

Usporedna analiza seizmičke otpornosti sakralne građevine oštećene u potresu

Kancijan, Matija

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:750146>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-06**

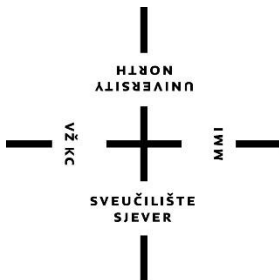


Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)



SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN



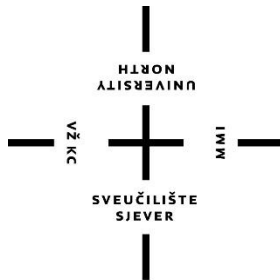
DIPLOMSKI RAD br.104/GRD/2024

**USPOREDNA ANALIZA SEIZMIČKE OTPORNOSTI
SAKRALNE GRAĐEVINE OŠTEĆENE U POTRESU**

Matija Kancijan

Varaždin, rujan 2024. godine

SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN
Diplomski sveučilišni studij Graditeljstva



DIPLOMSKI RAD br.104/GRD/2024

**USPOREDNA ANALIZA SEIZMIČKE OTPORNOSTI
SAKRALNE GRAĐEVINE OŠTEĆENE U POTRESU**

Student:
Matija Kancijan, 2843/336

Mentor:
izv.prof.dr.sc. Matija Orešković

Varaždin, rujan 2024.

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za graditeljstvo		
STUDIJ	diplomski sveučilišni studij Graditeljstvo		
PRISTUPNIK	Matija Kancijan	MATIČNI BROJ	2843/336
DATUM	26.08.2024.	KOLEGIJ	Tehnička dijagnoza
NASLOV RADA	Usporedna analiza seizmičke otpornosti sakralne građevine oštećene u potresu		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Comparative analysis of the seismic resistance of sacred building damaged in the earthquake		
MENTOR	dr.sc. Matija Orešković	ZVANJE	izv.prof.dr.sc.
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. izv.prof.dr.sc. Aleksej Aniskin 2. izv.prof.dr.sc. Matija Orešković 3. prof.dr.sc. Božo Soldo 4. doc.dr.sc. Goran Puž 5.		

Zadatak diplomskog rada

BROJ	104/GRD/2024
OPIS	Diplomskim radom potrebno je prikazati potresni izračun sakralne građevine kapele sv. Jakoba u Jakopovcu temeljem dvije različite metode, linearne i nelinearne analize. Usporedbom je potrebno iskazati prednosti i mane pojedinih proračuna kao i razlike u rezultatima. Rad se mora sastojati od: Uvod Općenito o potresnom djelovanju na građevine Tehnička obilježja sakralne građevine Identifikacija građevine Nacrti postojećeg stanja Geološki sastav tla i seizmičke karakteristike obuhvaćenog područja Snimak zatečenih oštećenja konstrukcije Analiza seizmičke otpornosti Analiza rezultata Zaključak

ZADATAK URUČEN 2.09.2024.



Predgovor

Tema rada motivirana je učestalom seizmičkom aktivnošću na području Republike Hrvatske te specifičnim strukturnim izazovima koje ona postavlja pred povijesne sakralne objekte. Sakralne građevine, zbog svoje starosti i ponekad složene arhitektonske konfiguracije i korištenih materijala, predstavljaju izazov u pogledu seizmičke otpornosti.

Cilj rada bio je provesti komparativnu analizu seizmičkog ponašanja oštećene sakralne građevine koristeći suvremene metode numeričkog modeliranja i analize pomoću dvaju računalnih programa 3Muri i Tower. U radu su razmatrane specifične karakteristike konstrukcija povijesnih sakralnih građevina, kao i rezultati provedenih analiza kroz prizmu seizmičkog djelovanja.

Radom je isključivo evaluirana i uspoređena otpornost konstrukcijskih elemenata kroz detaljnu seizmičku analizu, čime se nastoji pridonijeti razumijevanju ovakvih građevina pod seizmičkim opterećenjem.

Zahvaljujem svom mentoru izv.prof.dr.sc. Matiji Oreškoviću na stručnim savjetima i uputama koje su doprinijele izradi ovog rada. Također, zahvaljujem i svojoj obitelji i prijateljima na potpori tijekom cijelog studija.

Sažetak

Rad se bavi usporednom analizom seizmičke otpornosti sakralne građevine kapele sv. Jakoba u Jakopovcu, oštećene u potresu, korištenjem dvaju različitih softverskih programa: 3Muri i Tower. Cilj rada je ocijeniti preciznost i pouzdanost oba programa u procjeni seizmičke otpornosti te utvrditi njihove prednosti i nedostatke.

Analiza započinje detaljnim opisom sakralne građevine koja je pretrpjela značajna oštećenja tijekom nedavnog potresa. Zgrada je modelirana u oba softverska programa kako bi se simulirale seizmičke sile i procijenila njezina otpornost. Metodologija rada uključuje statičku i dinamičku analizu, pri čemu se posebna pažnja posvećuje nelinearnom ponašanju materijala i struktura preko programa 3Muri.

Rad se u analizi rezultata bavi usporedbom potresne otpornosti kroz tri različita postupka njezina dobivanja – gruba seizmička analiza, metoda postupnog guranja i metoda spektra odziva.

Ključne riječi: *nelinearna statička analiza, potres, potresno djelovanje, konstrukcije*

Summary

The paper deals with a comparative analysis of the seismic resistance of the sacral building of the chapel of St. Jakov in Jakopovac, which was damaged in the earthquake, using two different software programs: 3Muri and Tower. The aim of the paper is to evaluate the precision and reliability of both programs in the assessment of seismic resistance and to determine their advantages and disadvantages.

The analysis begins with a detailed description of the sacred building that suffered significant damage during the recent earthquake. The building was modeled in both software programs to simulate seismic forces and assess its resistance. The work methodology includes static and dynamic analysis, with special attention paid to the non-linear behavior of materials through the 3Muri program.

In the analysis of the results, the paper addresses the comparison of earthquake resistance through three different methods of obtaining it: rough seismic analysis, the gradual push method, and the response spectrum method.

Key words: *nonlinear static analysis, earthquake, seismic action, structures*

Popis korištenih kratica

EMS	Europska makroseizmička ljestvica
MCS	Mercalli-Cancani-Siebergova ljestvica
ML	Magnitudna ljestvica
SDOF	Ekvivalentni model s jednim stupnjem slobode

Sadržaj

1. Uvod	8
2. Općenito o potresnom djelovanju na građevine.....	10
2.1. Kvazistatička interpretacija (za pomaka sustava ulijevo).....	13
3. Tehnička obilježja sakralne građevine	16
3.1. Tehnički opis sakralne građevine	16
3.2. Identifikacija nekretnine	21
3.2.1. Prostorno planska dokumentacija	22
3.2.2. Izvadak iz registra kulturnih dobara RH	23
3.3. Nacrti postojećeg stanja	25
3.4. Geološki sastav tla i seizmičke karakteristike obuhvaćenog područja.....	33
3.5. Klasifikacija oštećenja	39
3.6. Faktor važnosti građevine	42
4. Snimak zatečenih oštećenja konstrukcije	43
5. Analiza seizmičke otpornosti	53
5.1. Grubi seizmički proračun	53
5.2. Metoda postupnog guranja.....	56
5.3. Metoda spektra odziva	82
5.4. Funkcija zatega kao mjera sanacije oštećenih zidova.....	111
6. Analiza rezultata	113
7. Zaključak (stil – Naslov 1).....	118
8. Literatura	120
9. Popis slika	121
10. Popis tablica	121

1. Uvod

Seizmička otpornost konstrukcije predstavlja temeljni aspekt inženjerske analize, osobito u seizmički aktivnim područjima. Tijekom posljednjih desetljeća, potresi su prouzročili znatne materijalne štete i ljudske gubitke, što dodatno naglašava važnost ovog segmenta. U tom kontekstu, precizna procjena seizmičke otpornosti građevina i njezino unapređenje postali su prioritetni zadaci građevinskih inženjera s ciljem minimizacije rizika te povećanja sigurnosti i trajnosti objekata u uvjetima seizmičkog djelovanja.

Ovaj rad je usmjeren na usporedbu seizmičke otpornosti sakralne građevine kapele sv. Jakoba u Jakopovcu, koja je pretrpjela oštećenja tijekom petrinjskog potresa 2020. godine, magnitude $ML=5,0$ i $6,2$, koristeći dva softverska programa za analizu konstrukcija: 3Muri i Tower.

3Muri je računalni program za analizu zidanih konstrukcija i konstrukcija mješovitog sustava (zide-beton) putem nelinearne statičke metode postupnim guranjem (tzv. *pushover* analiza) [1].

Pushover analiza sastoji se od niza nelinearnih statičkih proračuna za monotono rastuće bočno opterećenje. Potrebno je ostvariti ravnotežu krivulja poprečne sile i pomaka karakteristične točke. Bočno opterećenje nanosi se u oblicima: linearni trokutasti, modalni i jednoliki. Sposobnost se definira pomakom krova. Najveća sposobnost pomaka odgovara pomaku krova pri kojem je ukupna bočna otpornost (poprečna sila u podnožju) pala ispod 80 % najveće otpornosti konstrukcije zbog progresivnog oštećenja i sloma elemenata koji preuzimaju bočno opterećenje [2].

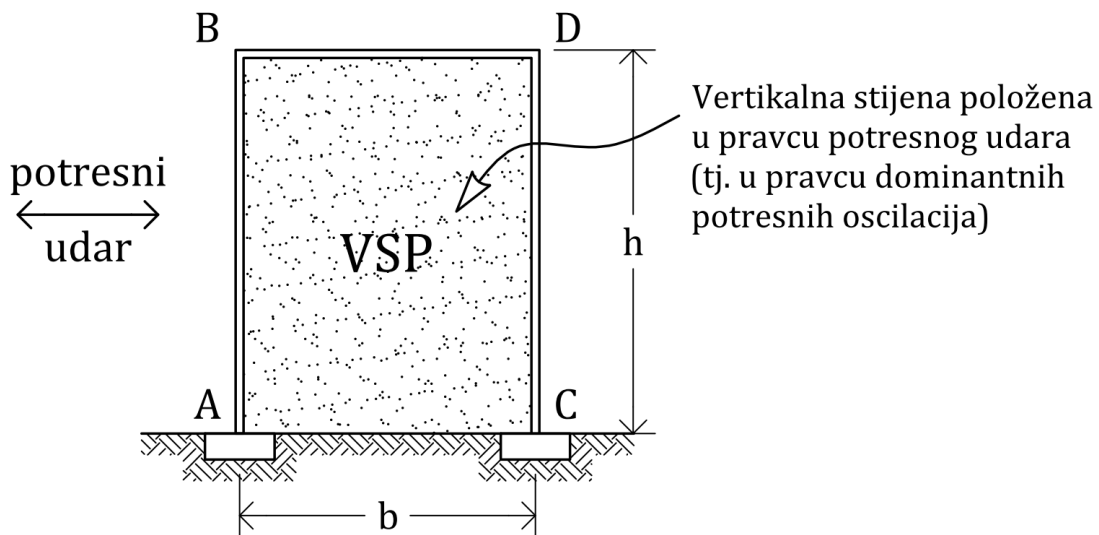
Tower je računalni program za statičku i dinamičku analizu konstrukcija te dimenzioniranje betonskih, čeličnih i drvenih elemenata. Tower je program za sveobuhvatnu analizu utjecaja u ravninskim i prostornim konstrukcijama [3].

U radu se opisuje metodologija koja je korištena za modeliranje građevine u oba programa. Prvo se predstavlja tehnički opis sakralne građevine koja se analizira, uključujući njezine osnovne karakteristike i specifičnosti, nacрте postojećeg stanja, geološki sastav tla lokacije, seizmičke karakteristike lokacije i snimak zatečenih stanja (oštećenja) konstrukcije. Potom se objašnjava metodologija statičke i dinamičke analize koja je primijenjena u oba računalna programa.

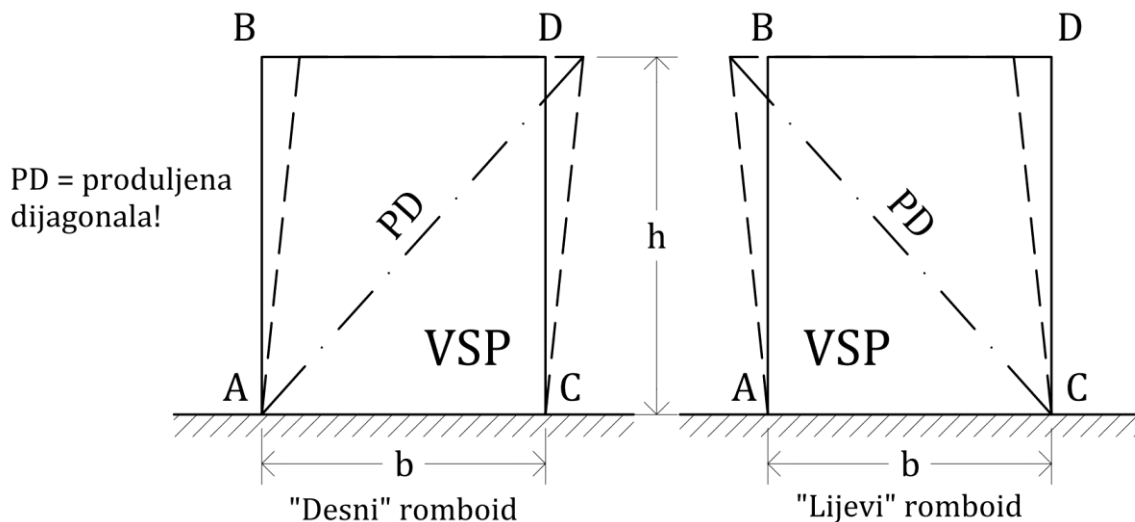
Analiza rezultata fokusirana je na usporedbu pokazatelja seizmičke otpornosti, uključujući pomake, naprezanja i oštećenja. Posebna se pažnja posvećuje identificiranju kritičnih točaka konstrukcije koje su najosjetljivije na seizmička opterećenja. Komparativna analiza također uključuje diskusiju o prednostima i nedostacima svakog računalnog programa, uzimajući u obzir njihovu preciznost, pouzdanost i vrijeme potrebno za analizu.

2. Općenito o potresnom djelovanju na građevine

Pod utjecajem oscilacija uzrokovanih potresom, zid VSP (tj. pravokutnik omeđen linijama ABDCA) usklađivat će se s tim vibracijama, pri čemu će mijenjati svoj oblik iz pravokutnog u „desni“ romboid, pa opet u pravokutnik, a potom u „lijevi“ romboid i opet povratno u pravokutnik [4].

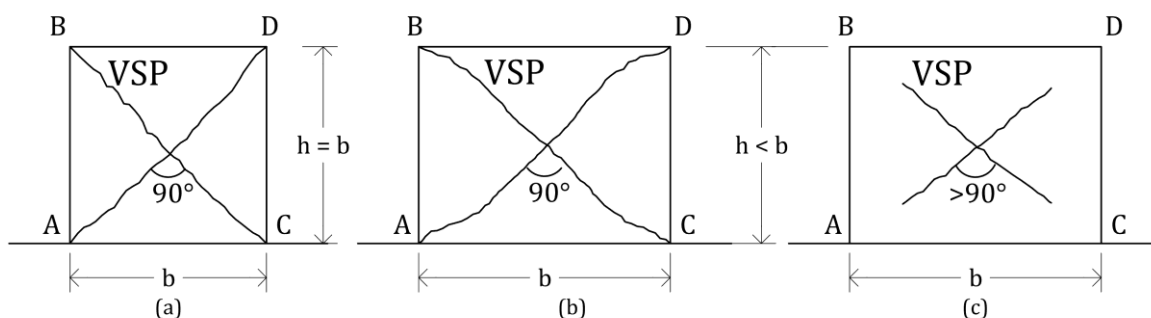


Slika 1. Vertikalna stijena kao ispuna unutar pravokutnika ABDCA [4]



Slika 2. Naizmjenične pretvorbe pravokutnika u romb [4]

Linija PD (produžena dijagonala pravokutnika, a sada romboida) pokazuje smjer u kojem se dogodilo glavno razvlačenje zida. Vlačne pukotine će se otvarati otprilike okomito ili gotovo okomito na taj smjer. Otvaranje tih pukotina također ovisi o prethodno određenim linijama najmanjeg otpora (u smjeru rastezanja zida), što uvelike zavisi o omjeru stranica pravokutnog zida (b i h), a zatim o postojećim otvorima u zidu (kao što su vrata i prozori), te o neujednačenosti trenutne kvalitete zida [4].

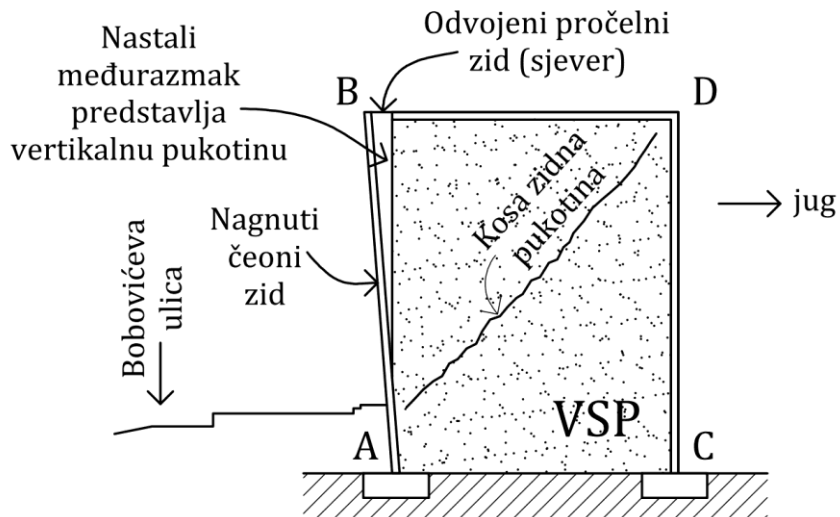


Slika 3. Pojava ukriženih pukotina [4]

Kod ujednačenih oscilacijskih uvjeta, a kod zida kvadratnog oblika, doći će do pojave dijagonalno-križnih pukotina (a), dok će se kod horizontalno izduženih pravokutnika križne pukotine pojaviti u srednjem dijelu zida (b) ili će kut pukotinskog križanja odstupiti od 90° (c) [4].

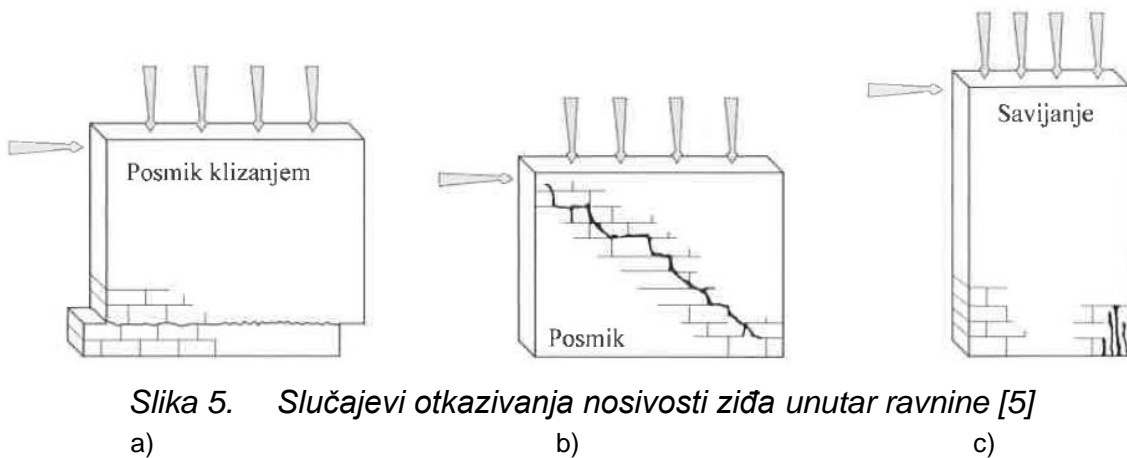
U slučajevima kada zid nema ujednačene pridržajne uvjete na bočnim vertikalama, kada je npr. manja otpornost na lijevoj vertikali (AB), tada će doći do tendencije većeg produljenja dijagonale na pravcu CB, a to će onda značiti da će takvo produljenje biti popraćeno jačom (ili čak jedinom) pukotinom u smjeru AD [4].

Ako u svemu tome dođe i do popuštanja otpornosti duž vertikale AB, tada će se pukotina u dijagonalnoj zoni AD dodatno uvećati, a s njom povezana (konjugirana) križna pukotina neće se ni pojaviti [4].



Slika 4. Primjer asimetrične otpornosti [4]

Na slici 5 prikazana su tri načina otkazivanja nosivosti zida u ravnini. Radi se o zidu koji je opterećen ekscentričnim tlakom. Prilikom potresnog djelovanja javlja se horizontalna sila koja, zajedno s ekscentričnim tlakom, stvara kombinaciju djelovanja.



Slika 5. Slučajevi otkazivanja nosivosti zida unutar ravnine [5]

a)

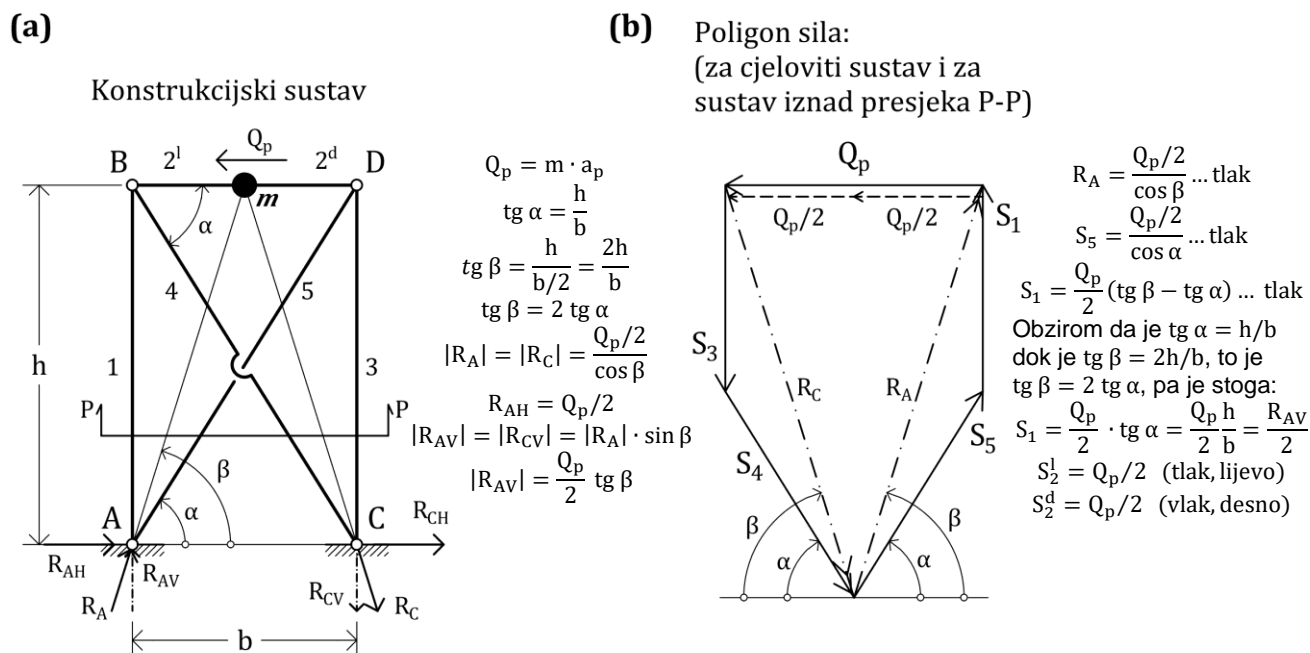
b)

c)

Slom prikazan pod a) predstavlja čisti pomak koji se javlja pri nižim vrijednostima vertikalne tlačne sile. Slom pod b) opisuje vlačni ili posmični dijagonalni kvar, koji je najčešći u praksi. U slučaju c) dolazi do vlačnog popuštanja na lijevoj strani i tlačnog drobljenja na desnoj strani zida, što je posljedica kombinacije visokih vrijednosti momenta savijanja i/ili tlačne sile.

2.1. Kvazistatička interpretacija (za pomaka sustava ulijevo)

Ako se iscrtava pojednostavljeni statički sustav kao na priloženoj skici, te ako se uloga zida zamijeni s dvije ukrižene dijagonale (koje poput zida ukružuju okvirnu konstrukciju), tada će za potresno opterećenje Q_p (koje se zbog pojednostavljenja veže uz cjelovitu masu m na sredini gornje grede zglobnog okvira) uravnoteženje sila biti iskazano uz pomoć poligona sila [4].

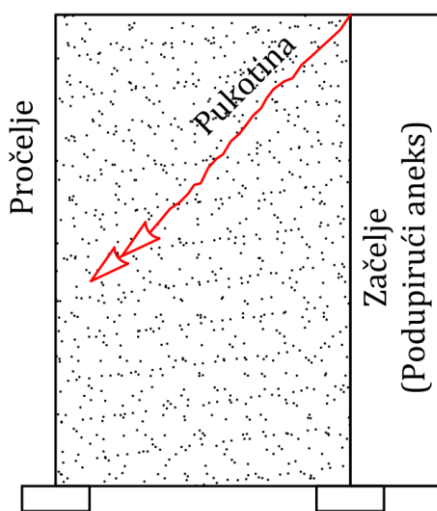


Slika 6. Idealizirana statička shema [4]

Bitno je uočiti da u štapu br. 4 djeluje vlačna sila, što znači da u štapu br. 5 mora djelovati tlačna sila (pri pomaku okvira ulijevo!), pa je stoga situacija kao na slici 6. Vlačna reakcija R_C u temelju C ne bi se mogla ostvariti da zgrada nema vlastitu težinu, pa će stoga potresna komponenta rezultante (R_C) u temelju C biti kompenzirana kroz odgovarajući dio vlastite težine objekta [4].

Ako se na nosivim zidovima (koji su barem približno položeni na pravac glavnog potresnog udara, tj. ako se nalaze na pravcu dominantnih potresnih oscilacija) mogu uočiti ukrižene, odnosno konjugirane dijagonalne pukotine, to je znak da građevina pruža podjednaki otpor na tzv. lijevi i desni potresni pomak [4].

Ako pak postoje samo pukotine jednog usmjerenja (jednodijagonalne pukotine), tada će one nedvojbeno ukazati na to koja strana građevine ima manju, a koja veću otpornost [4].



Slika 7. Shematski prikaz jednosmjerne pukotine [4]

U smjeru pada pukotine nalazi se ona strana građevine na kojoj je protupotresni otpor manji u odnosu na onu drugu otporniju stranu građevine. Može se reći da je ta strana građevine prema kojoj pada pukotina temeljena na nedostatnoj otpornosti tla na potresne oscilacije [4].

Postoji realistična pretpostavka da bi se adekvatnim geotehničkim sanacijskim zahvatom duž te oslabljene fronte mogla znatno povećati protupotresna otpornost objekta [4].

Statička analiza provedena je na krajnje pojednostavljenoj shemi zglobno povezanih štapova (zglobovi A,B,C i D). To je idealizirana zglobna veza koja rezultira kosim reakcijama temeljnog sustava (zglob A i zglob C) uslijed djelovanja potresne sile Q_p :

$$|R_A| = |R_C| = \frac{Q_p/2}{\cos \beta}$$

pri čemu je horizontalna komponenta $R_H = Q_p/2$, dok vertikalna komponenta iznosi:

$$|R_{AV}| = |R_{CV}| = |R_A| \cdot \sin \beta = \frac{Q_p}{2} \operatorname{tg} \beta$$

Ako se na mjestima A i C pretpostavi potpuno uklještenje konstrukcije u temeljno tlo, tada će iščeznuti vertikalne komponente reakcije ($R_v=0$) uslijed djelovanja sile Q_p , dok će horizontalne i dalje ostati iste, tj. $R_H = Q_p/2$, no zato će na svaki od dva temelja (A i C) djelovati moment uklještenja:

$$M_{Tu} = \frac{1}{2} Q_p \cdot h$$

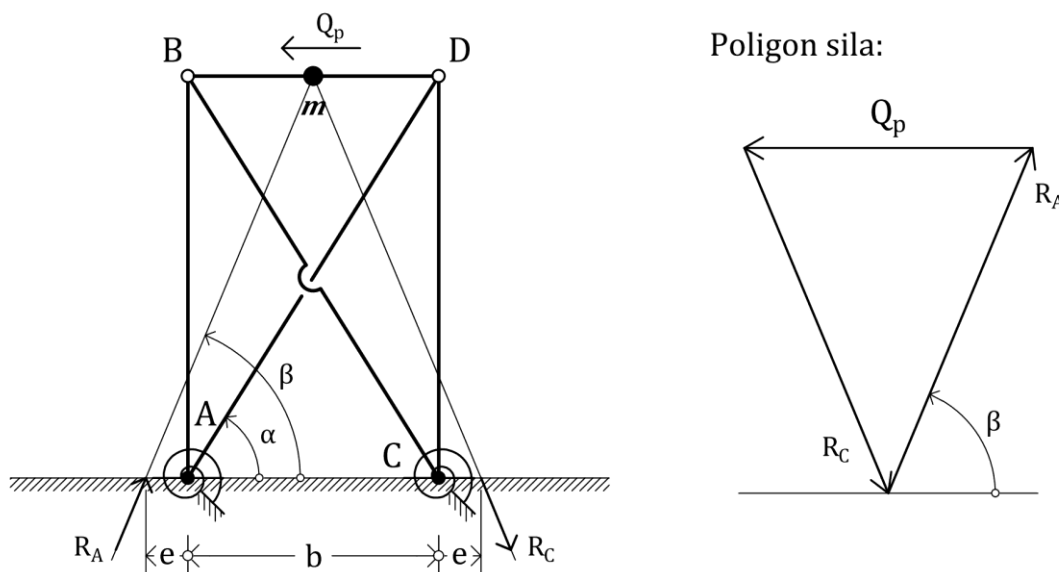
Ako je pak konstrukcija elastično upeta u temeljno tlo, smanjit će se djelujući moment na svaki od dva temelja i iznositi će:

$$M_{TEu} = \eta M_{Tu} = \frac{1}{2} \eta (Q_p \cdot h) = \eta h (Q_p/2)$$

pri čemu je η koeficijent elastične upetosti koji može poprimiti neku vrijednost u rasponu:

$$0 \leq \eta \leq 1$$

Valja primijetiti da će kut β izravno ovisiti o koeficijentu η (skica 5).



Slika 8. Shema konstrukcije koja je elastično upeta u temeljima A i C [4]

3. Tehnička obilježja sakralne građevine

3.1. Tehnički opis sakralne građevine

Kapela sv. Jakoba u Jakopovcu je jednobrodna građevina s nižom i užom polukružnom apsidom i zvonikom iznad zapadnog ulaza. Sa sjeverne strane nalazi se sakristija. Zvonik je zidan unutar tlocrta osnovnog dijela kapele, iznad prostora kora. Spominjanje kapele seže u popis župa 1334. godine („Item ecclesia sancti Jacobi, prope ibidem“), kao i godine 1501. te 1513. [6].

Kapela je smještena istočno od ceste koja se penje kroz gornji dio naselja Jakopovec, na povišenom dijelu od ceste, te od groblja koje se nalazi na istočnoj strani padine tog brežuljka. Sa sjeverne strane kapele u taj je brežuljak usječen put koji vodi prema podnožju groblja, a koji je s vremenom produbljivan. Danas su vidljivi tragovi puzanja i klizanja zemlje na kosini uz potporni zid uz cestu, visine 1.5 do 2.0 m iznad nje, a na njegovom sjevernom dijelu su također vidljivi znakovi popuštanja od tlaka tla.

Kor, ulazni dio i zvonik dograđeni su sredinom XIX. stoljeća (natpis na ogradi kora spominje godinu 1831.), kada je kapela vjerojatno dobila izgled kakav je vidljiv danas. Dimenzije pretpostavljenog srednjovjekovnog dijela kapele bile bi 10,0 m x 5,0 m u lađi, dok je svetište tlocrtno široko 3,5 m, a duboko 2,8 m. Svi zidovi su debljine približno jednog metra. Oblikovne značajke svetišta i lađe, njihove dimenzije, debljina zidova, veličina cijele stare kapele, sve to upućuje na njezinu gradnju negdje tijekom XII. ili početkom XIII. stoljeća, premda za sada nisu poznati povijesni dokumenti koji bi to potvrdili. Sakristija, prigradna sa sjeverne strane, ima zidove iste debljine kao i kapela, te je neuobičajeno prostrana. Zbog teškog pristupa krovu sakristije, trenutno se ne mogu utvrditi eventualni ostaci koji bi upućivali da je to bilo prizemlje neke više građevine, možda tornja, ili je čak možda ostatak nekog većeg kompleksa uz kapelu.

Unutrašnjost kapele presvođena je češkim kapama, jedna iznad kora, a četiri u lađi. Svetište je nadsvođeno polu-kalotom.

Kapela ima jednostavna, glatka pročelja, na južnoj strani raščlanjena samo s dva polukružno završena otvora s kamenim okvirima, koji potječu iz XIX. stoljeća. Na starijim fotografijama vidi se još jedan uski kvadratni prozor, smješten na nešto nižoj razini od navedena dva prozora i bliže svetištu. On je u recentnoj obnovi fasade zazidan. Dio svetišta i sjeverni zid kapele su glatki, bez vidljivih profilacija ili otvora.

Zapadno pročelje raščlanjeno je ulazom s kamenim okvirom, pravokutnim prozorom iznad njega te okulusom u zabatu. Zvonik se izdiže iz pročelja, rastvoren je polukružnim otvorima u gornjoj zoni, te završava piramidom s željeznim križem na vrhu. Na starim se fotografijama može vidjeti da je kapela građena kamenom lomljencem, s klesanim ugaonim kvadrima. Nažalost, posljednja obnova kapele nije provedena prema konzervatorskim uvjetima, te nije izrađena ni kvalitetna fotodokumentacija kapele u trenutku skidanja stare žbuke, a nova cementna žbuka neprimjerena je povijesnim građevinama, te je već nakon nekoliko godina izazvala oštećenja na boji zbog vlage zaostale u zidovima. Cjelokupna unutrašnjost, zidovi i svodovi u lađi i svetištu te korska ograda ukrašeni su žbukorezom koji je izveo varaždinski slikar Julije Merlić 1949. godine. Zbog tog umjetničkog rada u unutrašnjosti je nemoguće izvesti sondiranja radi utvrđivanja eventualnih ranijih slojeva žbuke, istraživanja na građevinskom materijalu ili stvarnog stanja pukotina u zidovima.

Prema oblikovnim elementima, zaključak jest da je građevina vjerojatno izgrađena u XII. ili početkom XIII. stoljeća. Budući da je Jakopovec bio župa u XIV. stoljeću (što podrazumijeva veći broj žitelja, dakle i veću crkvu), te je na temelju vizualnog pregleda kapele izvana i iznutra vidljivo da je osnovni, srednjovjekovni korpus kapele očuvan, iako nema mnogo pisanih izvora koji bi to potvrdili. Taj osnovni dio kapele čini dio gdje se nalazi svetište i dio lađe, do kora. Ta je kapela, u gotovo nepromijenjenim gabaritima, očuvana sve do danas.



Slika 9. Frontalni pogled na kapelu s istaknutim pročeljem



Slika 10. Prikaz sjevernog pročelja



Slika 11. Prikaz južnog pročelja



Slika 12. Prikaz zapadnog pročelja



Slika 13. Prikaz istočnog pročelja



Slika 14. Šira situacija istočne (stražnje) strane kapele

3.2. Identifikacija nekretnine



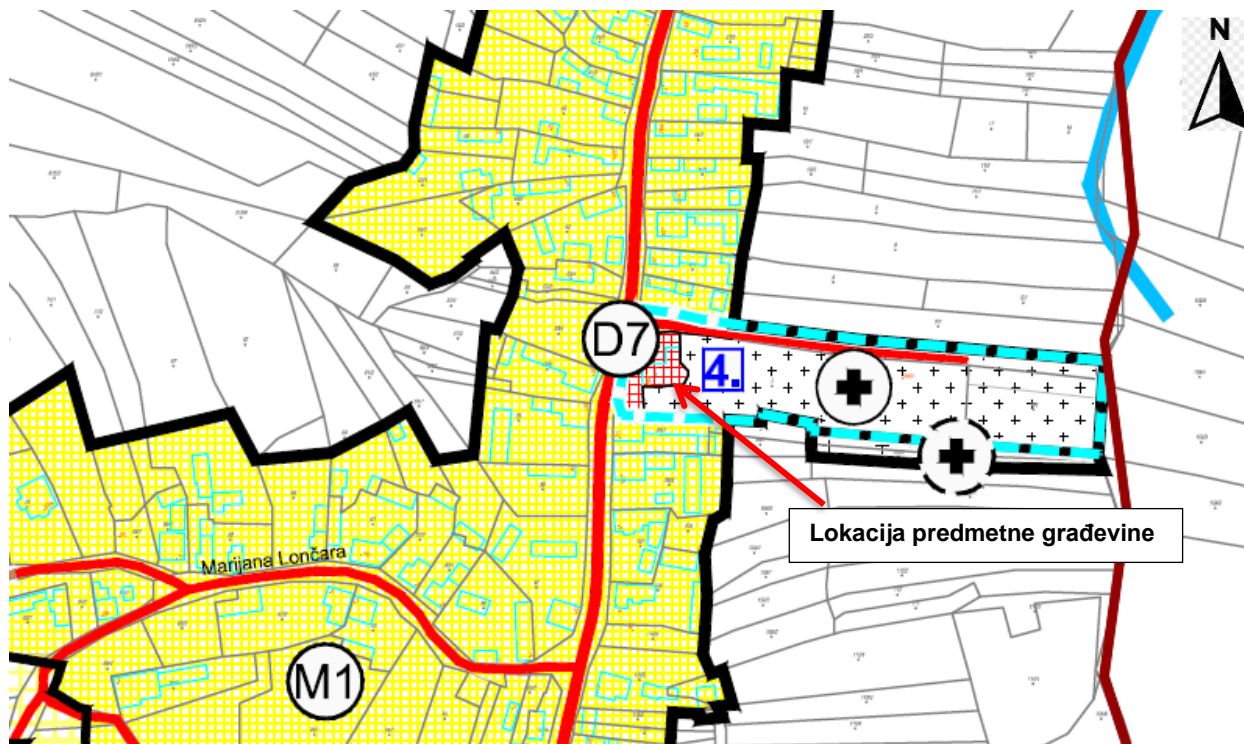
Slika 15. Prikaz mikrolokacije predmetne katastarske čestice (izvor: <https://geoportal.dgu.hr/>)



Slika 16. Prikaz makrolokacije predmetne katastarske čestice (izvor: <https://geoportal.dgu.hr/>)

3.2.1. Prostorno planska dokumentacija

Prema prostornom planu uređenja Općine Jalžabet („Službeni vjesnik Varaždinske županije“, broj 41/04, 9/06, 34/12, 45/16 i 18/23), predmetna katastarska čestica nalazi se unutar registriranih kulturnih dobara: 1. Crkva sv. Jakova – Z-1237, Jakopovec.



Slika 17. Prikaz mikrolokacije prema namjeni PPU Općine Jalžabet [7]

UREĐENJE I ZAŠTITA

REGISTRIRANA KULTURNA DOBRA:



1. Kapela sv. Klementa - Z-1440, Kelemen
2. Pil sv. Florijana - Z-1930, Kelemen
3. Arheološko nalazište Blizna - Z-6319, Jakopovec
4. Crkva sv. Jakova - Z-1237, Jakopovec
5. Pil sv. Jakoba - Z-1932, Jakopovec

3.2.2. Izvadak iz registra kulturnih dobara RH

Ministarstvo kulture i medija

Web Registar kulturnih dobara RH

Opći podatci

Naziv dobra: Crkva sv. Jakova
Naziv dobra (eng):
Lista i registarski broj: Nepokretna pojedinačna, Z-1237
Pravni status: Zaštićeno kulturno dobro
Vrsta: Nepokretna pojedinačna
Klasifikacija: sakralne građevine
Datacija: 14 st. n.e. - 19 st. n.e.
Autor:
UNESCO:

Smještaj kulturnog dobra

Županija: Varaždinska županija
Grad/općina: JALŽABET
Adresa: Jakopovec, VINOGRADSKA

Nadležni konzervatorski odjel

Naziv KO: Konzervatorski odjel u Varaždinu za područje Varaždinske županije i Međimurske županije
Adresa KO: Gundulićeva 2
Telefon: 042 201 850
e-mail: vesna.pascuttini-juraga@min-kulture.hr

Podatci na datum: 07.09.2024.

Podatci nisu službeni i mogu se koristiti isključivo u informativne svrhe.

Slika 18. Izvod iz registra kulturnih dobara Republike Hrvatske
(izvor: <https://registar.kulturnadobra.hr/#/>)

**Opis**

Kapela sv. Jakova u središtu je naselja, na maloj čistini, s grobljem iza apside. Kapela se spominje u popisu župa 1334. godine. Današnja građevina još je očuvala gabarite srednjovjekovne crkve, sa dogradnjom u 1. pol. 19. st. Pravilno je orijentirana, jednobrodna s nižom i užom, polukružno završenom apsidom i tornjem iznad ulaza. Cjelokupna je unutrašnjost ukrašena žbukorezom s vegetabilnim motivima i motivima anđela i anđeoskih glavica, koje je izveo varaždinski slikar Julije Merlić 1949.

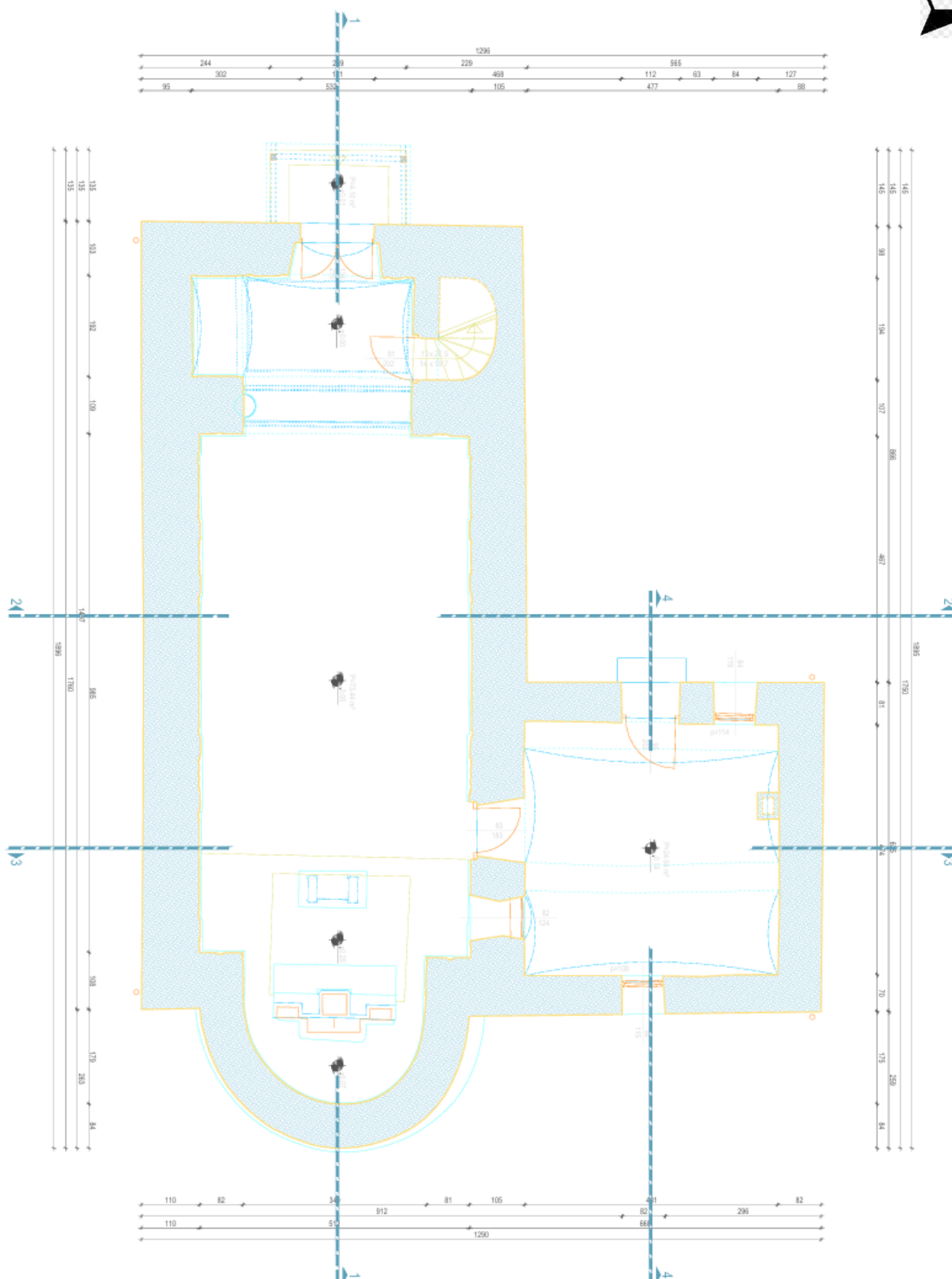
Opis (eng)

Podatci na datum: 07.09.2024.

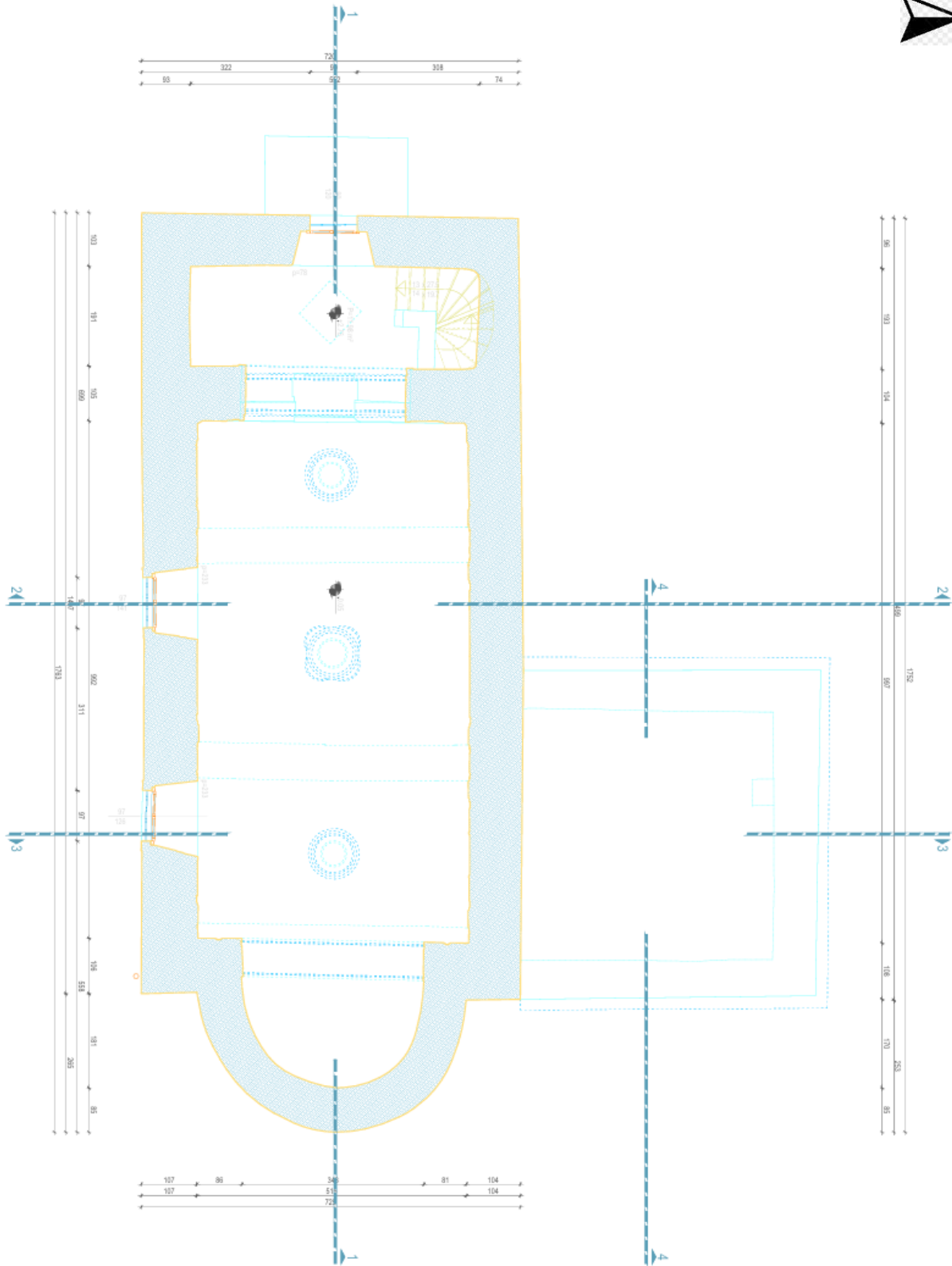
Podatci nisu službeni i mogu se koristiti isključivo u informativne svrhe.

Slika 19. Izvod iz registra kulturnih dobara Republike Hrvatske
(izvor: <https://registar.kulturnadobra.hr/#/>)

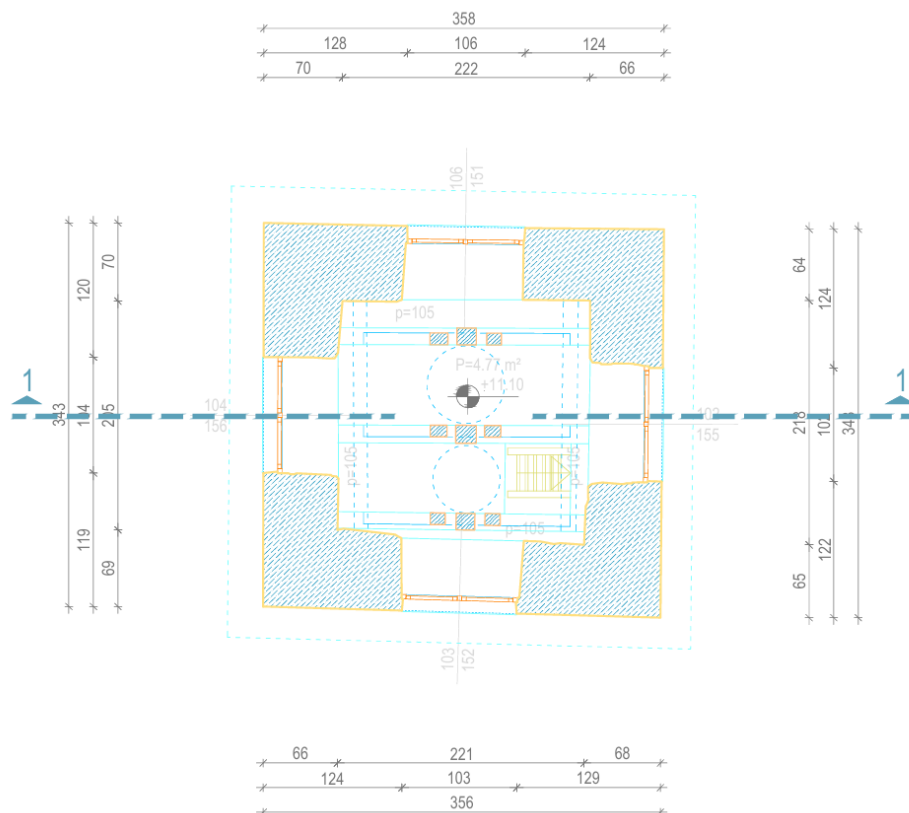
3.3. Nacrti postojećeg stanja



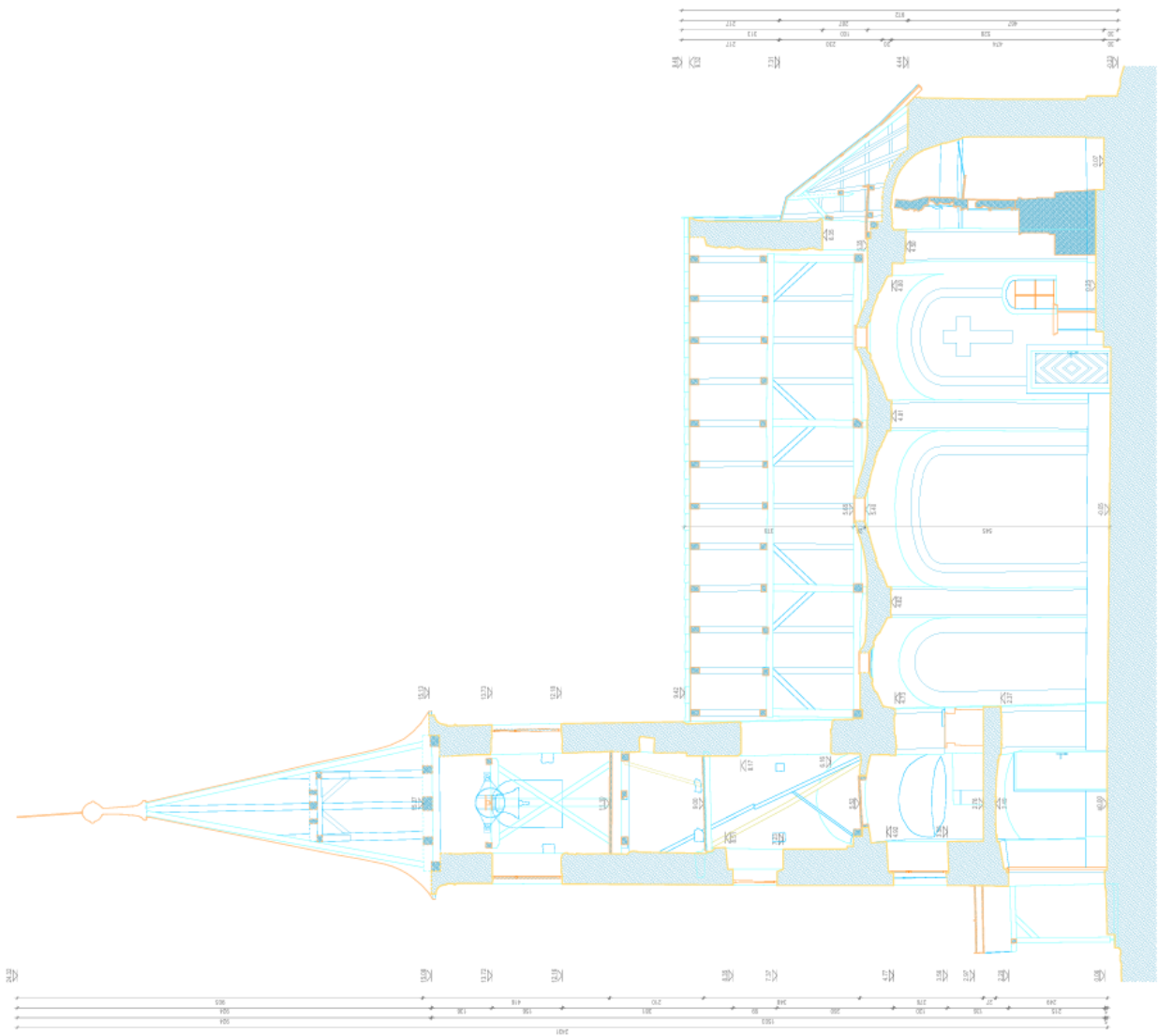
Slika 20. Tlocrt prizemlja kapele - postojeće stanje



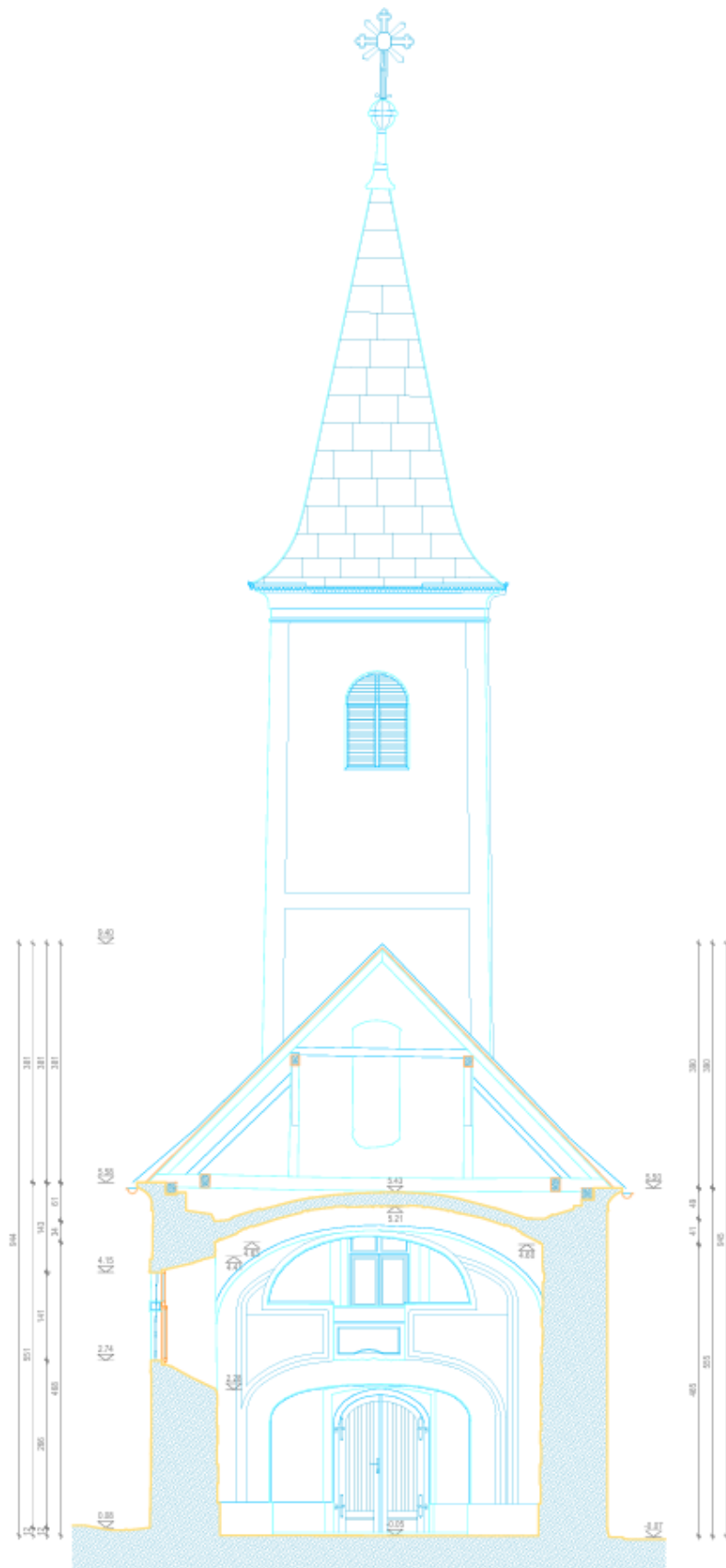
Slika 21. Tlocrt pjevališta – postojeće stanje



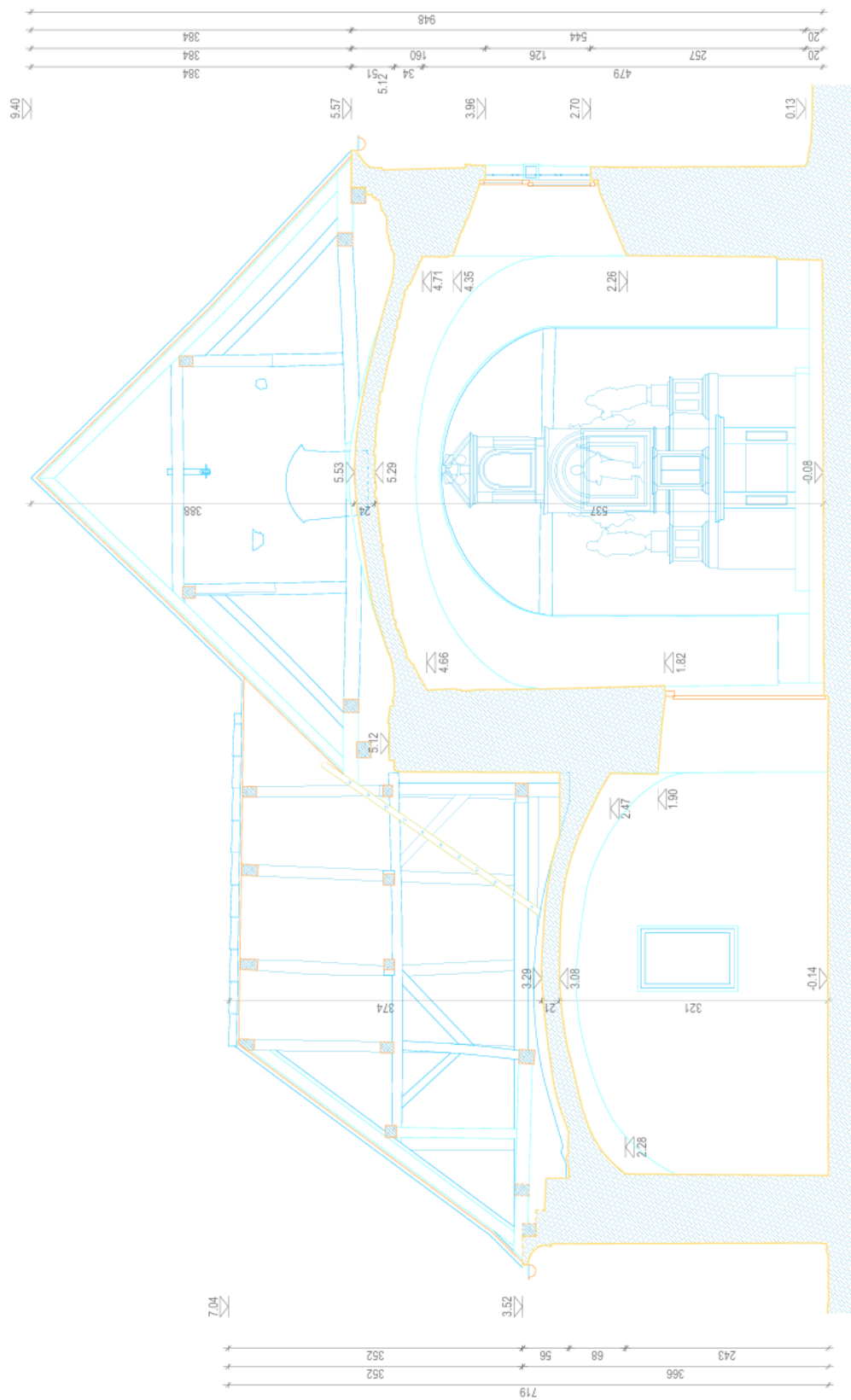
Slika 23. Tlocrt zvonika – postojeće stanje



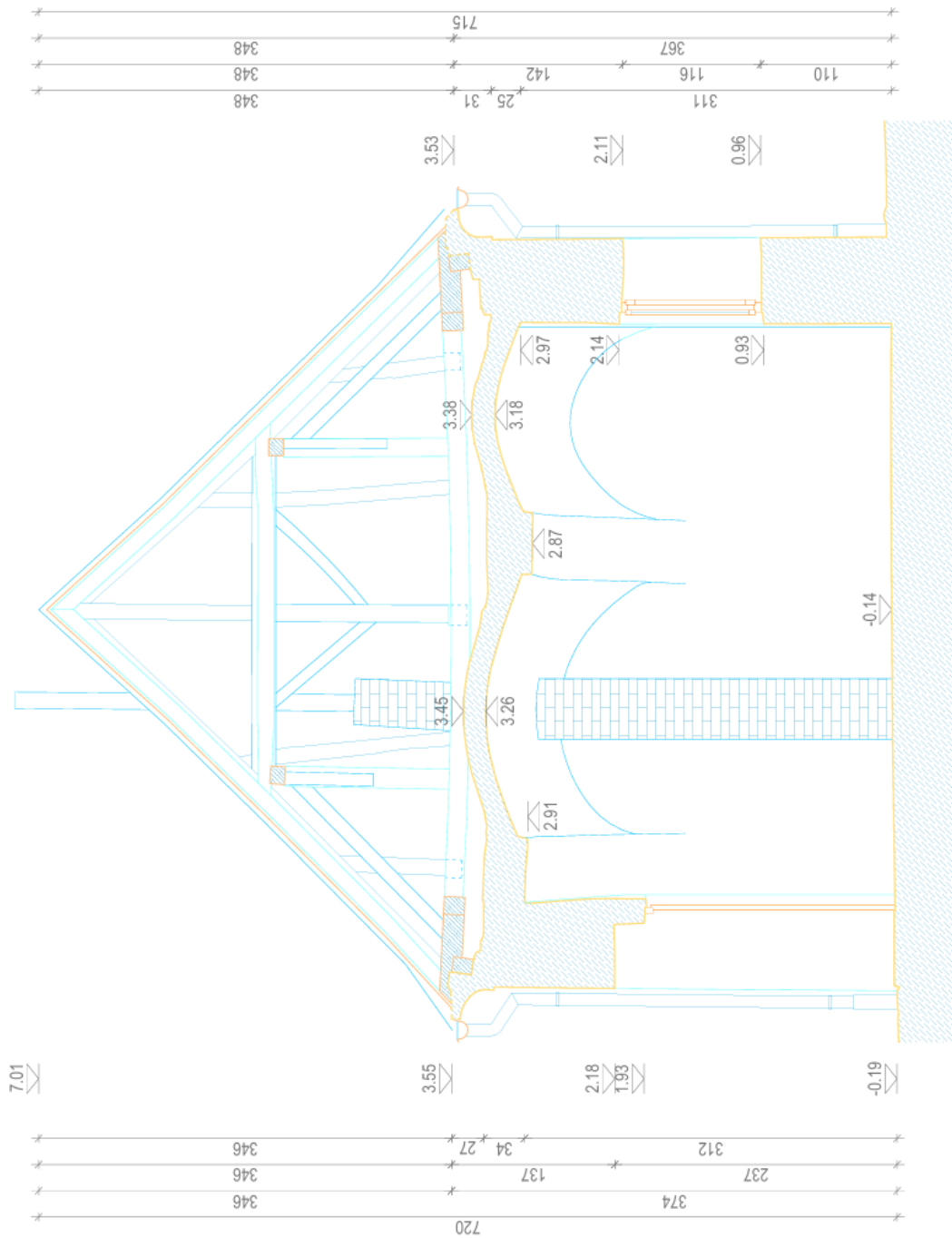
Slika 24. Presjek 1-1 – postojeće stanje



Slika 25. Presjek 2-2 - postojeće stanje



Slika 26. Presjek 3-3 – postojeće stanje



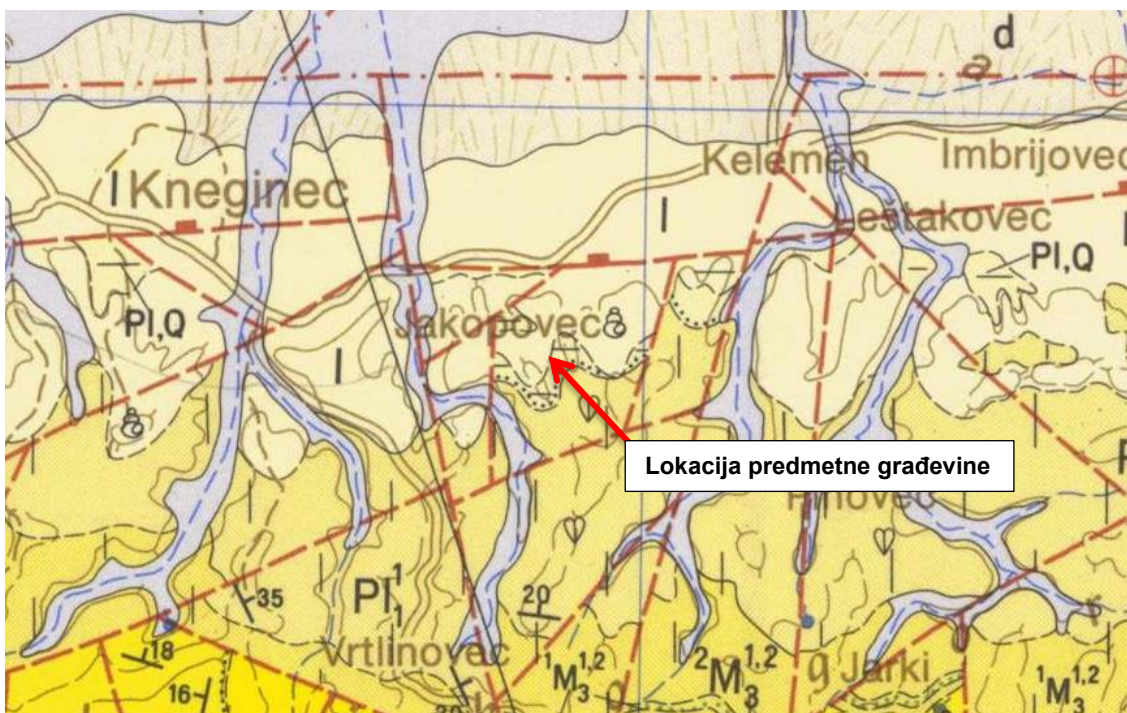
Slika 27. Presjek 4-4 – postojeće stanje

3.4. Geološki sastav tla i seizmičke karakteristike obuhvaćenog područja

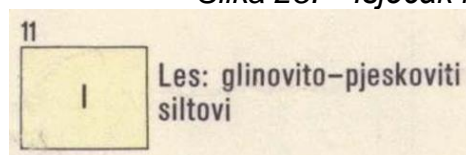
Pregledom osnovne geološke karte promatranog područja vidljivo je da se predmetna zgrada nalazi na području geoloških struktura nastalih u doba pliocena.

Promatrano područje ima geološku građu koja se sastoji od lapora s rijetkim proslojcima pijesaka i pješčenjaka, pijesci s proslojcima pjeskovitih lapora i pješčenjaka [7].

U geološkoj građi terena prema osnovnoj geološkoj karti na području lista Varaždin sudjeluju stijene gornjeg paleozoika, trijasa, jure, krede, paleogena, neogena i kvartara [7].

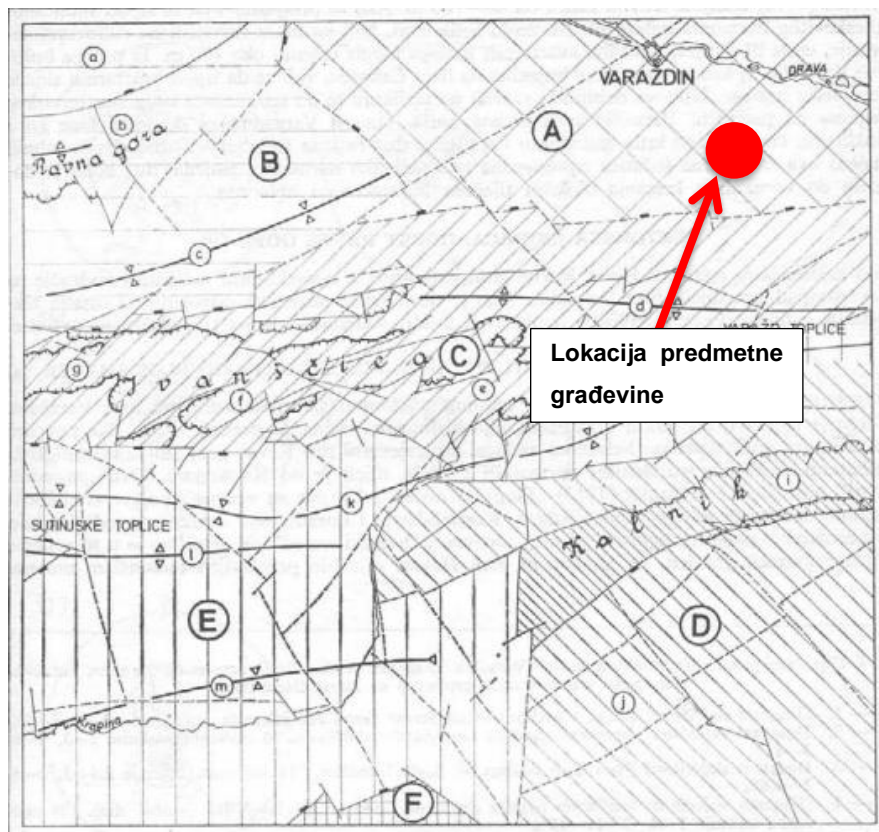


Slika 28. Isječak iz osnovne geološke karte – list Varaždin [8]

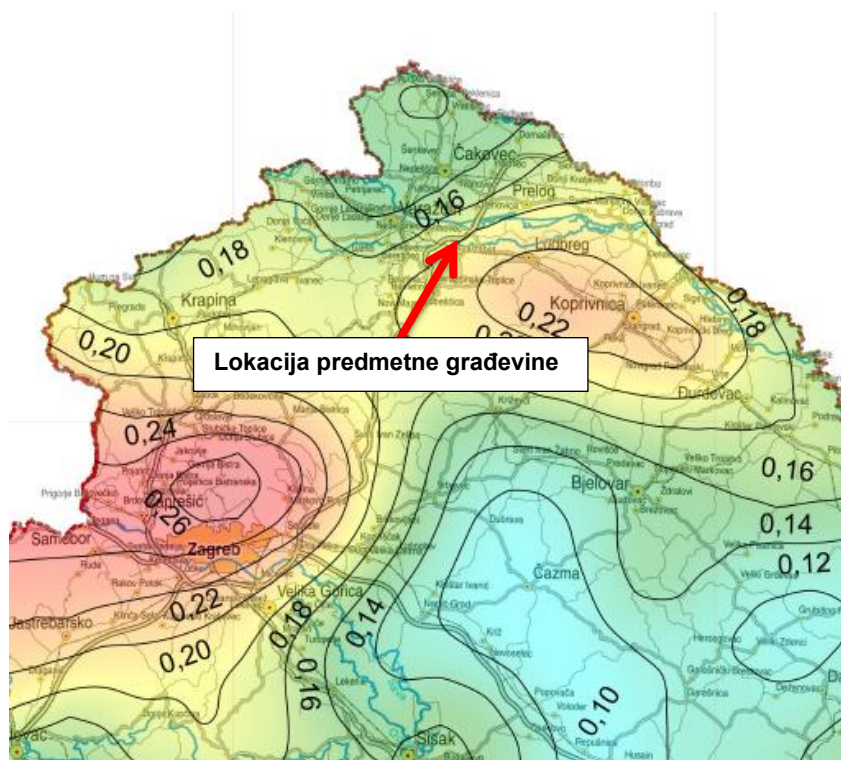


Predmetna lokacija kapele svetog Jakoba u Jakopovcu prema tektonskoj jedinici pripada dravskoj potolini (označena slovom A); strukturne jedinice: Varaždinska depresija. Područje lista Varaždin podijeljeno je u 6 tektonskih jedinica te obuhvaća jedno od tektonski najkompliciranijih područja u sjevernoj Hrvatskoj. Tektonske su jedinice sastavljene od strukturnih jedinica. Ove tektonske cjeline međusobno su odvojene normalnim i reversnim rasjedima [8].

Dravska potolina predstavlja izduženo područje, uglavnom dinarskog smjera pružanja (sjeverozapad-jugoistok). Njezin manji dio, koji ima alpski smjer (istok-zapad) nalazi se na listu Varaždin. To područje je već D.Gorjanović-Kramberger (1902.) nazvao Varaždinska depresija. Od ostalih jedinica odvojena je vrlo izraženim normalnim rasjedima smjera istok-zapad (Jalžabet-Tužno) i sjeverozapad-jugoistok (Tužno-Gornje Ladanje). Varaždinska depresija spuštana je tijekom kvartara i ispunjena aluvijalnim dravskim sedimentima. Prema K. Urumoviću (1971.) debljina aluvija varira od 80 do 100 m. Ako se pretpostavi da se ispod šljunčano-pjeskovitog horizonta nalaze pleistocenski sedimenti, koji su inače razvijeni na rubovima depresije, onda bi ukupna debljina kvartarnih naslaga mogla iznositi oko 150 m. Iz profila bušotine Varaždin-1, kao i većeg broja bušotina na listu Čakovec, vidi se da ispod kvartarnih slijede neogenske naslage. Njihove debljine i razvoj ne razlikuju se od sedimenata istog stratigrafskog raspona na području Varaždinsko-topličkog gorja. One u Varaždinskoj depresiji čine kosu sinklinalu, čije je južno krilo rasjednuto i spuštano duž rasjeda Jalžabet-Tužno. Osim rubnih rasjeda ova strukturna jedinica ispresjecana je s nekoliko normalnih rasjeda, duž kojih je dolazilo do vertikalnih kretanja blokova tijekom pleistocena i holocena [8].

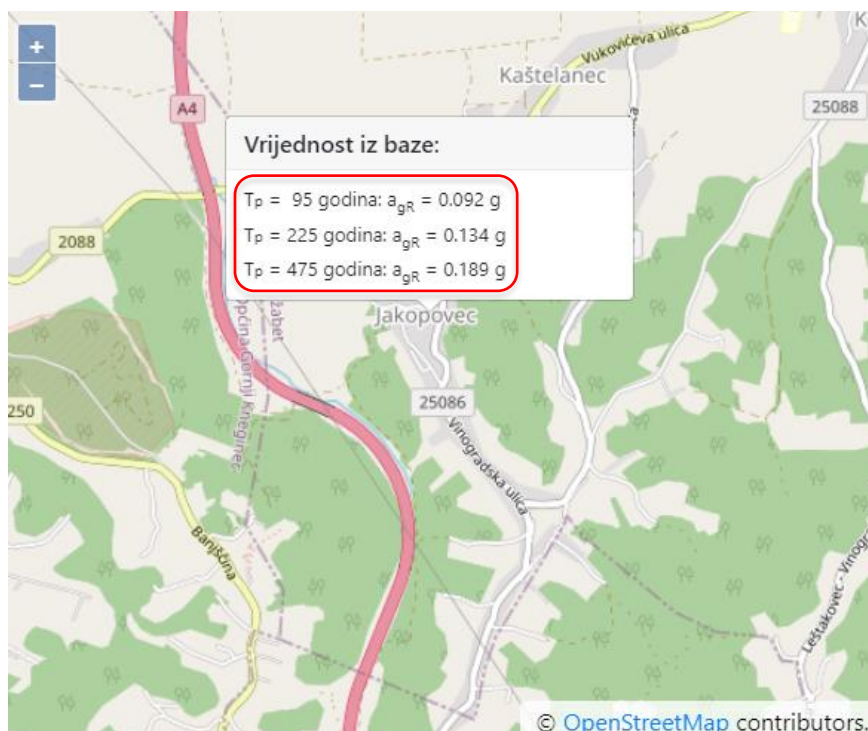


Slika 29. Pregledna tektonska karta lista Varaždin [8]



Slika 30. Seizmološki prikaz područja (isječak karte za povratni period od 475 godina); izvor (<http://seizkarta.gfz.hr/hazmap/karta.php>)

Podaci o seizmičnosti šireg područja nalaze se u „Seizmološkoj karti Republike Hrvatske“. Ta je karta izrađena za različite povratne periode, a stupnjevi seizmičnosti pojedinih područja izraženi su stupnjevima MCS ljestvice.



Slika 31. Predmetna lokacija s horizontalnim vršnim ubrzanjima tla tipa C (a_{gR}) za povratna razdoblja od $T_p=95, 225$ i 475 godina izraženih u jedinicama gravitacijskog ubrzanja ($1g=9,81$ m/s²) (izvor: <http://seizkarta.gfz.hr/hazmap/>)

Prema Eurocodu 8, svaka zemlja je podijeljena na seizmičke zone ovisno o tektonskim svojstvima. Ovisno o seizmičkoj zoni, definirana je vrijednost maksimalnog ubrzanja „ a_g “ u stjenovitom ili drugom tlu. Potresno djelovanje određuje se preko proračunskog ubrzanja „ a_g “, koje odgovara povratnom periodu od 500 godina. Utjecaj potresnog djelovanja koji se odnosi na tlo općenito se uzima u obzir razmatranjem razreda tla. Tlo je podijeljeno u pet osnovnih razreda (A, B, C, D i E), a ovi razredi imaju i podrazrede. Tlo na predmetnoj lokaciji nalazi se u razredu tla „C“, koji označava slojeve šljunaka i pijeskova. Prema karti potresnih područja Republike Hrvatske, koja je sastavni dio Nacionalnog dodatka za niz normi HRN EN 1998-1:2011/NA:2011, Eurocode 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija-1.dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade, određeno je vršno ubrzanje za tip tla „C“, a za istražni prostor iznosi $a_{gR}=0,189$ g [m/s] (povratni period 475 godina).

Tablica 1. Kategorizacija tla prema seizmičnosti (Eurocode 8, HRN EN 1998-1:2008 en)

Tip tla	Opis geotehničkog profila tla	$V_{s,30}$ [m/s]	N_{SPT} [n/30cm]	C_u [kPa]
A	Stijena ili druga geološka formacija uključujući najmanje 5 m slabijeg materijala na površini.	>800	–	–
B	Nanosi vrlo zbijenoga pijeska, šljunka ili vrlo krute gline debljine najmanje nekoliko desetaka metara, sa svojstvom postupnoga povećanja mehaničkih svojstava s dubinom.	360 - 800	> 50	> 250
C	Debeli nanosi srednje zbijenoga pijeska, šljunka ili srednje krute gline debljine od nekoliko desetaka do više stotina metara.	180 - 360	15 - 50	70 - 250
D	Nanosi slabo do srednje koherentni (sa ili bez mekih koherentnih slojeva) ili s predominantno mekim do srednje krutim koherentnim tlima.	< 180	< 15	< 70
E	Profili koji sadrže površinski sloj koji karakterizira brzina v_s tzv. tipove tla C i D i debljine od 5 m do 20 m, a ispod njih je kruti materijal s brzinom većom od $v_s = 800$ m/s	–	–	–
S1	Nanosi koji sadrže najmanje 10 m debeli sloj mekane gline s visoko plastičnim indeksom ($I_p > 40$) i visokim sadržajem vode	< 100	–	10 - 20
S2	Nanosi likvefakcijski osjetljivog tla pijeska i gline ili bilo koji tip tla koji nije opisan od A do E i pod S1	–	–	–

$V_{s,30}$ - srednja vrijednost brzine (L) poprečnih površinskih valova
 N_{spt} - standardni penetracijski test (broj udaraca); C_u - posmična čvrstoća tla

Tip tla	S	T_P (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,00	0,15	0,4	2,0
B	1,20	0,15	0,5	2,0
C	1,15	0,20	0,6	2,0
D	1,35	0,20	0,8	2,0
E	1,40	0,15	0,5	2,0

-horizontalna komponenta sile: $F_H = 0,5 \cdot \alpha \cdot S \cdot W = 0,5 \cdot 0,2g \cdot 1,15 \cdot 1 \cong 0,12g$

-vertikalna komponenta sile: $F_V = 0,5 \cdot F_H = 0,5 \cdot 0,12g \cong 0,06g$

Iz gornjeg se izraza može zaključiti koliki je doprinos horizontalnog ubrzanja tla na pojavu horizontalne sile koja djeluje na građevinu. Drugim riječima, vertikalna sila na zid povećava se za 50 % horizontalne sile koja je uzrokovana potresom.

Ta dodatna vertikalna sila predstavlja novo opterećenje na temelj i temeljno tlo, dok „nova“ horizontalna sila predstavlja sasvim novo opterećenje na kompletni nosivi sustav zgrade, što dodatno uzrokuje momente u konstrukciji koji se najviše očituju u temeljima i vertikalnim nosivim sustavima, ukoliko oni postoje.

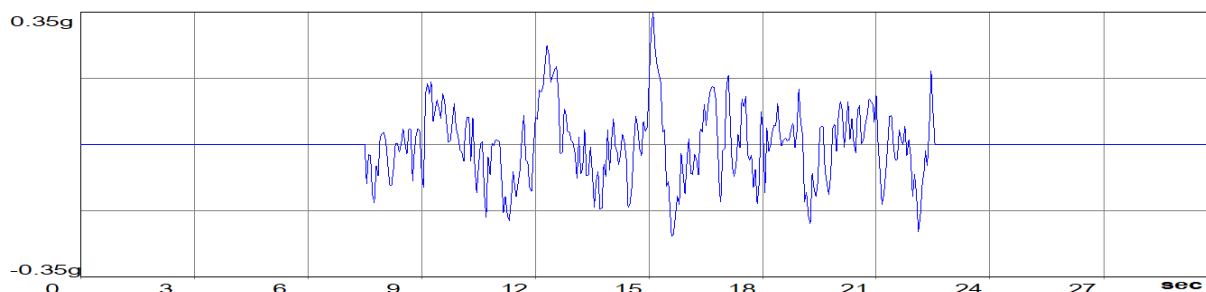
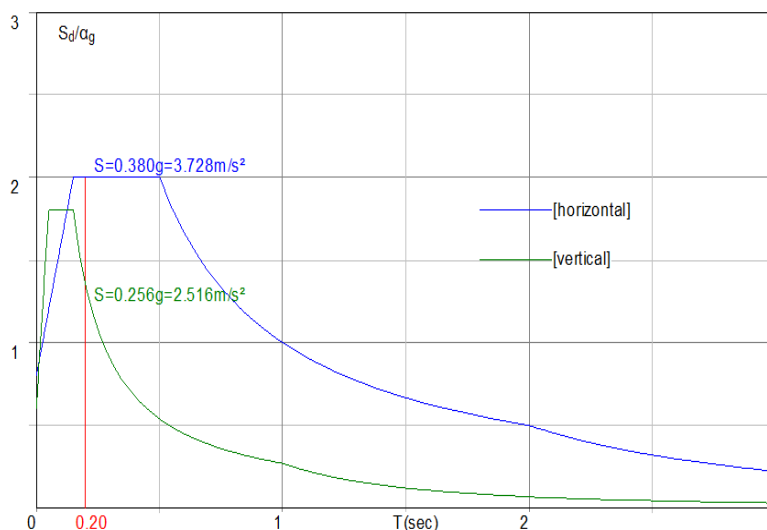
PRORAČUNSKI ELASTIČNI SPEKTAR ODZIVA

Horizontalno ubrzanje omjer $\alpha_g=0,190 \times g$
 Faktor tla $S=1,15$
 Faktor ponašanja [horizontalni] $q=1,50$
 Faktor ponašanja [vertikalni] $q_v=1,50$
 Vert. / horiz. $\alpha_{vg}/\alpha_g=0,50$

Karakteristike perioda spektra

[horizontalno] $T_b=0,15$ s
 $T_c=0,50$ s
 $T_d=2,00$ s

[vertikalno] $T_{vb}=0,05$ s
 $T_{vc}=0,15$ s
 $T_{vd}=1,00$ s



Horizontalni elastični spektar odziva $S_d(T)$

$$0,00 \leq T < 0,15: S_d(T) = 0,190 \times 1,20 \times [2/3 + (T/0,15) \times (2,5/1,50 - 2/3)]$$

$$0,15 \leq T < 0,50: S_d(T) = 0,190 \times 1,20 \times (2,5/1,50)$$

$$0,50 \leq T < 2,00: S_d(T) = 0,190 \times 1,20 \times (2,5/1,50) \times [0,50/T]$$

$$2,00 \leq T < 4,00: S_d(T) = 0,190 \times 1,20 \times (2,5/1,50) \times [0,50 \times 2,00/T^2]$$

Vertikalni elastični spektar odziva $S_{vd}(T)$

$$0,00 \leq T < 0,05: S_{vd}(T) = 0,90 \times 0,190 \times 1,0 \times [2/3 + (T/0,05) \times (3,0/1,50 - 2/3)]$$

$$0,05 \leq T < 0,15: S_{vd}(T) = 0,90 \times 0,190 \times 1,0 \times (3,0/1,50)$$

$$0,15 \leq T < 1,00: S_{vd}(T) = 0,90 \times 0,190 \times 1,0 \times (3,0/1,50) \times [0,15/T]$$

$$1,00 \leq T < 4,00: S_{vd}(T) = 0,90 \times 0,190 \times 1,0 \times (3,0/1,50) \times [0,15 \times 1,00/T^2]$$

3.5. Klasifikacija oštećenja

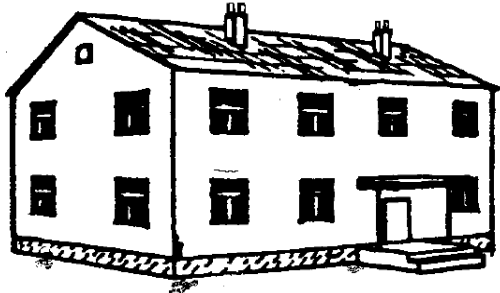

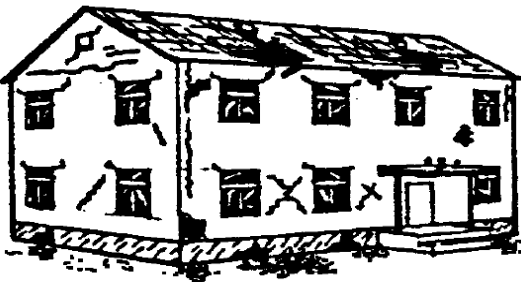


Način na koji se konstrukcija deformira pri potresnom opterećenju ovisi o vrsti zgrade. Za opću kategorizaciju, zgrade se mogu grupirati u osnovne dvije skupine: zidane zgrade (konstrukcije) i armirano-betonske konstrukcije (zgrade). Većina zgrada konstruirana je kombinacijom armirano-betonske konstrukcije i zidanih elemenata, ali u tom smislu pravila armirano-betonska konstrukcija (okvir) preuzima potresno djelovanje, odnosno potresnu otpornost (horizontalne sile).

Nastala, te detektirana oštećenja, formiraju se u pet razreda prema tablici sa slike 31. Pri tome treba imati u vidu da je predmetna zgrada (kapela) građena pretežito od zidanih i kamenih elemenata, te je u tom smislu i potrebno klasificirati strukturalna i nekonstrukcijska oštećenja.

Za zidane građevine u pravilu je svojstvena velika raznolikost pojedinih tipova konstrukcija, s obzirom na primjenu raznovrsnih materijala, načina gradnje te horizontalnih i vertikalnih konstruktivnih elemenata. Posebnu pozornost treba obratiti na stanje zidova, vrstu međukatne konstrukcije, lukove i svodove, na svojstva krovišta, te na nekonstrukcijske elemente koji mogu predstavljati opasnost.

Tablice u nastavku daju shematski pregled stupnjeva oštećenja i najučestalijih odgovarajućih stanja konstrukcijskih i nekonstrukcijskih elemenata za zidane konstrukcije, prema EMS-98 klasifikaciji.

KLASIFIKACIJA OŠTEĆENJA ZIDANIH ZGRADA

I.		<p>RAZRED 1.: Zanemarivo do lagano oštećenje (nema strukturnih oštećenja, lagana nestrukturna oštećenja)</p> <p>Vrlo tanke pukotine u pojedinim zidovima. Pad samo malih komada žbuke. Pad labavog kamenja s gornjih dijelova zgrada u vrlo malo slučajeva.</p> <p>Korištenje objekta: Bez ograničenja</p>
II.		<p>RAZRED 2.: Umjerena oštećenja (lagana strukturna oštećenja, umjerena nestrukturna oštećenja)</p> <p>Pukotine u mnogim zidovima. Pad prilično velikih komada žbuke. Djelomično rušenje dimnjaka.</p> <p>Korištenje objekta: Ograničeno korištenje</p>
III.		<p>RAZRED 3.: Znatna do velika oštećenja (umjerena strukturna oštećenja, velika nestrukturna oštećenja)</p> <p>Velike i ekstenzivne pukotine u većini zidova. Odvajanje crjepova na krovu. Pucanja dimnjaka na ravni krova. Lomovi pojedinih nestrukturnih elemenata (pregrade, zabatni zidovi).</p> <p>Korištenje objekta: Privremeno korištenje</p>
IV.		<p>RAZRED 4.: Vrlo velika oštećenja (velika strukturna oštećenja, vrlo velika nestrukturna oštećenja)</p> <p>Ozbiljna oštećenja zidova. Djelomična strukturna oštećenja krovova i podova.</p> <p>Korištenje objekta: Ne koristiti</p>
V.		<p>RAZRED 5.: Rušenje (vrlo velika strukturna oštećenja)</p> <p>Totalno ili gotovo potpunu urušavanje.</p> <p>Korištenje objekta: Ne koristiti</p>

Slika 32. Stupnjevi oštećenja za zidane zgrade prema EMS-98 klasifikaciji [9]



Slika 33. Oznake kategorije upotrebljivosti građevina [9]

Tablica sa slike 31. prikazuje sažet pregled razina oštećenja i najčešćih stanja konstrukcijskih i nekonstrukcijskih elemenata u zidanim konstrukcijama prema klasifikaciji EMS-98.

Prilikom procjene sigurnosti oštećenih zgrada potrebno je utvrditi koje su sigurne za daljnju upotrebu, uzimajući u obzir mogućnost naknadnih podrhtavanja tla nakon većeg potresa.

Na osnovu kategorizacije oštećenja i analize očekivanog ponašanja konstrukcije u slučaju ponovljenog potresa određenog intenziteta, pregledane građevine klasificiraju se u jednu od šest kategorija.

Kapela sv. Jakoba, koja je predmet ovoga rada, prema prethodno opisanome, svrstava se u kategoriju PRIVREMENO NEUPORABLJIVO; PN2-potrebne mjere HITNE INTERVENCIJE.



Mjere hitnih intervencija oštećenih zidova, otklanjanju mogućnosti budućih povećanja postojećih pukotina u zidovima, a koja je dopuna i kompatibilna s izvedbom pilota pod tim zidovima, jest zatezanje glavnih zidova kapele pri njenim vrhovima postavljanjem zatega u unutrašnjost zida. Mjere koje spadaju pod hitne mjere sanacije uključuju i injektiranje pukotina dvokomponentnim epoksidnim ljepilom za konstrukcijska lijepljenja u nosivim elementima, te povezivanje drvenih elemenata krovišta na spojevima u svrhu privremene stabilizacije krovne konstrukcije.

3.6. Faktor važnosti građevine

Građevine se mogu svrstati u četiri razreda važnosti, ovisno o posljedicama rušenja za živote ljudi, njihovoj važnosti za javnu sigurnost i civilnu zaštitu u razdoblju neposredno nakon potresa, te društvenim i ekonomskim posljedicama nakon rušenja. Razredi važnosti povezuju se s različitim faktorima važnosti γ_I .

Predmetna građevina svrstava se prema razredu važnosti **II**, a prema sljedećoj tablici:

Tablica 2.- Faktor važnosti zgrade [10]

Kategorija važnosti zgrade	Opis zgrade	Faktor važnosti zgrade γ_I
IV	Zgrade čija je cjelovitost neposredno nakon potresa životno važna za zaštitu ljudi: npr. zgrade državnih tijela razine ministarstva, vlade i sabora; bolnice; zgrade s kapitalnom opremom za telekomunikacijske i radio veze; zgrade zračnih luka; zgrade profesionalnih vatrogasnih jedinica, zgrade policijskih postaja županijske razine; zgrade elektrana i energana; spremnici opasnih tvari	1,4
III	Zgrade čija je potresna otpornost važna zbog posljedica vezanih uz rušenje: osnovne i srednje škole; zgrade s kinodvoranama; zgrade s dvoranama za skupove veće od 100 osoba; đачki i studentski domovi, domovi za djecu s teškoćama; domovi umirovljenika; dječji vrtići; silosi, spremnici i dimnjaci viši od 30 m	1,2
II	Obične zgrade: stambene zgrade, poslovne zgrade, proizvodne zgrade, trgovačke zgrade, hoteli, zgrade sveučilišta, zgrade istraživačkih instituta, hale, skladišta, stadioni, javne garaže	1,0
IV	Zgrade manje važnosti za javnu sigurnost: skladišta poljoprivrednih proizvoda; staje i peradarnici; skloništa	0,8

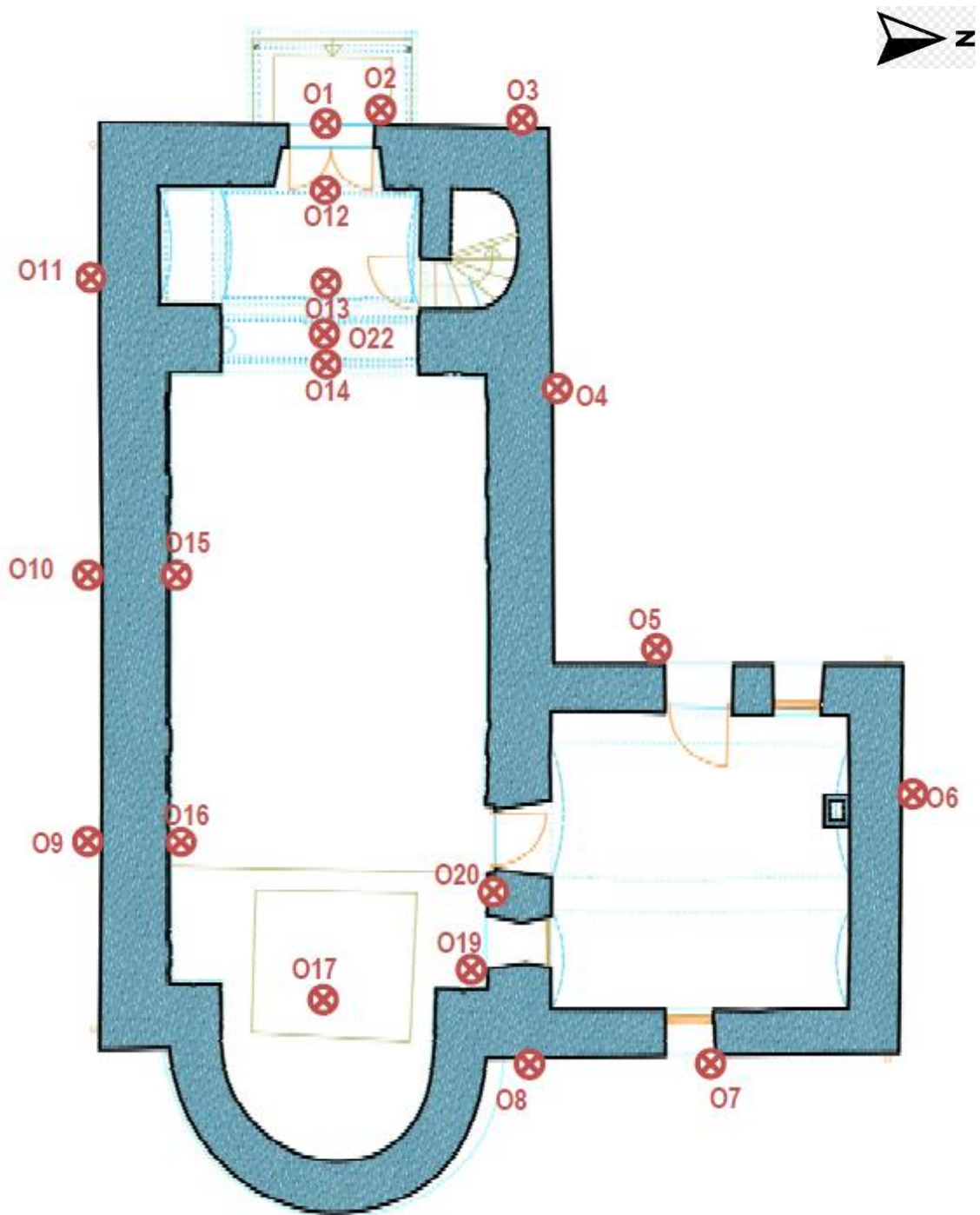
4. Snimak zatečenih oštećenja konstrukcije

Prilikom terenskog pregleda kapele vidljiva su sljedeća veća oštećenja:

Vertikalni pukotinski sustavi vanjskog dijela kapele, znatnog intenziteta, upućuju na tendenciju gubitka strukturalnog integriteta zida, odnosno nosive konstrukcije. Ranijom anamnezom te samim rekognosciranjem oštećenja konstrukcije kapele jasno je kako, iako nisu nastale tijekom prošlogodišnjih potresa, već su ih oni povećali i produbili, početni njihov uzrok leži u samoj morfologiji terena te reološkim procesima koji se odvijaju u tlu.

Oštećenja u unutrašnjosti kapele direktan su nastavak vanjskih oštećenja (sjeverni i južni zid), ali i ostalih dodatnih strukturalnih oštećenja koji se javljaju na lučnim elementima kapele.

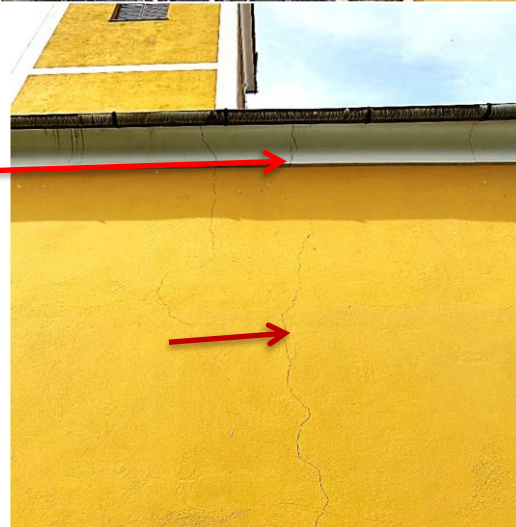
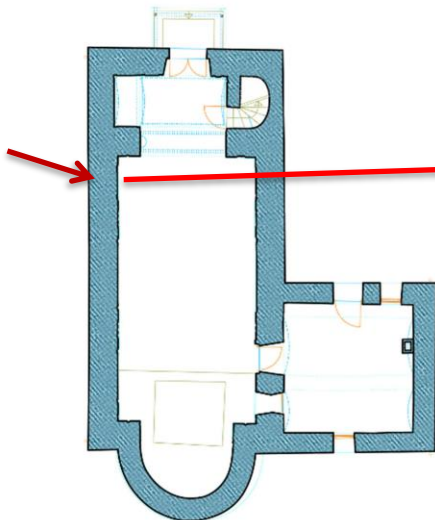
Pukotine na svodovima nastavljaju orijentaciju zidnih pukotina (pukotina je u smjeru sjever-jug), što pokazuje na tendenciju doslovnog „raspolavljanja“ kapele. Na taj se način, slikovito, može zaključiti kako jedan dio kapele teži odvajanju u smjeru istoku, a drugi u smjeru zapada. Uzimajući u obzir ranije analizirane padine sa istočne i zapadne strane, njihovo puzanje te blizinu kapele, tada cijeli pukotinski sustav kapele dobiva savršen smisao te svoju uzročno-posljedičnu vezu.



Slika 34. Tlocrt prizemlja kapele s naznakama vanjskih i unutarnjih oštećenja



Slika 35. Vertikalna pukotina sjevernog pročelja

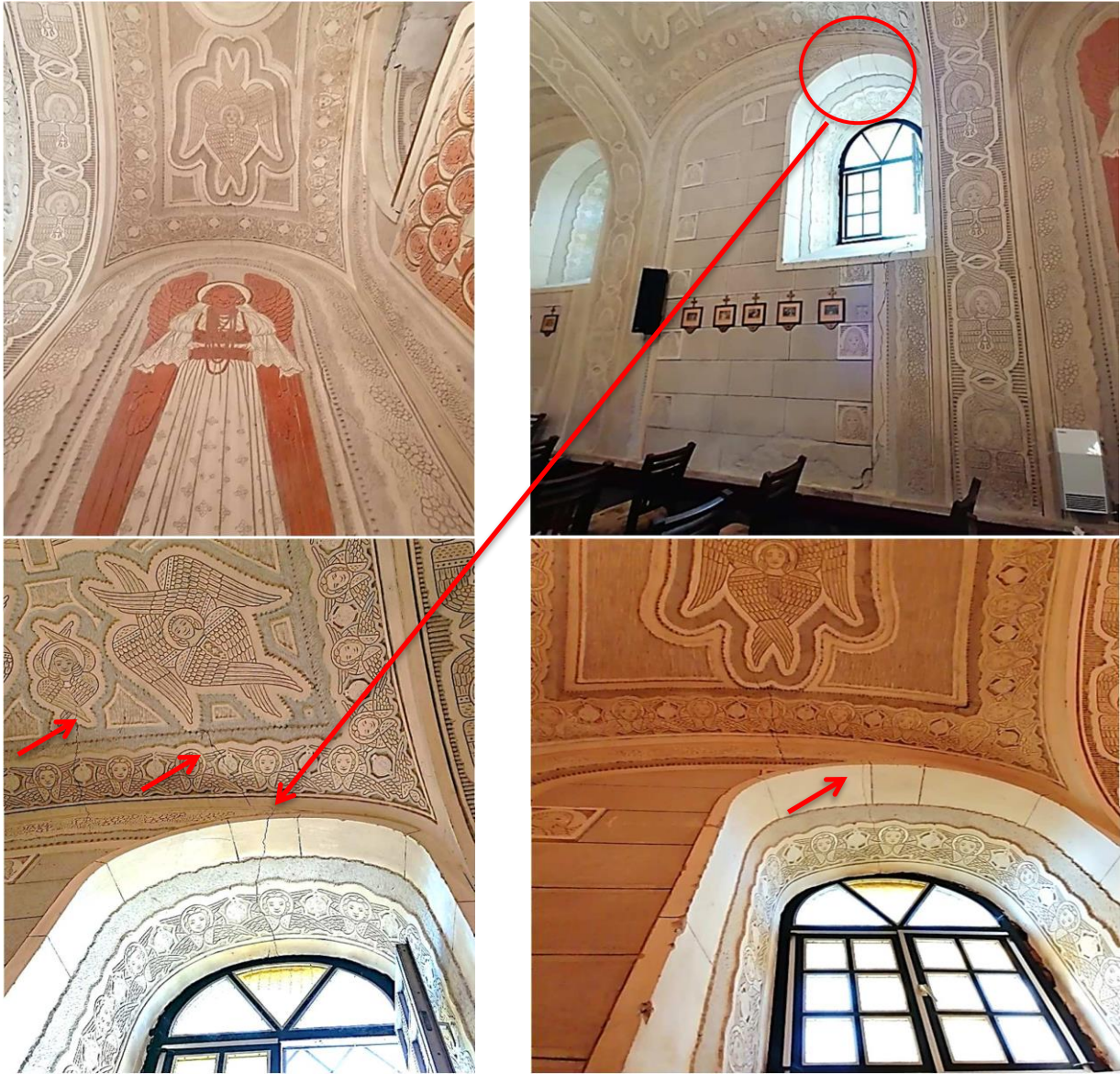


Slika 36. Vertikalne pukotine južnog pročelja



Slika 37. Jasno vidljivi znakovi padinskog puzanja sa istočne i sjeverne strane kapele. Ovdje je važno primjetiti neposrednu blizinu kapele kao i nagnute konstruktivne elemente koji upućuju na puzanje terena (stepenice, potporni zidovi, te stupovi ograde)

Na slici 37 vidljivi su nagli nagibi terena, praktički odmah uz sam rub kapele (sjeverna i istočna strana), dok je sa zapadne strane napravljen zasjek padine te je smješten potporni kameni zid (koji se do sada već vidno nagnuo i popucao). Sve te vidljive naznake (a posebno nagibi ograda, zidova, te grobova i grobnih ploča) jasno upućuju na reološki proces puzanja koji se već dugi niz godina događa u temeljnom tlu kapele. Sama blizina kapele tim zasjecima i padinama uvelike ugrožava njezinu stabilnost, dok je potres samo pridonio i ubrzao reološke procese u tlu. Vertikalne zidne pukotine o kojima je riječ u nastavku rada direktan su produkt potresa, njegovog utjecaja na padinu te ubrzavanje pomicanja čestica tla u smjeru padine.



Slika 38. *Progresivno širenje pukotinskog sustava od vertikalnih pukotina na zidovima do horizontalnih pukotina na svodovima*

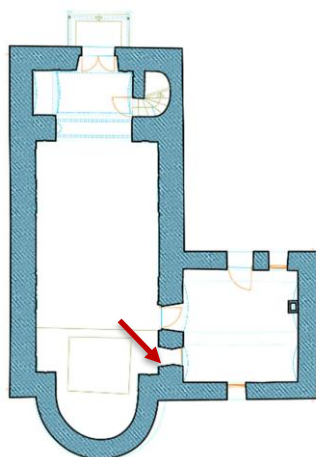
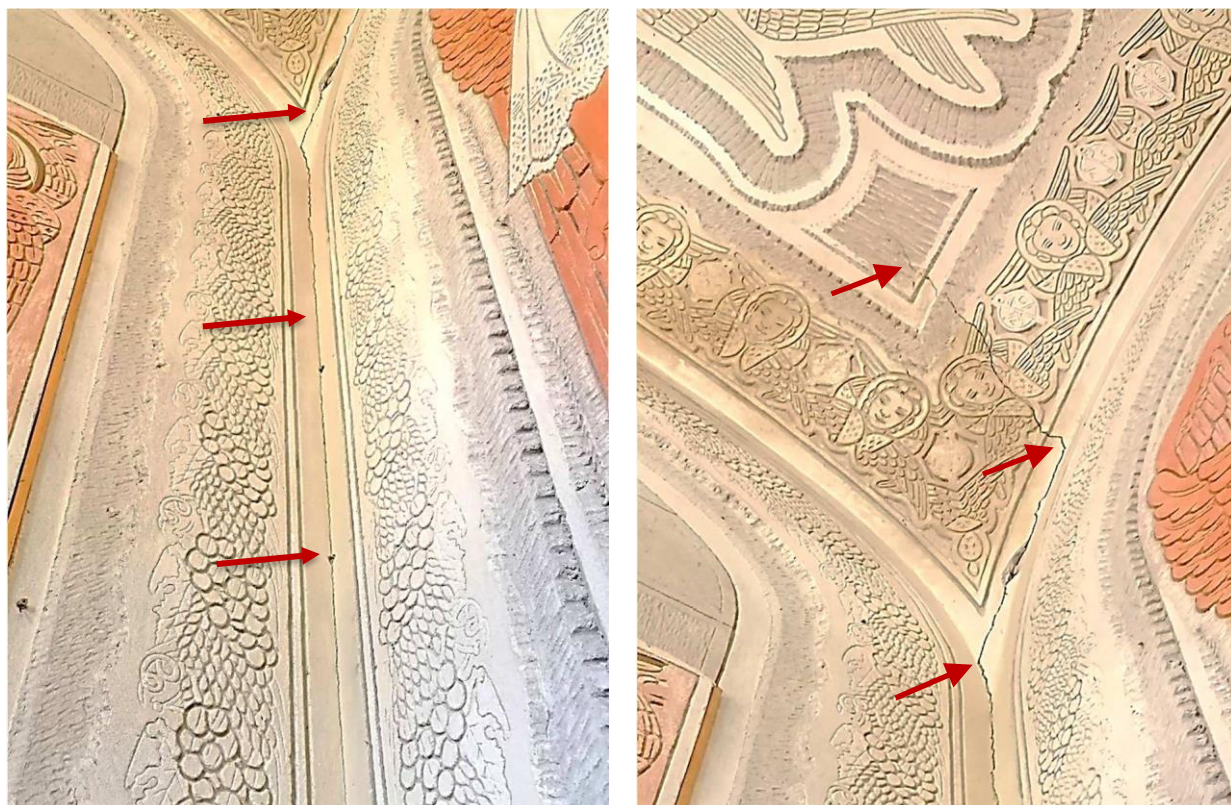


Slika 39. Oštećenje lijevog zida broda crkve



Slika 40. Oštećenje desnog zida broda crkve

Oštećenja na slikama 39 i 40 jasno ukazuju na progresivno širenje pukotina koje su nastavak svodnih pukotina u smjeru sjever-jug, što ukazuje na doslovno „raspolavljanje“ kapele. Na taj se način slikovito može zaključiti kako se jedan dio kapele odvojio u smjeru istoka, a drugi u smjeru zapada.



Slika 41. Pukotinski sustav na spoju sakristije i kapele

Pukotinski sustav prikazan na slici 41 prostire se cijelim spojem sakristije i kapele, te dalje prelazi u luk na stranu kapele da bi kroz sljedećih 40-ak cm pukotina skrenula na svod i tu završila. Na ovome mjestu kapela je najbliže sjevernoj padini (zasjeku), te tu postoji velika opasnost od lokalne nestabilnosti uzrokovane potresom i puzanjem tla.



Slika 42. Pukotina sjevernog zida kapele (zid sakristije)

Na slici 42. vidljiva je vertikalna pukotina znatne duljine koja se nalazi na zidu sakristije (koji je ranije bio vanjski zid kapele). Pukotina se širi s nosivog zida dalje u luk kapele, pa se na njemu nastavlja u duljini od cca 50 cm. Ova pukotina, kao i sve ranije navedene, je strukturalna, no u ovom slučaju je svakako manjeg intenziteta nego ranije navedene vertikalne pukotine. Može se konstatirati da su svi lučni elementi kapele jednako oštećeni u svojim tjemenu (podgledi tjemena), a pukotine takvog tipa dalje se nastavljaju na svodove kapele.

Naprijed prikazana konstruktivna oštećenja, u prvom redu, odnose se na vidljive pukotine izvana i iznutra, a iznutra još i dodatno otpadanje dijelova žbukoreza na mjestima većih oštećenja. Deformacije (pomaci od početno izvedenog stanja), koje sigurno postoje, nisu toliko izražene i vidljive da bi se mogle uzimati u razmatranje i kontrolu stabilnosti elemenata konstrukcije, budući da se ne zna početni oblik tih elemenata. Svodovi nisu bitno deformirani ni u cjelini niti na bilo kojim dijelovima lokalno. Zidani lukovi, u pravilu, imaju pukotine u podgledima tjemena, a oni položeni, osim pukotina u tjemenu, imaju i deformaciju (skoro horizontalnih) podgleda tjemena. Nagibi zidova nisu mjereni, budući da je građevina skenirana i iscrtana s tolikom preciznošću da će se današnja vertikalnost i budući eventualni otkloni od nje u svakom trenutku iz ovako dobivenih podataka moći rekonstruirati i iz toga proračunati utjecaji novih deformacija.

Drugi jasan uzrok i vidljiva grupa oštećenja zidova jesu pukotine na mjestima spojeva zidova različito starih dijelova građevine. To je općenito razumljivo za mjesta

prigradnje, a ovdje su ta mjesta dodatno potencirana kao pukotine po cijeloj visini spojeva i uslijed utjecaja temeljenja plitkim slojevima tla relativno slabe nosivosti, te prošlogodišnjim potresima. Takve su pukotine vidljive skoro po cijeloj visini na spojevima sakristije i glavnog dijela kapele, te u uzdužnim zidovima kapele približno na mjestima gdje veće opterećenje, zbog utjecaja mase zvonika na te zidove, prelazi u manje opterećene dijelove zida. Masa zvonika predstavlja najveću masu u kapeli, a posljedično i najveća naprezanja na temelje i temeljno tlo (koji su ugroženi progresivnim puzanjem tla).

Drvena konstrukcija krovišta nije bitno ili vidljivo deformirana ili oštećena, no postoje mjesta, odnosno pojedinačni elementi i spojevi elemenata krovnih konstrukcija koji zahtijevaju ojačanja, zamjene zbog dotrajalosti ili dodatne elemente nekih vezova kojima će se sva krovišta osigurati i od svih nestabilnosti za ekstremnija današnja opterećenja snijegom, a i budućim potresom. Kod krovišta kapele radi se o više konstrukcija dvo ili višestrešnih krovišta:

- četverostrešno krovište zvonika
- dvostrešno krovište iznad glavnog dijela kapele
- polukružno krovište nad apsidom
- sjeverno trostrešno krovište nad sakristijom.

Sva navedena krovišta izvedena su kao klasične drvene konstrukcije, neke od njih starije od stoljeća, s djelomičnim novijim intervencijama pomoću zamjena dotrajalih elemenata ili češće s provizornim ojačanjima na način dodavanja potpornih elemenata (stupova ili razupornih greda) da se smanje ili čak zamijene funkcije nosivosti susjednih oslabljenih elemenata i lokalno ojača oslabljeni dio krovišta ili nekog veza.

Druga vrsta su nekonstruktivna oštećenja, ali ne i manje bitna, koja su na ovoj konstrukciji posljedica djelovanja vode iz tla na sve zidove kapele i sakristije. Budući da građevina nema klasičnu horizontalnu branu hidroizolacije između temelja i zidova, kapilarno dizanje vlage vidljivo je na svim zidovima s vanjske strane, gdje je djelomično vidljivo i oko vijenca zgrade, posebno na prizemnim zidovima sakristije. S unutarnje strane šteta je još veća, iako je manje vidljiva, budući da djeluje kroz zid na kojem su vrijedni žbukorezi, a za sada je njezin najgori utjecaj pri dnu zidova, ujedno i na najnižim dijelovima žbukoreza koji su blizu poda mjestimično već počeli otpadati sa zida. Manje vidljivo je mjestimično odljepljivanje žbuke od zida, što znači i opasnost od urušavanja ovih odljepljenih površina žbukoreza bez pozadinske potpore zida, dakle bitno većih oštećenja na žbukorezu. Važno je napomenuti kako se kod pregleda konstrukcije s vanjske strane na nekim mjestima gdje su već oštećenja otvorila pogled

na unutarnje slojeve prije radova zaštite, naišlo na potpuno krivo naknadno ugrađene slojeve-cementne premaze i druge slojeve koji ne upijaju kapilarnu vlagu i vodu iz tla, već povećavaju dizanje vlage u zidovima.

Većina pukotina na konstrukciji upućuje, u prvom redu, na slabo nosivo tlo kao početni i osnovni uzrok deformacija i oštećenja.

Temelj je napravljen od kamenih blokova, nepravilnih i različitih veličina (najčešće promjera od 10 do 30 cm). Djelom u gornjem temeljnom dijelu nalazi se i opeka. Temelj izgleda suho i u dobrom je stanju, a vezivo između kamenih blokova također je u dobrom stanju. Dno temelja je na jednoj lokaciji na -1,60 m ispod površine okolnog terena, te se pretpostavlja da je svugdje na građevini jednoliko.

5. Analiza seizmičke otpornosti

Provjera ispunjavanja temeljnog zahtjeva mehaničke otpornosti i stabilnosti, te analiza seizmičke otpornosti postojeće konstrukcije provedena je pomoću proračunskog modela konstrukcije kapele izrađenog u programskom paketu 3Muri i Tower. Nakon analize opterećenja prikazani su osnovni podaci o 3D modelu konstrukcije, a nakon toga rezultati zidanih svodova, zidova i lukova, te analiza opterećenja na tlo.

5.1. Grubi seizmički proračun

Provodi se analiza prosječnog naprezanja na zidovima.

Kod izračuna ploštine zida ne uzimaju se u obzir otvori, što je na strani sigurnosti. Ovakav grubi izračun podrazumijeva pretpostavku potpune jednolike preraspodjele seizmičke sile, te potpuno jednaku preraspodjelu krutosti i mase. Dobra blizina jednolikosti manifestira se i kroz gotovo jednake periode osciliranja za prva dva translacijska x i y tona.

Etaža	Površina etaže [m ²]	Visina etaže [m]	Jedinična težina [kN/m ³]	Težina zidova [kN]	Stalno opterećenje zidova [kN/m ²]
zvonik	4,77	15,10	18,00	1296,50	271,80
sakristija	24,40	3,50	18,00	1537,20	63,00
glavni brod	73,44	5,40	18,00	7138,40	97,20
Σ=				9972,10	

Horizontalna komponenta proračunskog spektra odziva $S_{d(T)}$ konstrukcije, prema EN 1998-1 predlaže četiri izraza za izračunavanje horizontalne komponente proračunskog spektra. Izraz za određivanje odabire se na temelju usporedbe osnovnog perioda osciliranja linearnog sustava u odnosu na donju i gornju granicu perioda s granom konstantnog spektralnog ubrzanja, te vrijednosti perioda koja je definirana u spektru pomaka.

$$0 \leq T \leq T_B: S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q}$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_d(T) \left\{ \begin{array}{l} = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right] \geq \beta \cdot a_g \\ \geq 0,2 \cdot 1,49 = 0,298 \end{array} \right\}$$

$$T_D \leq T: S_d(T) \left\{ = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \cdot \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right] \geq \beta \cdot a_g \right\}$$

Prema proračunskom elastičnom spektru odziva, dobivene su vrijednosti gornje granice perioda s granom konstantnog spektralnog ubrzanja $T_c = 0,50$, a donja granica perioda s granom konstantnog spektralnog ubrzanja $T_B = 0,15$. Usporede li se te dvije granice s osnovnim periodom osciliranja linearnog sustava T , koji pojednostavljenim postupkom iznosi $T_1 = C_t \cdot H^{\frac{3}{4}} = 0,05 \cdot 15,10^{\frac{3}{4}} = 0,38$ s, dobiva se:

$$0,15 \leq 0,38 \leq 0,50$$

stoga je potrebno primijeniti izraz $S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q}$ za proračun horizontalne komponente proračunskog spektra odziva:

$$S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} = 0,189 \cdot 1,15 \cdot \frac{2,5}{1,5} = 0,36 \quad (T = 475 \text{ godina})$$

gdje je:

a_g -ubrzanje podloge

S-faktor tla

η (2,5)- korekcijski faktor prigušenja

q-faktor ponašanja (1,5)

$$S_x = S_y = 0,36 \cdot 9972,10 = 3590 \text{ kN}$$

Površina zidova:

$$A_{\text{zidovi},x} = 184 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{zidovi},y} = 181 \text{ m}^2$$

Kao što je vidljivo iz proračuna površine zidova, a što je i tipično za geometriju crkava, nedostatak je ukrutnih zidova, odnosno zidova okomitih na glavne uzdužne zidove (u ovom slučaju zidovi glavnog broda). Izostavljanje ukrutnih zidova bitno smanjuje nosivost glavnih zidova (pitanje otpornosti i sloma okomito na ravnine tih zidova); stoga se kao mjera sanacije, posebice u crkvama i sličnim građevinama, primjenjuje izvedba zatega.

Prosječno naprezanje ziđa za svaki smjer:

$$\sigma_{x,smjer} = 3590/18400 = 0,195 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{y,smjer} = 3590/18100 = 0,198 \text{ N/mm}^2$$

Računska posmična otpornost ziđa:

$$f_{v,d} = f_{vk,0} + 0,4 \cdot \sigma_d$$

Prema preporuci HRN EN 1998 NA (nacionalni dodatak normi), karakteristična osnovna posmična čvrstoća ziđa iznosi: $f_{vk,0} = 0,1 \text{ MN/m}^2$

Prosječno kontaktno naprezanje od vertikalnog opterećenja iznosi $0,197 \text{ N/mm}^2$

Računska posmična čvrstoća ziđa umanjena je s faktorom sigurnosti $\gamma_m = 1,5$

$$f_{v,d} = 0,1 + 0,4 \cdot 0,197 = 0,179/1,5 = \mathbf{0,119 \text{ N/mm}^2}$$

Postotak u odnosu na računsko djelovanje prema HRN EN 1998 za 475 godina:

$$\psi_x = 0,119/0,195 = 61 \%$$

$$\psi_y = 0,119/0,198 = 60 \%$$

5.2. Metoda postupnog guranja

Provjera ispunjavanja temeljnog zahtjeva mehaničke otpornosti i stabilnosti, te analiza potresne otpornosti postojeće konstrukcije provedena je pomoću proračunskih modela konstrukcije izrađenih u računalnom programu 3Muri za horizontalno potresno opterećenje statičkom nelinearnom metodom („push-over“ analizom). Nakon analize opterećenja prikazani su osnovni podaci za svaki model konstrukcije s ulaznim podacima – elementima, geometrijom i opterećenjima, te rezultati „pushover“ analize.

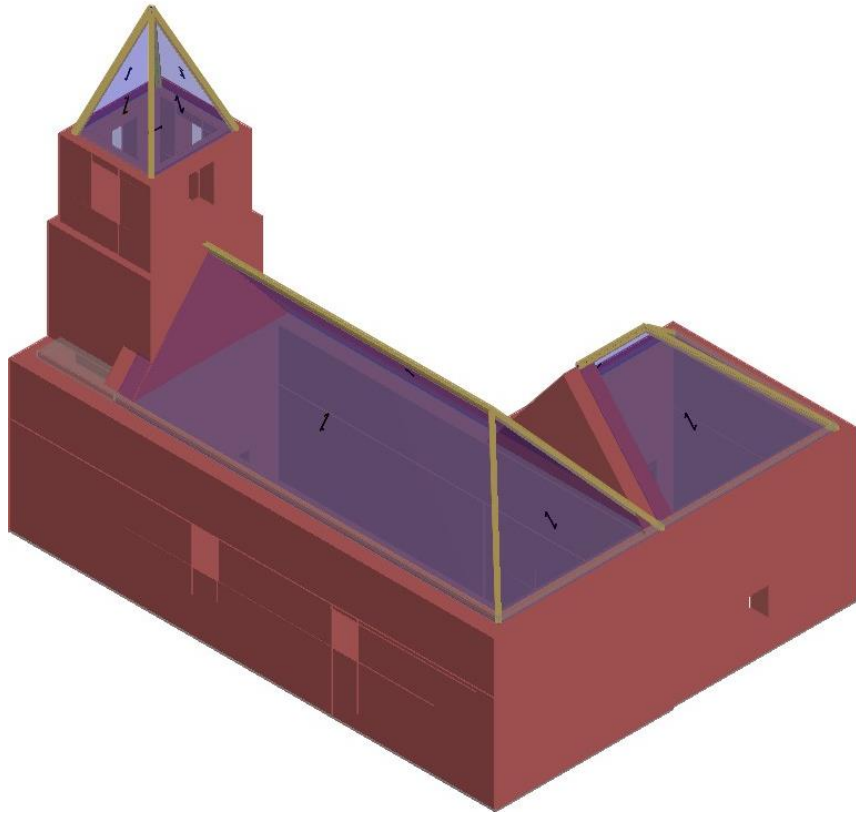
Modeliranje zidova

Dijeljenjem zida na okomita područja koja odgovaraju različitim razinama i bilježenjem položaja otvora mogu se odrediti dijelovi zida, zidanih stupova i greda na kojima su deformabilnost i oštećenja koncentrirani. Ovo može biti potvrđeno promatranjem šteta uzrokovanih stvarnim potresima, te eksperimentalnim i numeričkim simulacijama. Ta su područja modelirana s konačnim dvodimenzionalnim makroelementima, koji predstavljaju zidane zidove, s dva čvora i tri stupnja slobode po čvoru (u_x , u_z , rot_y) i dva dodatna unutarnja stupnja slobode. Otporni dijelovi zida smatraju se krutim dvodimenzionalnim čvorovima konačnih dimenzija na koje su povezani makroelementi. Makroelementi prenose akcije duž tri stupnja slobode razine; na svakom incidentnom čvoru. U opisu svakog pojedinog zida, čvorovi su identificirani parom koordinata (x , z) u razini zida. Visina z odgovara visini horizontalnih konstrukcija. Stupnjevi slobode su isključivo u_x , u_z i rot_y (za dvodimenzionalne čvorove). Zahvaljujući podijeli elemenata u čvorove, zidni model postaje potpuno usporediv s planom okvira.

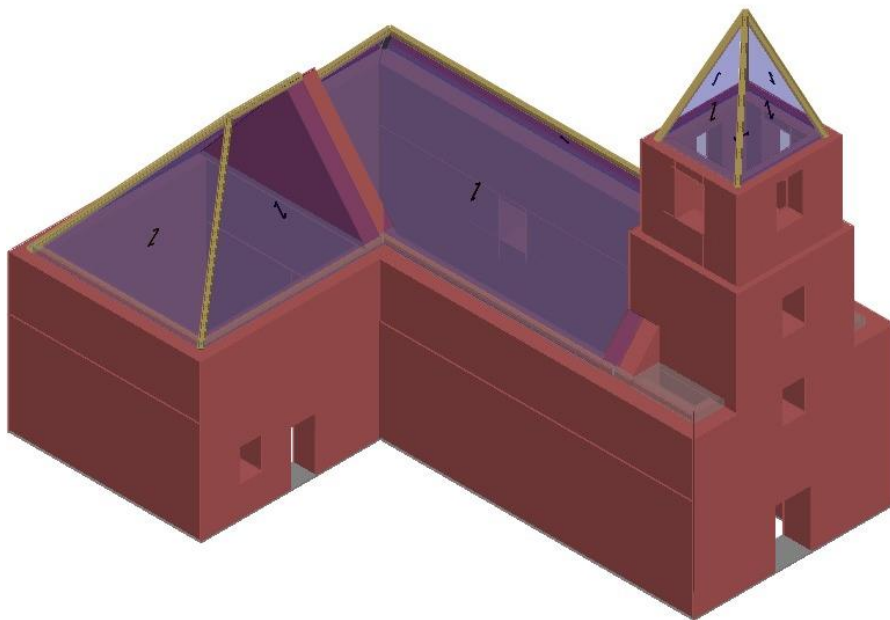
Prostorno modeliranje

U prostornom modeliranju, zidovi su otporni elementi, s obzirom na vertikalna i horizontalna opterećenja. S druge strane, horizontalne konstrukcije (podovi, svodovi, stropovi) svoja vertikalna opterećenja prenose na zidove i dijele horizontalna djelovanja na upadne zidove. Na ovaj način, konstrukcija je modelirana montažom ravnih konstrukcija: zidova i horizontalnih konstrukcija, objema nedostaje krutost na savijanje izvan ravnine.

U svakom slučaju, proširenje postupka na trodimenzionalno modeliranje nije jednostavno. Ispravna strategija je očuvanje modeliranja zidova na njihovoj razini i njihovo spajanje s horizontalnim strukturama, uključujući one za koje se modelira ponašanje membrane. Tako model strukture poprima masu i krutost na svim trodimenzionalnim stupnjevima slobode. U isto vrijeme, lokalno uzima u obzir pojedinačne stupnjeve slobode razina (dvodimenzionalni čvorovi). Na taj se način stvara esencijalni strukturni model, bez kompliciranja izračunavanja odziva izvan lokalne razine. Nakon što se uspostavi jedinstvena ukupna referenca za konstrukcijski model, uvode se u tlocrt općeg zida i kroz koordinate točke, podrijetlo lokalne reference $O_i (x_i, y_i, z_i)$, s obzirom na cjelokupni kartezijanski referentni sustav (X, Y, Z) . Kut se izračunava u odnosu na os X . Na taj je način lokalni referentni sustav za zid nedvosmisleno definiran, a modeliranje makroelemenata može se odvijati istim modalitetom koji se koristi za razine.



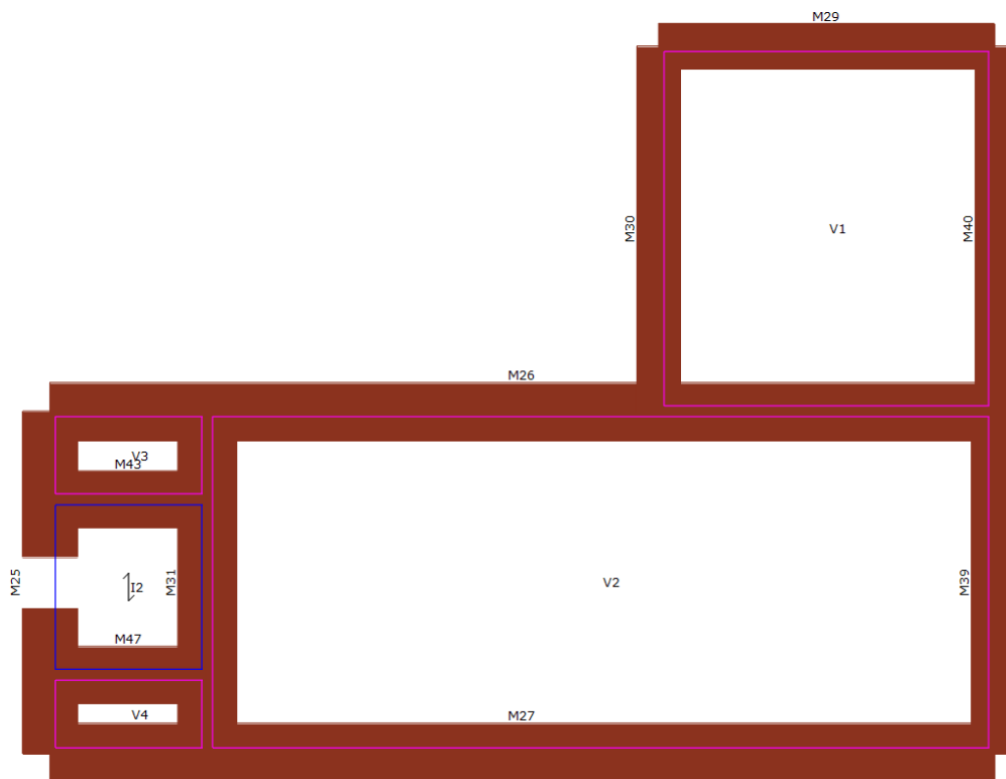
Slika 43. Aksonometrijski prikaz građevine u 3Muri programu



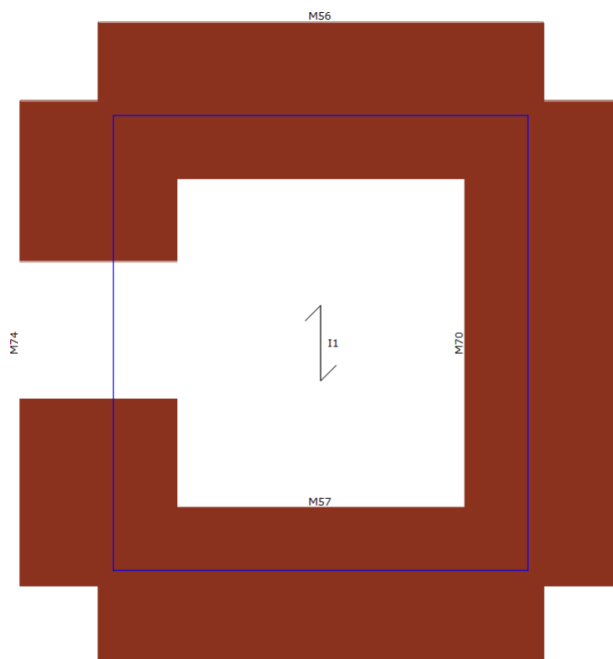
Slika 44. Aksonometrijski prikaz građevine u 3Muri programu



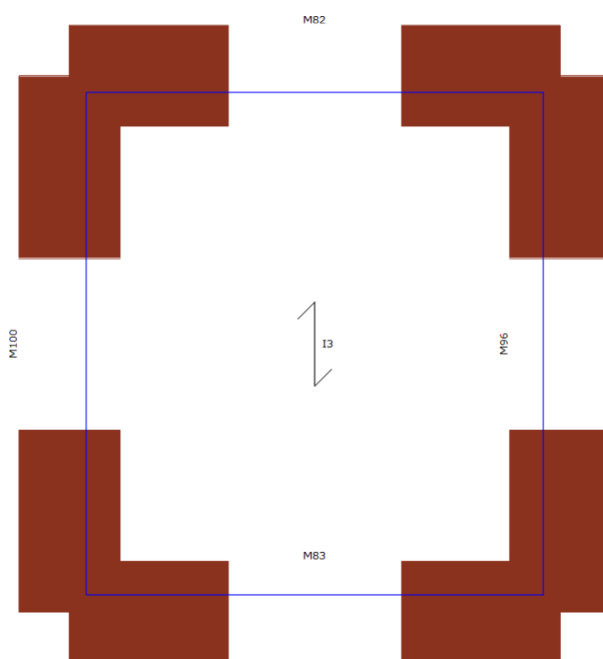
Slika 45. Tlocrtni prikaz etaže 1



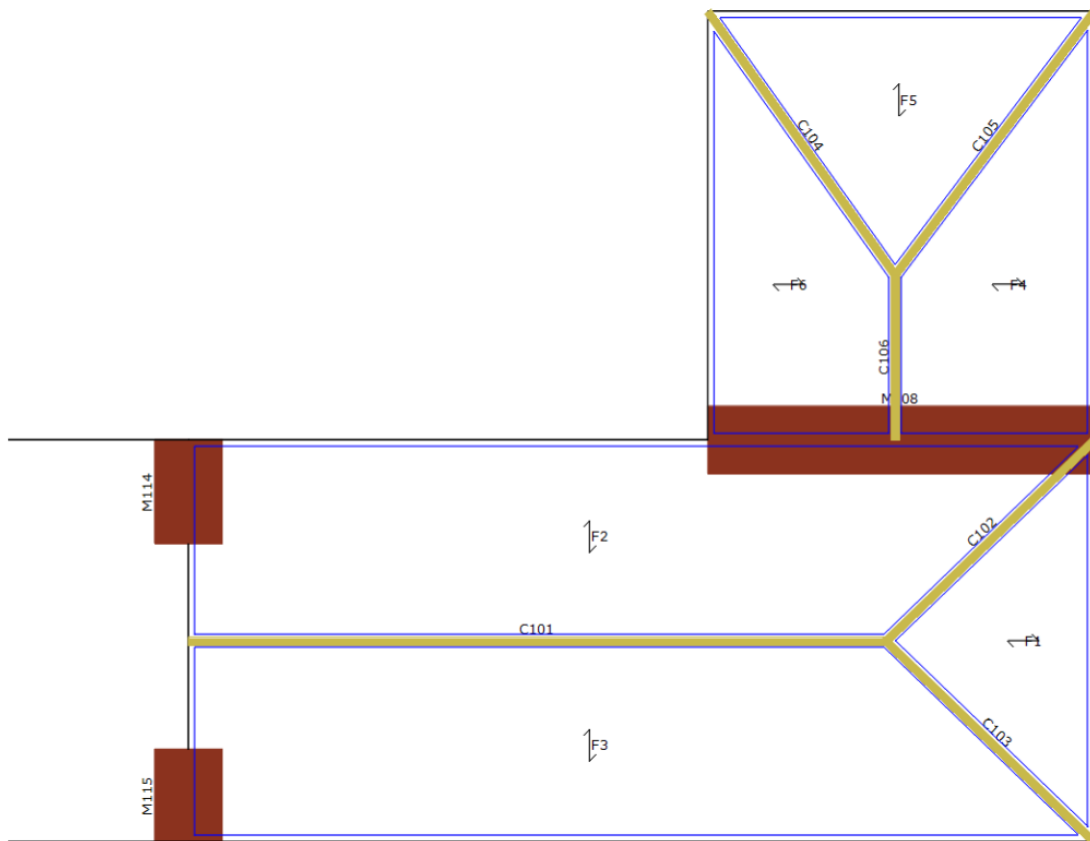
Slika 46. Tlocrtni prikaz etaže 2



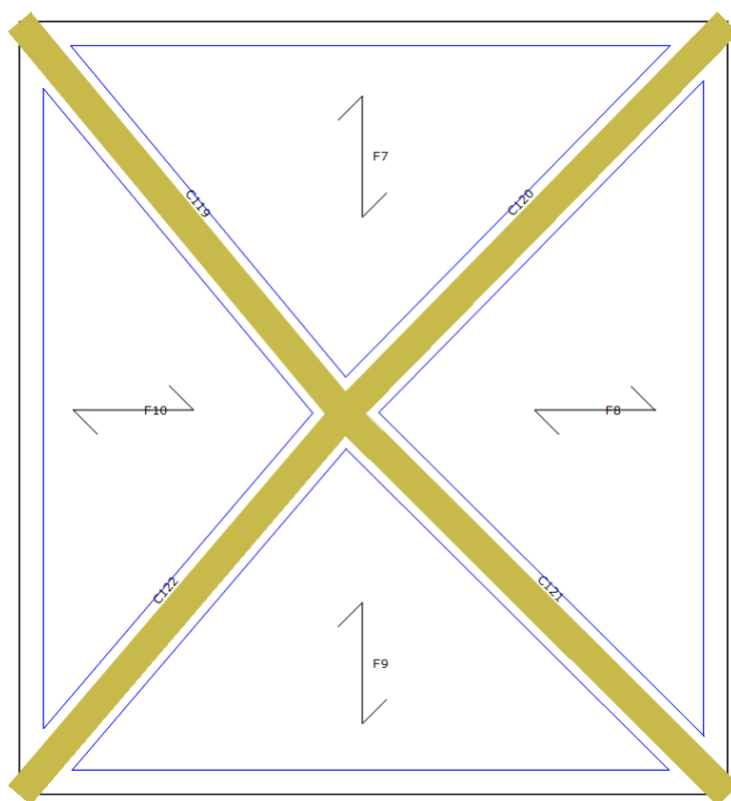
Slika 47. Tlocrtni prikaz etaže 3



Slika 48. Tlocrtni prikaz etaže 4



Slika 49. Tlocrtni prikaz krovne etaže 1



Slika 50. Tlocrtni prikaz krovne etaže 2

U nastavku su prikazani ulazni podaci modela konstrukcije u 3Muri programu.

Materijali

Oznaka	Tip	Boja	Opis
C24 Halor. plep	Drvo		EN 338:2002
zid kapele	Zide		

Zide

Oznaka	E [N/mm ²]	G [N/mm ²]	Specifična težina [kN/m ³]	f _m [N/cm ²]	Posmična otpornost [N/cm ²]
zid kapele	1 080,00	180,00	16,0	83,33	2,92

Drvo

Oznaka	E [N/mm ²]	G [N/mm ²]	Specifična težina [kN/m ³]	f _{wm} [N/mm ²]	f _{wk} [N/mm ²]	γ _w
C24 Halor. plep.	11 000,00	690,00	4,0	34,0	24,0	1,30
C24 Halor. plep.	7 000,00	440,00	4,0	20,0	14,0	1,30

Geometrija modela

Modeliranje građevine vrši se umetanjem zidova koji su „meshirani“ u diskretne makroelemente tako da tvore ekvivalentni okvirni model (EFM) koji čine deformabilni zidani stupovi i poprečne grede u ravni. Kruti čvorovi su naznačeni u područjima ziđa koja su obično manje podložna oštećenjima od potresa. Općenito, stupovi i prečke su spojeni na otvorima, a kruti čvorovi su elementi koji povezuju stupove i prečke. Matematički koncept koji stoji iza upotrebe ovog elementa omogućuje pronalaženje mehanizma oštećenja. To je posmično oštećenje u središnjem dijelu ili kompresijsko savijanje na rubovima elementa. Na taj način se dinamika štete može shvatiti na način na koji se ona događa u stvarnosti.

Čvorovi modela su trodimenzionalni, s pet stupnjeva slobode (tri komponente pomaka u cjelokupnom referentnom sustavu i rotacija oko X i Y osi). Alternativno, postoje i dvodimenzionalni čvorovi s tri stupnja slobode (dva prijenosa i rotacija razine zida). Trodimenzionalni čvorovi koriste se kako bi omogućili prijenos sila s prvog zida na drugi zid koji se nalazi poprečno na prvi. Dvodimenzionalni čvorovi imaju samo stupnjeve slobode na razini na kojoj se zid nalazi, što omogućuje prijenos stanja sile između različitih točaka zida.

Horizontalne strukture modelirane su s tri elementa poda čvorova povezanih s trodimenzionalnim čvorovima. Mogu se opteretiti okomito na njihovu razinu pomoću slučajnih ili trajnih opterećenja. Seizmička djelovanja opterećuju horizontalne elemente duž smjera etaže. Zbog toga je konačni element poda definiran s aksijalnom krutošću, ali bez krutosti na savijanje. To je zato što je glavno mehaničko ponašanje koje promatramo primanje horizontalnih opterećenja uslijed seizmičkog djelovanja.

Elementi konstrukcije

Razina 1

Zidni panel

Br.	Zid	Materijal	Ojačanje	Elevacija [cm]	Visina [cm]	Debljina [cm]
7	4	zid kapele	-	374,0	374,0	103,0
21	5	zid kapele	-	374,0	374,0	105,0
22	5	zid kapele	-	374,0	374,0	105,0
11	6	zid kapele	-	374,0	374,0	110,0
19	7	zid kapele	-	374,0	374,0	84,0
20	7	zid kapele	-	374,0	374,0	70,0
15	8	zid kapele	-	374,0	374,0	82,0
17	9	zid kapele	-	374,0	374,0	81,0
23	10	zid kapele	-	374,0	374,0	109,0
41	11	zid kapele	-	374,0	374,0	110,0
45	12	zid kapele	-	374,0	374,0	110,0

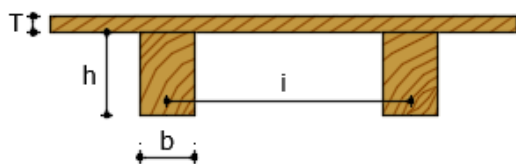
Razina 2

Zidni panel

Br.	Zid	Materijal	Ojačanje	Elevacija [cm]	Visina [cm]	Debljina [cm]
25	4	zid kapele	-	572,0	198,0	103,0
26	5	zid kapele	-	572,0	198,0	105,0
27	6	zid kapele	-	572,0	198,0	110,0
39	7	zid kapele	-	572,0	198,0	84,0
40	7	zid kapele	-	572,0	198,0	70,0
29	8	zid kapele	-	572,0	198,0	82,0
30	9	zid kapele	-	572,0	198,0	81,0
31	10	zid kapele	-	572,0	198,0	109,0
43	11	zid kapele	-	572,0	198,0	103,0
47	12	zid kapele	-	572,0	198,0	103,0

Horizontalne konstrukcije

Drveni grednik sa jednim redom dasaka

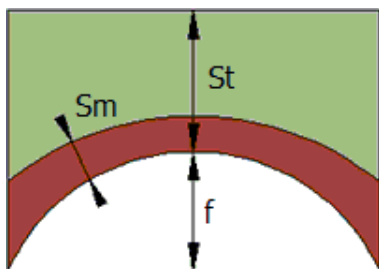


Oznaka	Materijal	Opis
U1	Drveni nosači: C24 Halor. plep	Drveni grednik sa jednim redom dasaka b [cm] = 14,0; h [cm] = 16,0; i [cm] = 90,0; T [cm] = 4,0

Međukatna konstrukcija

Br.	Oznaka	Elevacija [cm]	Debljina [cm]	G [N/mm ²]	E _x [N/mm ²]	E _y [N/mm ²]	Opterećenje masom	Tip
2	U1	572,0	4,0	10,00	4 355,5	0,00	Jednosmjerno	Drveni grednik sa jednim redom dasaka

Svod



Oznaka	Materijali	Opis
U1	Materijal svoda: zid kapele Gustoća ispune [kN/m ³] = 18,0	Križni svod S _t [cm] = 20,0; f [cm] = 35,0; S _m [cm] = 20,0
U2	Materijal svoda: zid kapele Gustoća ispune [kN/m ³] = 18,0	Križni svod S _t [cm] = 22,0; f [cm] = 60,0; S _m [cm] = 22,0

Svod

Br.	Oznaka	Elevacija [cm]	Debljina [cm]	G [N/mm ²]	E _x [N/mm ²]	E _y [N/mm ²]	Opterećenje masom	Tipologija
1	U1	572,0	20,0	76,58	459,50	459,50	Dvosmjerno	Križni svod
2	U2	572,0	22,0	54,24	325,45	325,45	Dvosmjerno	Križni svod
3	U2	572,0	22,0	110,99	665,91	665,91	Dvosmjerno	Križni svod
4	U2	572,0	22,0	111,92	671,50	671,50	Dvosmjerno	Križni svod

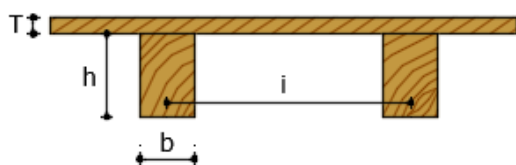
Razina 3

Zidni panel

Br.	Zid	Materijal	Ojačanje	Elevacija [cm]	Visina [cm]	Debljina [cm]
74	4	zid kapele	-	952,0	380,0	103,0
70	10	zid kapele	-	952,0	380,0	103,0
56	11	zid kapele	-	952,0	380,0	103,0
57	12	zid kapele	-	952,0	380,0	103,0

Horizontalne konstrukcije

Drveni grednik sa jednim redom dasaka



Oznaka	Materijali	Opis
U1	Drveni nosači: C24 Halor. plep	Drveni grednik sa jednim redom dasaka b [cm] = 14,0; h [cm] = 16,0; i [cm] = 90,0; T [cm] = 4,0

Međukatna konstrukcija

Br.	Oznaka	Elevacija [cm]	Debljina [cm]	G [N/mm ²]	E _x [N/mm ²]	E _y [N/mm ²]	Opterećenje masom	Tip
1	U1	952,0	4,0	10,00	4 355,5	0,00	Jednosmjerno	Drveni grednik sa jednim redom dasaka

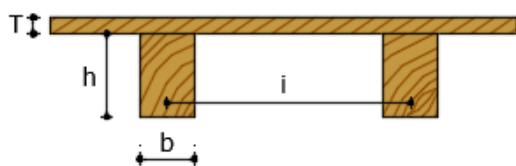
Razina 4

Zidni panel

Br.	Zid	Materijal	Ojačanje	Elevacija [cm]	Visina [cm]	Debljina [cm]
100	4	zid kapele	-	1 242,0	290,0	60,0
96	10	zid kapele	-	1 242,0	290,0	60,0
82	11	zid kapele	-	1 242,0	290,0	60,0
83	12	zid kapele	-	1 242,0	290,0	60,0

Horizontalne konstrukcije

Drveni grednik sa jednim redom dasaka



Oznaka	Materijali	Opis
U1	Drveni nosači: C24 Halor. plep	Drveni grednik sa jednim redom dasaka b [cm] = 14,0; h [cm] = 16,0; i [cm] = 90,0; T [cm] = 4,0

Međukatna konstrukcija

Br.	Oznaka	Elevacija [cm]	Debljina [cm]	G [N/mm ²]	E _x [N/mm ²]	E _y [N/mm ²]	Opterećenje masom	Tip
3	U1	1 242,0	4,0	10,00	4 355,5	0,00	Jednosmjerno	Drveni grednik sa jednim redom dasaka

Elementi krovišta

Razina 2

Zidni panel

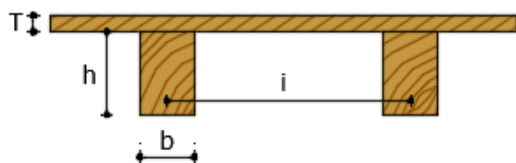
Br.	Zid	Materijal	Ojačanje	Debljina [cm]
25	4	zid kapele	-	103,0
26	5	zid kapele	-	105,0
108	5	zid kapele	-	105,0
27	6	zid kapele	-	110,0
39	7	zid kapele	-	84,0
40	7	zid kapele	-	70,0
29	8	zid kapele	-	82,0
30	9	zid kapele	-	81,0
31	10	zid kapele	-	109,0
114	10	zid kapele	-	109,0
115	10	zid kapele	-	109,0
43	11	zid kapele	-	103,0
47	12	zid kapele	-	103,0

Čelična/drvena greda

Br.	Zid	Materijal	Površina [cm ²]	I [cm ⁴]	W plastično [cm ³]
101	13	C24	192,00	4 096,00	512,00
102	14	C24	192,00	4 096,00	512,00
103	15	C24	192,00	4 096,00	512,00
104	16	C24	192,00	4 096,00	512,00
105	17	C24	192,00	4 096,00	512,00
106	18	C24	192,00	4 096,00	512,00

Elementi krovišta

Drveni grednik sa jednim redom dasaka



Oznaka	Materijali	Opis
U1	Drveni nosači: C24 Halor. plep	Drveni grednik sa jednim redom dasaka b [cm] = 12,0; h [cm] = 16,0; i [cm] = 90,0; T [cm] = 5,0

Nagib krovišta

Br.	Oznaka	Min vrijednost [cm]	Max vrijednost [cm]	Debljina [cm]	G [N/mm ²]	E _x [N/mm ²]	E _y [N/mm ²]	Opterećenje masom	Tip
1	U1	572,0	950,0	4,0	10,00	5 866,67	0,00	Jednosmjerno	Drveni grednik sa jednim redom dasaka
2	U1	572,0	950,0	4,0	10,00	5 866,67	0,00	Jednosmjerno	Drveni grednik sa jednim redom dasaka
3	U1	572,0	950,0	4,0	10,00	5 866,67	0,00	Jednosmjerno	Drveni grednik sa jednim redom dasaka
4	U1	572,0	950,0	4,0	10,00	5 866,67	0,00	Jednosmjerno	Drveni grednik sa jednim redom dasaka
5	U1	572,0	950,0	4,0	10,00	5 866,67	0,00	Jednosmjerno	Drveni grednik sa jednim redom dasaka
6	U1	572,0	950,0	4,0	10,00	5 866,67	0,00	Jednosmjerno	Drveni grednik sa jednim redom dasaka

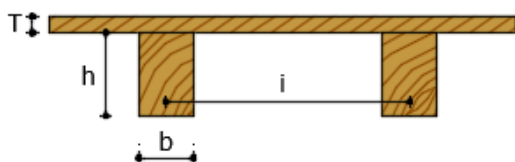
Razina 3 i 4

Čelična/drvena greda

Br.	Zid	Materijal	Površina [cm ²]	I [cm ⁴]	W plastično [cm ³]
119	19	C24	192,00	4 096,00	512,00
120	20	C24	192,00	4 096,00	512,00
121	21	C24	192,00	4 096,00	512,00
122	22	C24	192,00	4 096,00	512,00

Međukatne konstrukcije

Drveni grednik sa jednim redom dasaka



Oznaka	Materijali	Opis
U1	Drveni nosači: C24 Halor. plep	Drveni grednik sa jednim redom dasaka b [cm] = 12,0; h [cm] = 16,0; i [cm] = 90,0; T [cm] = 5,0

Nagib krovišta

Br.	Oznaka	Min vrijednost [cm]	Max vrijednost [cm]	Debljina [cm]	G [N/mm ²]	E _x [N/mm ²]	E _y [N/mm ²]	Opterećenje masom	Tip
7	U1	1 242,0	1 642,0	4,0	10,00	5 866,67	0,00	Jednosmjerno	Drveni grednik sa jednim redom dasaka
8	U1	1 242,0	1 642,0	4,0	10,00	5 866,67	0,00	Jednosmjerno	Drveni grednik sa jednim redom dasaka
9	U1	1 242,0	1 642,0	4,0	10,00	5 866,67	0,00	Jednosmjerno	Drveni grednik sa jednim redom dasaka
10	U1	1 242,0	1 642,0	4,0	10,00	5 866,67	0,00	Jednosmjerno	Drveni grednik sa jednim redom dasaka

Opterećenja

Seizmičko opterećenje:

Kombinacija opterećenja prema [Eurocode 0-p.6.5.3].

$$\gamma_1 \cdot E + G_{k1} + G_{k2} + \sum_i \psi_{2i} \cdot Q_{Ki}$$

Utjecaj potresa određen je uzimajući u obzir mase povezane sa sljedećim gravitacijskim opterećenjem:

$$G_{k1} + G_{k2} + \sum_i (\psi_{Ei} \cdot Q_{Ki})$$

Statičko opterećenje:

Kombinacija opterećenja

$$\gamma_{G1} \cdot G_{k1} + \gamma_{G2} \cdot G_{k2} + \gamma_Q \cdot \psi_0 \cdot Q_k$$

gdje je:

γ_1	faktor važnosti građevine (Eurocode 8 - p.4.2.5)
E	seizmički utjecaj za promatrano granično stanje
G_{K1}, G_{K2}	karakteristična vrijednost stalnog opterećenja
Q_{Ki}	karakteristična vrijednost promjenjivog opterećenja Q_k
ψ_2	koeficijent kombinacije koji daje kvazi-stalnu vrijednost promjenjivog opterećenja
ψ_0	koeficijent kombinacije za promjenjivo opterećenje
ψ_{Ei}	koeficijent kombinacije promjenjivog opterećenja Q_i , koji uzima u obzir mogućnost da će se sva opterećenja pojaviti za cijelu konstrukciju u slučaju potresa, te se dobiva množeći ψ_{2i} sa φ .

$\gamma_{G1}; \gamma_{G2}; \gamma_Q$: parcijalni koeficijenti sigurnosti

Br. Međukatna konstrukcija	G_{k1} [kN/m ²]	G_{k2} [kN/m ²]	Q_k [kN/m ²]	Vodeće promjenjivo djelovanje 1	φ	ψ_0	ψ_2
1	0,09	0,14	1,50	Da	1,00	1,00	0,30
2	0,09	0,14	1,50	Da	1,00	1,00	0,30
3	0,09	0,00	2,00	Da	1,00	1,00	0,30

Br. Svod	G_{k1} [kN/m ²]	G_{k2} [kN/m ²]	Q_k [kN/m ²]	Vodeće promjenjivo djelovanje 1	φ	ψ_0	ψ_2
1	4,20	0,93	1,50	Da	1,00	1,00	0,30
2	5,00	0,93	1,50	Da	1,00	1,00	0,30
3	5,00	0,93	1,50	Da	1,00	1,00	0,30
4	5,00	0,93	1,50	Da	1,00	1,00	0,30

Br. Nagib krovišta	G_{k1} [kN/m ²]	G_{k2} [kN/m ²]	Q_k [kN/m ²]	Vodeće promjenjivo djelovanje 1	φ	ψ_0	ψ_2
1	0,09	0,00	0,92	Da	1,00	1,00	0,00
2	0,09	0,00	0,92	Da	1,00	1,00	0,00
3	0,09	0,00	0,92	Da	1,00	1,00	0,00
4	0,09	0,00	0,92	Da	1,00	1,00	0,00
5	0,09	0,00	0,92	Da	1,00	1,00	0,00
6	0,09	0,00	0,92	Da	1,00	1,00	0,00
7	0,09	0,00	0,92	Da	1,00	1,00	0,00
8	0,09	0,00	0,92	Da	1,00	1,00	0,00
9	0,09	0,00	0,92	Da	1,00	1,00	0,00
10	0,09	0,00	0,92	Da	1,00	1,00	0,00

Spektar prema normi

Spektar odziva prema normi definiran je vršnim ubrzanjem i kategorijom tla.

Pushover analiza

Opis pushover analize

Potresna analiza promatrane konstrukcije provedena je nelinearnom statičkom metodom [Eurocode 8 – p.4.3.3.4.2.]. Potrebne provjere uključuju usporedbu takozvane krivulje kapaciteta i graničnih pomaka koji su definirani prema normi. Krivulja kapaciteta definirana je kao dijagram koji prikazuje odnos pomaka („displacement“) i potresne poprečne sile u podnožju („base shear“).

Za metodu postupnog guranja korištena su dva oblika vertikalne raspodjele bočnih sila. To su jednolična raspodjela koja je proporcionalna masi konstrukcije na svakoj etaži, te po visini linearno rastuća raspodjela koja ima oblik obrnutog trokuta.

Spomenute bočne sile djeluju na mjestima masa u modelu. U obzir je uzeta i slučajna ekscentričnost od 5 % koja uzima u obzir eventualne nesigurnosti u položaju masa.

Ovim načinom raspodjele bočnih sila dobiven je maksimalni pomak u podnožju zgrade. Pomak koji se ispituje za praćenje krivulje kapaciteta je točka konstrukcije koja se naziva kontrolni čvor. Norma zahtijeva praćenje bilinearne krivulje kapaciteta za ekvivalentni sustav (SDOF).

Određivanje krivulje u odnosu na ekvivalentni sustav omogućuje određivanje perioda u kojem se može očekivati najveći pomak izazvan potresom, prema spektrima koji se nalaze u normi [EC8 3.2.2.2].

Za pojedinu analizu moguće je odabrati uvjete seizmičkog opterećenja koje treba ispitati:

Raspodjela bočnih opterećenja: Određuje se koja raspodjela se koristi osim uniformne (statičke sile ili modalna).

Smjer: Određuje smjer iz kojeg je konstrukcija opterećena bočnim potresnim opterećenjem.

Za određivanje stanja najvećeg seizmičkog opterećenja izvršene su pojedinačne analize za tipologiju opterećenja, seizmički smjer i mogući slučajni ekscentricitet.

Br.	Smjer seizmičkog opterećenja	Uniformna raspodjela bočnog opterećenja	Ekscentricitet [cm]	Razina	Čvor
1	+X	Uniformna	0,0	4	42
2	+X	Statičke sile	0,0	4	42
3	-X	Uniformna	0,0	4	42
4	-X	Statičke sile	0,0	4	42
5	+Y	Uniformna	0,0	4	42
6	+Y	Statičke sile	0,0	4	42
7	-Y	Uniformna	0,0	4	42
8	-Y	Statičke sile	0,0	4	42
9	+X	Uniformna	64,5	4	42
10	+X	Uniformna	-64,5	4	42
11	+X	Statičke sile	64,5	4	42
12	+X	Statičke sile	-64,5	4	42
13	-X	Uniformna	64,5	4	42
14	-X	Uniformna	-64,5	4	42
15	-X	Statičke sile	64,5	4	42
16	-X	Statičke sile	-64,5	4	42
17	+Y	Uniformna	88,0	4	42
18	+Y	Uniformna	-88,0	4	42
19	+Y	Statičke sile	88,0	4	42
20	+Y	Statičke sile	-88,0	4	42
21	-Y	Uniformna	88,0	4	42
22	-Y	Uniformna	-88,0	4	42
23	-Y	Statičke sile	88,0	4	42
24	-Y	Statičke sile	-88,0	4	42

Rezultati

Prema normi provedene su provjere graničnog stanja znatnog oštećenja (ZO) i graničnog stanja ograničenog oštećenja (OO).

Granično stanje znatnog oštećenja (ZO) proračunato je za vršno ubrzanje tla za povratni period od 95 godina, dok je granično stanje ograničenog oštećenja (OO) proračunato za vršno ubrzanje tla za povratni period od 225 godina.

Za proračun potresne otpornosti građevine određeno je horizontalno vršno ubrzanje tla za povratni period od 95 godina $a_{gR=}$, te za povratni period od 225 godina $a_{gR=}$, prema karti potresnih područja Republike Hrvatske.

U proračunu za lokaciju navedene građevine određen je tip temeljnog tla C – debeli nanosi srednje zbijenog pijeska, šljunka ili srednje krute gline debljine od nekoliko desetaka do više stotina metara.

Analizirana građevina spada u razred važnosti III (kulturne institucije). Za zgrade III kategorije faktor važnosti iznosi 1,20 iz tablice u poglavlju 3.6.

Granično stanje znatnog oštećenja (ZO):

$$d_t^{SD} \leq d_m^{SD}$$

d_t^{SD} : ciljani (zahtijevani) pomak prema normi

d_m^{SD} : sposobnost pomaka za granično stanje znatnog oštećenja (ZO)

Granično stanje ograničenog oštećenja (OO):

$$S_d(T^*) \leq d_y^*$$

$S_d(T^*)$: ciljani pomak zahtijevan u normi za $T=T^*$

d_y^* : sposobnost plastične deformacije ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode

Indeks oštećenja

Za granična stanja izračunat je indeks oštećenja α (α_{ZO} , α_{OO})

Ovi su parametri izračunati prema sljedećim izrazima:

$$\alpha_{SD} = \frac{P_{GA_{CSD}}}{P_{GA_{DSD}}}; \alpha_{DL} = \frac{P_{GA_{CDL}}}{P_{GA_{DDL}}}$$

Tablica 3. Prikaz rezultata provedene analize sa označenim kritičnim iteracijama (žuto)
po X i Y smjeru

Br.	Smjer seizmičkog opterećenja	Seizmičko opterećenje	E _{cc.} [cm]	d _t ZO [cm]	d _m ZO [cm]	ZO Ver.	S _d OO [cm]	d*y OO [cm]	OO Ver.
1	+X	Uniformna	0,0	1,91	3,92	Da	0,21	0,33	Da
2	+X	Statičke sile	0,0	5,25	3,37	Ne	0,49	0,38	Ne
3	-X	Uniformna	0,0	3,29	1,28	Ne	0,22	0,14	Ne
4	-X	Statičke sile	0,0	5,32	1,22	Ne	0,37	0,10	Ne
5	+Y	Uniformna	0,0	6,48	4,13	Ne	1,22	0,83	Ne
6	+Y	Statičke sile	0,0	8,34	7,94	Ne	1,75	0,80	Ne
7	-Y	Uniformna	0,0	6,37	4,73	Ne	1,17	0,75	Ne
8	-Y	Statičke sile	0,0	6,42	2,57	Ne	1,06	0,31	Ne
9	+X	Uniformna	64,5	1,82	3,92	Da	0,18	0,28	Da
10	+X	Uniformna	-64,5	2,66	1,73	Ne	0,21	0,23	Da
11	+X	Statičke sile	64,5	4,53	1,34	Ne	0,35	0,23	Ne
12	+X	Statičke sile	-64,5	5,07	1,40	Ne	0,41	0,23	Ne
13	-X	Uniformna	64,5	3,28	1,19	Ne	0,22	0,15	Ne
14	-X	Uniformna	-64,5	3,32	1,16	Ne	0,22	0,14	Ne
15	-X	Statičke sile	64,5	5,72	1,13	Ne	0,43	0,11	Ne
16	-X	Statičke sile	-64,5	5,64	1,20	Ne	0,42	0,11	Ne
17	+Y	Uniformna	88,0	5,89	5,39	Ne	1,07	0,80	Ne
18	+Y	Uniformna	-88,0	7,19	4,93	Ne	1,41	0,84	Ne
19	+Y	Statičke sile	88,0	7,68	2,96	Ne	1,55	0,83	Ne
20	+Y	Statičke sile	-88,0	8,84	3,64	Ne	1,90	0,66	Ne
21	-Y	Uniformna	88,0	5,26	2,47	Ne	0,85	0,54	Ne
22	-Y	Uniformna	-88,0	6,79	4,06	Ne	1,25	0,65	Ne
23	-Y	Statičke sile	88,0	5,62	1,18	Ne	0,84	0,29	Ne
24	-Y	Statičke sile	-88,0	8,32	3,41	Ne	1,69	0,48	Ne

Br.	Smjer seizmičkog opterećenja	Seizmičko opterećenje	E _{cc.} [cm]	α ZO	α OO
1	+X	Uniformna	0,0	1,489	1,574
2	+X	Statičke sile	0,0	0,719	0,766
3	-X	Uniformna	0,0	0,524	0,652
4	-X	Statičke sile	0,0	0,291	0,263
5	+Y	Uniformna	0,0	0,678	0,683
6	+Y	Statičke sile	0,0	0,954	0,457
7	-Y	Uniformna	0,0	0,771	0,639
8	-Y	Statičke sile	0,0	0,433	0,294
9	+X	Uniformna	64,5	1,547	1,511
10	+X	Uniformna	-64,5	0,777	1,065
11	+X	Statičke sile	64,5	0,436	0,646
12	+X	Statičke sile	-64,5	0,395	0,559
13	-X	Uniformna	64,5	0,510	0,686
14	-X	Uniformna	-64,5	0,491	0,645
15	-X	Statičke sile	64,5	0,259	0,267
16	-X	Statičke sile	-64,5	0,275	0,271
17	+Y	Uniformna	88,0	0,926	0,751
18	+Y	Uniformna	-88,0	0,712	0,597
19	+Y	Statičke sile	88,0	0,426	0,533
20	+Y	Statičke sile	-88,0	0,429	0,347
21	-Y	Uniformna	88,0	0,542	0,630
22	-Y	Uniformna	-88,0	0,630	0,516
23	-Y	Statičke sile	88,0	0,269	0,344
24	-Y	Statičke sile	-88,0	0,428	0,283

Legenda rezultata

Armirani beton

	Neoštećeno
	Posmično otkazivanje
	Oštećenje od savijanja
	Otkazivanje savijanjem
	Tlačno otkazivanje
	Vlačno otkazivanje
	Posmično otkazivanje

Drvo

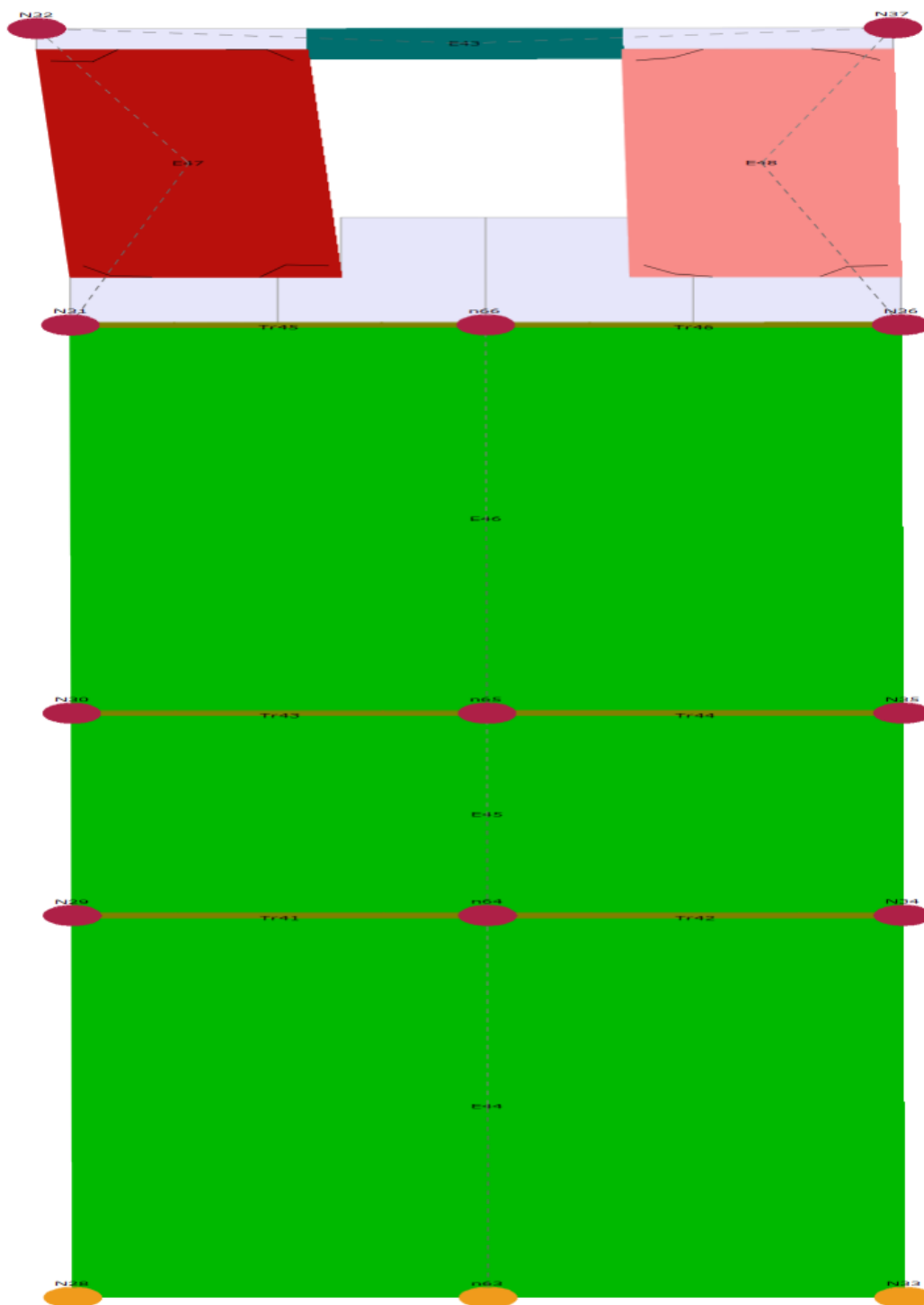
	Neoštećeno
	Otkazivanje savijanjem
	Tlačno otkazivanje
	Vlačno otkazivanje

Čelik

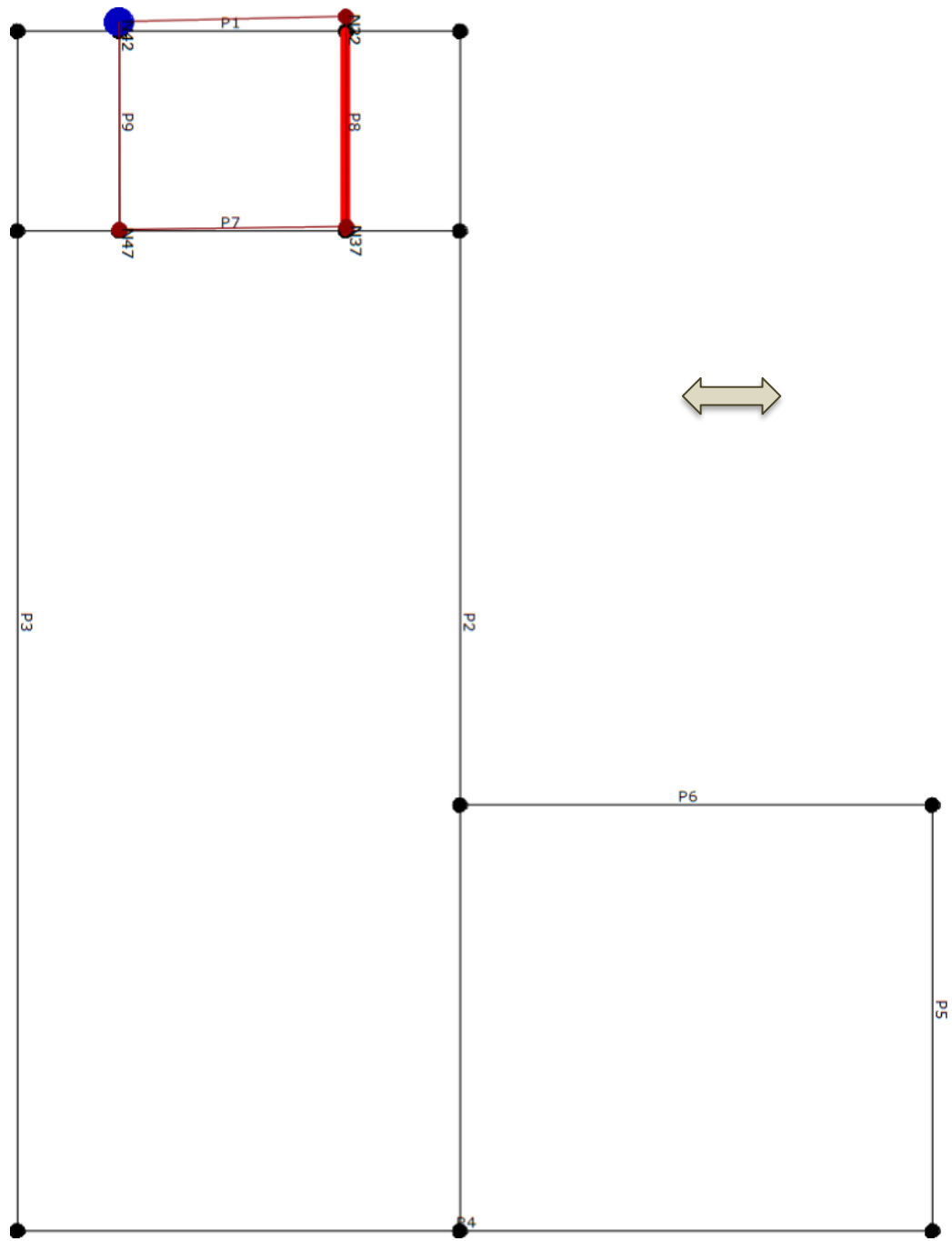
	Neoštećeno
	Oštećenje od savijanja
	Tlačno oštećenje
	Vlačno oštećenje
	Neučinkovit element
	Povratak na elastično stanje

Zide

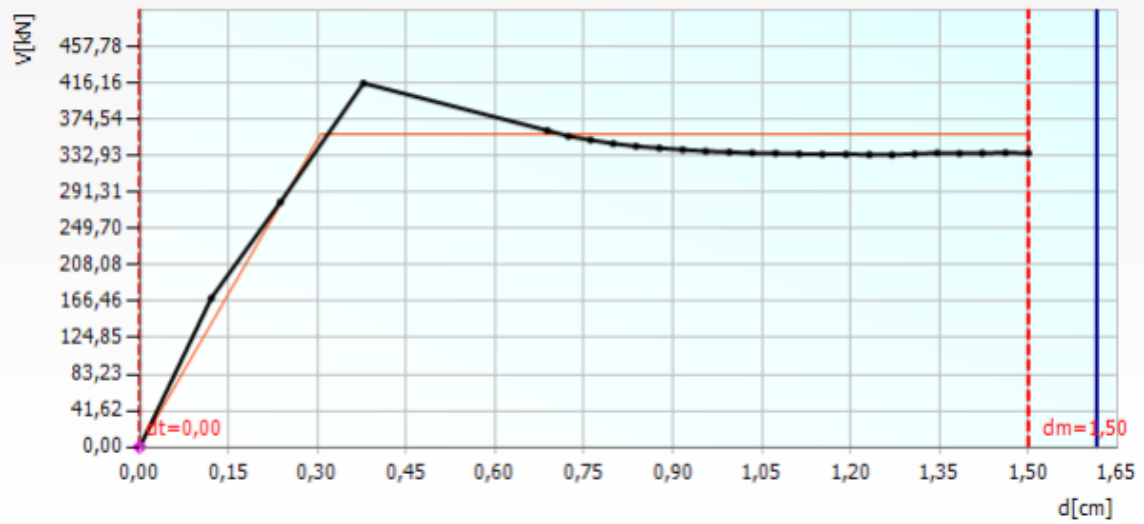
	Neoštećeno
	Početak plastičnosti
	Posmično oštećenje
	Početak posmičnog sloma
	Posmično otkazivanje
	Oštećenje od savijanja
	Početak sloma savijanjem
	Otkazivanje savijanjem
	Ozbiljno oštećenje
	Tlačno otkazivanje
	Vlačno otkazivanje
	Otkazivanje tijekom elastične faze
	Neučinkovit element



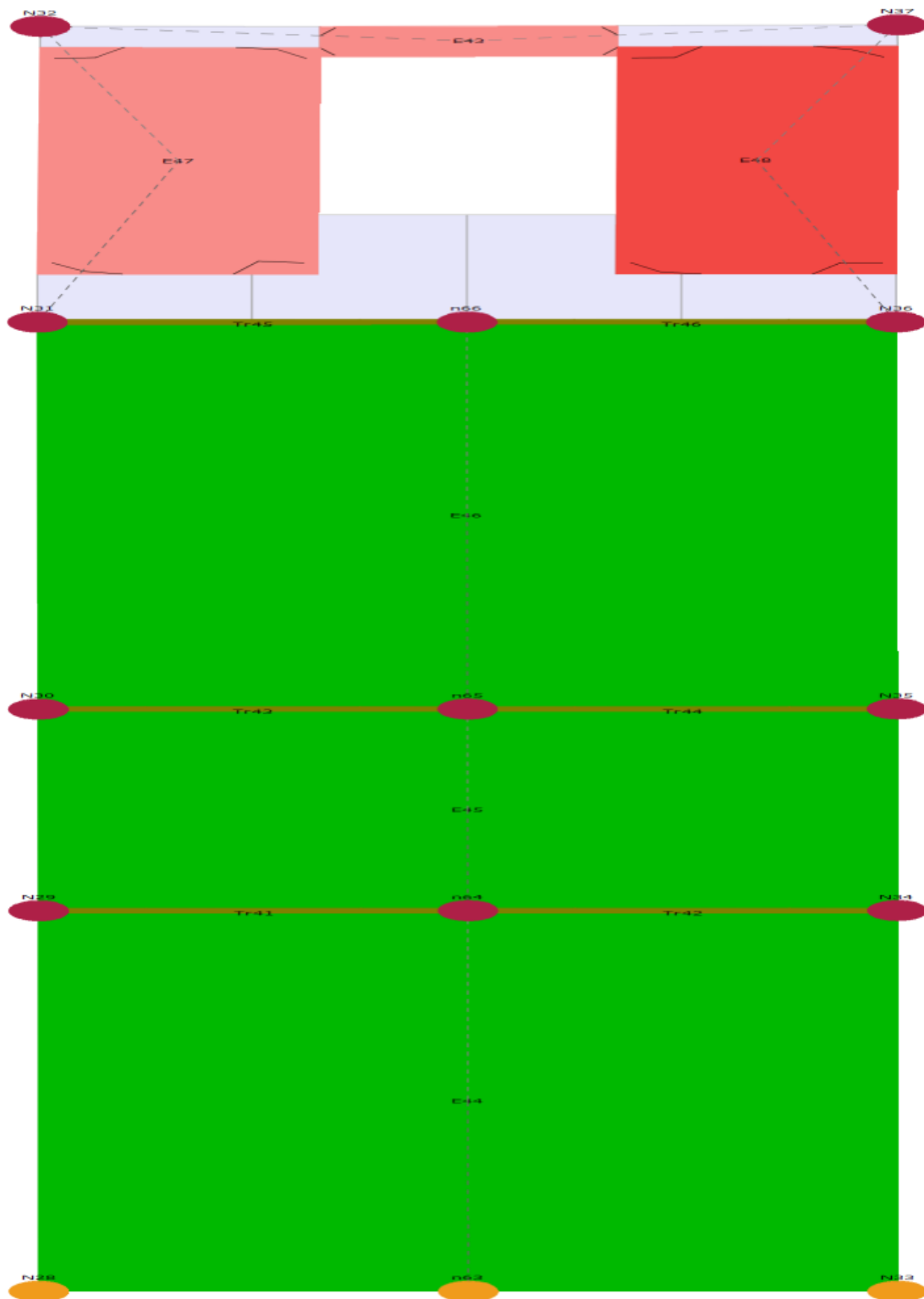
Slika 51. Seizmička analiza br. 15 u smjeru X; zid 8; korak 26



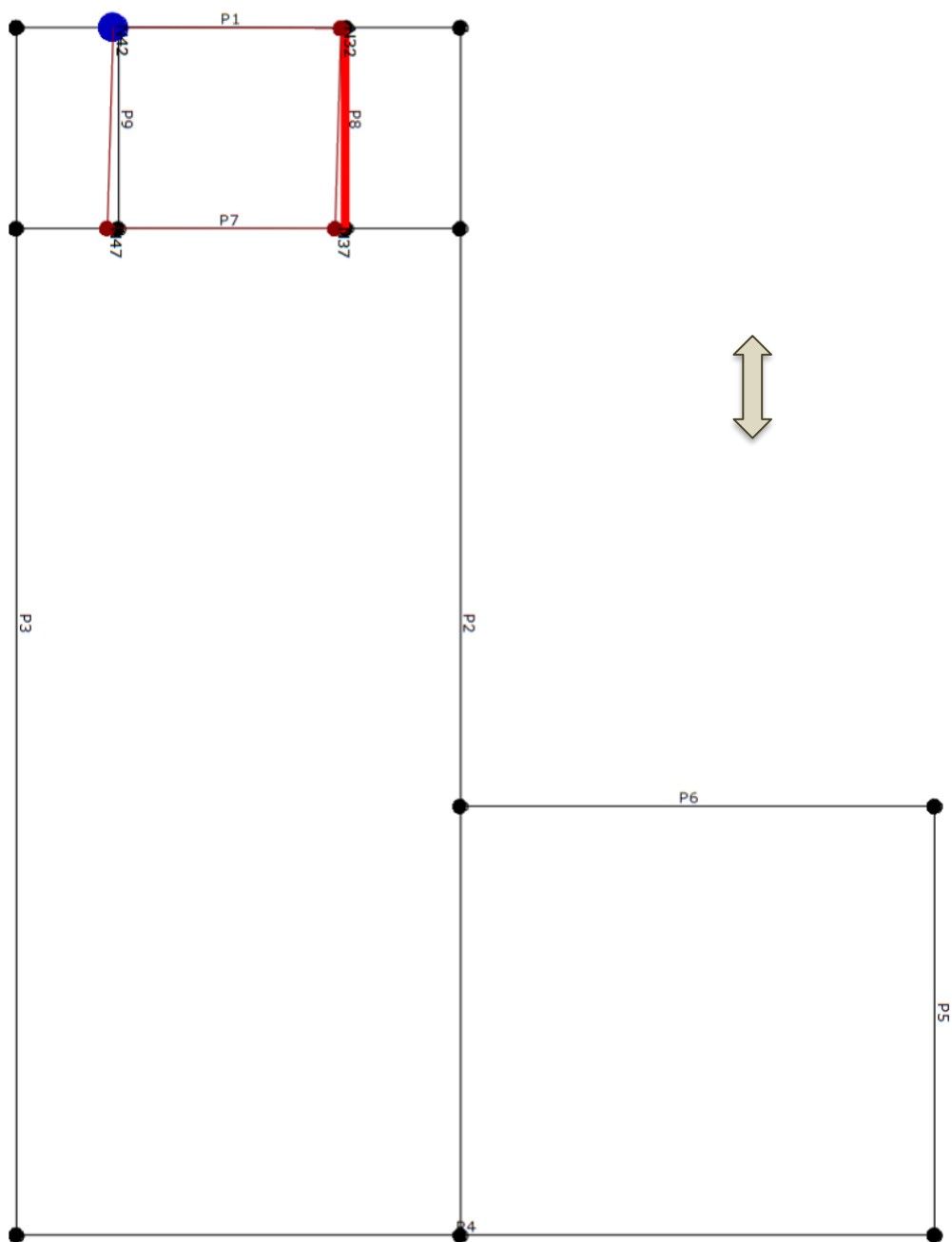
Slika 52. Tlocrtni pogled deformacije; smjer X



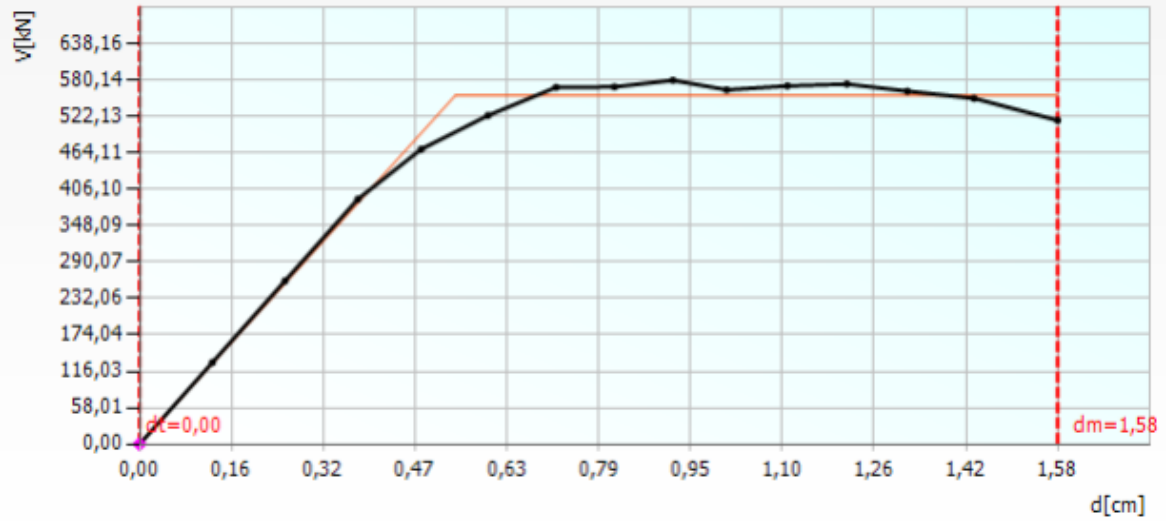
Slika 53. Mjerodavna krivulja kapaciteta nosivosti; analiza br. 15 (smjer X)



Slika 54. Seizmička analiza br. 23 u smjeru Y; zid 8; korak 15



Slika 55. Tlocrtni pogled deformacije; smjer Y



Slika 56. Mjerodavna krivulja kapaciteta nosivosti; analiza br. 23 (smjer Y)

5.3. Metoda spektra odziva

Proveden je linearno-dinamički modalni proračun u programskom paketu Tower, gdje se primjenjuje spektar odziva na prostornome modelu. Za zidove i međukatne konstrukcije građevine korišteni su plošni modeli, a za grede i stupove štapni elementi.

U prostornom proračunskom modelu konstrukcije definirana su i zadana sljedeća vertikalna opterećenja:

Opterećenje.1 (stalno + dodatno stalno) g:

-gravitacijsko opterećenje od vlastite težine konstruktivnih elemenata

-prostorna težina punog zidanog ziđa svodova i zidova $\gamma = 18,0 \text{ kN/m}^3$

-prostorna težina (pretežno) kamenog ziđa temelja $\gamma = 22,0 \text{ kN/m}^3$

Težine slojeva i podova

na plohe krovova $0,70 \text{ kN/m}^2$ tlocrtne površine

na drvene podeste zvonika $0,20 \text{ kN/m}^2$

na svodove $0,50 \text{ kN/m}^2$

na svodove poda kora $2,50 \text{ kN/m}^2$

Težina zvona (koncentrirana sila) $10,0 \text{ kN}$

Opterećenje 2. (pokretno opterećenje) p:

pokretna opterećenja: na podeste zvonika i svodove (kata) $0,5 \text{ kN/m}^2$

na svodove poda kora $4,0 \text{ kN/m}^2$

OPT.3 (opterećenje snijegom) s:

snijeg:	na plohe krova zvonika	0,5 kN/m ²
	na kosim plohama zvonika	0,11 kN/m ²
	na plohe ostalih krovova	0,8 kN/m ²
	na kosim plohama ostalih krovova	0,55 kN/m ²

Opterećenje snijegom provedeno je prema normi Eurocode 1 (EC1) *Djelovanja na konstrukcije, Djelovanje snijega*; EN 1991-1-3:2003.

Karakteristična vrijednost opterećenja snijegom na tlo iznosi $s_k = 1,30 \text{ kN/m}^2$

Opterećenja snijega na krov provode se prema EC1 EN1991-1-3:2003 §5

Kut nagiba krovišta $\alpha_1 = 46^\circ$

$$\alpha_2 = 46^\circ$$

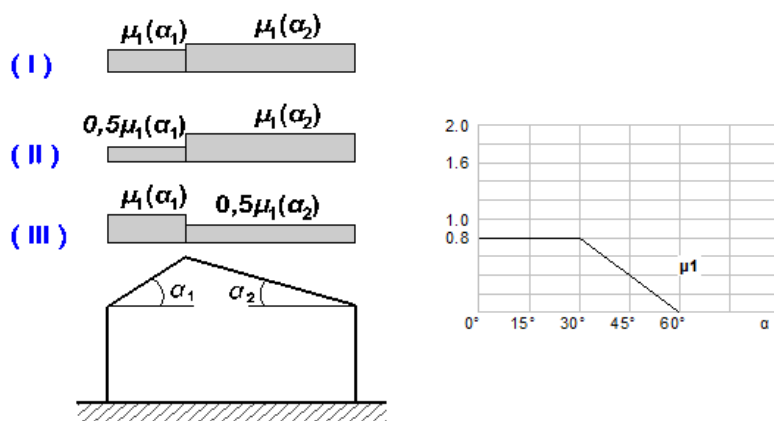
Koeficijent izloženosti $C_e = 1,00$ (EC1-1-3 §5.2(7))

Termalni koeficijent $C_t = 1,00$ (EC1-1-3 §5.2(8))

Koeficijent oblika krova: $\alpha_1 = 46^\circ$, $\alpha_2 = 46^\circ$, $i_1(\alpha_1)=0,373$, $i_1(\alpha_2)=0,373$

$$S(\alpha_1)=\mu_1(\alpha_1) \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,373 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,30 = 0,485 \text{ kN/m}^2$$

$$S(\alpha_2)=\mu_1(\alpha_2) \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,373 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,30 = 0,485 \text{ kN/m}^2$$

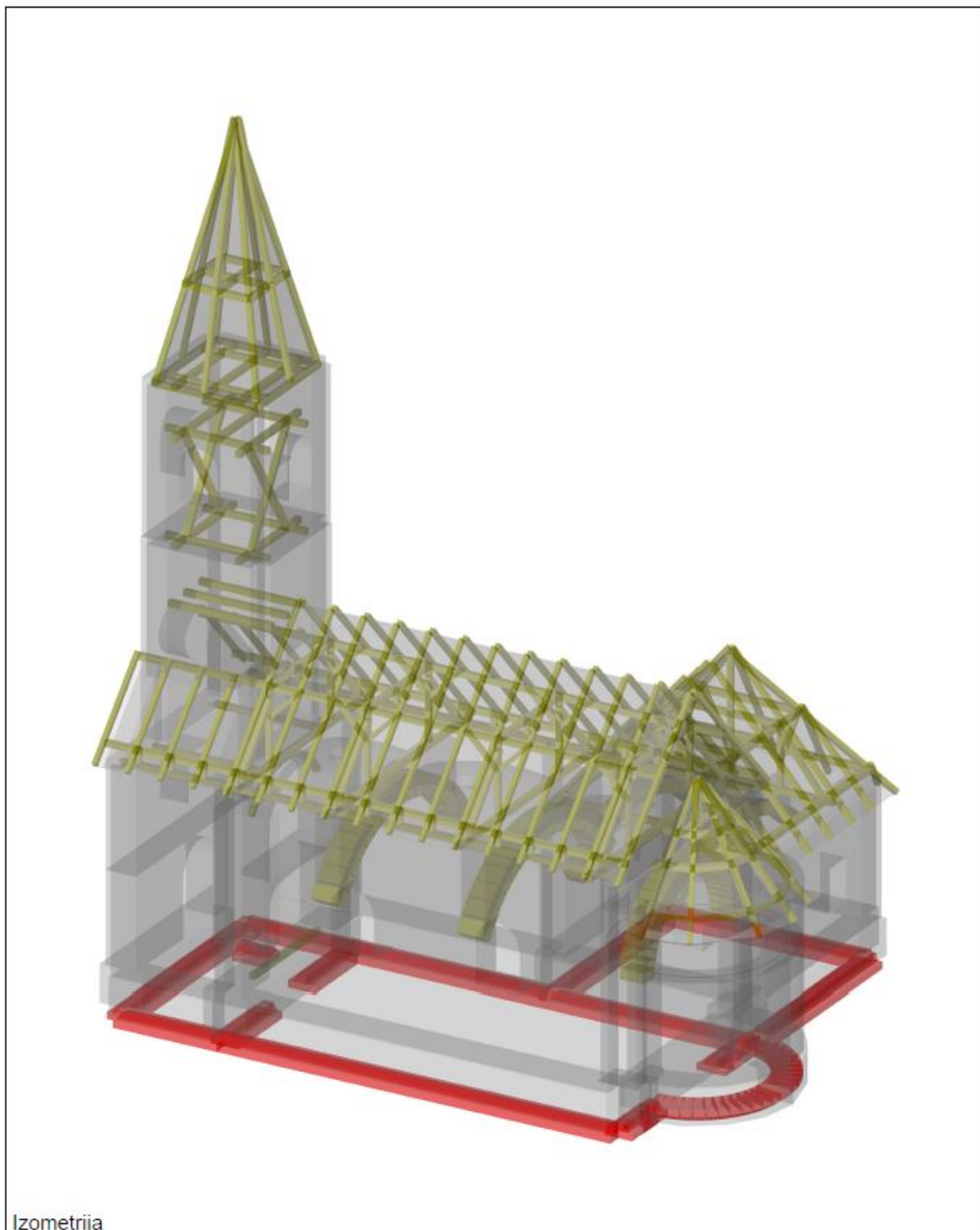


Opterećenje snijegom

Slučaj opterećenja (I) $S(\text{Lijevo})=S(\alpha_1)=0,485 \text{ kN/m}^2$, $S(\text{Desno})=S(\alpha_2)=0,485 \text{ kN/m}^2$

Slučaj opterećenja (II) $S(\text{Lijevo})=0,5 \times S(\alpha_1)=0,243 \text{ kN/m}^2$, $S(\text{Desno})=S(\alpha_2)=0,485 \text{ kN/m}^2$

Slučaj opterećenja (III), $S(\text{Lijevo})=S(\alpha_1)=0,485 \text{ kN/m}^2$, $S(\text{Desno})=0,5 \times S(\alpha_2)=0,243 \text{ kN/m}^2$



*Slika 57. 3D proračunski model konstrukcije kapele u Jakopovcu
-postojeće stanje-*

Raspored seizmičkih sila po visini objekta - S_y

Nivo	Z [m]	Ton 1			Ton 2			Ton 3		
		P _x [kN]	P _y [kN]	P _z [kN]	P _x [kN]	P _y [kN]	P _z [kN]	P _x [kN]	P _y [kN]	P _z [kN]
	26.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
vrh križa zvonika	24.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
vrh krova zvonika	21.80	-0.03	0.14	0.00	-1.31	5.51	-0.05	-0.00	-0.00	-0.00
podest krova zvonika	17.63	-0.08	0.43	0.00	-4.07	17.15	-0.19	-0.01	-0.00	-0.00
vrh zidova zvonika	15.10	-0.36	1.89	0.00	-17.74	75.24	-0.94	-0.03	-0.01	-0.01
zvonik-ovjes zvon i vrh otvora	13.70	-0.51	2.73	0.00	-25.52	108.57	-1.48	-0.05	-0.01	-0.01
UK otvora zvonika	12.20	-0.42	2.29	0.00	-21.18	90.73	-1.38	-0.04	-0.01	-0.01
drugi podest zvonika	10.84	-0.59	3.21	0.01	-29.29	126.96	-2.21	-0.06	-0.01	-0.02
prvi podest zvonika	8.95	-0.75	4.23	0.18	-37.71	156.91	2.97	-0.07	-0.01	-0.02
tjeme lukova sakristije	5.84	-3.04	20.10	3.32	-156.88	610.49	71.95	-0.32	-0.07	-0.07
baza svoda apside	2.73	-1.53	33.74	9.21	-81.77	313.11	-11.50	-0.51	-0.18	-0.18
pod kora	2.47	-0.60	3.53	0.02	-25.48	110.29	-0.05	-0.05	-0.01	-0.01
baza užeg glavnog svoda	1.23	-0.50	3.03	0.03	-20.37	91.61	1.07	-0.04	-0.01	0.00
0.00	0.00	-0.18	1.12	0.24	-7.04	34.36	8.04	-0.01	-0.00	-0.00
OK temelja	-0.20	-0.01	0.06	-0.12	-0.38	1.53	-3.87	-0.00	-0.00	0.00
baza glavnih svodova	-0.28	-0.07	0.42	0.20	-2.90	13.06	6.18	-0.01	-0.00	-0.00
temeljne stope	-1.00	-0.01	0.06	-0.03	-0.47	1.68	-1.35	-0.00	-0.00	0.00
baza svodova sakristije	-3.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Σ=	-8.68	76.98	13.07	-432.13	1757.2	67.20	-1.21	-0.34	-0.32

Nivo	Z [m]	Ton 4			Ton 5			Ton 6		
		P _x [kN]	P _y [kN]	P _z [kN]	P _x [kN]	P _y [kN]	P _z [kN]	P _x [kN]	P _y [kN]	P _z [kN]
	26.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
vrh križa zvonika	24.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
vrh krova zvonika	21.80	-0.39	-0.10	-0.06	0.16	-1.62	0.04	-0.03	-0.03	-0.00
podest krova zvonika	17.63	-1.20	-0.31	-0.21	0.52	-5.05	0.15	-0.08	-0.09	-0.01
vrh zidova zvonika	15.10	-5.28	-1.38	-1.07	2.34	-22.30	0.77	-0.34	-0.42	-0.03
zvonik-ovjes zvon i vrh otvora	13.70	-7.57	-1.99	-1.66	3.37	-31.64	1.20	-0.48	-0.59	-0.04
UK otvora zvonika	12.20	-6.20	-1.64	-1.56	2.74	-25.03	1.12	-0.37	-0.46	-0.04
drugi podest zvonika	10.84	-8.36	-2.25	-2.51	3.56	-31.97	1.79	-0.43	-0.58	-0.06
prvi podest zvonika	8.95	-10.30	-2.58	-2.69	4.07	-10.48	4.29	-0.37	-0.16	-0.01
tjeme lukova sakristije	5.84	-43.12	-8.92	-3.52	13.92	197.71	42.19	-0.45	3.34	1.68
baza svoda apside	2.73	-23.15	-3.81	4.69	-27.06	236.36	-11.17	5.06	4.14	4.71
pod kora	2.47	-7.47	-1.61	-1.14	-3.17	54.55	0.28	-0.14	1.11	-0.04
baza užeg glavnog svoda	1.23	-5.99	-1.33	0.22	-3.82	59.18	0.60	-0.13	1.22	0.02
0.00	0.00	-2.00	-0.49	-0.24	-1.58	21.12	1.72	-0.07	0.45	0.03
OK temelja	-0.20	-0.10	-0.01	0.37	-0.03	1.63	-1.83	-0.00	0.03	-0.02
baza glavnih svodova	-0.28	-0.75	-0.18	-0.28	-0.42	6.77	3.37	-0.02	0.14	0.06
temeljne stope	-1.00	-0.10	-0.02	0.18	-0.03	0.91	1.28	-0.00	0.02	0.03
baza svodova sakristije	-3.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Σ=	-121.97	-26.62	-9.48	-5.44	450.13	45.79	2.14	8.13	6.26

		Ton 7			Ton 8			Ton 9		
Nivo	Z [m]	Px [kN]	Py [kN]	Pz [kN]	Px [kN]	Py [kN]	Pz [kN]	Px [kN]	Py [kN]	Pz [kN]
	26.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
vrh križa zvonika	24.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
vrh krova zvonika	21.80	-0.01	-0.07	0.00	0.00	-0.02	-0.00	0.01	0.00	-0.00
podest krova zvonika	17.63	-0.05	-0.21	0.01	0.00	-0.05	-0.01	0.04	0.01	-0.00
vrh zidova zvonika	15.10	-0.19	-0.91	0.03	-0.00	-0.22	-0.03	0.19	0.03	-0.01
zvonik-ovjes zvon i vrh otvora	13.70	-0.27	-1.25	0.04	-0.01	-0.29	-0.05	0.26	0.04	-0.01
UK otvora zvonika	12.20	-0.19	-0.90	0.04	-0.02	-0.19	-0.05	0.17	0.02	-0.01
drugi podest zvonika	10.84	-0.18	-0.98	0.06	-0.03	-0.17	-0.08	0.14	0.01	-0.02
prvi podest zvonika	8.95	-0.08	0.01	0.12	-0.06	-0.36	-0.17	-0.02	0.09	0.00
tjeme lukova sakristije	5.84	0.50	7.27	2.19	0.08	-0.82	5.12	-0.81	0.91	0.11
baza svoda apside	2.73	3.76	2.32	-2.33	-0.70	-5.20	1.05	-1.49	-0.76	0.19
pod kora	2.47	0.36	3.80	0.02	-0.24	3.05	-0.02	-0.50	-0.26	-0.01
baza užeg glavnog svoda	1.23	0.35	4.67	-0.01	-0.23	5.76	-0.04	-0.47	-0.43	0.02
0.00	0.00	0.09	1.96	0.04	-0.08	3.18	-0.10	-0.16	-0.21	0.03
OK temelja	-0.20	0.02	0.06	-0.07	-0.02	-0.07	0.08	-0.02	-0.00	-0.01
baza glavnih svodova	-0.28	0.03	0.60	0.12	-0.02	0.94	-0.10	-0.04	-0.06	0.02
temeljne stope	-1.00	0.01	0.03	0.05	-0.00	-0.03	-0.00	-0.01	0.00	-0.00
baza svodova sakristije	-3.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Σ=	4.17	16.41	0.30	-1.33	5.50	5.59	-2.71	-0.61	0.31

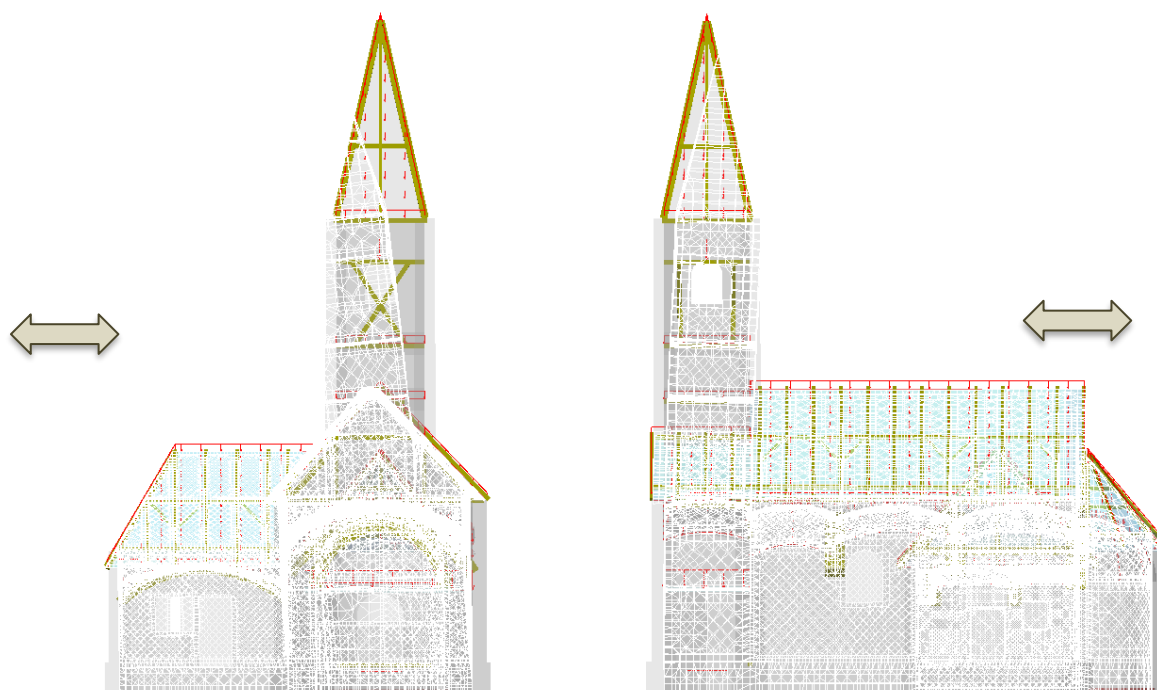
		Ton 10			Ton 11			Ton 12		
Nivo	Z [m]	Px [kN]	Py [kN]	Pz [kN]	Px [kN]	Py [kN]	Pz [kN]	Px [kN]	Py [kN]	Pz [kN]
	26.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
vrh križa zvonika	24.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
vrh krova zvonika	21.80	0.43	0.03	-0.02	0.30	-0.23	-0.01	-0.04	-0.05	0.00
podest krova zvonika	17.63	1.32	0.11	-0.06	0.92	-0.69	-0.04	-0.12	-0.15	0.01
vrh zidova zvonika	15.10	5.67	0.48	-0.30	3.93	-2.86	-0.20	-0.51	-0.63	0.07
zvonik-ovjes zvon i vrh otvora	13.70	7.59	0.65	-0.46	5.19	-3.69	-0.31	-0.66	-0.81	0.10
UK otvora zvonika	12.20	4.81	0.43	-0.44	3.07	-2.17	-0.30	-0.37	-0.47	0.10
drugi podest zvonika	10.84	3.70	0.40	-0.70	1.85	-1.37	-0.47	-0.18	-0.28	0.16
prvi podest zvonika	8.95	-1.82	-0.61	-1.00	-2.80	1.97	-0.54	0.47	0.66	0.21
tjeme lukova sakristije	5.84	-34.29	-8.69	-2.27	-33.52	19.87	-1.76	4.55	5.47	0.04
baza svoda apside	2.73	-27.21	1.56	1.34	-3.61	1.99	-4.03	0.60	-0.29	-1.06
pod kora	2.47	-8.89	0.19	-0.28	0.74	3.04	-0.13	0.12	0.70	0.06
baza užeg glavnog svoda	1.23	-7.55	1.12	0.21	1.84	2.19	0.12	0.08	-0.03	-0.03
0.00	0.00	-2.11	0.81	-0.01	1.09	0.18	0.06	-0.02	-0.16	0.03
OK temelja	-0.20	-0.24	-0.00	0.17	0.39	0.05	-0.03	-0.02	0.01	-0.06
baza glavnih svodova	-0.28	-0.59	0.24	-0.25	0.27	0.05	0.04	-0.01	-0.03	0.08
temeljne stope	-1.00	-0.10	-0.03	-0.06	0.06	0.08	0.03	-0.00	0.01	0.02
baza svodova sakristije	-3.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Σ=	59.28	-3.31	-4.13	20.28	18.40	-7.56	3.88	3.96	-0.27

Faktori participacije - Sudjelujuće mase

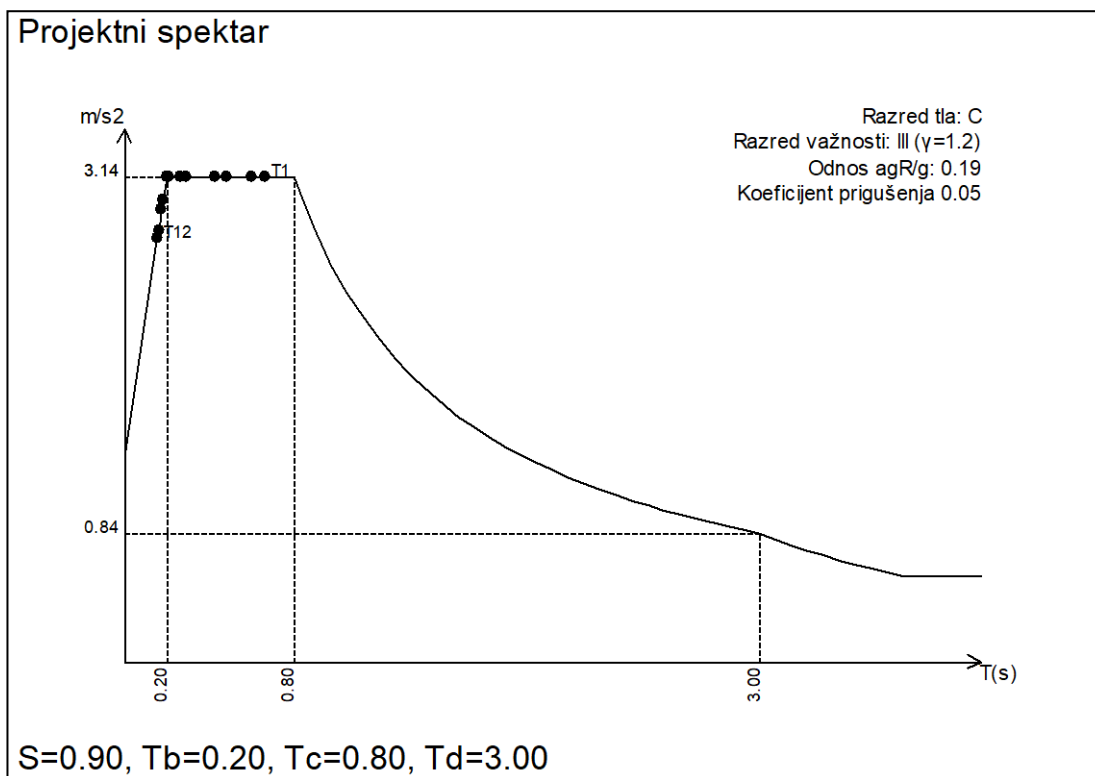
Ton	U [$\alpha=90^\circ$]	U [$\alpha=0^\circ$]
1	2.91	0.04
2	50.91	3.08
3	0.20	2.50
4	2.47	51.77
5	13.76	0.00
6	0.33	0.02
7	0.67	0.04
8	0.25	0.01
9	0.15	2.97
10	0.04	12.25
11	0.65	0.78
12	0.23	0.22
ΣU (%)	72.55	73.70

Periodi osciliranja konstrukcije

No	T [s]	f [Hz]
1	0.6635	1.5071
2	0.5981	1.6720
3	0.4857	2.0590
4	0.4342	2.3033
5	0.2892	3.4578
6	0.2707	3.6943
7	0.2158	4.6339
8	0.2038	4.9066
9	0.1838	5.4406
10	0.1768	5.6554
11	0.1620	6.1736
12	0.1560	6.4104



Slika 58. Prikaz drugog tona oscilacije

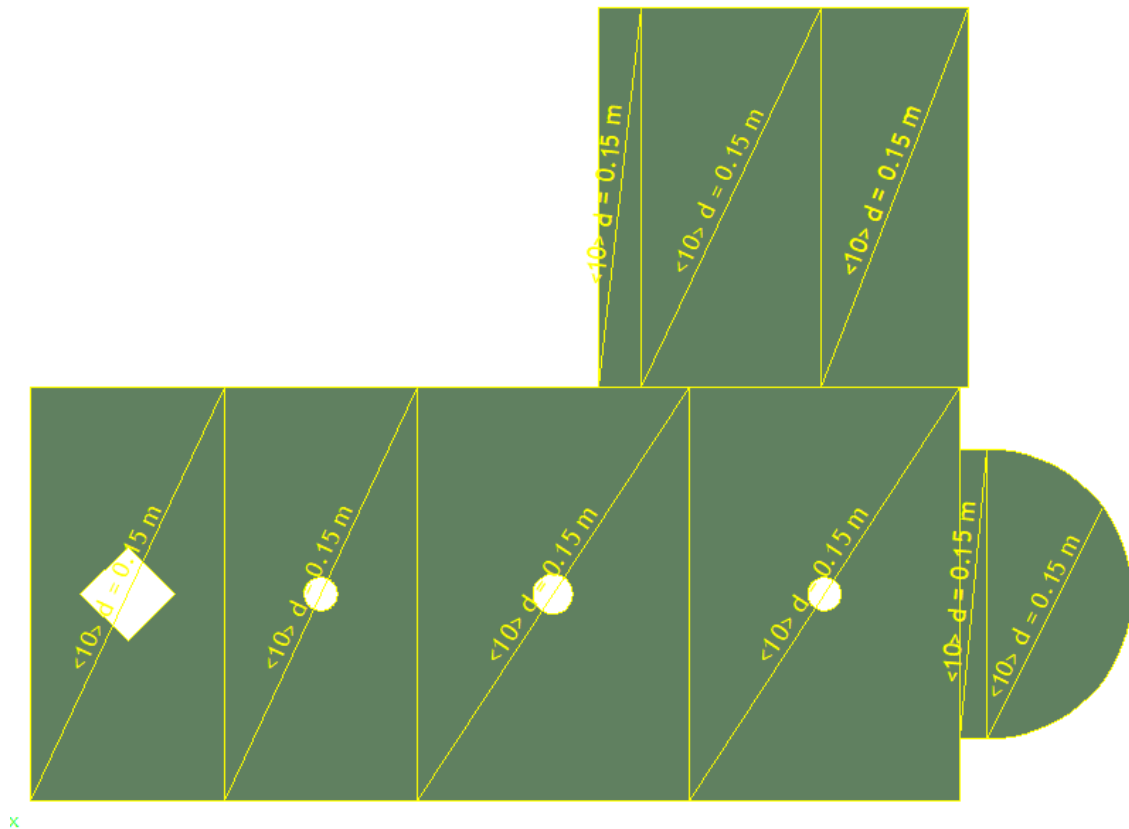


Slika 59. Prikaz perioda na projektnom spektru

ZIDANI SVODOVI I LUKOVI

U glavnom proračunskom modelu, svodovi kapele modelirani su debljinom od 30 cm. Takav je model zadržan radi simulacije težine svodova sa debelom žbukom (u presjeku zajedno se pokazuje 22 do 25 cm blizu tjemena, te od 26 do 40 cm u blizini lukova na koje se oslanjaju). U globalnom modelu nije moguće modelirati svod iz dvije debljine, stoga se pristupa da se globalnom proračunu svih drugih elemenata konstrukcije, reakcija i opterećenja na tlo, zadrže svodovi debljine 30 cm. Svi rezultati prikazani u ispisu rađeni su s takvim svodovima, čija debljina odgovara petama svodova, ali nije točna u predjelima oko tjemena.

Za proračun i kontrolu svodova, na istom modelu su oni modelirani s debljinom od 15 cm, dakle s pravom debljinom centralnih područja oko tjemena svih svodova.



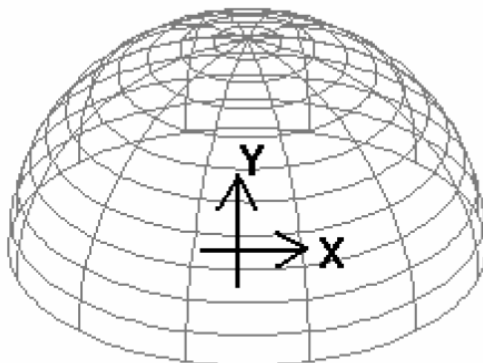
Slika 60. Tlocrtni prikaz položaja svodova

Prikazane su unutarnje sile N_x i N_y u točkama svodova:

N_x – normalna sila u pravcu lokalne X - osi

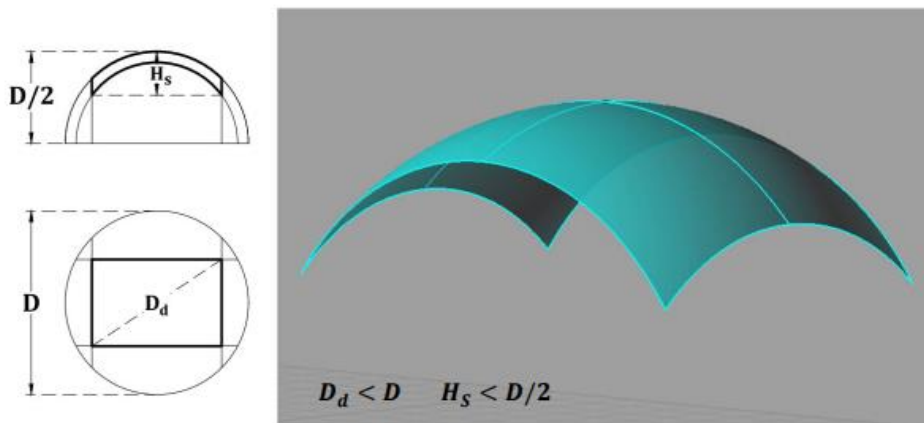
N_y – normalna sila u pravcu lokalne Y - osi

Gdje su osi X i Y kod svodova definirane u lokalnom koordinatnom sustavu ploče za radijalno generiranu mrežu konačnih elemenata. Pored unutarnjih sila prikazana su i glavna naprezanja, a ona se prikazuju posebno za gornju i donju stranu ploče (gornji rub ploče usmjeren je prema pozitivnom smjeru lokalne z osi ploče).

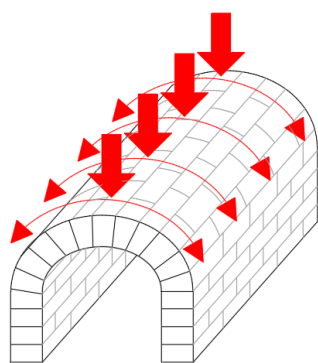


Slika 61. Lokalni koordinatni sustav ploče za radijalno izgeneriranu mrežu konačnih elemenata

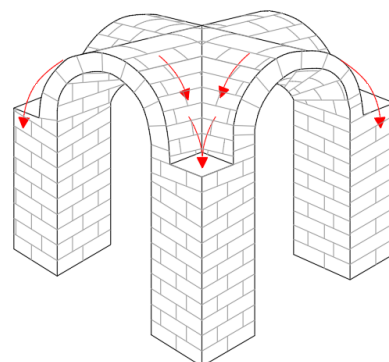
Predmetna kapela nadsvođena je tzv. češkim svodovima, specifičnim po tome što njihova horizontalna ravnina presijeca kuglu iznad njenog središta. Zbog toga je visina svoda manja od polumjera kugle ($H_s < \frac{D}{2}$). Takav svod može imati kvadratičnu osnovu, gdje su dijagonale jednake i međusobno okomite, ili pravokutnu osnovu. U slučaju pravokutne osnove, takav se svod naziva i baroknim svodom.



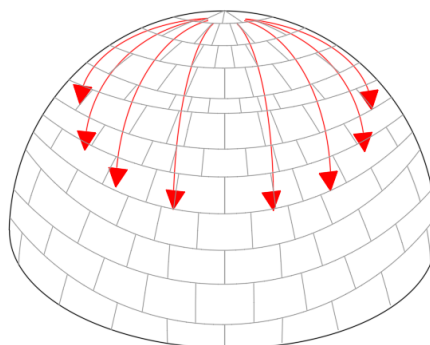
Slika 62. Prikaz češkog svoda (baroknog svoda) s pravokutnom tlocrtnom osnovom (dijagonale nisu međusobno okomite)



bačvasti svod (longitudinalni tip svoda)

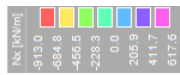


križni svod (nastaje presijecanjem plaštevaa longitudinalnih svodova)

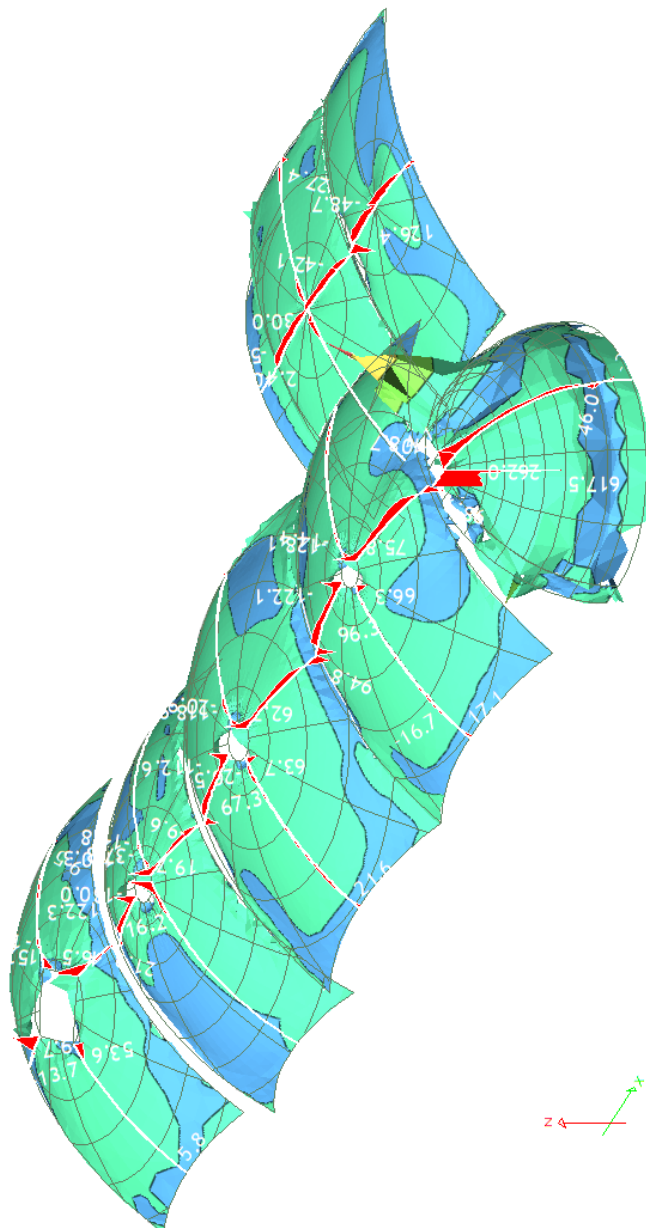


kupola (centralna forma svoda, nad centralnim tlocrtom (kružnim, ovalnim ili poligonalnim))

Slika 63. Različiti tipovi svodova sa prikazom prijenosa opterećenja



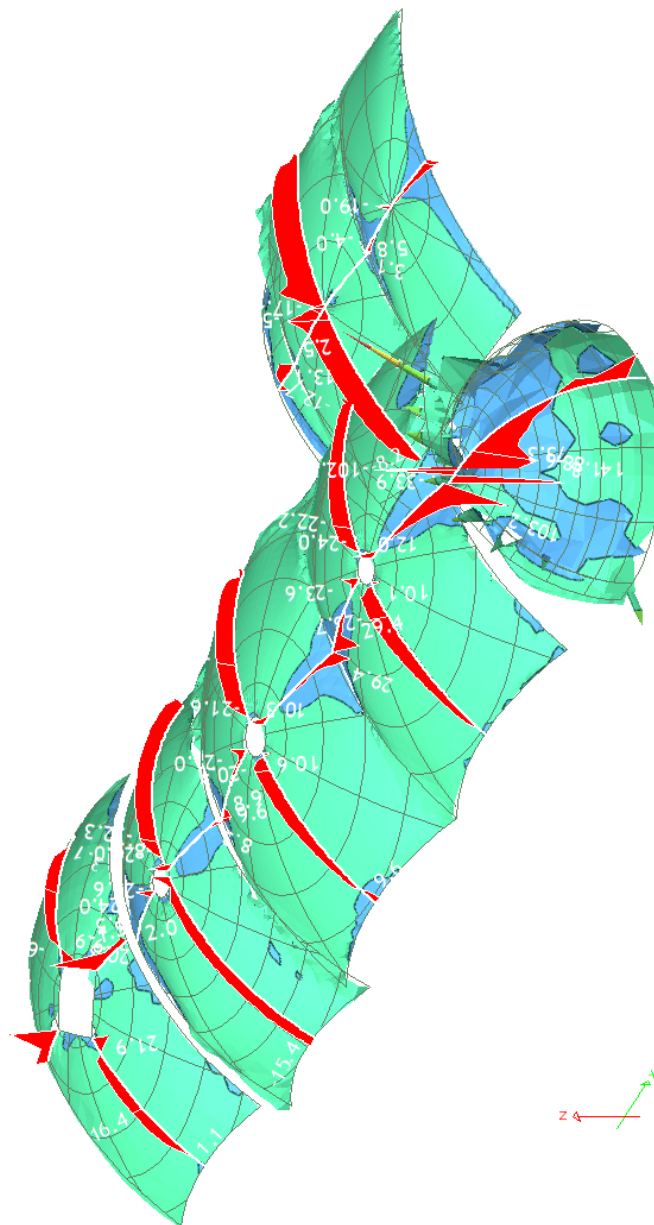
↑ pogled



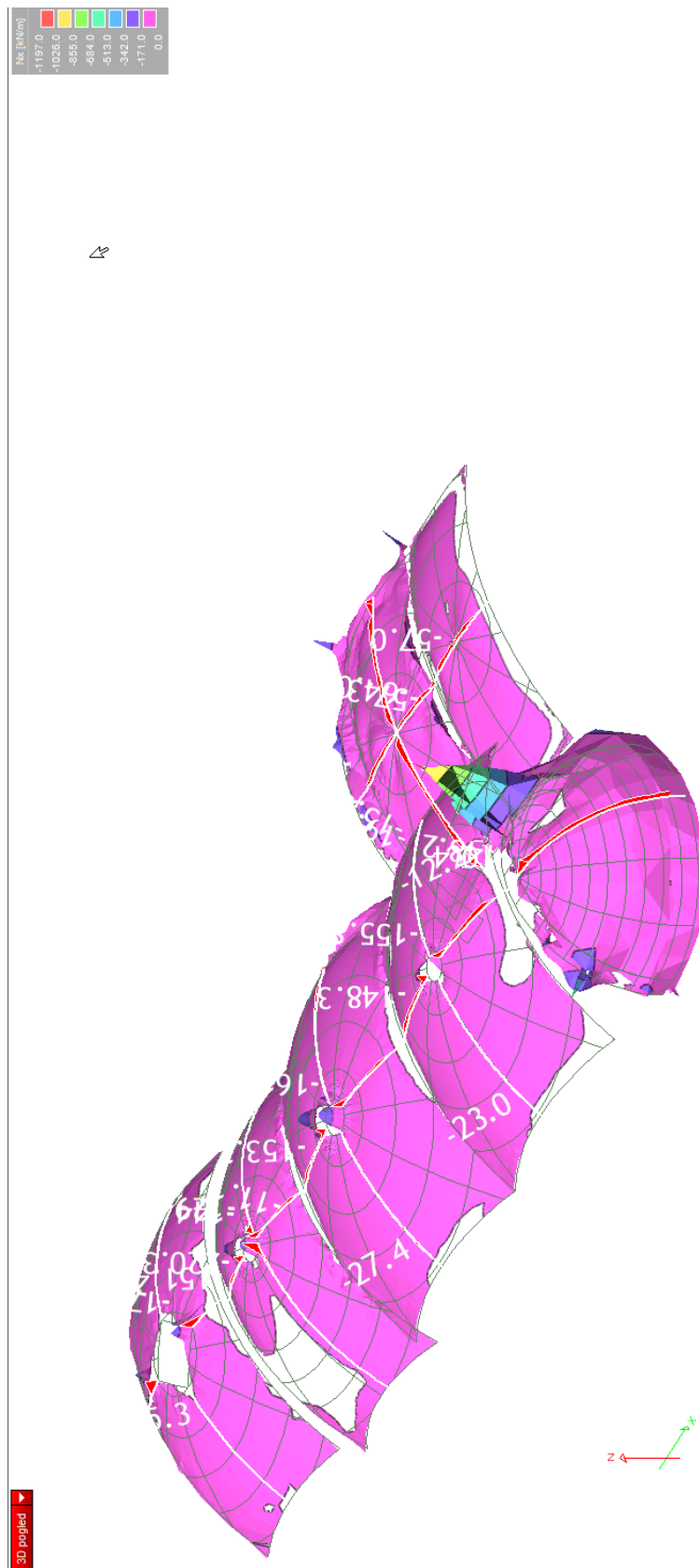
Slika 64. Svodovi stropova; Utjecaji u ploči: max. $N_x=617,5$ kN/m



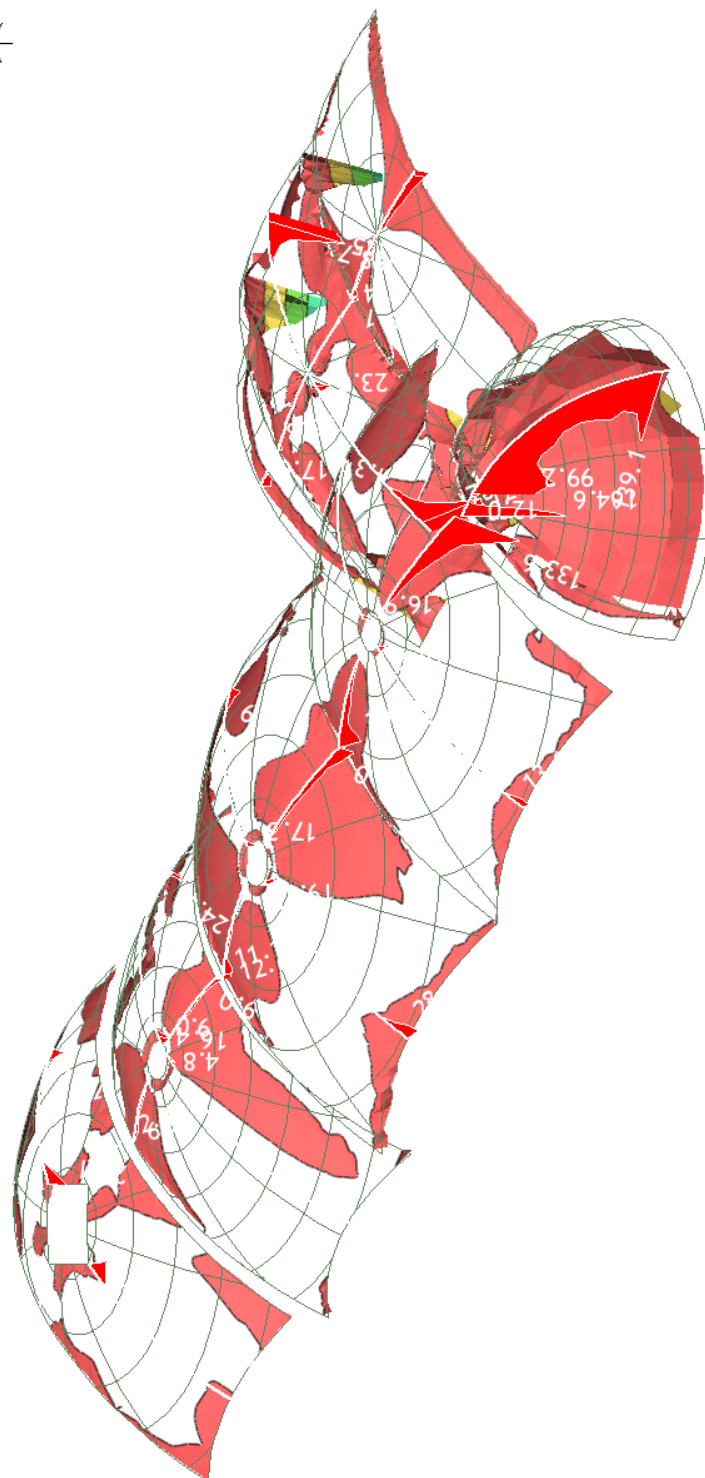
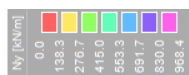
3D pogled



Slika 65. Svodovi stropova; Utjecaji u ploči: max. $N_y=656,7$ kN/m



Slika 66. Svodovi stropova; Utjecaji u ploči: max. $N_x=1197$ kN/m



Slika 67. Svodovi stropova; Utjecaji u ploči: max. $N_x=968,3$ kN/m

Unutarnje sile u svodovima u oba smjera približno iznose 100 do 150 kN/m', dakle 660 do 1000 kN/m² ili 0,7 do 1,0 MPa, što je zadovoljavajuće za ziđe svodova bez pukotina (što je i pretpostavka ovog linearnog proračuna).

Kao sljedeći rezultat proračuna svodova prikazana su i usporedna naprezanja (σ_u) proračuna prema hipotezi najvećeg deformacijskog rada (energetska hipoteza) iz

$$\text{glavnih naprezanja } \sigma_u = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2}.$$

Kod toga σ_1 predstavlja maksimalnu vrijednost naprezanja u promatranoj točki, a σ_2 minimalnu vrijednost, prema izrazima iz ravninskog stanja naprezanja [11]:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2}$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2}$$

a koji se pak dobivaju iz sljedećih izraza [11]:

$$\sigma_x = \frac{N_x}{d} \pm \frac{6M_x}{d^2}$$

$$\sigma_y = \frac{N_y}{d} \pm \frac{6M_y}{d^2}$$

$$\tau = \frac{N_{xy}}{d} \pm \frac{6M_{xy}}{d^2}$$

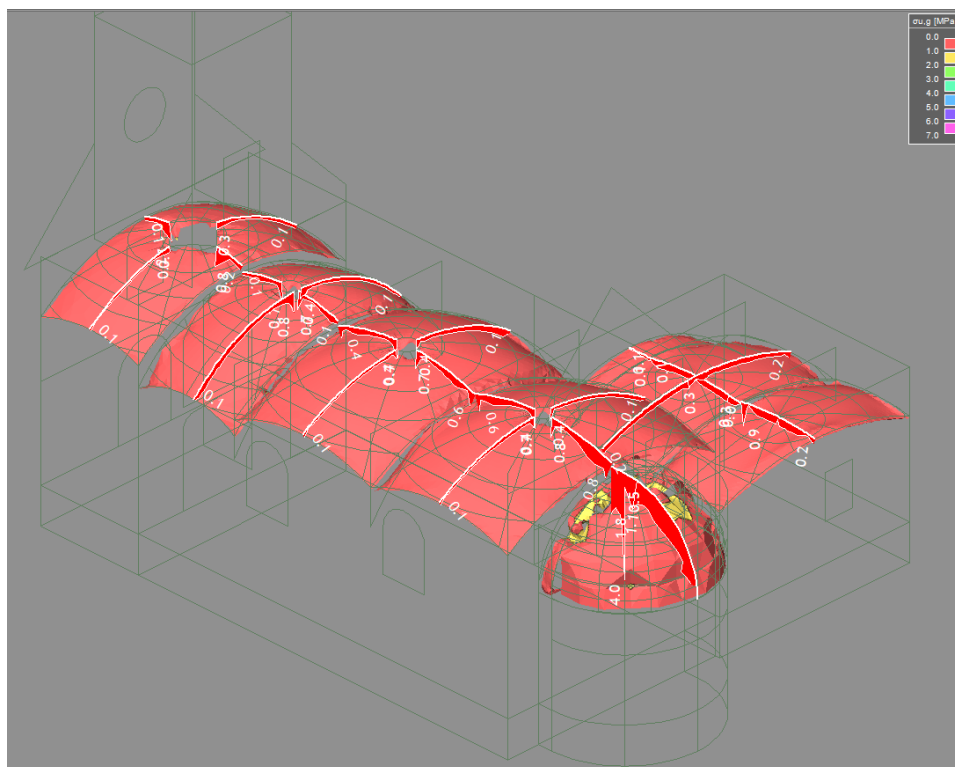
U izraze za proračun glavnih naprezanja svakako treba uvrstiti odgovarajuća naprezanja komponenti, u zavisnosti od toga da li se glavna naprezanja računaju u gornjoj ili donjoj strani ploče.

Ravnine u kojima se javljaju glavna naprezanja leže okomito jedna na drugu.

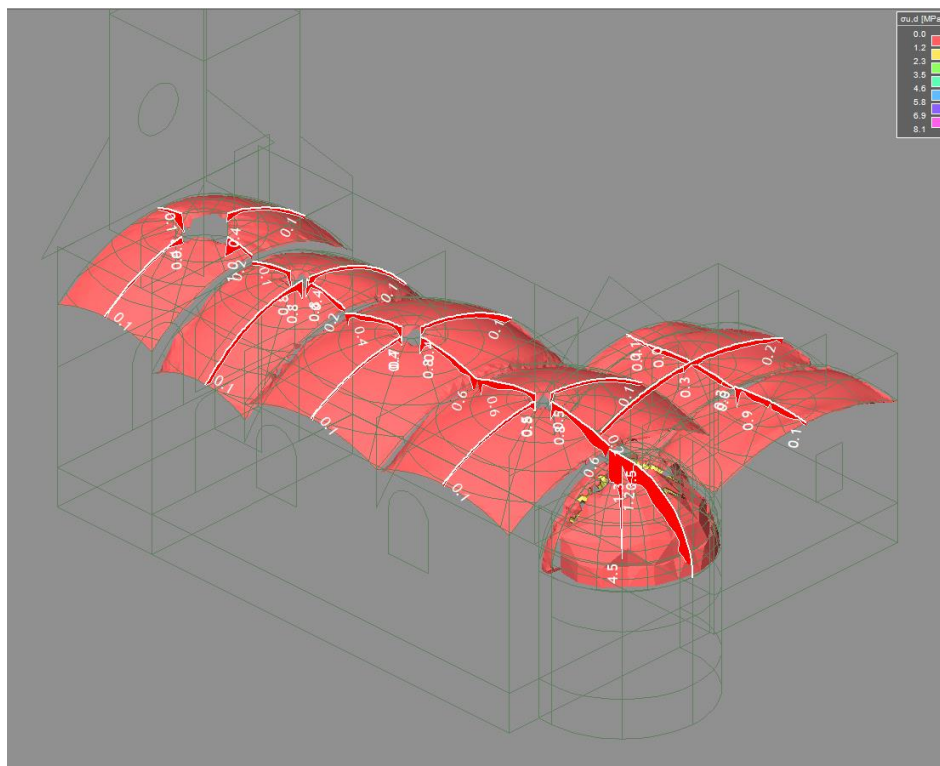
Vrijednost usporednog naprezanja proračunava se iz Miss-ove formule (hipoteza najveće energijske distorzije) [12]:

$$\sigma_u = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2}$$

Glavna se naprezanja razlikuju za gornji i donji rub poprečnih presjeka:



Slika 68. Svodovi stropova; prikaz maksimalnog naprezanja $\sigma_{u,g,max.} = 7,0 \text{ MN/m}^2$

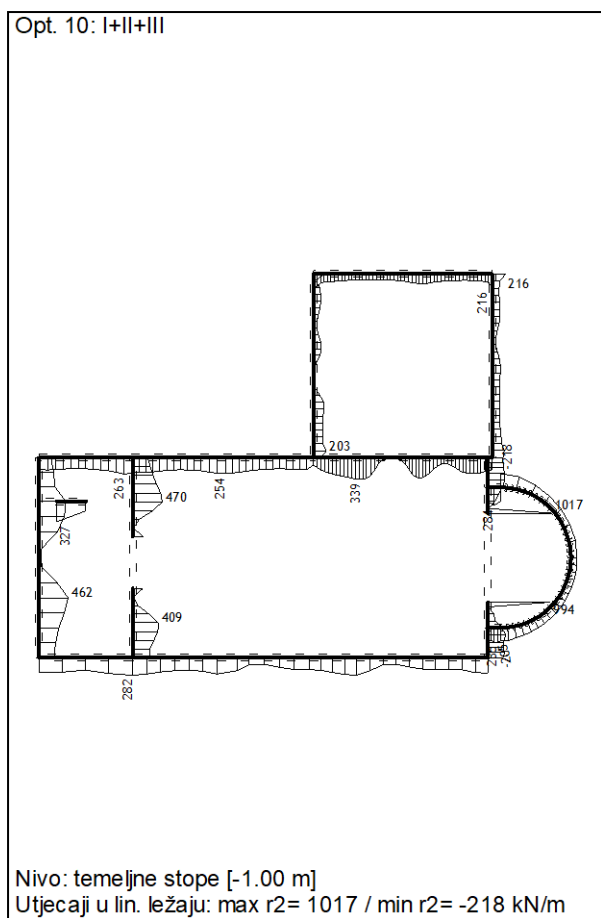
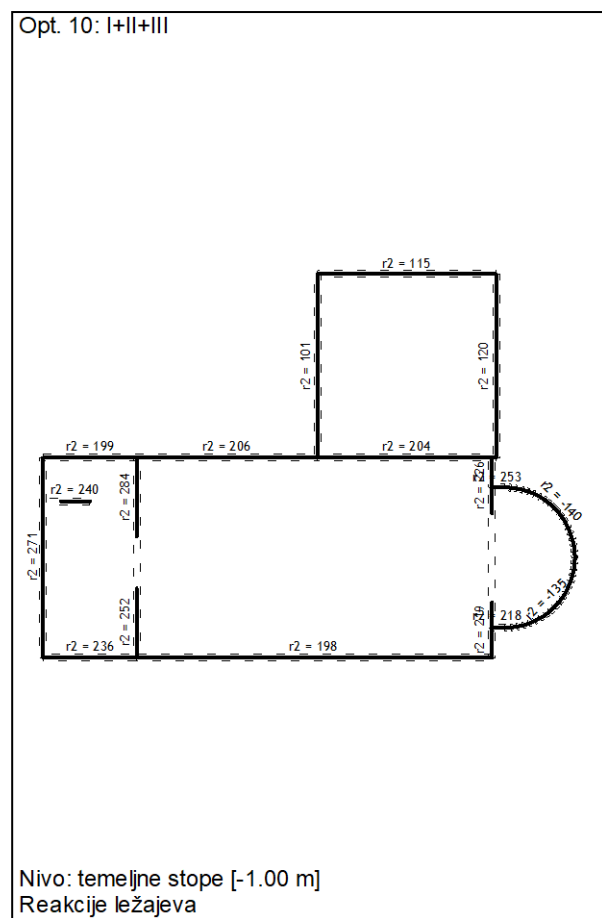


Slika 69. Svodovi stropova; prikaz maksimalnog naprezanja $\sigma_{u,d,max.} = 7,0 \text{ MN/m}^2$

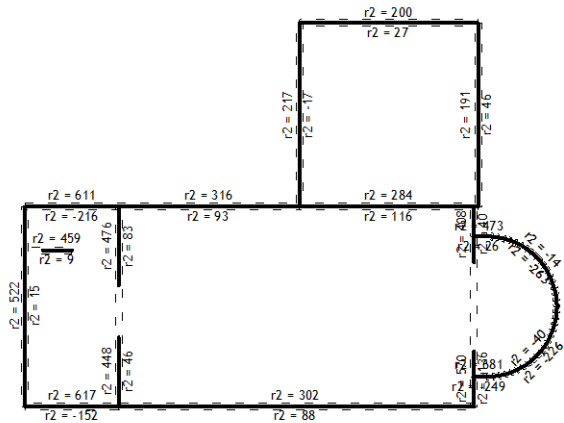
Iznos naprezanja u karakterističnim meridijalnim presjecima kod svih svodova na oba ruba je u zadovoljavajućim granicama. To odgovara činjenici da u svodovima nema vidljivih pukotina, osim onih koje su nastavak i proističu iz pukotina deformiranih i oštećenih zidova s kojima su vezani.

TEMELJI KAPELE

Temelji kapele modelirani su krutim linijskim osloncima, i to za dvije kombinacije opterećenja – kombinacija svih vertikalnih osnovnih opterećenja (I+II+III) te anvelopa kombinacija svih vertikalnih opterećenja s potresnim opterećenjem.

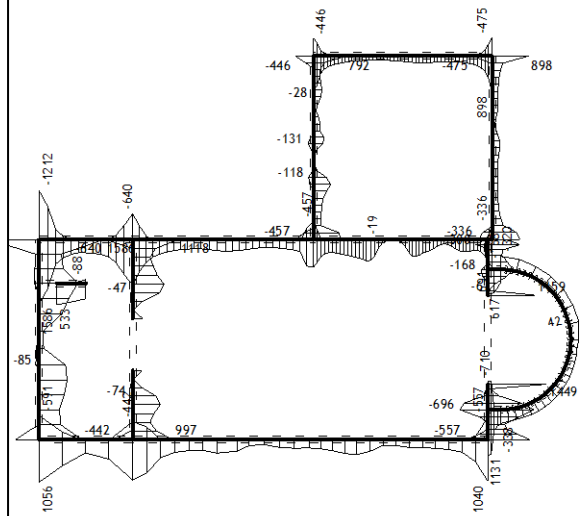


Opt. 27: [Anv] 1,8-26

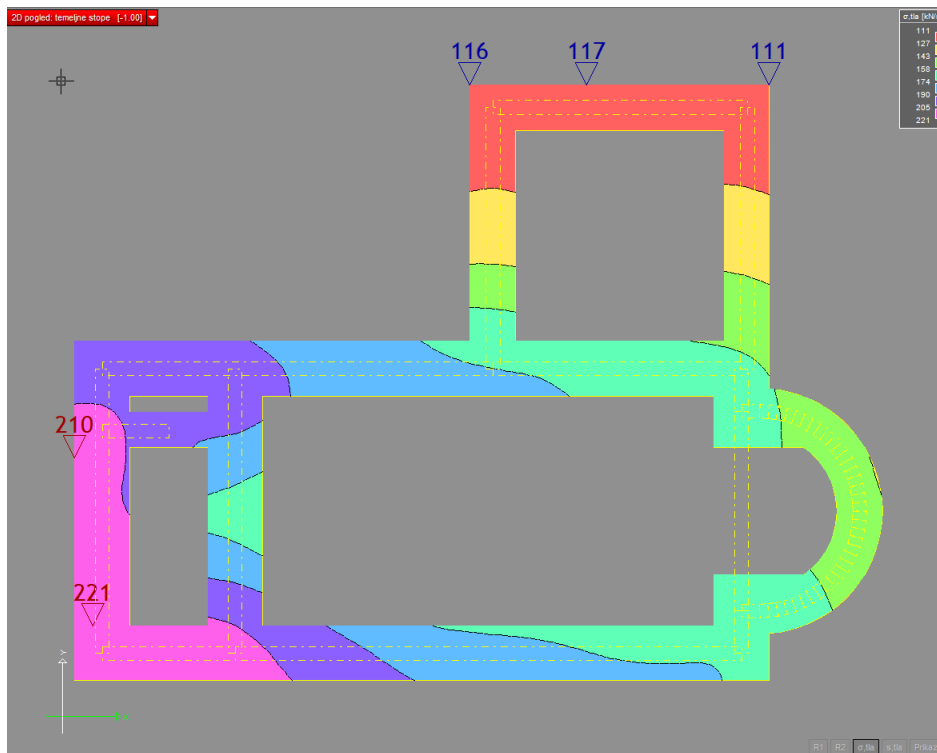


Nivo: temeljne stope [-1.00 m]
Reakcije ležajeva

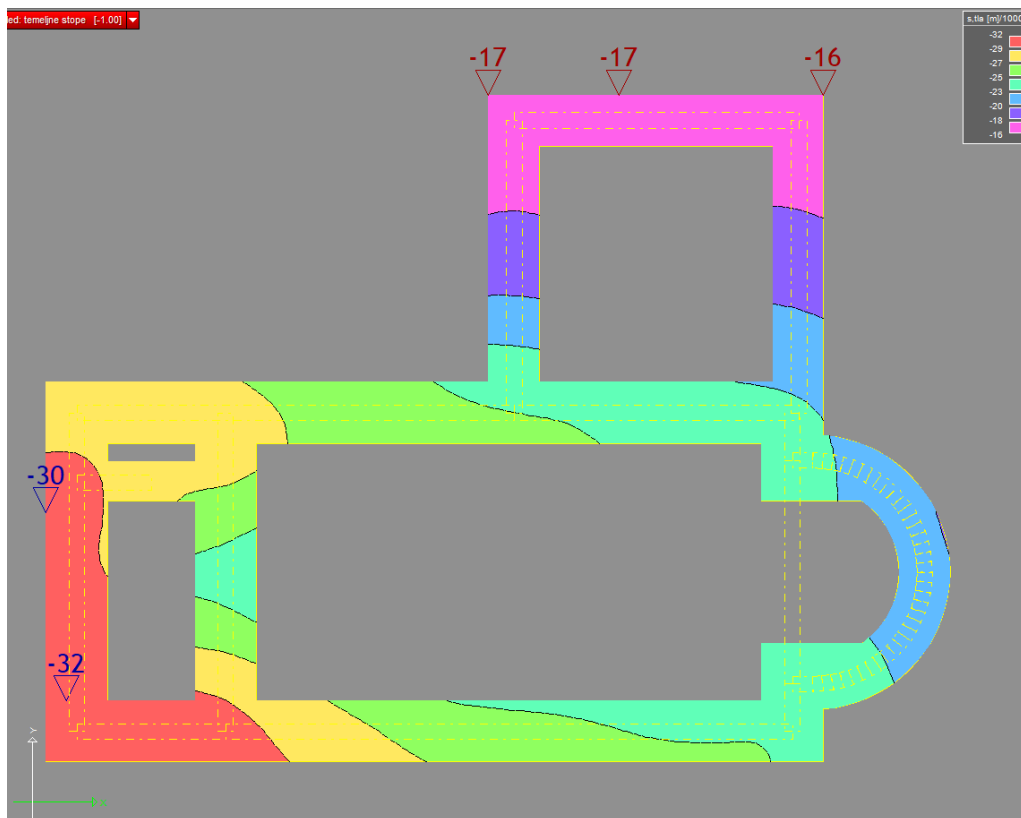
Opt. 27: [Anv] 1,8-26



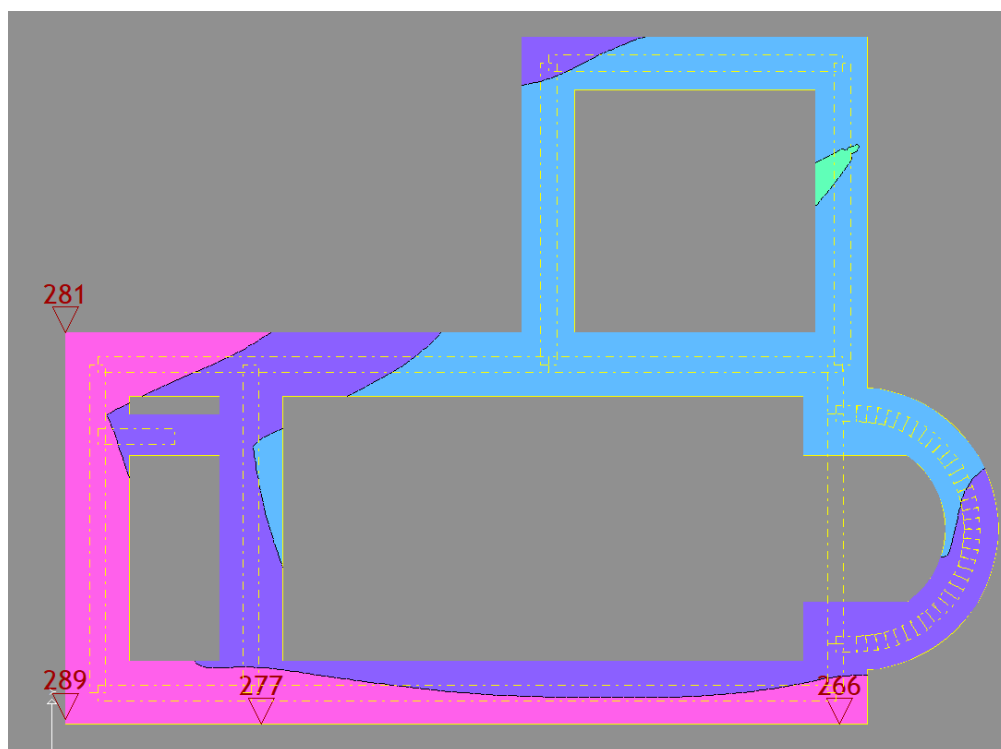
Nivo: temeljne stope [-1.00 m]
Utjecaji u lin. ležaju: max r2= 1586 / min r2= -1212 kN/m



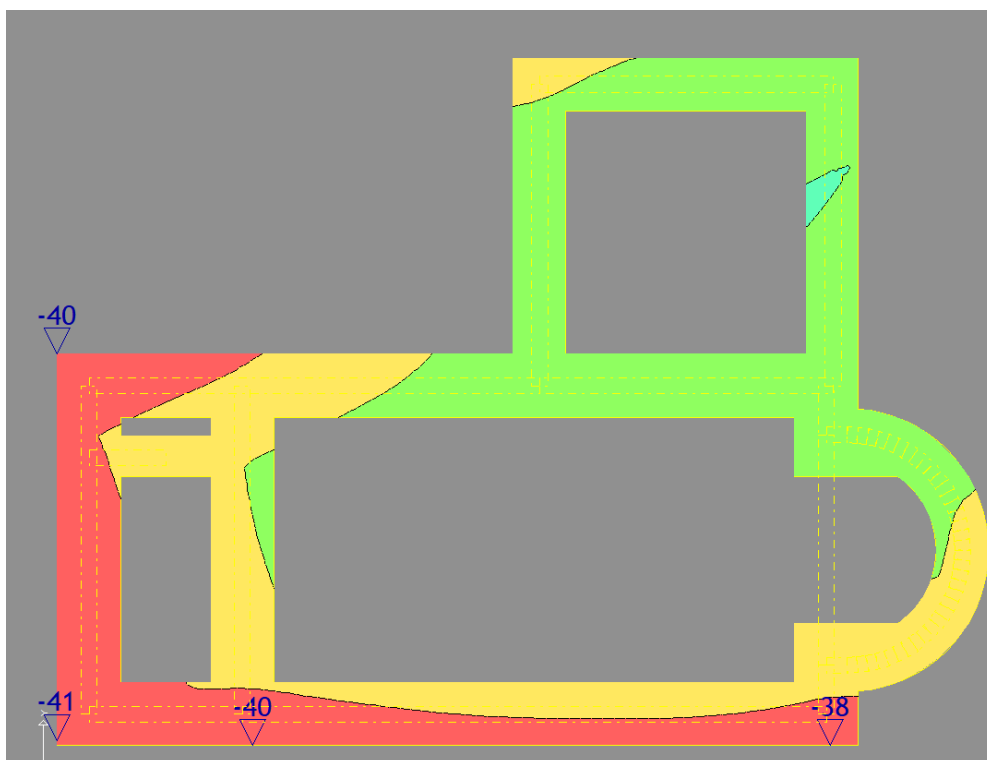
Slika 70. Naprezanja u tlu za kombinaciju vertikalnih opterećenja (I+II+III)



Slika 71. Slijezanja tla za kombinaciju vertikalnih opterećenja (I+II+III)



Slika 72. Naprezanja u tlu za anvelopu kombinacije vertikalnih i potresnih opterećenja



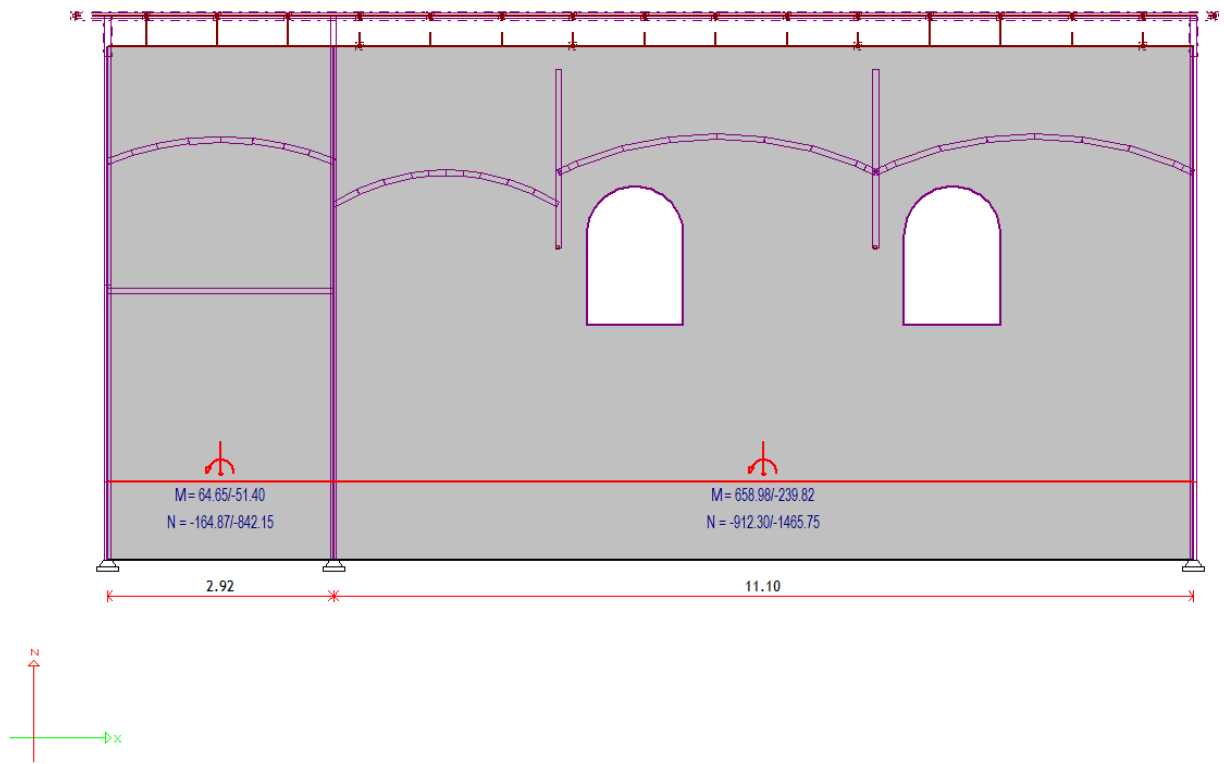
Slika 73. Slijeganja u tlu za anvelopu kombinacije vertikalnih i potresnih opterećenja

Iz dobivenih rezultata za postojeće stanje opterećenja tla ispod zidova kapele vidljivo je da se nejednoliko slijeganje u tlu moralo već dogoditi prije mnogo godina te da postojeće pukotine na zidovima imaju svoj dugogodišnji uzrok u toj činjenici nejednolikog opterećenja i diferencijalnih slijeganja. Plitko temeljenje (od nivoa okolnog tla, temeljna stopa nalazi se na približno 1,0 do 1,5 m dubine) gdje su temelji u zoni podložniji postepenom puzanju zbog okolnih padina i zasijecanja tla, te su potresi još dodatno povećali pukotine u zidovima, s tendencijom k budućim bitno većim i opasnijim povećanjima istih oštećenja, koje mogu dovesti do opasne nestabilnosti zidova kapele.

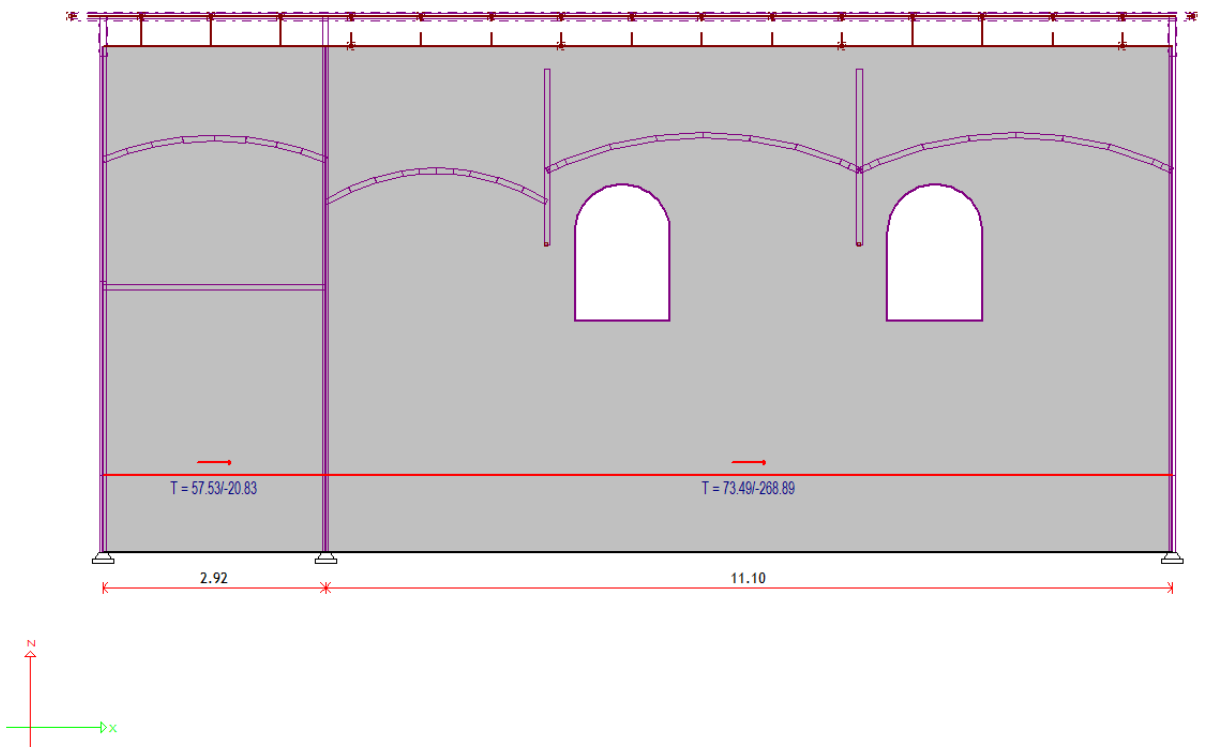
Naprezanja u tlu za kombinaciju vertikalnih opterećenja, koje je mjerodavno za dugotrajno stanje građevine, ukazuje na bitno veća opterećenja prednjeg dijela konstrukcije gdje se nalazi zvonik.

Zbog svega navedenog, buduća sanacija temelja kapele predviđa spuštanje temeljenja na veću dubinu, te se prema rezultatima i iskustvu projektira izvođenje naglavne grede i AB pilota promjera 30 cm, dubine do 8 m ispod svih zidova kapele, s tim da se oni proguste ispod zidova s utjecajem veće težine od zvonika, te dijelovi zidova i prije spomenuti poprečni zidovi. Kod toga čak nije nužno da se ukupno opterećenje građevine, čija težina se već uspostavila u ravnoteži s otporom i nosivošću tla na nivou sadašnjeg temelja, u cijelosti prenese na dubinu od 6 do 8 m, već je važno da se većina temeljenja prebaci u dublje slojeve gdje nema utjecaja od kolebanja tla kod budućih potresa ili povećanja puzanja tla.

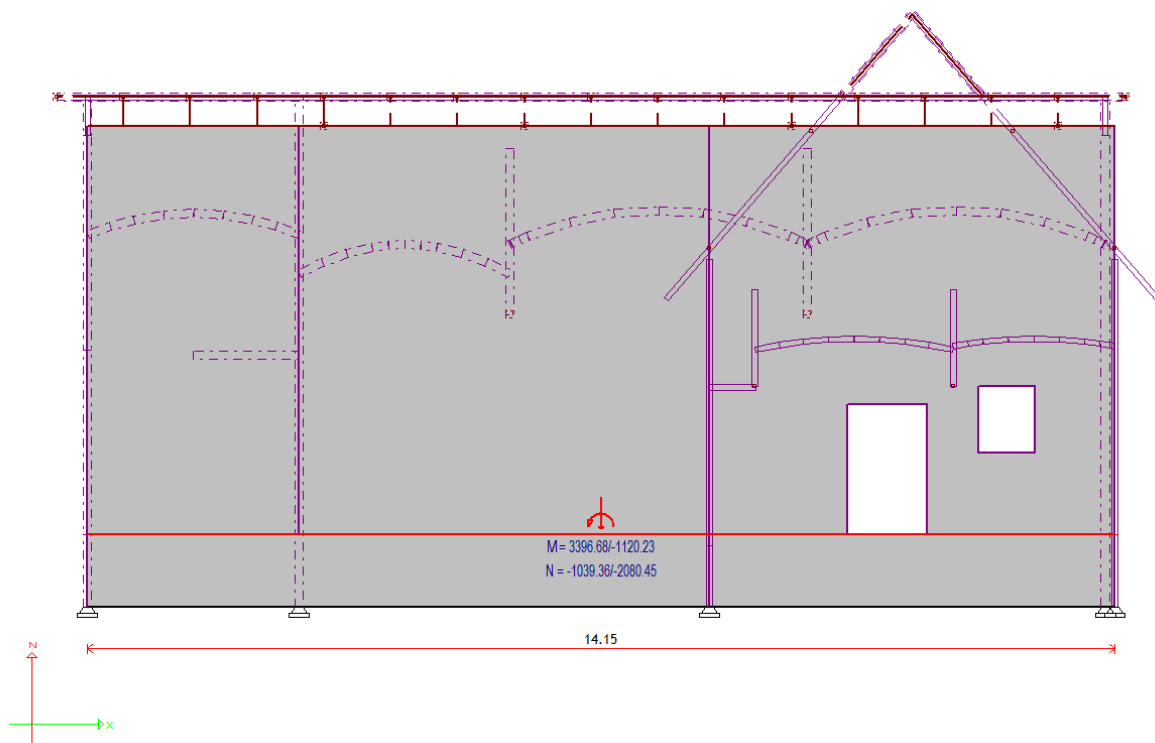
U nastavku je prikaz dimenzioniranja zidova u ravnini za postojeće stanje. Proračun zida je napravljen sa uzimajući rezne sile M_{Ed} , V_{Ed} i N_{Ed} iz seizmičke proračunske situacije, te korištenjem izraza za tlačnu duljinu omeđenog zida. Proračun je proveden na puno djelovanje (100 % EN), pa su i rezne sile dobivene proračunom na puno djelovanje.



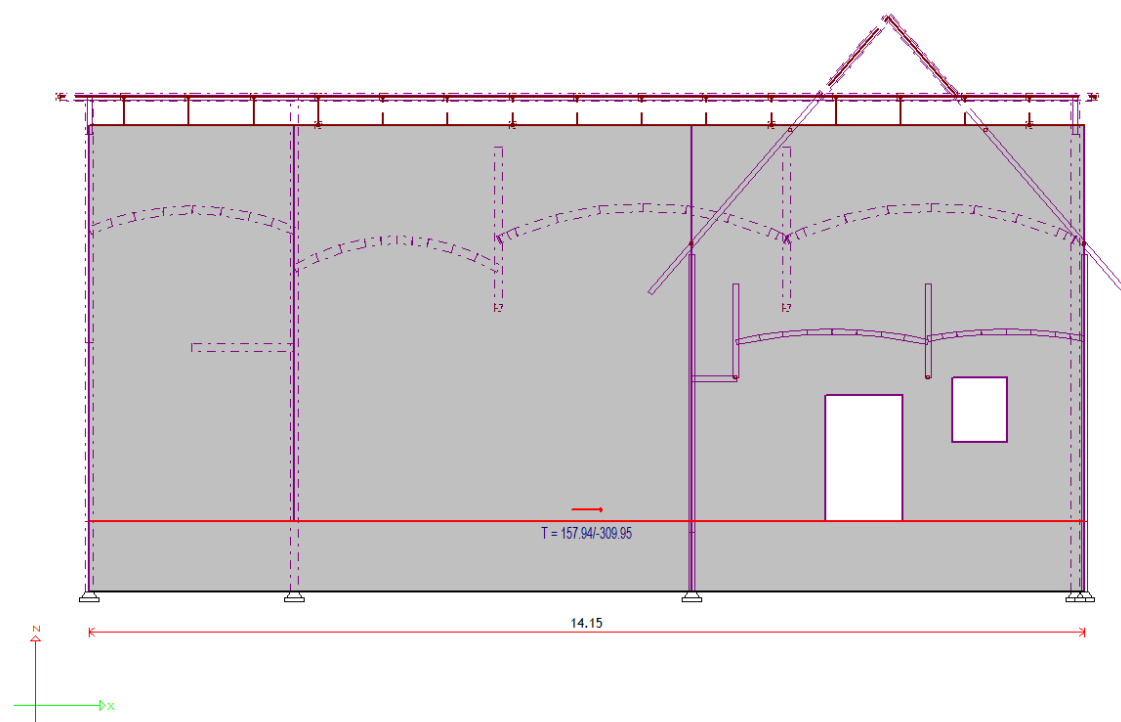
Slika 74. Okvir X1 i X2; Vektorski presjeci: N_n



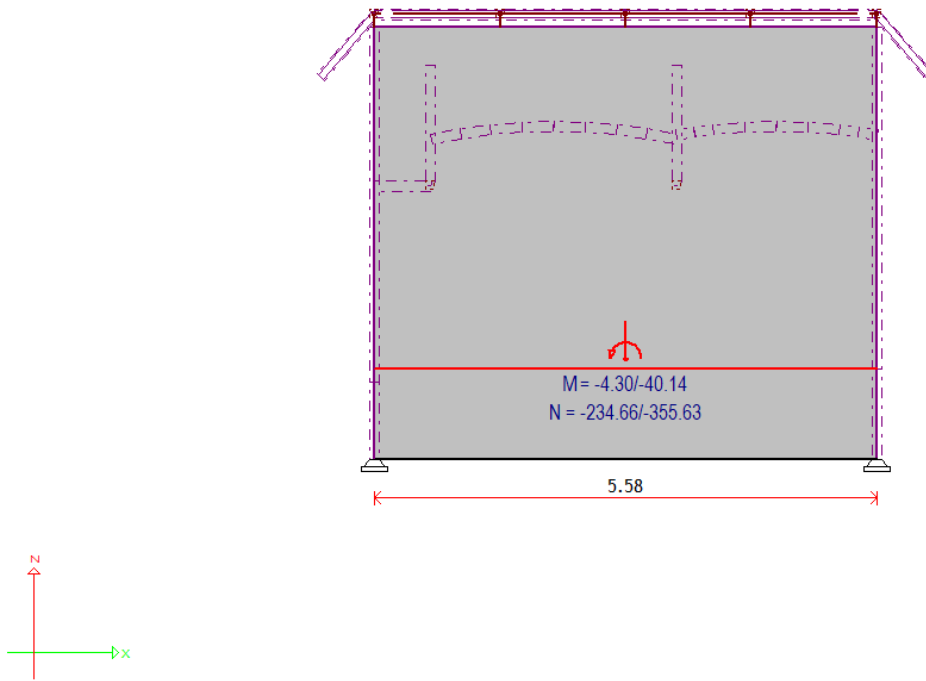
Slika 75. Okvir X1 i X2; Vektorski presjeci: N_{ns}



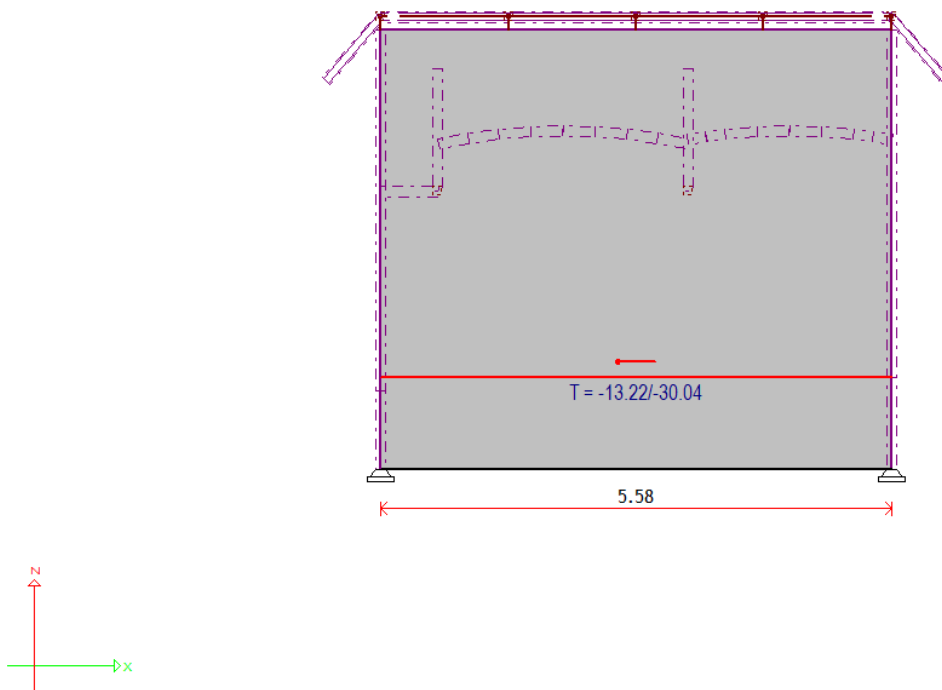
Slika 76. Okvir X3; Vektorski presjeci Nn



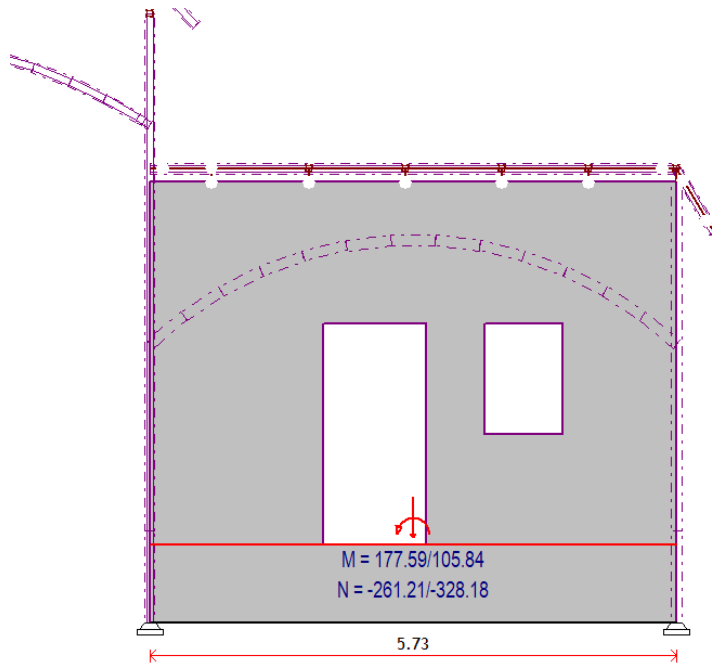
Slika 77. Okvir X3; Vektorski presjeci Nns



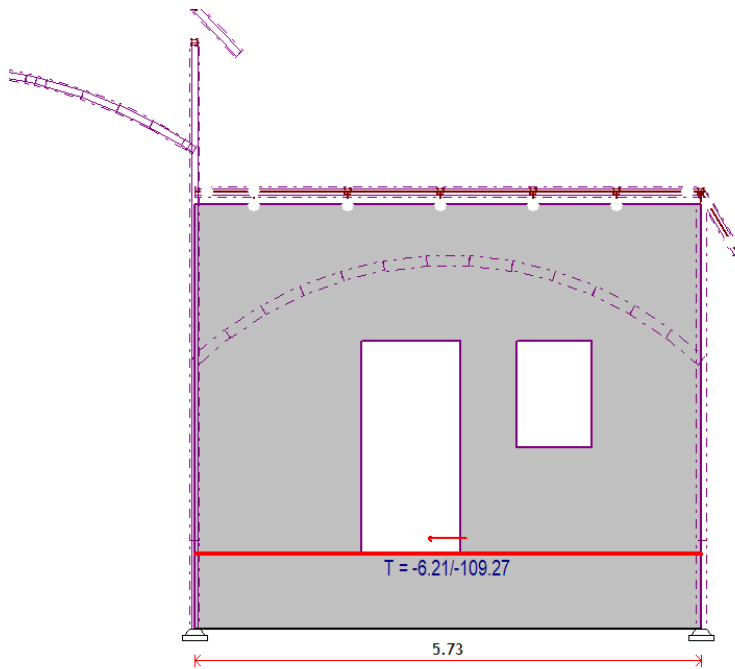
Slika 78. Okvir X4; Vektorski presjeci N_n



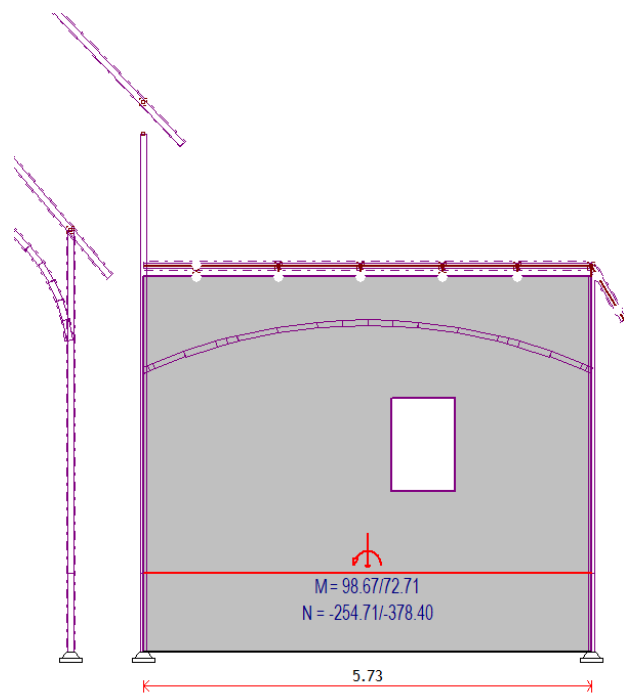
Slika 79. Okvir X4; Vektorski presjeci N_{ns}



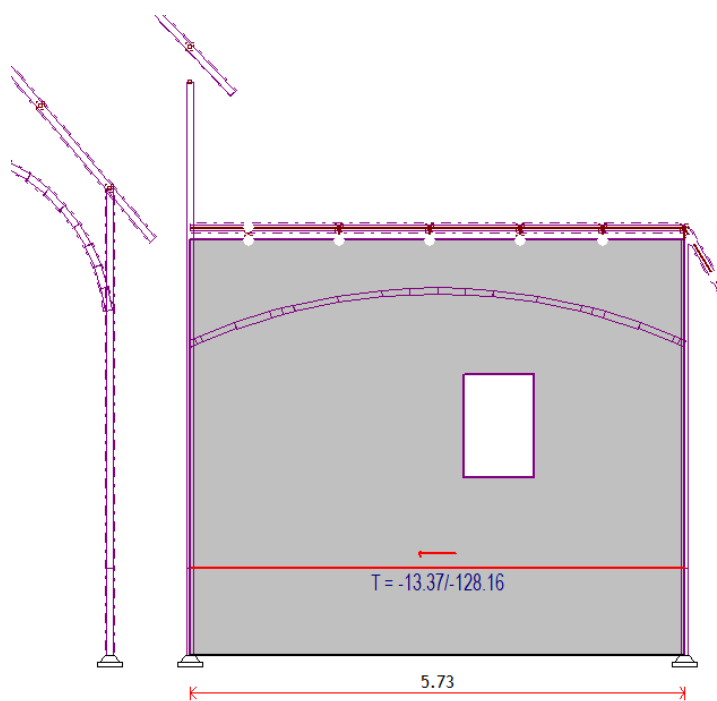
Slika 80. Okvir Y1; Vektorski presjeci Nn



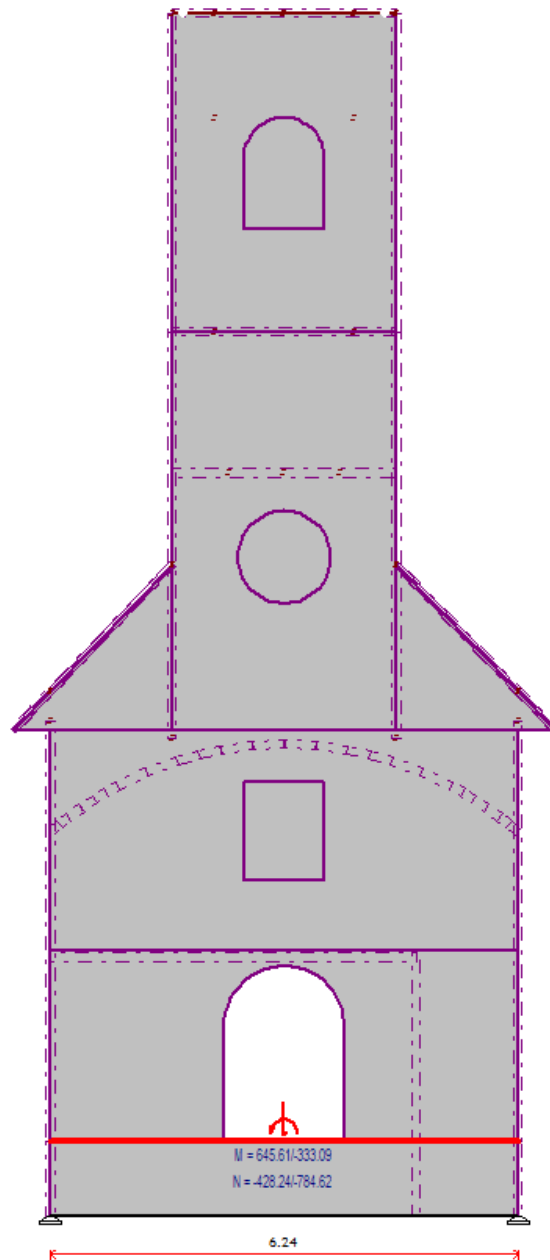
Slika 81. Okvir Y1; Vektorski presjeci Nns



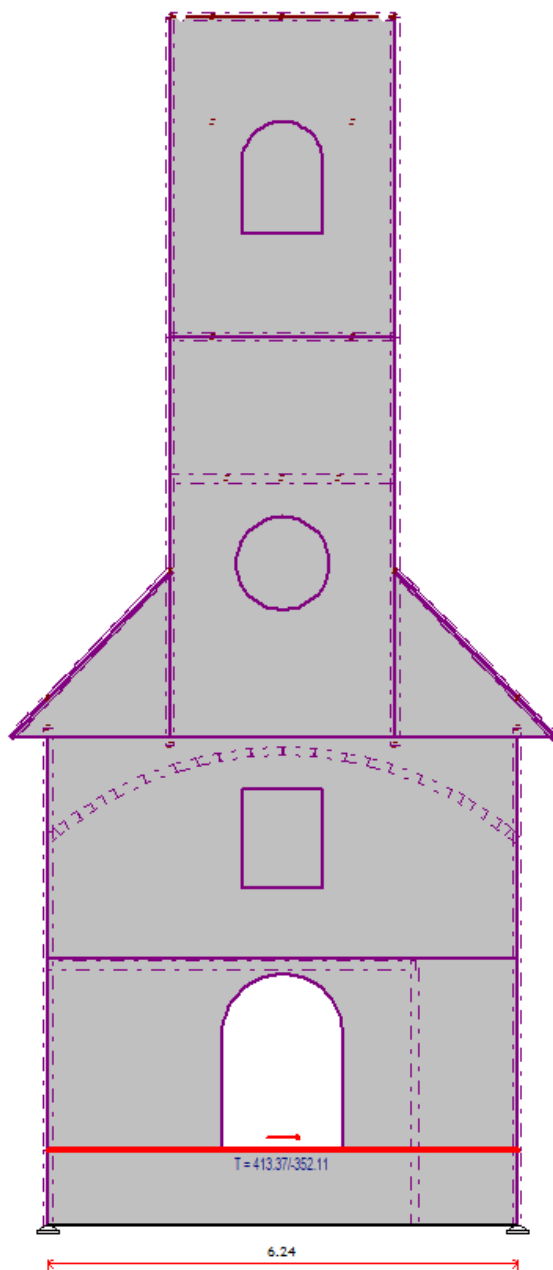
Slika 82. Okvir Y2; Vektorski presjeci Nn



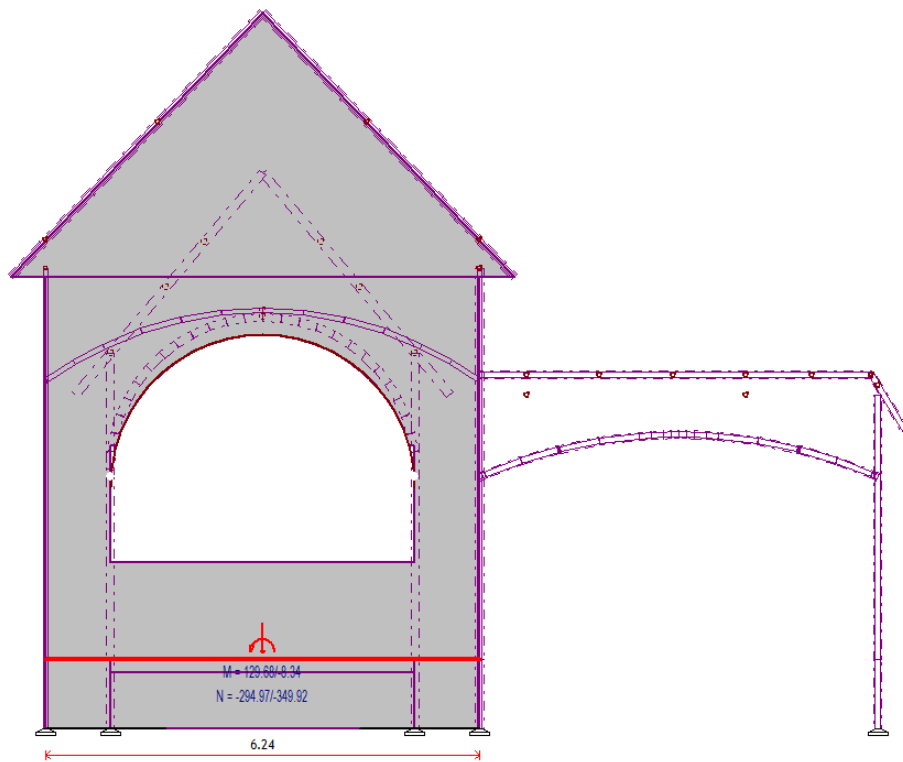
Slika 83. Okvir Y2; Vektorski presjeci Nns



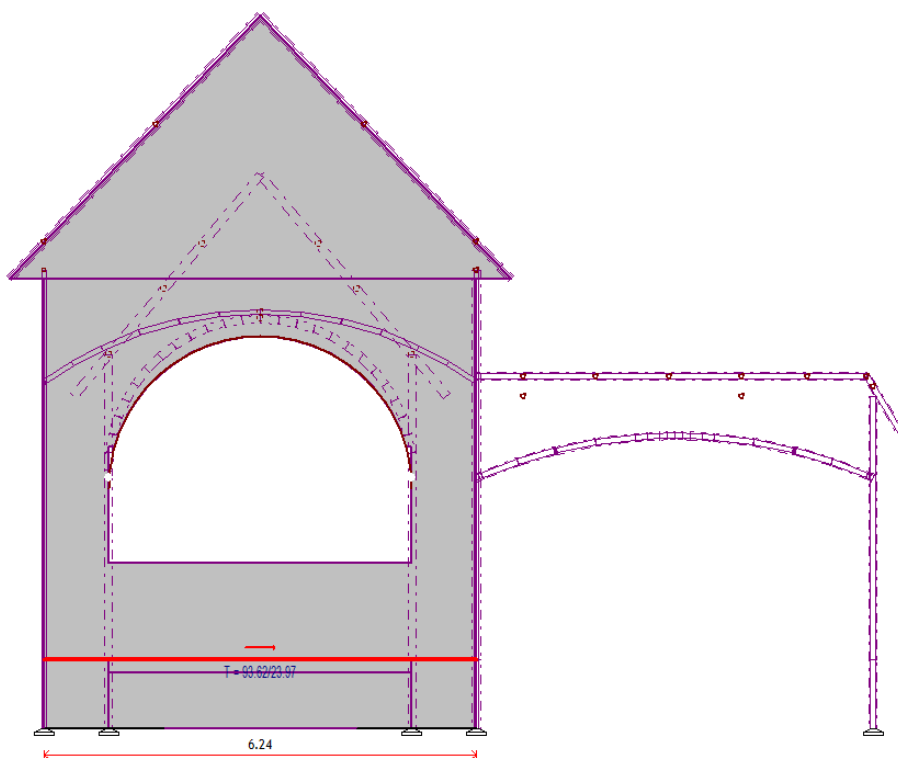
Slika 84. Okvir Y3; Vektorski presjeci Nn



Slika 85. Okvir Y3; Vektorski presjeci Nns



Slika 86. Okvir Y4; Vektorski presjeci Nn



Slika 87. Okvir Y4; Vektorski presjeci Nn

OTPORNOST ZIDA NA HORIZONTALNU POSMIČNU SILU U SMJERU X												
$f_{vk,0}=0,1 \text{ N/mm}^2$			$\gamma_M = 1,5$ - za seizmiku				MORT ZA ZIDANJE – vapneni mort					
KONTROLNI PRORAČUN ZIDA NA HORIZONTALNU SILU												
$L_c = 3 \cdot \left[\frac{L}{2} - \left(\frac{M_{Ed}}{N_{Ed,min}} \right) \right] \leq L$				Tlačna duljina zida				$f_{vk} = f_{vk,0} + 0,4 \cdot \sigma_d$			Posmična čvrstoća zida	
$\sigma_d = \frac{N_{Ed}}{L_c \cdot d}$				Vertikalno naprezanje zida				$V_{Rd} = \left(\frac{1}{\gamma_M} \right) \cdot f_{vk} \cdot L_c \cdot d$			Posmična otpornost zida	
ZID	L [cm]	d [cm]	N_{Ed} [kN]	M_{Ed} [kNm]	V_{Ed} [kN]	L_c [cm]	σ_d kN/cm ²	f_{vk} kN/cm ²	V_{Rd} [kN]	$\frac{V_{Rd}}{V_{Ed}}$ 50 % EN 98	$\frac{V_{Rd}}{V_{Ed}}$ 100 % EN 98	
X ₁	1110	100	270	659	1465	933	0,0029	0,011	685	46,70	23,35	
X ₂	292	100	58	65	843	102	0,0057	0,013	89	10,49	5,24	
X ₃	1415	100	310	3397	2081	1165	0,0022	0,011	855	41,05	20,53	
X ₄	558	75	31	41	356	440	0,00094	0,0103	227	63,65	31,83	
				$\sum V_{Ed} =$	4745			$\sum V_{Rd} =$	1856	40,47	20,24	

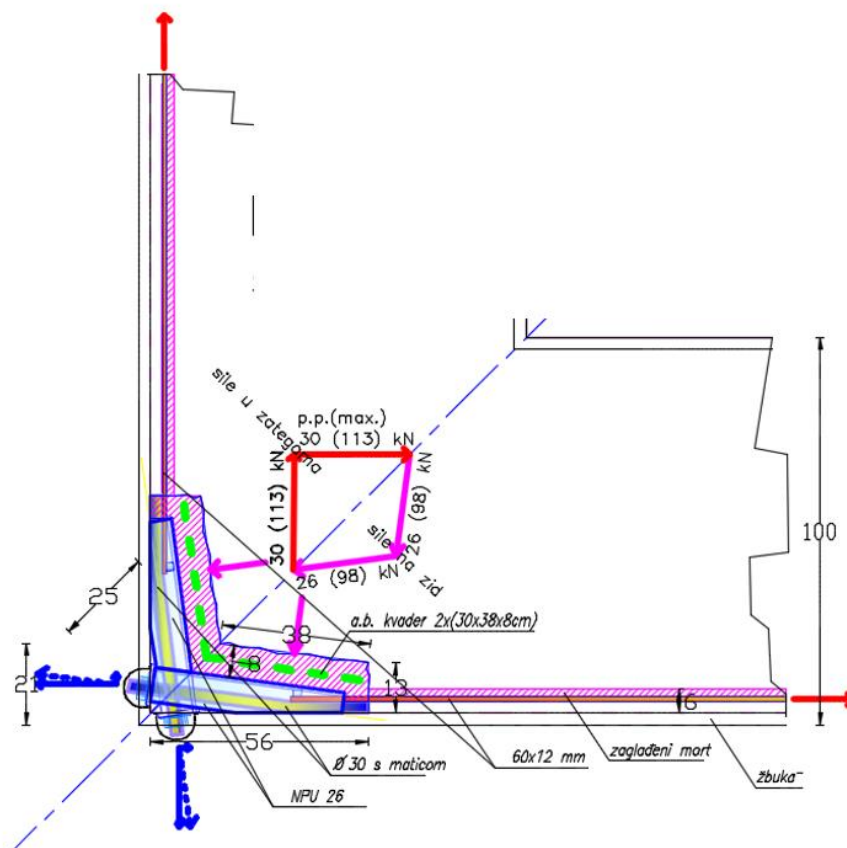
OTPORNOST ZIDA NA HORIZONTALNU POSMIČNU SILU U SMJERU Y												
$f_{vk,0}=0,1 \text{ N/mm}^2$			$\gamma_M = 1,5$ - za seizmiku				MORT ZA ZIDANJE – vapneni mort					
KONTROLNI PRORAČUN ZIDA NA HORIZONTALNU SILU												
$L_c = 3 \cdot \left[\frac{L}{2} - \left(\frac{M_{Ed}}{N_{Ed,min}} \right) \right] \leq L$				Tlačna duljina zida				$f_{vk} = f_{vk,0} + 0,4 \cdot \sigma_d$			Posmična čvrstoća zida	
$\sigma_d = \frac{N_{Ed}}{L_c \cdot d}$				Vertikalno naprezanje zida				$V_{Rd} = \left(\frac{1}{\gamma_M} \right) \cdot f_{vk} \cdot L_c \cdot d$			Posmična otpornost zida	
ZID	L [cm]	d [cm]	N_{Ed} [kN]	M_{Ed} [kNm]	V_{Ed} [kN]	L_c [cm]	σ_d kN/cm ²	f_{vk} kN/cm ²	V_{Rd} [kN]	$\frac{V_{Rd}}{V_{Ed}}$ 50 % EN 98	$\frac{V_{Rd}}{V_{Ed}}$ 100 % EN 98	
Y ₁	573	75	110	178	330	374	0,00392	0,0116	217	65,73	32,87	
Y ₂	573	75	129	99	379	573	0,0029	0,011	316	83,38	41,69	
Y ₃	624	75	414	646	785	467	0,012	0,015	351	44,62	22,31	
Y ₄	624	75	94	130	350	521	0,002	0,011	287	81,87	40,94	
				$\sum V_{Ed} =$	1844			$\sum V_{Rd} =$	1171	68,4	34,2	

-NE ZADOVOLJAVA

5.4. Funkcija zatega kao mjera sanacije oštećenih zidova

Sanacija oštećenih zidova, koja će otkloniti mogućnost budućih povećanja postojećih pukotina u zidovima, jest zatezanje glavnih zidova kapele pri njenim vrhovima. Uobičajeno se to radi na svakom zidu s obje njegove strane, no kod nekih povijesnih građevina to nije moguće radi unutrašnjosti ispunjene vrijednim i zaštićenim žbukorezima, gdje je nemoguće izvoditi bilo kakve invazivne radove s unutrašnje strane zidova.

Dimenzije poprečnog presjeka zatega osiguravaju da će zatega moći preuzeti povećanje sile u zatezi s početnih 30 kN prednaprezanja na 110 do 115 kN (11 tona) u vrijeme budućeg mogućeg potresa. Iz prikazanog paralelograma sila vidljivo je da će tada tlak betonskog kvadra ispod zatega na površinu oslonca u zidu od opeke biti približno 98 kN, što će, uz dimenzije tog kvadra od 30 x 38 cm i preraspodjelu momenta u pretežno centrični tlak, uslijed prilagodbe ležajne površine između betona i opeke, iznositi 800 do 900 kN/m² (0,8 do 0,9 MN/m²).



Slika 88. Grafoanalitička metoda određivanja sile na zid

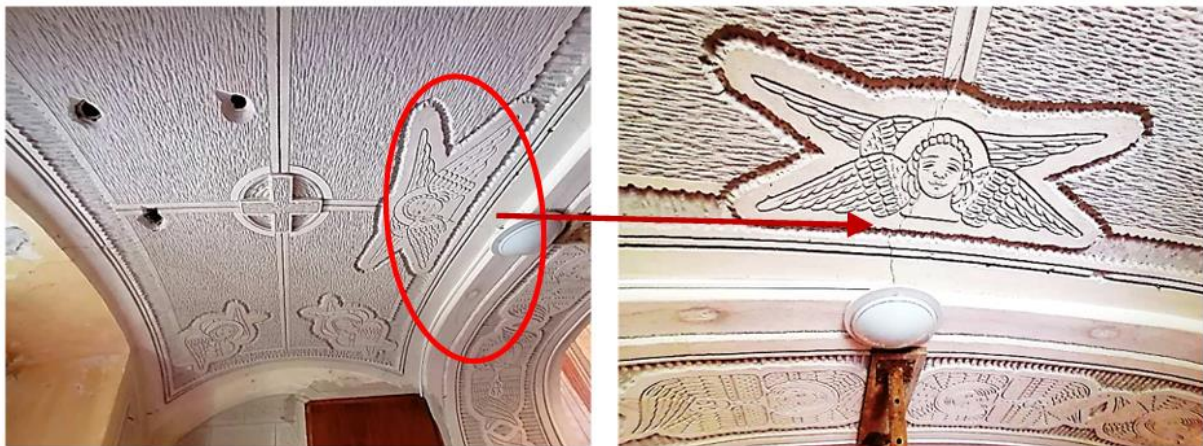
Zadnja strana prikazanog sistema povezanih zatega jest ona u zidu Z gdje se nalazi otvor i prolaz između glavnog dijela kapele i svetišta, te gdje je izveden

trijumfalni luk. Iako on ima bitno veću „strelicu“ od lukova uz zid Z, kod računske kontrole ovog zida pokazalo se da tu postoji prevelika sila zatezanja koja je i najveći uzrok pukotina u podgledu tjemena tog luka.

Zatege u zidu kora potrebne su u tom zidu budući da se vertikalno opterećenje od težine zvonika (čija jedna strana je taj zid) zbog otvora u unutrašnjosti kapele širi na bočne strane tog zida, a taj otklon izaziva vlačne sile nad oba otvora. Lukovi i nadvoji su također dio nosivog sustava zvonika. Zbog njih su nastale pukotine u podgledima oba luka u tom zidu – nad korom te nad pjevalištem.



Slika 89. Pukotina na nadvoju ulaza, odnosno luku iznad ulaznih vratiju



Slika 90. Pukotina u podgledu luka nad korom

6. Analiza rezultata

Proračun potresne otpornosti predmetne građevine proveden je s pomoću računalnog programa 3Muri i Tower, pri čemu su dobiveni rezultati tzv. pushover analizom i linearnom analizom.

Metodom postupnog guranja (tzv. *pushover* analizom) dobivene su pushover krivulje, gdje se može zaključiti kako postojeća konstrukcija ne zadovoljava većinu provedenih analiza za granično stanje ograničenog oštećenja (OO), dok za granično stanje znatnog oštećenja (ZO) zadovoljava u većini rezultata. Za smjer X najnepovoljnija je analiza broj 15, a za smjer Y analiza broj 23. Prema rezultatima dobivenim analizom, vidljivo je da je konstrukcija slabija u smjeru X, te da mehanička otpornost i stabilnost konstrukcije zgrade ne zadovoljavaju minimalni zahtijevani indeks znatnog oštećenja (IZO) i da ne zadovoljavaju minimalni zahtijevani indeks ograničenog oštećenja (IOO).

Linearnom analizom računalnim programom Tower predstavljaju se rezultati unutrašnjih sila konstruktivnih elemenata. Za potrebe kontrole mehaničke otpornosti i stabilnosti konstrukcije kapele izrađen je model koji predstavlja dosadašnje stanje.

Faktori participacije – sudjelujuće mase daju informaciju o relativnom doprinosu svakog tona u određenom seizmičkom slučaju opterećenja.

Težina konstrukcije

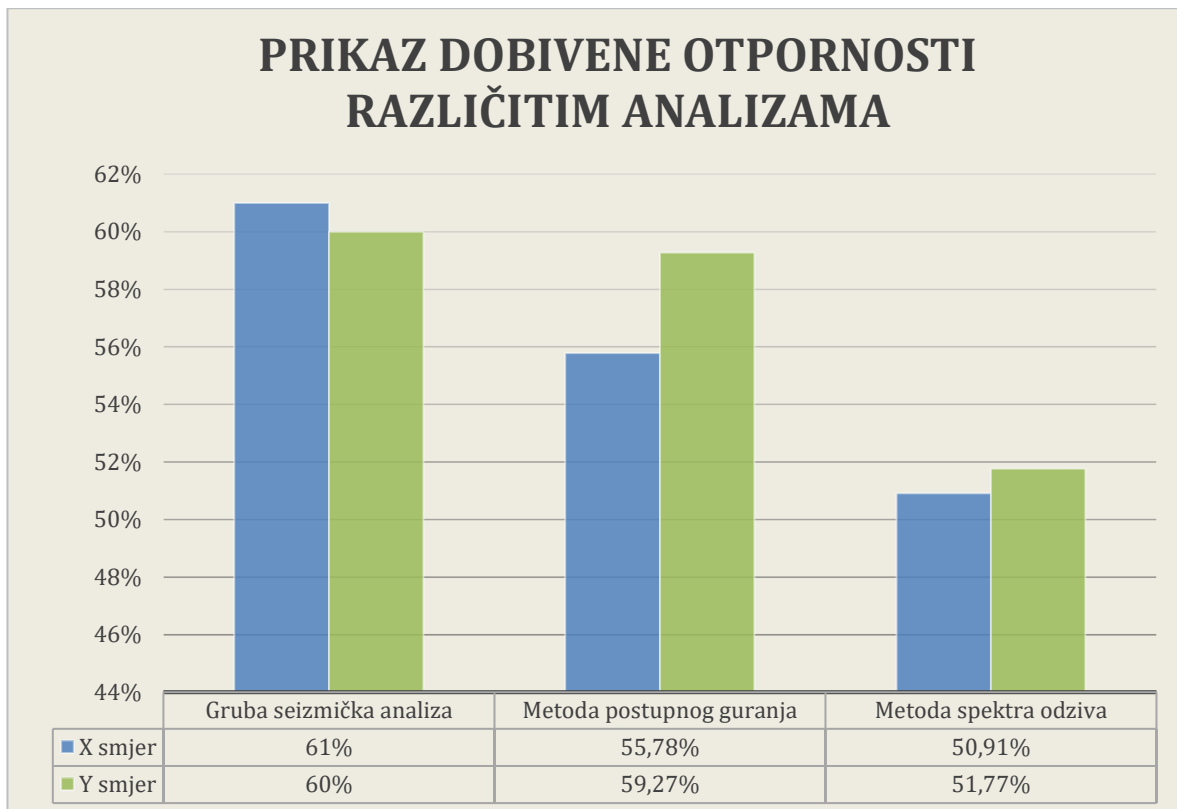
Grubom seizmičkom analizom dobiva se težina konstrukcije od **9 972,10 kN**, dok u provedenoj analizi **metodom spektra odziva** iz 3D modela težina iznosi **11 405 kN**, što daje razliku od 13 %, te se prihvaća točnost mase iz modela.

Sudjelujuće mase

Seizmička sila za svaki smjer (x i y) prema **gruboj seizmičkoj analizi** iznosi 61 %, u smjer X, odnosno 60 % u smjeru Y.

Metodom postupnog guranja za smjer X iznosi 55,78 %, dok za smjer Y iznosi 59,27 %.

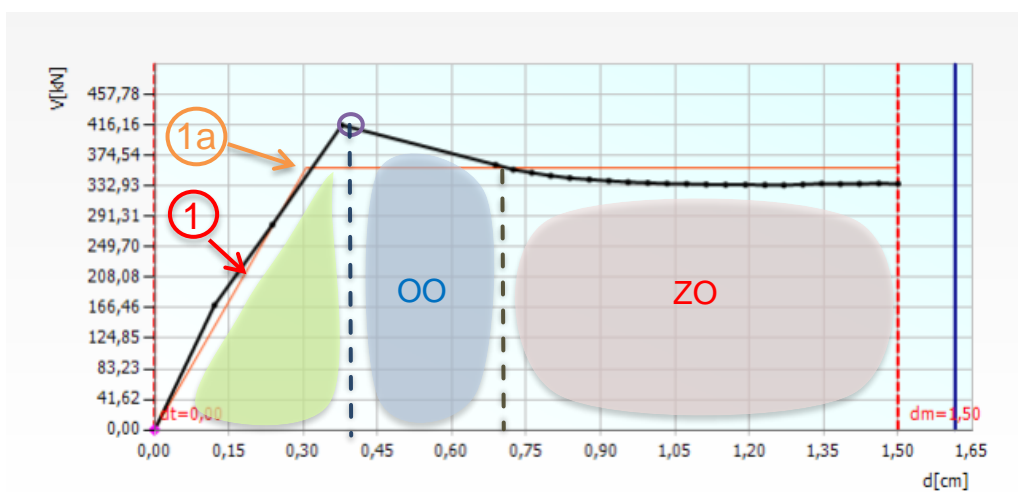
Metodom spektra odziva za smjer X, seizmička sila iznosi 50,91 %, dok za smjer Y ona iznosi 51,77 %, dakle $S_x=5806$ kN, $S_y=5904$ kN.



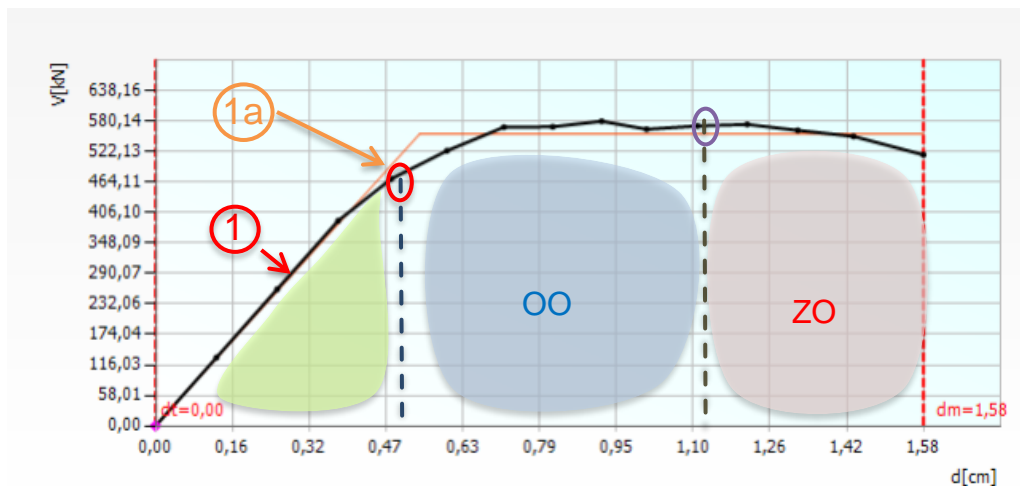
Slika 91. Prikaz dobivene otpornosti različitim analizama

Konstrukcija kapele prema metodi postupnog guranja i metodi spektra odziva slabija je u X smjeru u odnosu na Y smjer kod metode postupnog guranja i metode spektra odziva, dok se kod grube seizmičke analize zbog vrlo male razlike može zaključiti kako vrijedi $S_x = S_y = 60\%$

Analiza krivulja kapaciteta iz nelinearnog statičkog proračuna



a) X smjer



b) Y smjer

Oznaka 1a na obje krivulje označava idealnu krivulju kapaciteta nosivosti, odnosno odnos između opterećenja i deformacija konstrukcije. Krivulja se obično sastoji od nekoliko ključnih faza. U početnoj fazi, odnosno elastičnoj fazi, kapacitet nosivosti povećava se linearno s povećanjem opterećenja. Ova faza je u skladu s Hookeovim zakonom, gdje su deformacije direktno proporcionalne opterećenju.

Nakon linearne faze, konstrukcija ulazi u plastičnu fazu. U ovoj fazi krivulja više ne pokazuje linearan odnos, prelazi u plastično stanje gdje deformacije više ne prate direktno opterećenje. Na kraju krivulje može se primijetiti smanjenje kapaciteta nosivosti uslijed lokalnih deformacija, kao što je lom konstrukcije. Ova posljednja faza prikazuje kako je konstrukcija nesposobna izdržati dodatna opterećenja, što može dovesti do loma.

Krivulja kapaciteta sa slike a) predstavlja rezultat nelinearnog statičkog proračuna konstrukcije postupnim guranjem u X smjeru, u programu 3Muri. Na početku krivulje uočava se elastično ponašanje konstrukcije (oznaka 1). Ovaj dio krivulje odgovara elastičnom režimu ponašanja, gdje konstrukcija reagira proporcionalno primijenjenom opterećenju i ne dolazi do trajnih oštećenja. Linearno ponašanje konstrukcije uočava se sve do vršne točke koja se nalazi na $d \approx 0,35$ cm pomaka i poprečne sile od $V \approx 416$ kN. Ova točka označava maksimalnu nosivost konstrukcije prije nego što počne gubiti svoj kapacitet i ulazi u fazu plastičnih deformacija. Nakon ove točke, nosivost konstrukcije počinje opadati, što je vidljivo iz jasno vidljive padajuće krivulje nakon vršnog kapaciteta (ljubičasti kružić).

Srednji dio krivulje označava područje gdje, nakon postizanja vršne točke i početnog opadanja nosivosti, konstrukcija zadržava gotovo konstantnu nosivost, unatoč tome što se deformacije nastavljaju povećavati. Drugim riječima, iako dolazi do

povećanja pomaka, konstrukcija može i dalje podnositi opterećenje bez daljnjeg značajnog gubitka kapaciteta. Srednji se dio krivulje proteže od oko $d=0,60$ cm do $d=1,50$ cm, gdje je nosivost stabilizirana na $V\approx 332$ kN. U ovoj fazi konstrukcija više ne povećava kapacitet (sila ostaje gotovo konstantna), ali doživljava daljnje plastične deformacije. Srednji dio krivulje pokazuje otpornost konstrukcije na kolaps unatoč značajnim deformacijama, odnosno konstrukcija, iako oštećena i s reduciranim kapacitetom, može još neko vrijeme pružati otpor, čime se izbjegava nagli slom.

Krivulja kapaciteta sa slike b) predstavlja rezultat nelinearnog statičkog proračuna postupnim guranjem (pushover analiza) u programu 3Muri. Krivulja predstavlja otpornost konstrukcije u Y smjeru. Gotovo linearno ponašanje krivulje nalazi se na početku s oznakom 1. Ovaj linearni porast traje sve dok konstrukcija ne dođe do faze kada se počinju razvijati plastične deformacije, tj. kada se dostigne granični kapacitet. Faza početka razvoja plastične deformacije može se očitati s grafa, a označena je crvenim kružićem gdje poprečna sila iznosi cca 464 kN s pomakom od 0,47 cm, kada kapacitet sile počinje usporavati rast.

Srednji dio krivulje označava prijelaz iz elastičnog u plastično područje i proteže se od točke tečenja do vršne točke nosivosti. Ovo je dio krivulje u kojem se konstrukcija ponaša u kombinaciji elastičnih i plastičnih deformacija, tj. dolazi do smanjenja krutosti, ali konstrukcija još uvijek može podnijeti dodatna opterećenja.

Srednji se dio proteže od $d\approx 0,47$ cm do $d\approx 1,10$ cm (točka označena ljubičastim kružićem). To je područje gdje se brzina povećanja nosivosti usporava, ali opterećenja još uvijek rastu. Drugim riječima, konstrukcija je prešla iz potpuno elastičnog ponašanja u fazu u kojoj dolazi do formiranja plastičnih zglobova, no konstrukcija još uvijek može nositi opterećenje.

Vršna točka na krivulji kapaciteta označava maksimalnu nosivost konstrukcije u ovome smjeru, odnosno maksimalnu poprečnu silu koju konstrukcija može izdržati prije nego što počne gubiti kapacitet.

Vršna se točka nalazi otprilike na poprečnoj sili iznosa od ≈ 600 kN, sa pomakom od $d\approx 1,10$ cm. Ova točka označava kraj faze u kojoj se konstrukcija još može nositi s dodatnim opterećenjima i početak faze u kojoj dolazi do progresivnog sloma ili značajnijih plastičnih deformacija.

Nakon vršne točke, krivulja počinje opadati, što pokazuje da konstrukcija gubi kapacitet i više ne može podnijeti dodatna opterećenja (u ovome slučaju potres).

Uobičajeno je da se stanje oštećenja nosivog elementa definira preko njegove deformacije. Općenito je moguće uspostaviti proizvoljne kriterije kojima se kontrolira ponašanje konstrukcije. Najčešće se rabe tri granična stanja, a to su granično stanje blizu rušenja (BR) u kojem je konstrukcija pred otkazivanjem, granično stanje značajnog oštećenja (ZO) pri kojemu je konstrukcija teško oštećena te je nije opravdano obnavljati. To stanje često odgovara i granici pri kojoj je sigurnost ljudi u zgradi ugrožena. Treće granično stanje odgovara stanju ograničenog oštećenja (OO) pri dosezanju kojega se ne bi smjela ugroziti uporabljivost zgrade te bi se njezina obnova trebala moći provesti razmjerno brzo. Svakom od tih graničnih stanja odgovara određeno povratno razdoblje za koje ne bi smjelo biti dosegnuto. Tako se prema HRN EN 1998-3 predlaže: značajno oštećenje (ZO) za povratni period od 475 godina, što odgovara vjerojatnosti premašaja od 10 % u 50 godina, dok je za granično stanje ograničenog oštećenja (OO) povratno razdoblje od 95 godina, što odgovara vjerojatnosti premašaja od 10 % u 10 godina.

7. Zaključak

Ovaj rad obuhvaća provođenje seizmičkih analiza otpornosti konstrukcije i detaljnu usporedbu dobivenih rezultata. Kroz proračun su primijenjene dvije metode: linearni i nelinearni proračun, s ciljem identifikacije sličnosti i razlika između njih.

Grubom seizmičkom analizom dobivena je otpornost građevine od 61 % u smjeru X, dok je u smjeru Y otpornost 60 %. Primjenom metode postupnog guranja (pushover metoda) dobiva se otpornost građevine od 55,78 % za smjer X, što je za 9 % manje u odnosu na grubu seizmičku analizu, te 59,27 % za smjer Y, što je za 2 % manje u odnosu na grubu seizmičku analizu.

Kod metode spektra odziva otpornost za smjer X iznosi 51 %, što je u odnosu na grubu seizmičku analizu manje za 17 %, te 52 % za smjer Y, što je u odnosu na grubu seizmičku analizu za isti smjer manje za 14 %.

Usporedbom metode spektra odziva i metode postupnog guranja dolazi se do rezultata otpornosti građevine od 9 % veće otpornosti u smjeru X i 13 % veće otpornosti u smjeru Y kod metode postupnog guranja.

Gruba seizmička analiza koristi jednostavniji pristup i često podrazumijeva idealizirane modele konstrukcije. Ona ne uzima u obzir kompleksna ponašanja konstrukcije, poput razvoja plastičnih zglobova ili lokalnih oštećenja, što dovodi do viših vrijednosti otpornosti. Ova analiza tretira konstrukciju kao idealno elastičnu i ne predviđa gubitak nosivosti ili plastične deformacije.

Pushover metoda simulira progresivno povećanje seizmičkog opterećenja sve dok konstrukcija ne dostigne limit nosivosti. Za razliku od grube seizmičke analize, ova metoda uzima u obzir nelinearno ponašanje konstrukcije, poput formiranja plastičnih zglobova i redistribucije sila. To objašnjava nešto niže vrijednosti otpornosti u usporedbi s grubom analizom, jer pushover metoda preciznije prikazuje kako konstrukcija gubi nosivost pri većim opterećenjima.

Metoda spektra odziva pokazuje najniže vrijednosti otpornosti, ukazujući na to da dinamička analiza bolje simulira stvarne izazove s kojima se konstrukcija suočava tijekom potresa.

Jednostavnije modeliranje konstrukcije postiže se u 3Muri programu, koji koristi nelinearnu metodu (pushover metodu). Za razliku od programa Tower, koji koristi metodu spektra odziva, modeliranje konstrukcije je zahtjevnije, no prikazuju se rezultati poput unutarnjih sila u svodovima kapele, naprezanja u temeljima i slično, dok kod 3Muri softvera to nije moguće postići. Također, s pomoću 3Muri programa

moгуće je očitati i analizirati različite stupnjeve oštećenja za svaki zid u konstrukciji, dok Tower ne nudi tu mogućnost.

Cilj rada je postignut prikazom usporedbe kroz sve tri metode i kroz dva softverska programa.

8. Literatura

Internet izvori:

[1] Što je 3Muri?, https://www.hkig.hr/fdsak3jnFsk1Kfa/novosti/HKIG-3muri_HR.pdf, [pristupljeno 2.09.2024.]

[2] Mitrović, S.: Ciklus predavanja: Znanjem za Zagreb (i Hrvatsku) – Zagrebu od Rijeke; Primjena nelinearnog statičkog proračuna u seizmičkoj analizi postojećih konstrukcija [pristupljeno 2.09.2024.]

[3] <https://www.plan-b.hr/index.php?id=2&sub=3> [pristupljeno 2.09.2024.]

[4] Muhovec, I. *Studija indikativnog pružanja pukotina na vertikalnim stijenama (VSP) koje su položene paralelno pravcu potresnog udara (u povodu potresa u Zagrebu, 22. ožujka 2020).*

[5] Peškan, I., Pascuttini-Juraga, V.: *Neka srednjovjekovna naselja i župe južnog varaždinskog podbrežja*, Izvorni znanstveni rad, Varaždin 2009.

[6] Prostorni plan uređenja Općine Jalžabet (*Službeni vjesnik Varaždinske županije* br. 18/23)

[7] Šimunić, AN., Pikija M., Hećimović, I., Šimunić AL.: *Osnovna geološka karta – list Varaždin (L 33-69)*, Beograd, 1981.

[8] *Potresno inženjerstvo, obnova zidanih zgrada*; Zagreb, ožujak 2021.

[9] Atalić, J. i sur.: *Program cjelovite obnove povijesne jezgre grada Zagreba; Konstruktorski modeli obnove*, Zagreb 2021.

[10] Kraus, I.: *Priručnik s tablicama i izrazima za proračun djelovanja na konstrukcije*, Osijek, 2018.

[11] Šimić, V.: *Otpornost materijala I*, Školska knjiga, Zagreb 2002.

[12] Šimić, V.: *Otpornost materijala II*, Školska knjiga, Zagreb 1995.

9. Popis slika

Slika 1 Vertikalna stijena kao ispuna unutar pravokutnika ABDCA [4].....	7
Slika 2 Naizmjenične pretvorbe pravokutnika u romb [4].....	7
Slika 3 Pojava ukriženih pukotina [4].....	8
Slika 4 Primjer asimetrične otpornosti [4].....	9
Slika 5 Slučajevi otkazivanj nosivosti ziđa unutar ravnine [5].....	9
Slika 6 Idealizirana statička shema [4].....	10
Slika 7 Shematski prikaz jednosmjerne pukotine [4].....	10
Slika 8 Shema konstrukcije koja je elastično upeta u temeljima A i C [4].....	12
Slika 9 Frontalni pogled na kapelu s istaknutim pročeljem (izvor: autor).....	14
Slika 10 Prikaz sjevernog pročelja (izvor: autor).....	15
Slika 11 Prikaz južnog pročelja (izvor: autor).....	16
Slika 12 Prikaz zapadnog pročelja (izvor: autor).....	16
Slika 13 Prikaz istočnog pročelja (izvor: autor).....	17
Slika 14 Šira situacija istočne (straženje) strane kapele (izvor: autor).....	17
Slika 15 Prikaz mikrolokacije predmetne katastarske čestice (izvor: https://geoportal.dgu.hr/).....	18
Slika 16 Prikaz makrolokacije predmetne katastarske čestice (izvor: https://geoportal.dgu.hr/).....	18
Slika 17 Prikaz mikrolokacije prema namjeni PPU Općine Jalžabet [6].....	19
Slika 18 Izvod iz registra kulturnih dobara RH (izvor: https://registar.kulturnadobra.hr/#/).....	20
Slika 19 Izvod iz registra kulturnih dobara RH (izvor: https://registar.kulturnadobra.hr/#/).....	21
Slika 20 Tlocrt prizemlja kapele	22
Slika 21 Tlocrt pjevališta	23
Slika 22 Tlocrt krovništva	24
Slika 23 Tlocrt zvonika	25
Slika 24 Presjek 1-1	26
Slika 25 Presjek 2-2	27
Slika 26 Presjek 3-3	29
Slika 27 Presjek 4-4	29
Slika 28 Isječak iz osnovne geološke karte – list Varaždin [7].....	30
Slika 29 Pregledna tektonska karta lista Varaždin [7].....	32

Slika 30 Seizmološki prikaz područja (isječak karte za povratni period od 475 godina); izvor (http://seizkarta.gfz.hr/hazmap/karta.php)	32
Slika 31 Predmetna lokacija s horizontalnim vršnim ubrzanjima.....	33
Slika 32 Stupnjevi oštećenja za zidane zgrade prema EMS-98 klasifikaciji [8].....	37
Slika 33 Oznake kategorije upotrebljivosti građevina [9].....	38
Slika 34 Tlocrt prizemlja kapele s naznakama vanjskih i unutarnjih oštećenja.....	42
Slika 35 Vertikalna pukotina sjevernog pročelja.....	44
Slika 36 Vertikalne pukotine južnog pročelja.....	41
Slika 37 Jasno vidljivi znakovi padinskog puzanja.....	43
Slika 38 Progresivno širenje pukotinskog sustava.....	44
Slika 39 Oštećenje lijevog zida broda crkve.....	45
Slika 40 Oštećenje desnog zida broda crkve.....	45
Slika 41 Pukotinski sustav na spoju sakristije i kapele.....	46
Slika 42 Pukotina sjevernog zida kapele.....	47
Slika 43 Aksonometrijski prikaz građevine u 3Muri programu.....	55
Slika 44 Aksonometrijski prikaz građevine u 3Muri programu.....	55
Slika 45 Tlocrtni prikaz etaže 1.....	56
Slika 46 Tlocrtni prikaz etaže 2.....	56
Slika 47 Tlocrtni prikaz etaže 3.....	57
Slika 48 Tlocrtni prikaz etaže 4.....	57
Slika 49 Tlocrtni prikaz krovne etaže 1.....	58
Slika 50 Tlocrtni prikaz krovne etaže 2.....	58
Slika 51 Seizmička analiza br. 15 u X smjeru.....	73
Slika 52 Tlocrtni pogled deformacije; smjer X.....	74
Slika 53 Mjerodavna krivulja kapaciteta nosivosti (smjer X).....	75
Slika 54 Seizmička analiza br. 23 u Y smjeru.....	76
Slika 55 Tlocrtni pogled deformacije; smjer Y.....	77
Slika 56 Mjerodavna krivulja kapaciteta nosivosti (smjer Y).....	78
Slika 57 3D proračunski model konstrukcije kapele u Jakopovcu.....	81
Slika 58 Prikaz drugog tona oscilacije.....	84
Slika 59 Prikaz perioda na projektnom spektru.....	85
Slika 60 Tlocrtni prikaz položaja svodova.....	86
Slika 61 Lokalni koordinatni sustav ploče za radijalno izgeneriranu MKE.....	86
Slika 62 Prikaz češkog svoda s pravokutnom osnovom.....	87
Slika 63 Različiti tipovi svodova sa prikazom prijenosa opterećenja.....	87

Slika 64 Svodovi stropova; utjecaji u ploči.....	88
Slika 65 Svodovi stropova; utjecaji u ploči.....	89
Slika 66 Svodovi stropova; utjecaji u ploči.....	90
Slika 67 Svodovi stropova; utjecaji u ploči.....	91
Slika 68 Svodovi stropova; prikaz maksimalnog naprezanja.....	93
Slika 69 Svodovi stropova; prikaz maksimalnog naprezanja.....	93
Slika 70 Naprezanja u tlu za kombinaciju I+II+III.....	95
Slika 71 Slijeganja tla za kombinaciju I+II+III.....	96
Slika 72 Naprezanja tla za anvelopu vertikalnih i potresnih opterećenja.....	96
Slika 73 Slijeganja u tlu za anvelopu vertikalnih i potresnih opterećenja.....	97
Slika 74 Okvir X1 i X2; Vektorski presjeci Nn.....	99
Slika 75 Okvir X1 i X2; Vektorski presjeci Nns.....	99
Slika 76 Okvir X3; Vektorski presjeci Nn.....	100
Slika 77 Okvir X3; Vektorski presjeci Nns.....	100
Slika 78 Okvir X4; Vektorski presjeci Nn.....	101
Slika 79 Okvir X4; Vektorski presjeci Nns.....	101
Slika 80 Okvir Y1; Vektorski presjeci Nn.....	102
Slika 81 Okvir Y1; Vektorski presjeci Nns.....	102
Slika 82 Okvir Y2; Vektorski presjeci Nn.....	103
Slika 83 Okvir Y2; Vektorski presjeci Nns.....	103
Slika 84 Okvir Y3; Vektorski presjeci Nn.....	104
Slika 85 Okvir Y3; Vektorski presjeci Nns.....	105
Slika 86 Okvir Y4; Vektorski presjeci Nn.....	106
Slika 87 Okvir Y4; Vektorski presjeci Nns.....	106
Slika 88 Grafoanalitička metoda određivanja sile na zid.....	108
Slika 89 Pukotina na nadvoju ulaza (izvor: autor).....	109
Slika 90 Pukotina u podgledu luka (izvor: autor).....	109
Slika 91 Prikaz dobivene otpornosti različitim analizama.....	111

10. Popis tablica

Tablica 1. Kategorizacija tla prema seizmičnosti.....	34
Tablica 2. Faktor važnosti zgrade [10].....	39
Tablica 3. Prikaz rezultata provedene analize.....	71



**IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU**

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, MATIJA KANCIJAN (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom USPOREDNA ANALIZA SEIZ. OTP. SAKR. GRAĐ. OST. U POTR. (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

Kancijan
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, MATIJA KANCIJAN (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom ~~završnog~~/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom USPOREDNA ANALIZA SEIZIČKE (upisati naslov) čiji sam autor/ica. OTPORNOSTI SAKRALNE GRAĐEVINE OŠTEĆENE U POTRESU

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

Kancijan
(vlastoručni potpis)