enaki modeli, a s togimi stropovi, dosegajo oziroma ne dosegajo zahtevane potresne odpornosti v odvisnosti od smeri obremenjevanja in stopnje poznavanja konstrukcije. Tako model z omejenim nivojem poznavanja (*ITL_KL1*) ne dosega zahtevane potresne odpornosti, model z normalnim nivojem poznavanja konstrukcije (*ITL_KL2*) zadosti zahtevam le v *Y* smeri, medtem ko model s popolnim poznavanjem konstrukcije (*ITL_KL1*) zahtevam standardov v celoti zadosti. Omenjene odpornosti so definirane na podlagi primerjave pospeškov. Koefficienti potresne odpornosti stavbe SRC_u v nekaterih primerih, kjer stavba zadosti zahtevanim odpornostim v smislu pospeškov, pokažejo ravno nasprotno, in sicer da stavba nima zadostne odpornosti (velja za model *ITL_KL2* s togimi stropovi v *X* smeri obremenjevanja). Izkaže se tudi obratno; v nekaterih primerih, kjer primerjava pospeškov pokaže nezadostno odpornost stavbe (velja za modele *ITL_KL3* s podajnimi stropovi v *X* smeri obremenjevanja, *ITL_KL2* s togimi stropovi v *Y* smeri), SRC_u prikaže zadostno odpornost stavbe.

Z analizami smo potrdili predpostavko, da je v primeru boljšega poznavanja konstrukcije, kar se odraža v boljših materialnih karakteristikah v modelu (višji nivo poznavanja konstrukcije pomeni nižji faktor zaupanja, s katerim moramo reducirati predpostavljene karakteristike materiala), izračunana potresna odpornost višja. Potresna odpornost stavbe se lahko poveča do 20% ali celo 30%, če spremenimo nivo poznavanja konstrukcije z omejenega na popolno.

Prednost programa 3Muri je širok nabor podajnih stropov, ki jih vsebuje knjižnica programa. V historičnih objektih, kakršen je grad Grm, se stropne konstrukcije od prostora do prostora razlikujejo, ročno preračunavanje nadomestne togosti in debeline pa bi bilo zamudno.

Program omogoča spremljanje razvoja poškodb pozameznih elementov sten v vsakem koraku izračuna. Z identifikacijo šibkih elementov bi lahko izvedli utrditvene ukrepe le na kritičnih mestih. Iz rezultatov zgoraj prikazanih analiz tako enoličnih rešitev ni bilo moč razbrati. Pri vsaki analizi pride do različnega razvoja poškodb in s tem porušitve. Hkrati se pojavi vprašljivost zanesljivosti rezultatov pri različnih izbirah materialnih karakteristik, saj so nekatere porušitve nelogične (npr. primeri *ITL_KL1*, *ITL_KL2* in *ITL_KL3* v *X* smeri za podajne stropove).

Slabost programa, ki jo je bilo moč razbrati iz številnih analiz, je občutljivost na izbiro kontrolnega vozlišča. Pri modelih s podajnimi stropovi je v primeru izbire kontrolnega vozlišča v katerem izmed ostalih traktov gradu rezultat drugačna deformacijska oblika. Razvijalci programske opreme so svetovali upoštevanje (manjše) togosti podajnih stropov tudi v nenosilni smeri, vendar pa to ni rešilo problema odvisnosti porušitve od izbire kontrolnega vozlišča. Spremenilo se je le razmerje odpornosti stavbe v *X* in *Y* smeri (odvisno od orientiranosti stropov). Zaradi notranjega dvorišča ni bilo mogoče izbrati kontrolnega vozlišča v središču mas (kontrolno vozlišče je možno izbrati le na poziciji obstoječih sten).

Program je občutljiv tudi na izbiro materialnih karakteristik. Pri enakem modelu nosilne konstrukcije in z različnimi materialnimi karakteristikami program ne opravi analiz. Težave so povzročale materialne karakteristike opečnih zidov, s katerimi so bili definirani tudi opečni oboki. Zadoščale so majhne modifikacije karakteristik (modula elastičnosti), da se je račun izvedel. Menim, da so problematična razmerja med modulom elastičnosti, strižnim modulom in tlačno trdnostjo.

Da bi lahko z gotovostjo trdili, kaj je vzrok nenavadnih porušitev, in natančno definirali probleme programa, z rezultati modela gradu Grm to ni mogoče. Neznank oziroma različnih parametrov, ki

vplivajo na izračun, je preveč. Za boljše razumevanje delovanja programa bi bilo potrebno analizirati enostavnejši model in ga postopoma spreminjati oz. nadgrajevati. Potrebno bi bilo preveriti vpliv materialnih karakteristik (upoštevati različna razmerja med deformacijskimi in trdnostnimi karakteristikami), orientiranosti in togosti stropov v različnih smereh, itd. Predvsem bi bila v pomoč odprta koda programa.

Grad bi bilo možno obravnavati tudi ločeno, po posameznih traktih, vendar se pojavi vprašanje interakcije sosednjih traktov. Tak model bi lahko opravičili z dilatacijami med posameznimi trakti, kar pa v realnosti ni zagotovljeno. Posamezni trakti bi tudi nudili manjšo odpornost, saj so stene traktov večinoma usmerjene vzdolž ene smeri (v prečni smeri je sten malo, še posebno v južnem traktu).

Možna bi bila tudi analiza takega tipa stavbe z drugimi programskimi orodji. Objekt bi lahko obravnavali z metodo, ki glede na tipične konstrukcijske elemente definira makro bloke, ali pa s kontrolo lokalnih porušitev posameznih konstrukcijskih sklopov.

11 ZAKLJUČEK

Analiza objektov, kakršen je grad Grm, je zelo kompleksna. Potrebno je preučiti vse razpoložljive vire informacij. Pri diplomskem delu so mi bili v pomoč dokumenti, ki mi jih je posredoval Zavod za kulturno dediščino: poročilo o analizi materialno-tehničnega stanja in potresne odpornosti iz leta 2001, programska naloga za celovito prenovo gradu, konservatorski načrt in arhitekturni načrti obstoječega stanja gradu. Pri tako obsežnem objektu z zapleteno zasnovo pa je objekt mogoče spoznati šele na terenu z ogledom tako notranjosti kot tudi zunanosti. Ogled objekta razkrije poškodbe in potrebno je raziskati vzroke. Na omenjenem objektu je bilo potrebno opraviti dodatne meritve nekaterih odprtín (iz načrtov prečnih prereзов ni bilo mogoče razbrati višin). Prav tako se je potrebno seznaniti z umetniškimi elementi na konstrukciji kot so poslikave sten in štukature na stopovih, ki morajo pri obnovi ostati nepoškodovani. Komunikacija med projektantom in naročnikom oz. konservatorsko službo je bistvenega pomena.

Za modeliranje stavbe v programu je potrebno poznavanje številnih vhodnih podatkov. Potrebno je poznati natančno geometrijo objekta (pozicije in dimenzije nosilnih sten, odprtín, sestavo stropov, detajle stikovanja), koristne obtežbe prostorov (arhiv in prostori za javne prireditve pomenijo večjo obremenitev) in njihovo uporabo (določa pomembnost konstrukcije), mehanske karakteristike materialov (trdnostne in deformacijske parametre) in sestavo tal (za določitev potresne obtežbe). Večja kot je njihova natančnost in zanesljivost, boljši so rezultati analize. Zato so potrebne številne predhodne preiskave, kjer se razišče stavbni razvoj (faze gradnje), ugotovijo lastnosti vgrajenega materiala (npr. z in-situ tlačno preiskavo, in-situ strižno ali diagonalno preiskavo, dobro oceno omogoča tudi preiskava z dvema jeklenima blazinama), geometrijo stropov in povezanost konstrukcijskih elementov.

Analize, opravljene v okviru diplomske naloge, so pokazale, da je konstrukcija sposobna prenesti do 30% večji pospešek na račun boljšega poznavanja konstrukcije. Razlog za to je manjša redukcija materialnih karakteristik s faktorjem zaupanja, ki jo predpisujejo standardi. Izkazalo se je, da je odpornost konstrukcije v X in Y smeri odvisna tudi od orientiranosti in togosti stropov, zato je priporočljivo, da se njihova sestava in povezanost z zidovi na objektu natančno raziščeta. Na odpornost konstrukcije v posameznih smereh vpliva tudi velikost koristne obtežbe (arhiv predstavlja veliko maso). Opazimo tudi, da konstrukcija s togimi ploščami v večini primerov dosega večjo potresno odpornost. Pri tem se pojavi vprašanje primernosti analiziranja starih stavb s podajnimi stropovi z metodami, ki upoštevajo etažni mehanizem in togo diafragmo. Nadomeščanje podajnih stropov z betonskimi ploščami se je v praksi pokazalo kot neprimerno (betonska plošča je težja, kar pomeni večje vztrajnostne sile, pri potresu pride do poškodb v stenah), hkrati je tudi nesprejemljivo s konservatorskega vidika pri zaščitenih stavbah. Ukrepi na objektih, ki so kulturna dediščina, morajo biti reverzibilni, poseganje v strukturo spomenika pa mora biti čim manjše. Izbrani utrditveni ukrepi morajo biti v skladu s kulturno-varstvenimi pogoji.

Za analizo zidanih konstrukcij obstaja več vrst metod. Za globani odziv (kjer je upoštevana porušitev v ravnini) je najbolj primerna in ekonomična metoda z ekvivalentnimi okvirji. Predlagana metoda je učinkovita ob predpostavki dobre povezanosti zidov in preprečitve izvenravninske porušitve. Torej, priporočljivo bi bilo preveriti tudi lokalni odziv makroelementov. V ta namen bi bila najbolj uporabna linearna oziroma nelinearna metoda makroelementov (ang. macro-block models). Takšen tip konstrukcije je sicer možno obravnavati tudi z metodo končnih elementov, kjer je material opisan s homogeniziranimi konstitutivnimi zakoni ali pa so bloki in maltni stiki med njimi natančneje modelirani. Vendar pa so takšni modeli veliko bolj kompleksni, zanje potrebujemo večje število vhodnih parametrov ter so numerično precej zahtevnejši (in posledično za prakso predragi).

Vsekakor pa se je pokazalo, da se splača nekaj več investirati v predhodne raziskave, saj je z natančnejšimi podatki možno modelirati model, ki se bolje obnese ob potresu.

VIRI

Bosiljkov, V. et al. 2010. PERPETUATE-Performance-based approach to Earthquake protection of Cultural heritage in European and mediterranean countries: DELIVERABLE D6- Review of innovative techniques for the knowledge of cultural assets. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering.

Bosiljkov, V. et al. 2004. On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings. Deliverable D10.2 & 10.4, Report on the evaluation at pilot sites (Report for owners of historic buildings): pilot site: Pišce / Slovenia. Ljubljana, Zavod za gradbeništvo Slovenije, 178 f.

Calderini, C. et al. 2010. PERPETUATE-Performance-based approach to Earthquake protection of Cultural heritage in European and mediterranean countries: DELIVERABLE D7 - Review of existing models for global response and local mechanisms. University of Genova, Italy.

Fajfar, P. 2002. Poenostavljena nelinearna analiza konstrukcij pri potresni obtežbi. Gradbeni vestnik letn.51, št.11, str.302-314.

IRMA- Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije d.o.o. 2001. Poročilo o analizi materialno tehničnega stanja in potresne odpornosti konstrukcije gradu Grm v Novem mestu. Osebna komunikacija. (28. 3. 2013.)

Kržan, M. 2012. Laboratorijske preiskave troslojnih kamnitih zidov. Zbornik 34. Zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev, str. 203-210

Lagomarsino, S. et al. 2013. TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings. Engineering Structures 56, 1787-1799

Register nepremične kulturne dediščine. 2014. Ministrstvo za kulturo. <http://giskd2s.situla.org/rkd/Opis.asp?Esd=8677> (Pridobljeno 7. 3. 2014)

NTC. 2008. Norme Tecniche per le Costruzioni, D.M., Suppl. Ord. n°30 alla G.U. n°29, Sections extracted from the commentary to Italian National Technical Code

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 la costruzioni in zona sismica.

Sapač, I. 2008. Rekonstrukcijski posegi v historičnih urbanih naselbinah na Slovenskem. Doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta (samozaložba I. Sapač): 902 str.

SIST EN 1991-1-1: 2004. Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1 - 1. del: Splošni vplivi- Prostorninske teže, lastna teža, koristne obtežbe stavb.

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

SIST EN 1998-1: 2005/A101. Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij- 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe- Nacionalni dodatek.

SIST EN 1998-3: 2005. Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij- 3. del: Ocena in prenove stavb.

SIST EN 1998-3: 2005/A101. Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij- 3. del: Ocena in prenove stavb- Nacionalni dodatek.

S.T.A. Data. General description.

<http://www.3muri.com/3muri/documenti/3MuriGeneralDescription.pdf> (Pridobljeno 7. 3. 2014)

S.T.A. Data. 3Muri User manual v5.0.1.

http://www.adrianocastagnone.com/stadata/Aggiornamenti/3Muri/manuali/3Muri5.0.1_ENG.pdf
(Pridobljeno 7. 3. 2014)

Stopar, I. 2000. Grajske stavbe v osrednji Sloveniji [2], Dolenjska, Knj. 1, Porečje Krke. Ljubljana, Viharnik, Znanstveni inštitut Filozofske fakultete, str. 345.

Tomaževič, M. 2009. Potresno odporne zidane stavbe. Ljubljana, Tehnis.

Zakon o varstvu kulturne dediščine (ZVKD-1). 2008. Uradni list RS, št. 16/2008, Ljubljana, str.1121.

ZVKDS-Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije Restavratorski center. 2011. Konservatorski načrt, Mapa 01, Novo mesto – Grad Grm. Osebna komunikacija. (28. 3. 2013.)

ZVKDS-Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije. 2010. Programska naloga za celovito prenovo gradu, Novo mesto – Grad Grm. Osebna komunikacija. (28. 3. 2013.)

ZVKDS-Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije. Načrti obstoječega stanja gradu Grm. Osebna komunikacija. (28. 3. 2013.a)

ZVKDS-Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije. Fotografski posnetki fasad in prostorov gradu Grm. Osebna komunikacija. (28. 3. 2013.b)

ZVKDS-Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije. Sestave stropov v nadstropju gradu Grm. Osebna komunikacija. (6. 12. 2013.c)

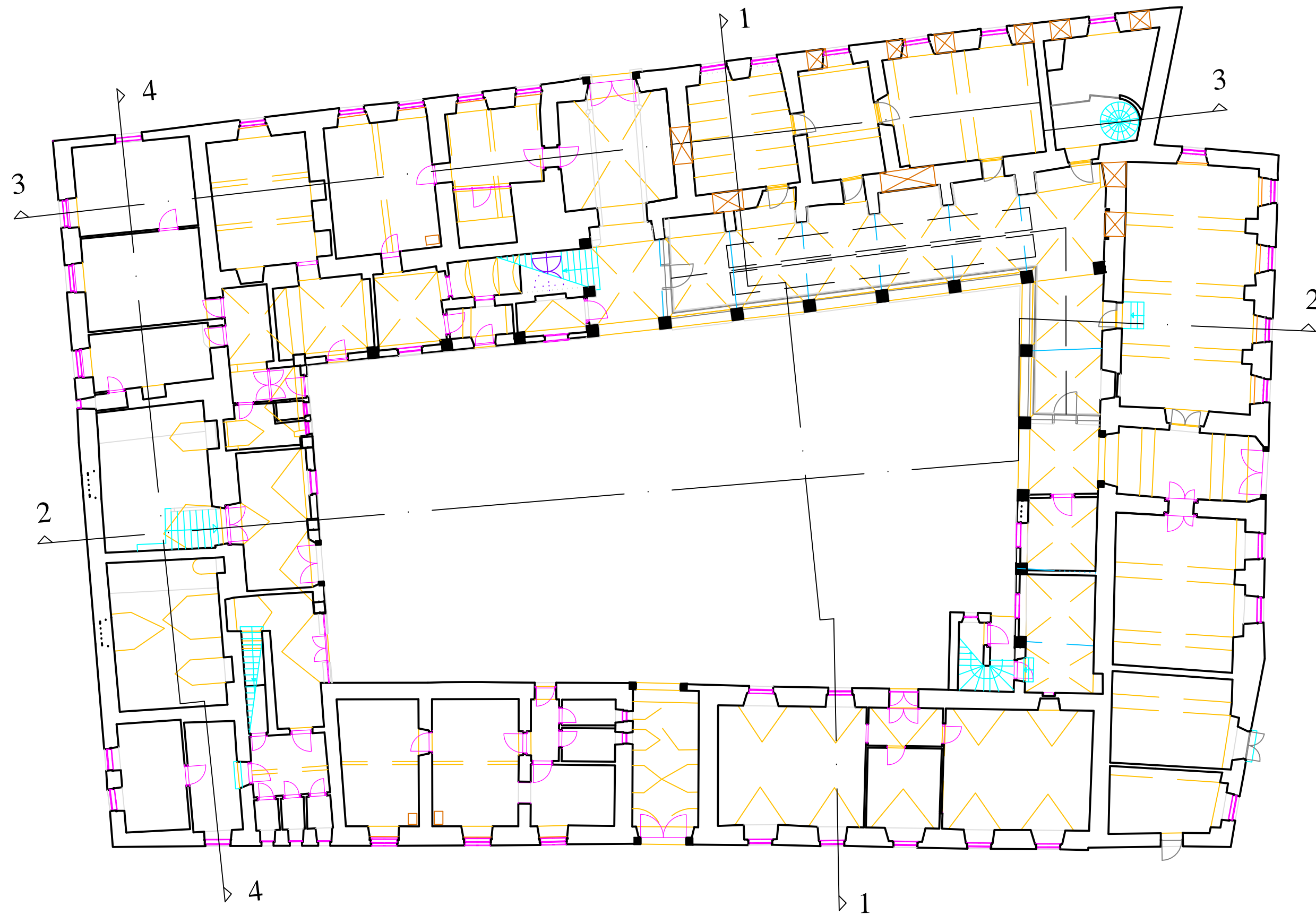
SEZNAM PRILOG

PRILOGA A: TLORIS PRITLIČJA GRADU GRM

PRILOGA B: TLORIS 1. NADSTROPJA GRADU GRM

PRILOGA C: VZDOLŽNI IN PREČNI PREREZ GRADU GRM

NOVO MESTO-GRAD GRM
POSNETEK OBSTOJEČEGA STANJA
TLORIS PRITLIČJA
z označenimi mesti prerezov
M 1:200



NOVO MESTO-GRAD GRM
POSNETEK OBSTOJEČEGA STANJA
TLORIS NADSTOPJA
z označenimi mesti prerezov
M 1:200



NOVO MESTO-GRAD GRM
POSNETEK OBSTOJEČEGA STANJA
PREREZ 2-2 IN PREREZ 3-3
M 1:200

PREREZ 2-2
Prečni prerez skozi Z in V trakt s pogledom na severno dvoriščno fasado



PREREZ 3-3
Vzdolžni prerez skozi S trakt

