



HRVATSKA KOMORA INŽENJERA GRAĐEVINARSTVA

15. Dani Hrvatske komore inženjera građevinarstva

Opatija, 2021.

Analiza postojećeg stanja, sanacija i ojačanje nosive konstrukcije Nadbiskupskog Dvora na Kaptolu

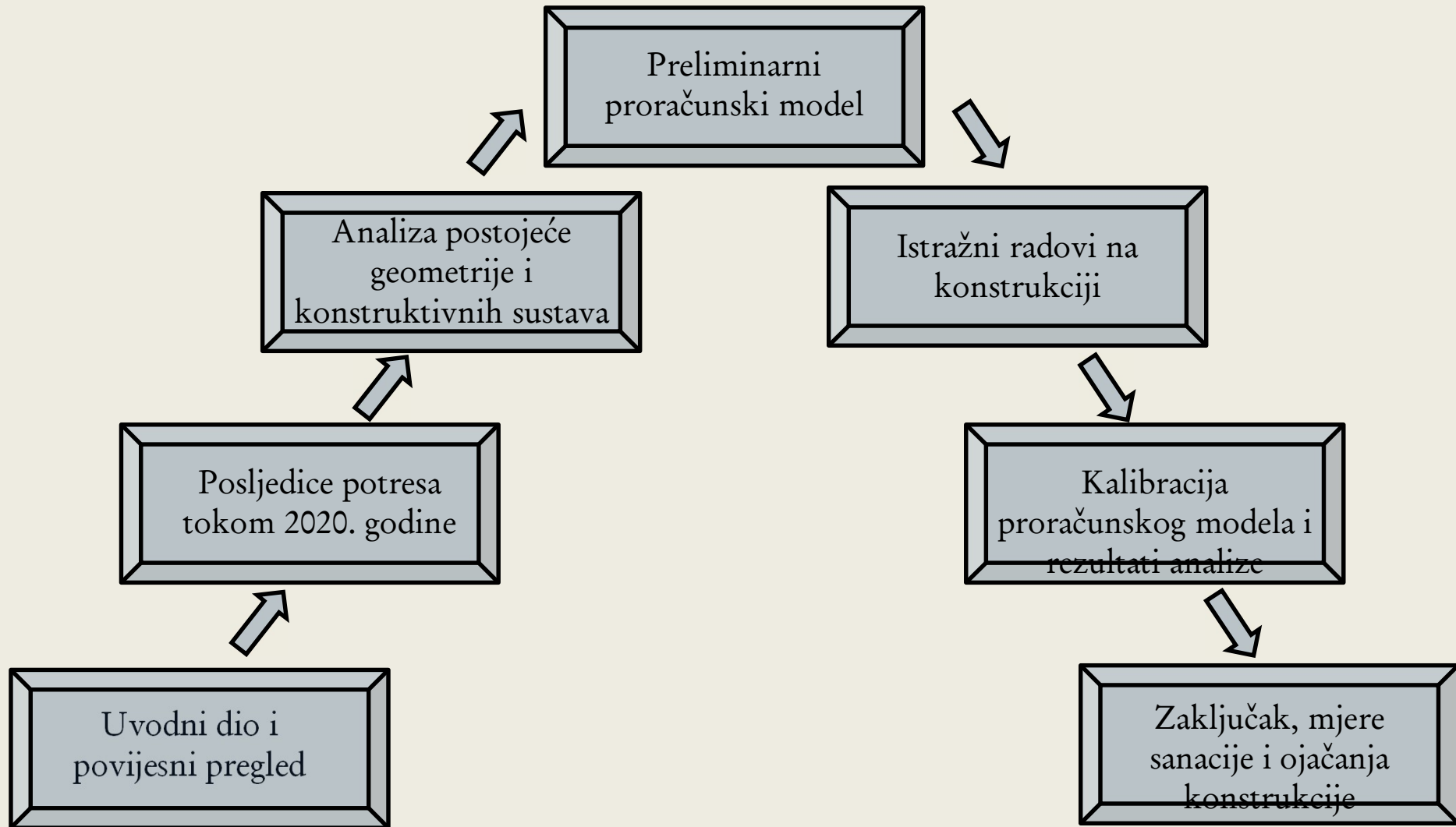
Ivan Kukina, mag.ing.aedif.

Nikola Miletić, dipl.ing.građ., KAP4, Zagreb, Hrvatska

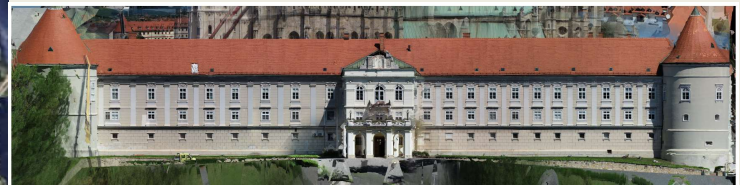
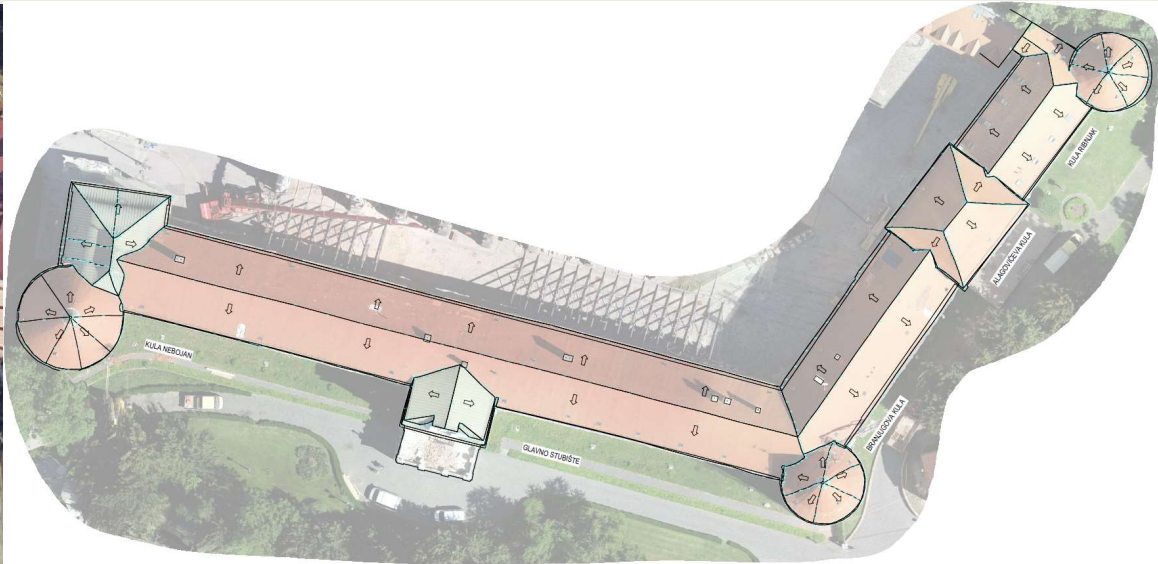
Ivan Kukina, mag.ing.aedif., KAP4, Zagreb, Hrvatska

Dražen Strunje, mag.ing.aedif., KAP4, Zagreb, Hrvatska

SADRŽAJ



OPĆENITO O KONSTRUKCIJI



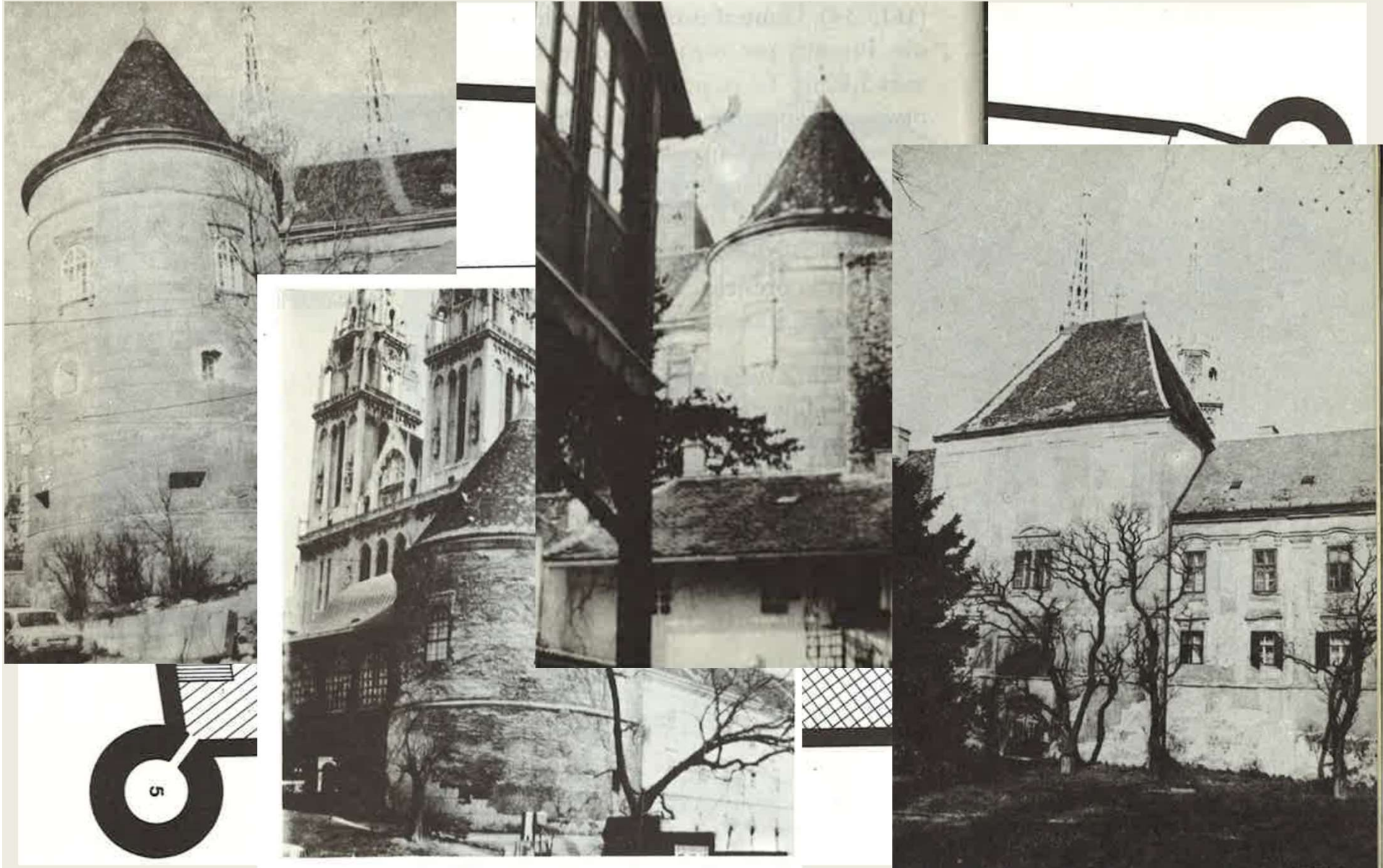
SUDIONICI U PROJEKTIRANJU

- Projektant konstrukcije: **Nikola Miletić, dipl.ing.grad.; KAP4 d.o.o.**
- Investitor: Nadbiskupija Zagrebačka
- Revident mehaničke otpornosti i stabilnosti betonske konstrukcije:
dr. sc. Boris Trogrlić, dipl.ing.grad., Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije; Sveučilište u Splitu
- Glavni projektant: Nenad Tepeš, dipl.ing.grad.
- Voditelj projekta: Boris Blažević, dipl.ing.grad.
- Projektant arhitekture: Ante Matić, ing.grad.

Dario Špoljarić, mag.inž.arh.

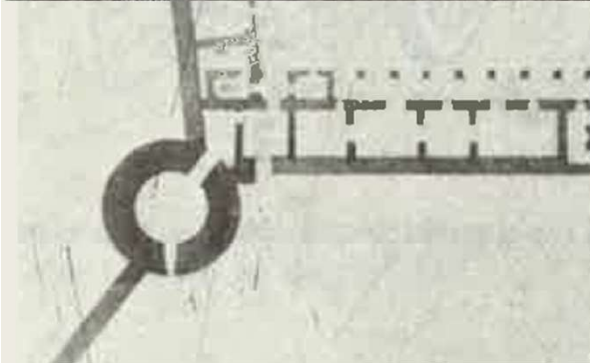
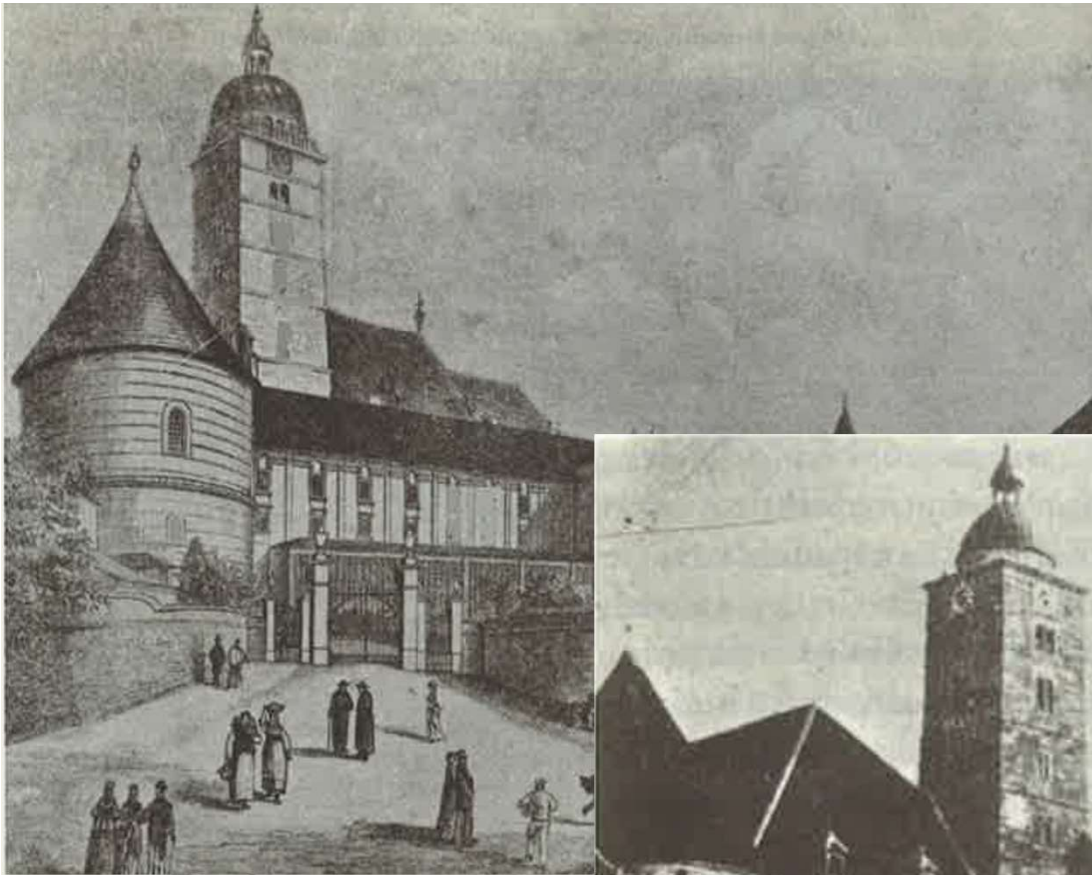


POVIJESNI RAZVOJ KONSTRUKCIJE



ONSTRUKCIJE

Arhivski tlocrt
Nadbiskupskog
Dvora 1870. godina



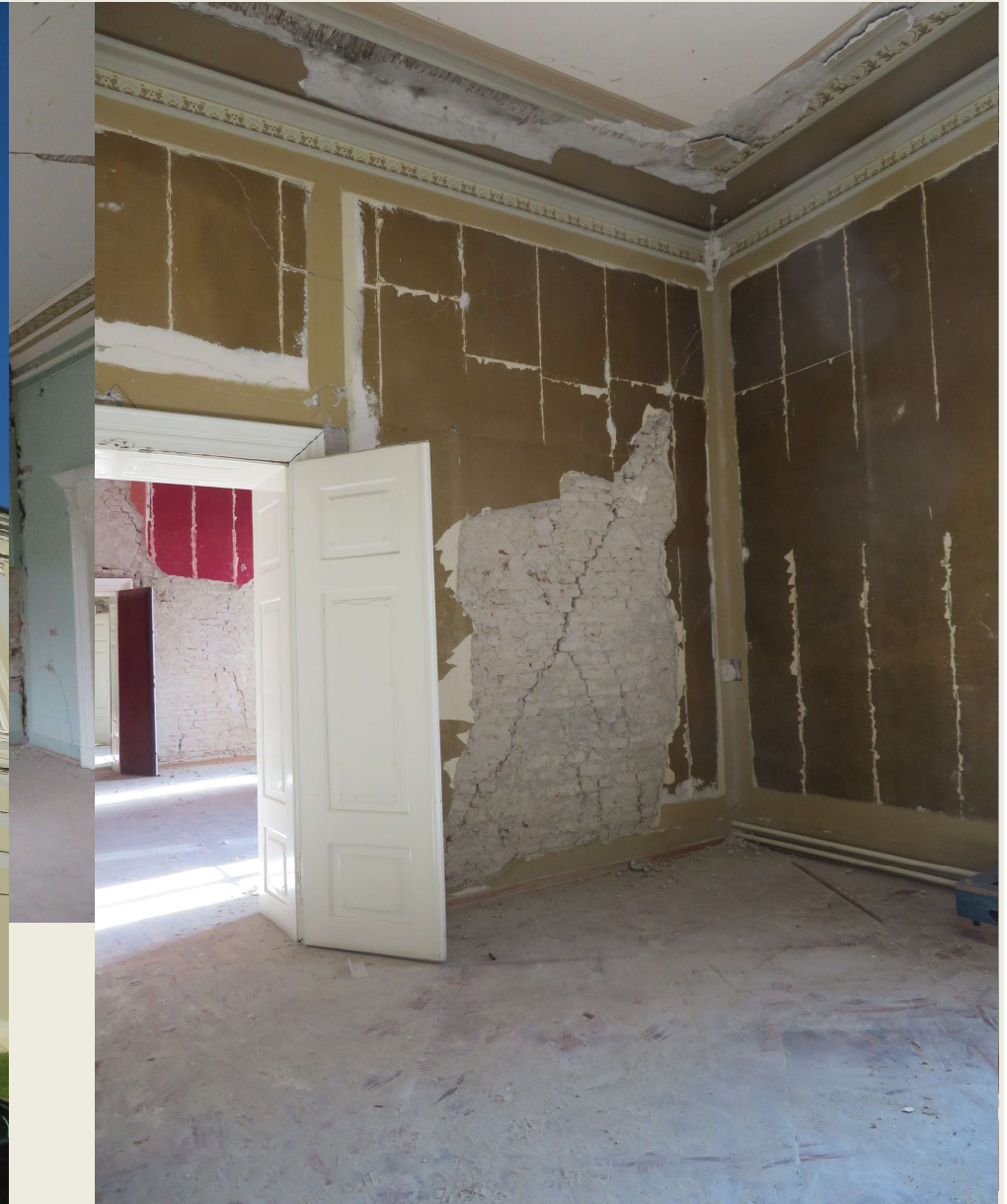
POS LJEDICE POTRESA TOKOM 2020. GODINE



POSljedICE POTRESA TOKOM 2020. GODINE

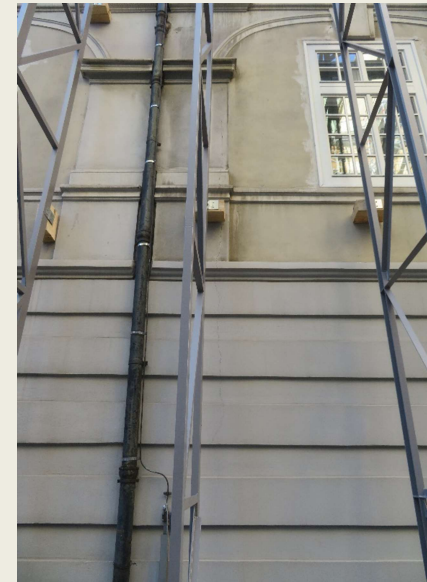


POSljedICE POTRESA TOKOM 2020. GODINE



MJERE HITNIH INTERVENCIJA

(izvedene prije uključivanja projektanta konstrukcije)



Osiguranje sprječavanja lateralnog pomaka nosive konstrukcije uzdužnih zidova prema katedrali



MJERE HITNIH INTERVENCIJA



- Svodovi znatno oštećeni i postojeći materijal se nalazi u rasutom stanju.
- Nakon „Petrinjskog“ potresa degradacije svodova se nastavila te je osigurano dodatno pridržanje.

MJERE HITNIH INTERVENCIJA



- Uklanjanje nestabilnih dijelova i urušenih konstruktivnih i nekonstruktivnih dijelova

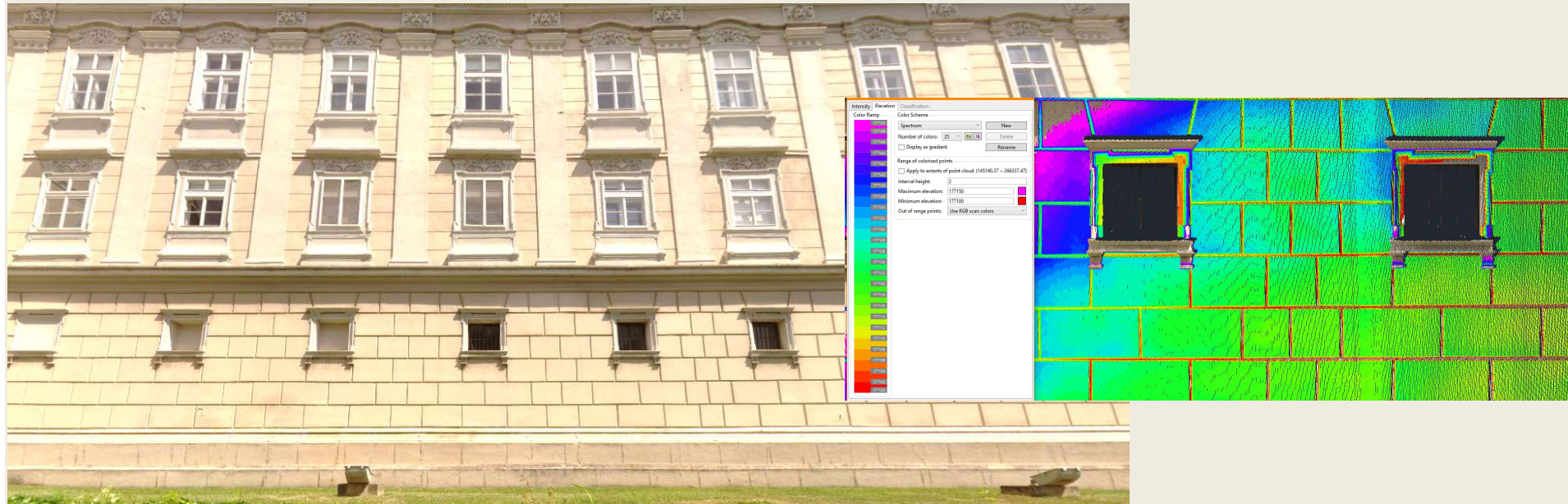


ANALIZA POSTOJEĆE GEOMETRIJE I KONSTRUKTIVNIH SUSTAVA

- Konstrukcija višekratno vizualno pregledana u danima nakon potresnog događaja 22.03.2020. te kontinuirano uključujući dane nakon „Petrinjskog” potresa 29.12.2020.
- Cijela građevina snimljena iznutra i izvana laserskim 3D skenerom „FARO FocusS 70“ te je snimak obrađen u formi 3D point cloud-a
- Izvršeno oko 400 snimaka prostora unutar i izvana građevine
- Na temelju 3D laserskog snimka izrađen arhitektonski snimak postojećeg stanja geometrije, definirane točne dimenzije konstruktivnih elemenata, njihovo praćenje po visini, pozicije otvora i ostalih konstruktivnih parametara



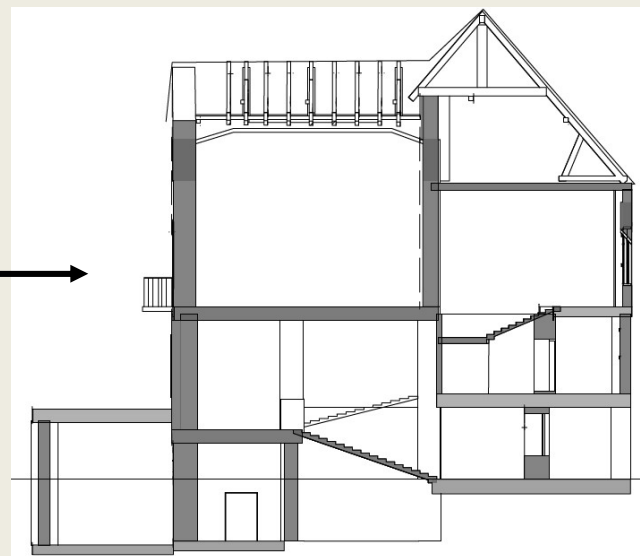
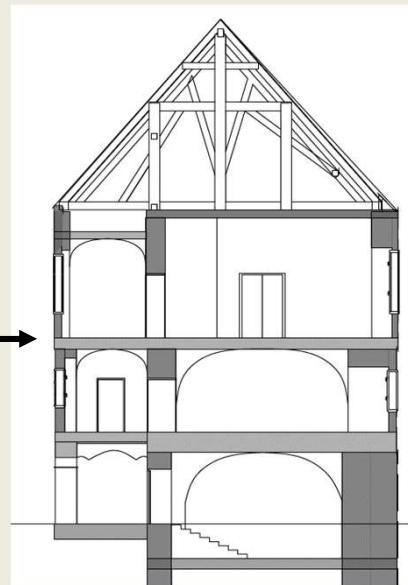
Ispitivanje vertikalnosti elemenata pomoću point cloud snimaka



3D laserski snimak postojećeg stanja

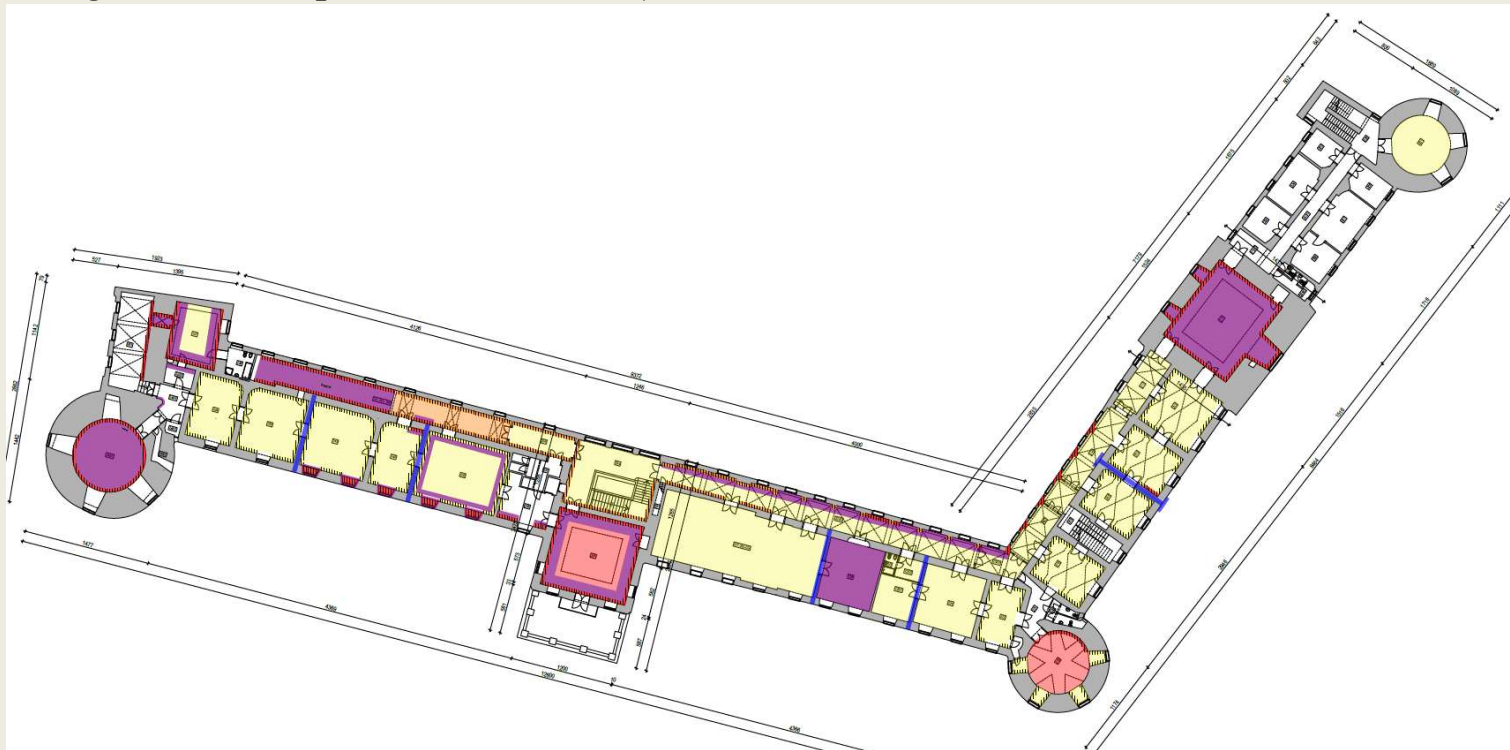
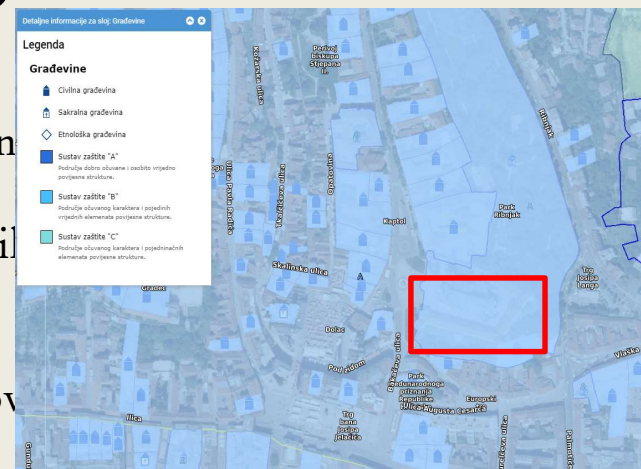


3D laserski snimak postojećeg stanja

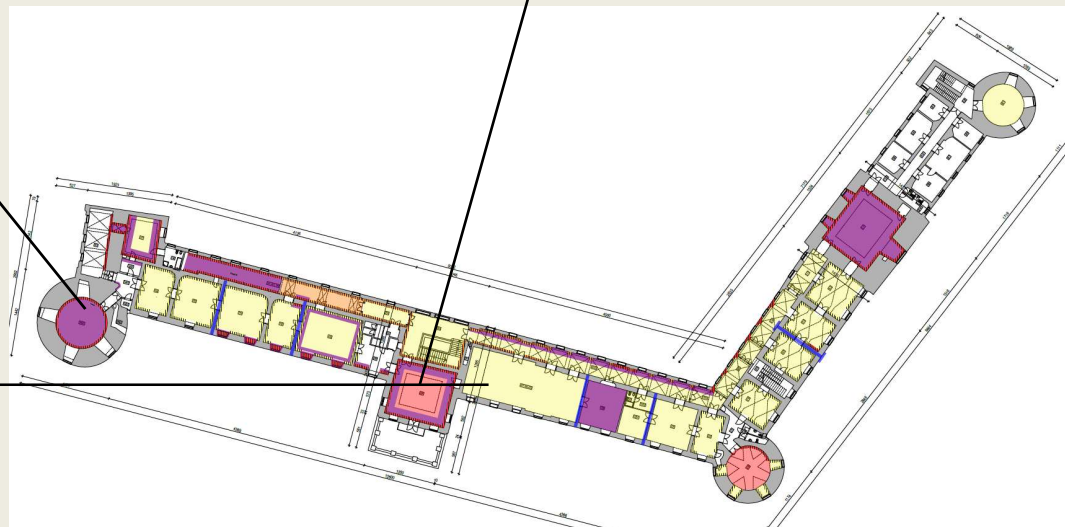
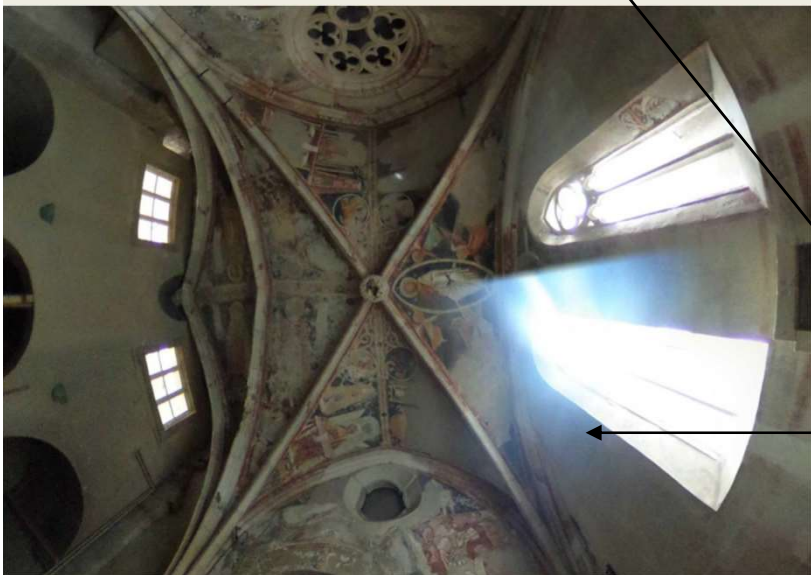


Konzervatorski uvjeti

- Nadbiskupski Dvor spada pod građevine svrstane u pojedinačno kulturno dobro
- Velik broj nalazi i izuzetan opseg konzervatorskih istražnih radn dodatno „problematizirali” konstrukciju obnovu
- Vrijedni nalazi u obliku freski i oslika pronađeni ispod postojećih slojeva zidova i stropova
- Od neprocjenjive vrijednosti smatraju se nalazi u kapeli sv. Stjepana, Bolleova svečana Dvorana, pojedini stropovi i zidovi glavnog hodnika te prostor kule Nebojan

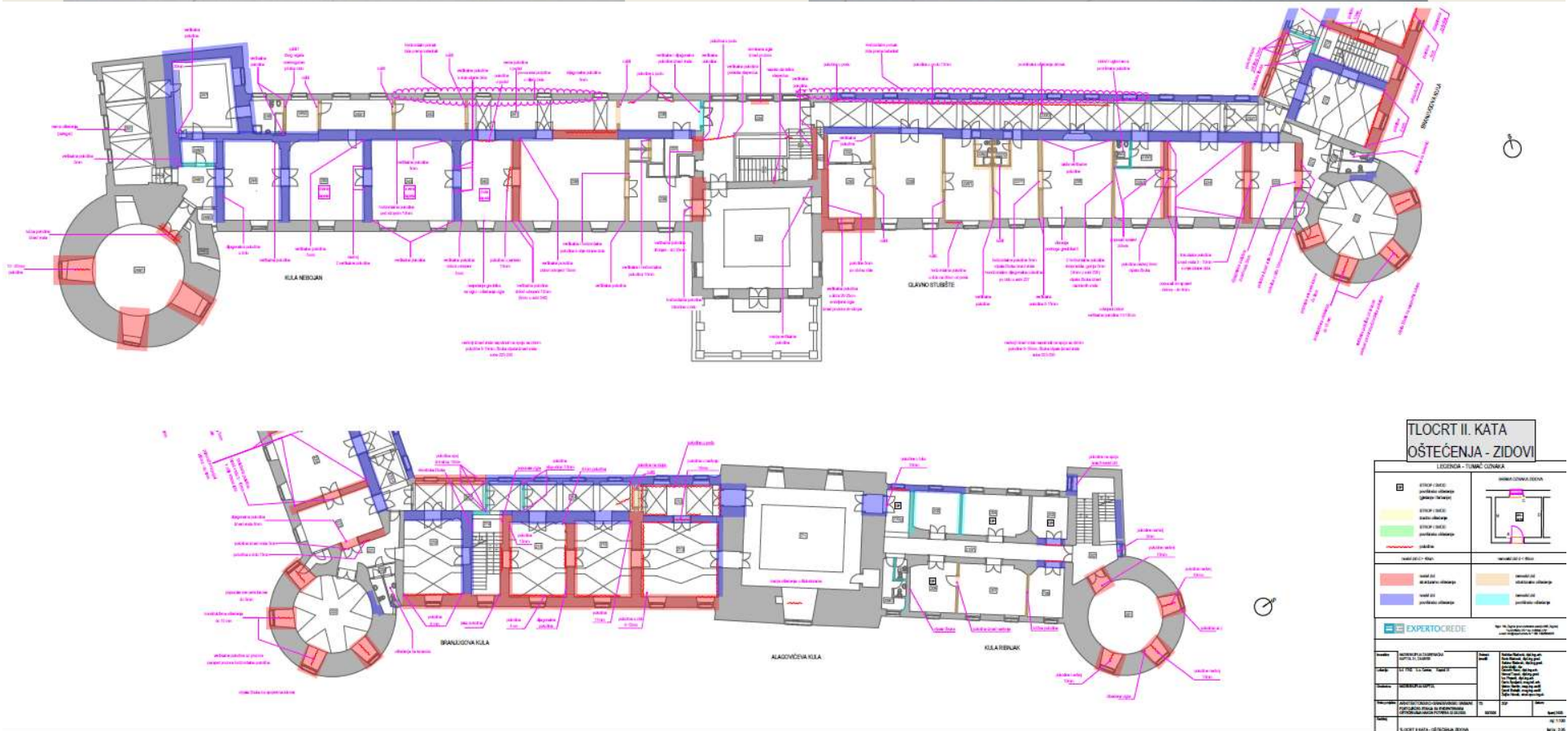


Konzervatorski uvjeti



ANALIZA POSTOJEĆE GEOMETRIJE I KONSTRUKTIVNIH SUSTAVA

- Izvršena detaljna numeracija i fotodokumentacija oštećenja i pukotinskog stanja te praćenje daljnjeg razvitka pukotina (EXPEROCREDE d.o.o.)

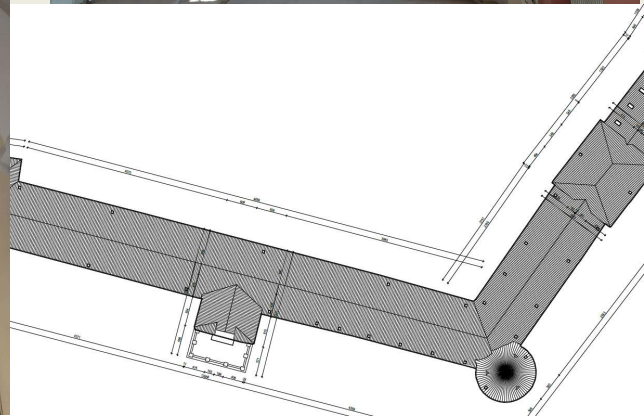


ANALIZA POSTOJEĆE GEOMETRIJE I KONSTRUKTIVNIH SUSTAVA

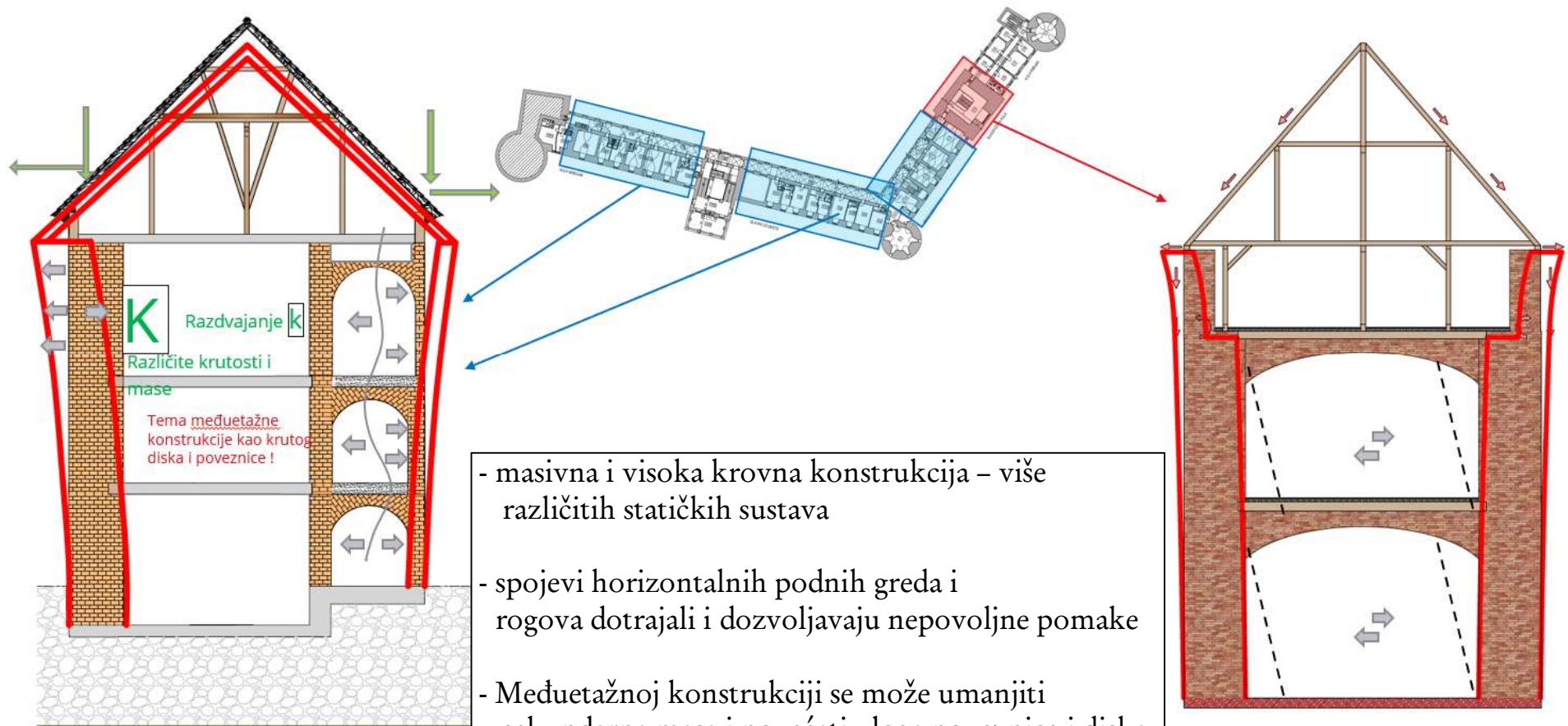
- Svi unutrašnji nosivi i „pregradni” zidovi izvedeni od pune opeke normalnog formata
- Vanjski bedemski i zidovi kule izvedeni mjestimično od kamenog, a mjestimično od opečnog zida



- Međukatne konstrukcije djelomično izvedene od tlačnih opečnih svodova, a mjestimično od gusto posloženih drvenih grednika
- Krovšte većinski izvedeno kao drveno dvostrešno (sustav stolice), a na pozicijama kule oblika je stošca



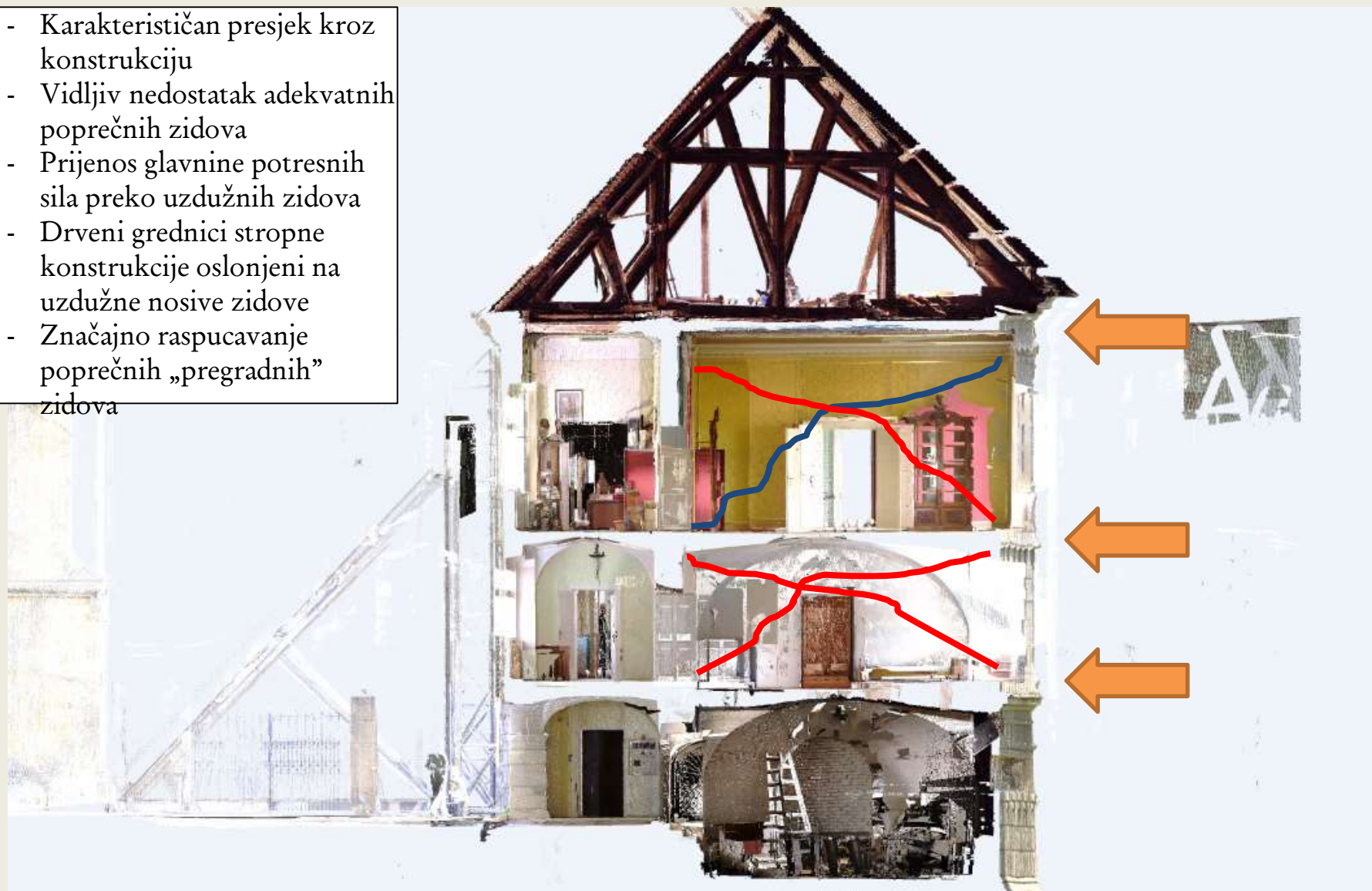
Karakteristični konstruktivni sustavi



- masivna i visoka krovna konstrukcija – više različitih statičkih sustava
- spojevi horizontalnih podnih greda i rogova dotrajali i dozvoljavaju nepovoljne pomake
- Međetažnoj konstrukciji se može umanjiti sekundarna masa i povećati uloga poveznice i diska
- krov prenosi dio horizontalne sile na parapetne zidove (pogotovo u potresu)

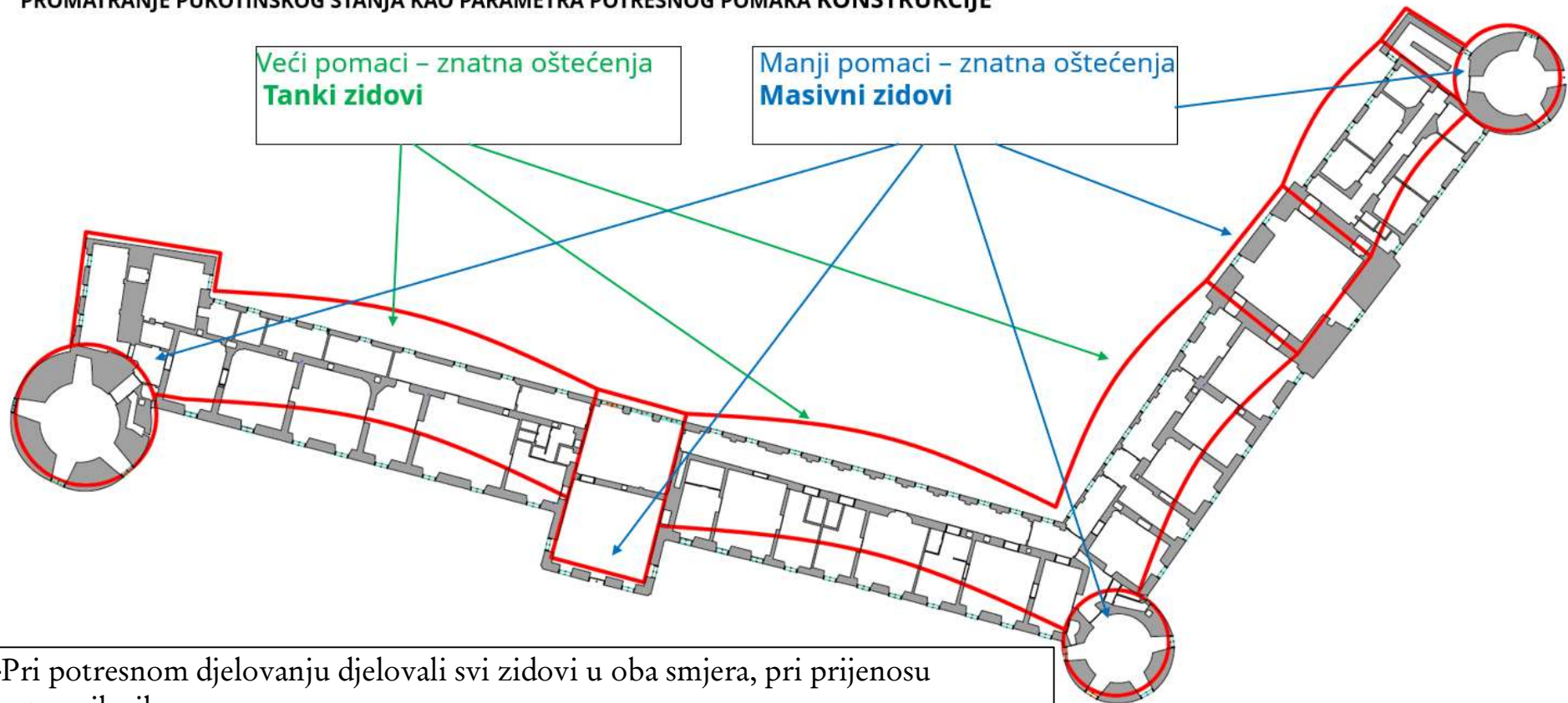
Karakteristični konstruktivni sustavi

- Karakterističan presjek kroz konstrukciju
- Vidljiv nedostatak adekvatnih poprečnih zidova
- Prijenos glavine potresnih sila preko uzdužnih zidova
- Drveni grednici stropne konstrukcije oslonjeni na uzdužne nosive zidove
- Značajno raspucavanje poprečnih „pregradnih” zidova



Karakteristični konstruktivni sustavi

- KONSTRUKCIJA GRAĐENA U VIŠE FAZA TIJEKOM 800 GODINA
- RAZLIČITO MEĐUDJELOVANJE CJELINA GRAĐENIH U RAZLIČITO VRIJEME
- PROMATRANJE PUKOTINSKOG STANJA KAO PARAMETRA POTRESNOG POMAKA KONSTRUKCIJE



-Pri potresnom djelovanju djelovali svi zidovi u oba smjera, pri prijenosu potresnih sila

-Uzdužni zidovi zidani debljine između 40 i 120 cm.

-Poprečni zidovi zidani kao tanki debljine 12-24 cm

-Zidani kao vertikalno nenosivi zidovi (nisu povezani sa stropnom konstrukcijom)

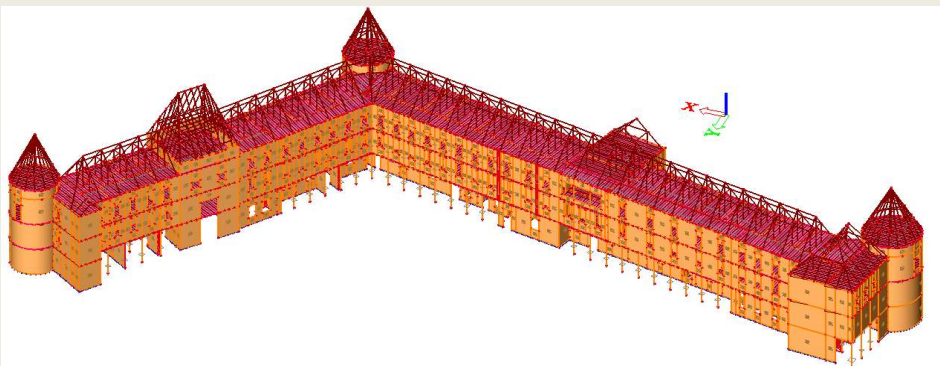
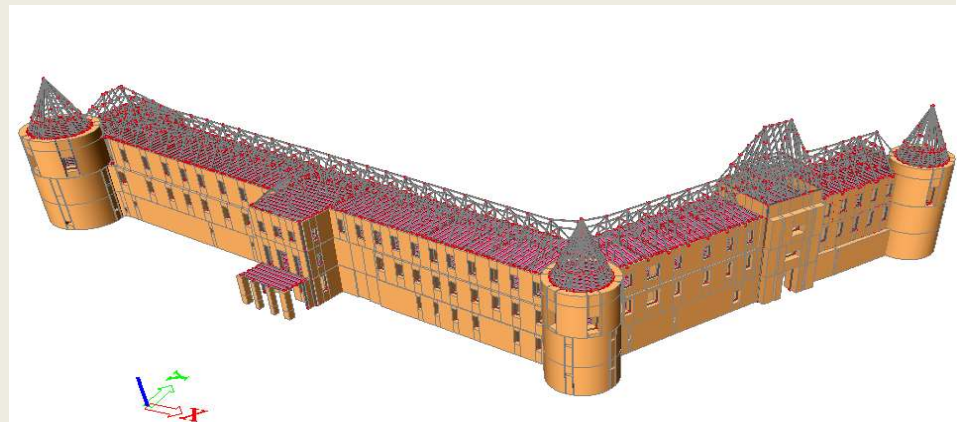
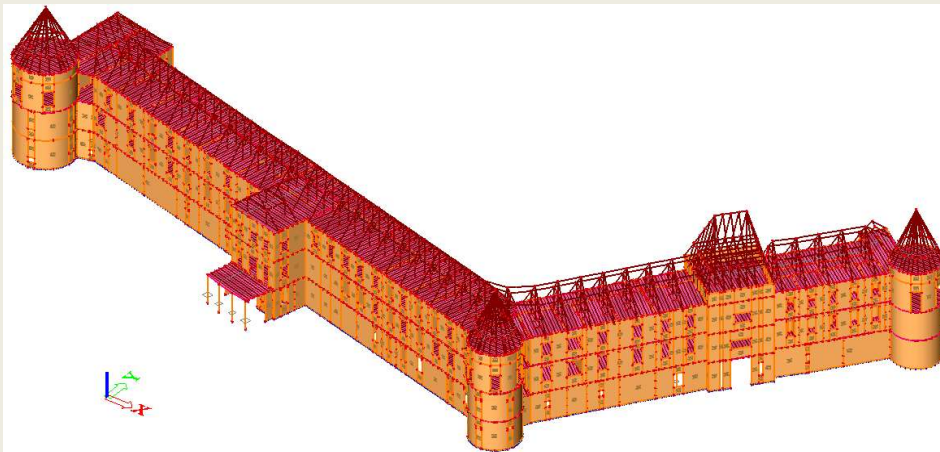
- Ne prate se po visini

-U potresu se ponašali kao potresno aktivni zidovi „gurani” od masivnih uzdužnih zidova

Ivan Kukina, mag.ing.aedif.



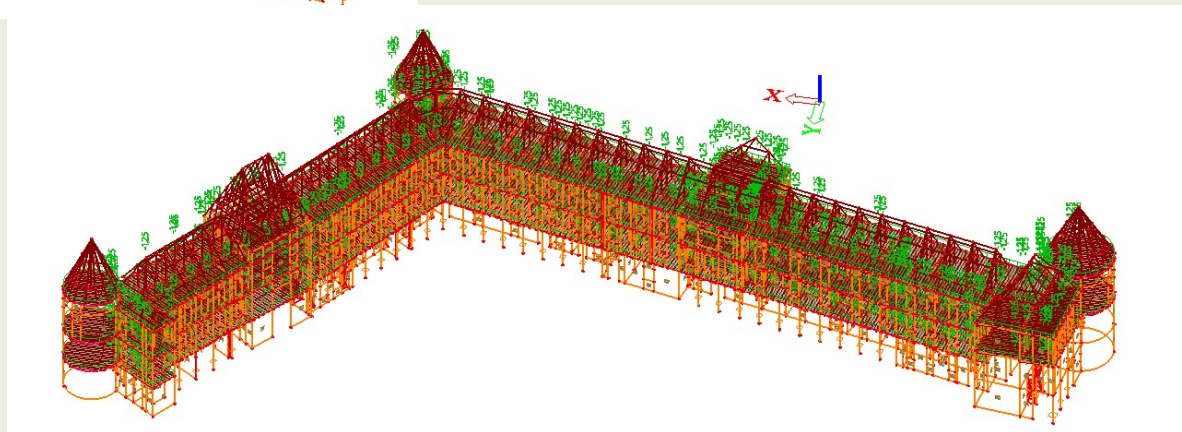
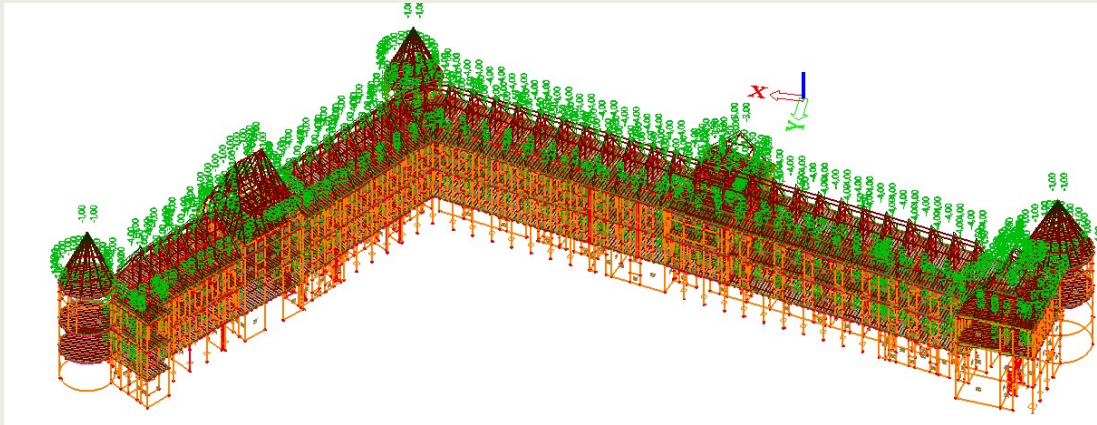
PRELIMINARNI PRORAČUNSKI MODEL



- Geometrija modelirana prema snimci postojećeg stanja – visoka točnost (3D laserski snimak)
- Mehaničke karakteristike materijala pretpostavljene prema iskustvenim vrijednostima za konstrukcije sličnog stila i starosti gradnje
- Modelirani i poprečni „nenosivi” zidovi zbog očitog utjecaja na krutost građevine (raspucanost, posmične dijagonalne pukotine)
- Modelirane veze ortogonalnih zidanih zidova u ovisnosti o vrsti zidarskog veza



Opterećenja na konstrukciju – vertikalno djelovanje

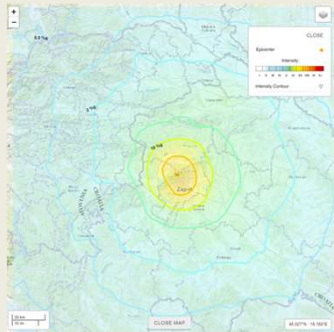


- Pretpostavljena vrijednost dodatnog stalnog i korisnog djelovanja na konstrukciju u trenutku potresnog djelovanja na dan 22.03.2020.
- Na taj način simulirano ponašanje konstrukcije za vrijeme potresa
- Dodatno stalno opterećenje: $2,0 \text{ kN/m}^2$
- Korisno opterećenje: $1,25 \text{ kN/m}^2$

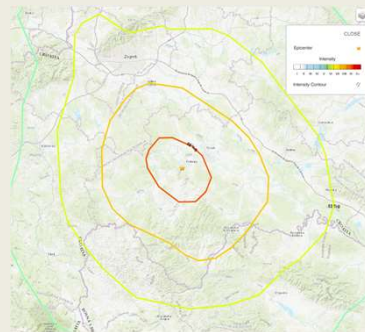
Opterećenja na konstrukciju – horizontalno djelovanje

- Horizontalno potresno opterećenje računato preko sudjelujućih masa i spektra ubrzanja
- Aktivacija masa pretpostavljenih djelovanja na dan potresa
- Proračun potresnih sila za:
 - Razina 2 potresnog djelovanja: $a_g=0,125\text{ g}$
 - Razina 4 potresnog djelovanja: $a_g=0,25\text{ g}$
- Proračun potresnih sila se provodi za faktor ponašanja 1,0 (bolji uvid u stvarno naponsko stanje i deformacije)
- Globalnim 3D modelom utvrđuje se globalno ponašanje konstrukcije i kritični dijelovi konstrukcije (usporedba sa postojećim pukotinskim stanjem)
- U obzir uzeta materijalna nelinearnost zida:
 - press only elementi koji ne preuzimaju vlačno naprezanje pri prijenosu opterećenja

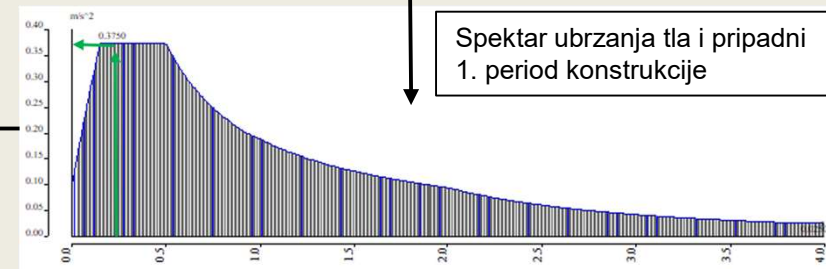
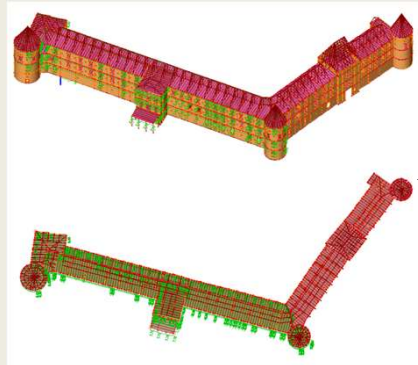
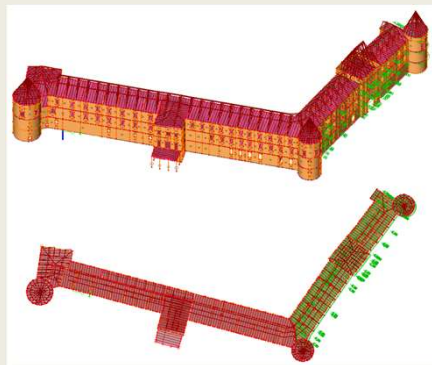
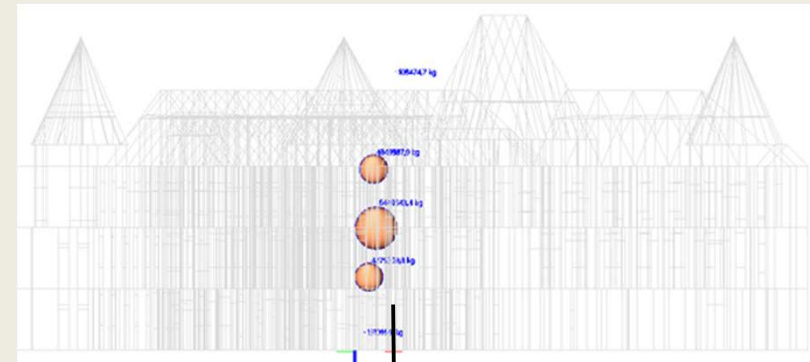
„Zagrebački potres” – 22.03.2020.



„Petrijnski potres” – 29.12.2020.



Mase koncentrirane po etažama



Rezultati modalne analize preliminarnog modela

1. Modalni oblik – $T = 0,22s$

3D displacement

Values: U_{total}

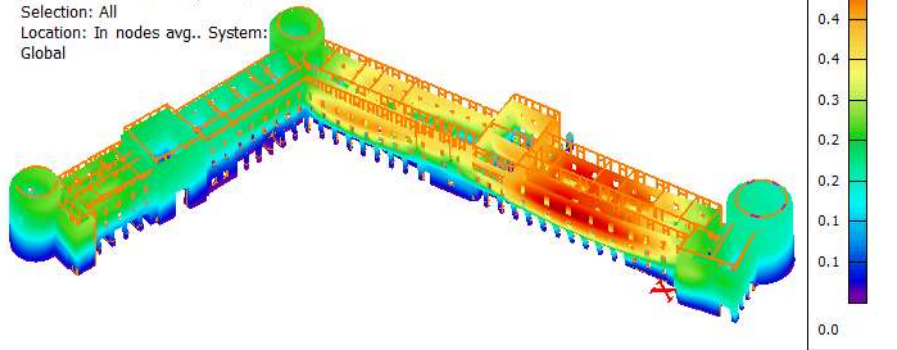
Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.

Mass combination: CM1/14 - 4,50

Selection: All

Location: In nodes avg.. System:

Global



2. Modalni oblik – $T = 0,18s$

3D displacement

Values: U_{total}

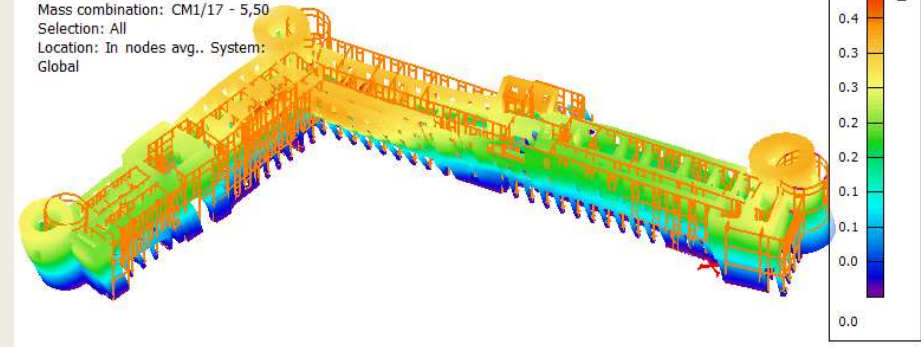
Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.

Mass combination: CM1/17 - 5,50

Selection: All

Location: In nodes avg.. System:

Global



3D displacement

Values: U_{total}

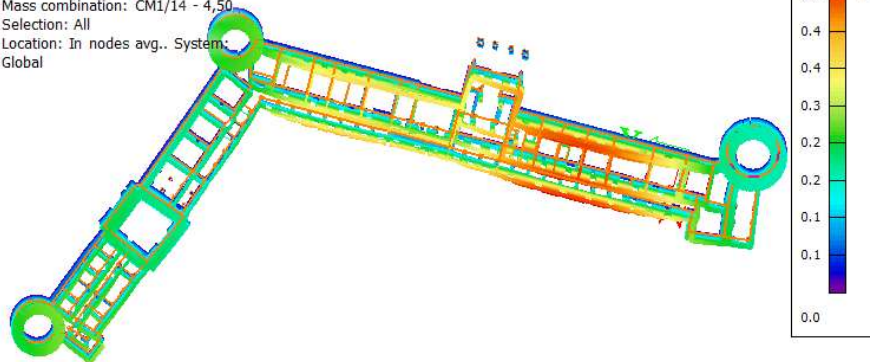
Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.

Mass combination: CM1/14 - 4,50

Selection: All

Location: In nodes avg.. System:

Global



3D displacement

Values: U_{total}

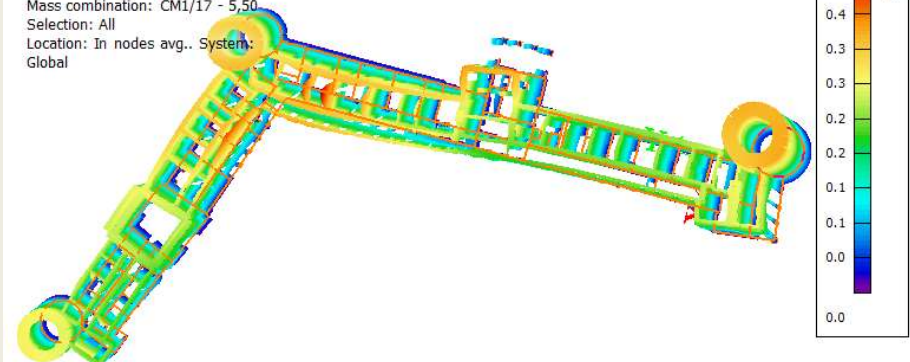
Modal shapes are normalized, so that the generalized modal mass of each mode is equal to 1kg.

Mass combination: CM1/17 - 5,50

Selection: All

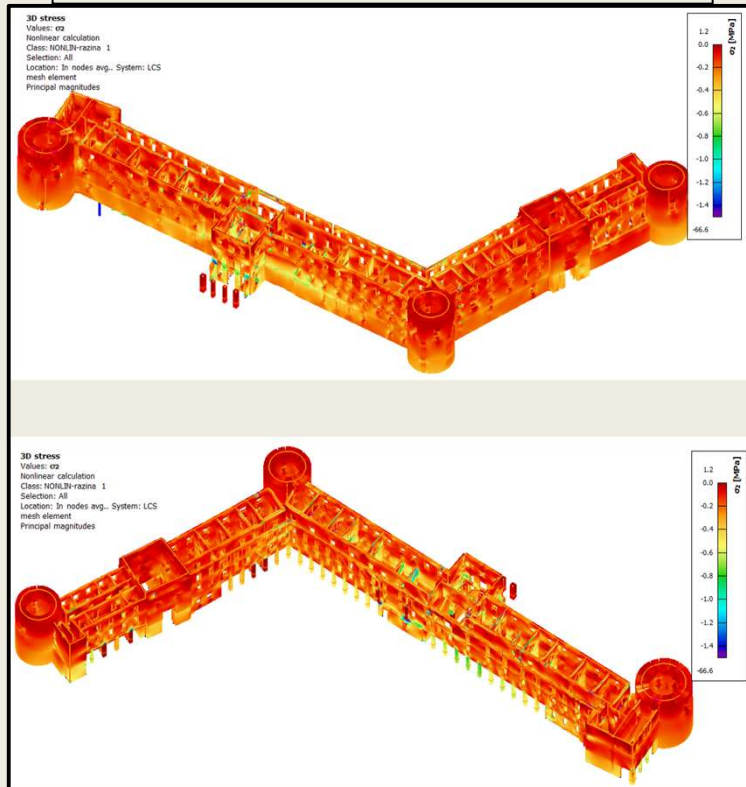
Location: In nodes avg.. System:

Global

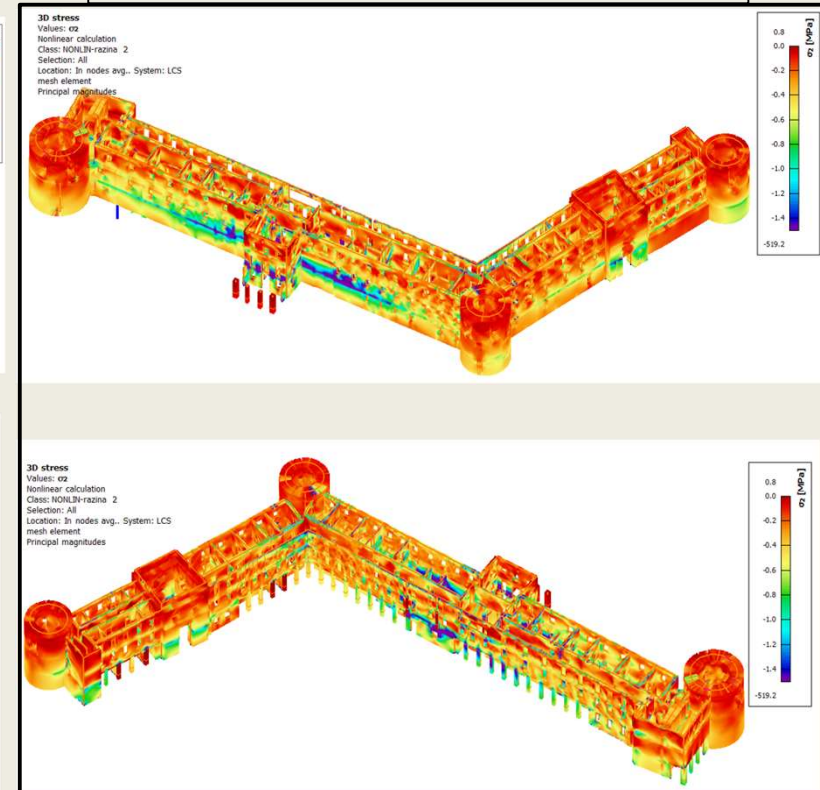


Analiza rezultata naprezanja preliminarnog modela

Tlačna naprezanja za potres ubrzanja tla u iznosu od 0,125g

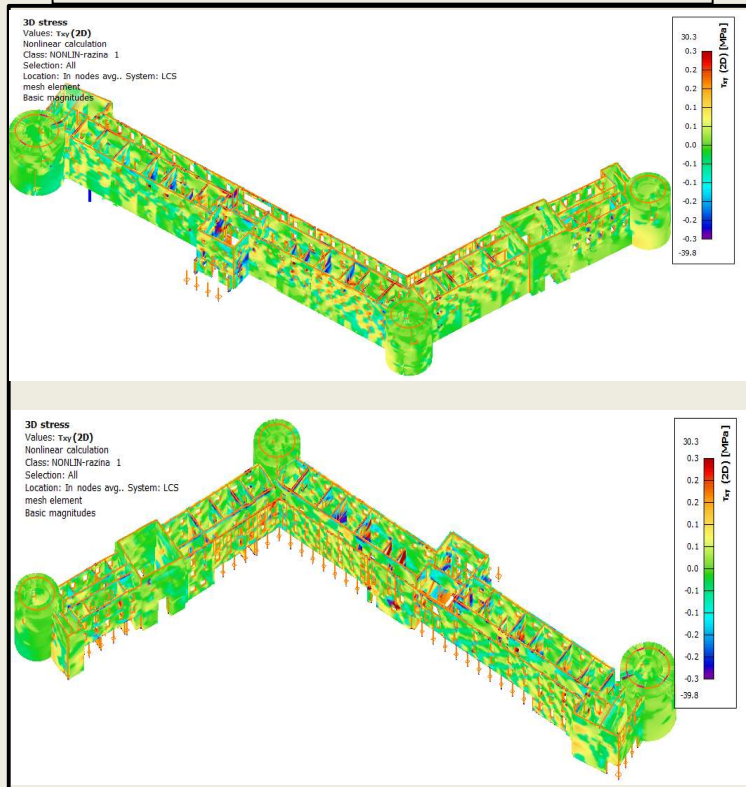


Tlačna naprezanja za potres ubrzanja tla u iznosu od 0,25g

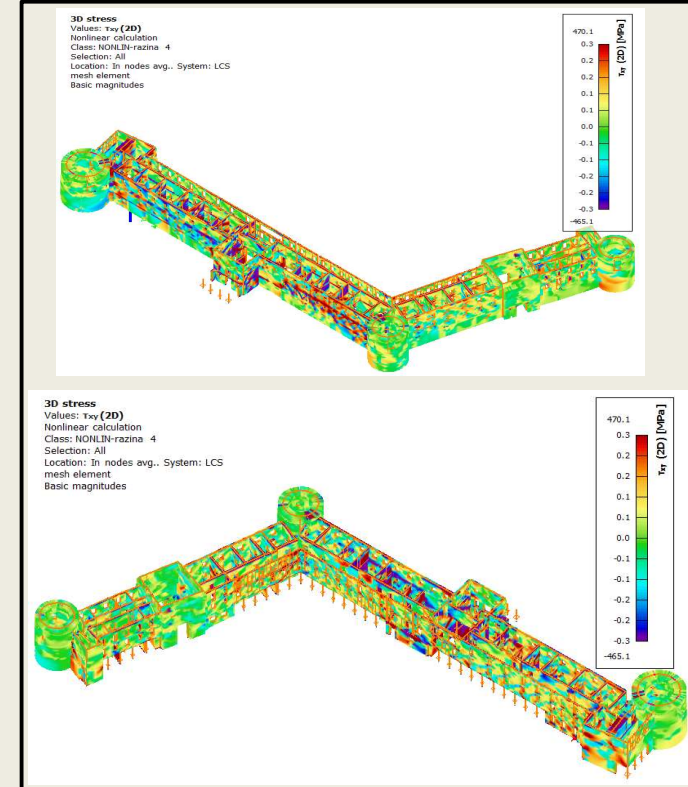


Analiza rezultata naprezanja preliminarnog modela

Posmična naprezanja za potres ubrzanja tla u iznosu od 0,125g



Posmična naprezanja za potres ubrzanja tla u iznosu od 0,25g



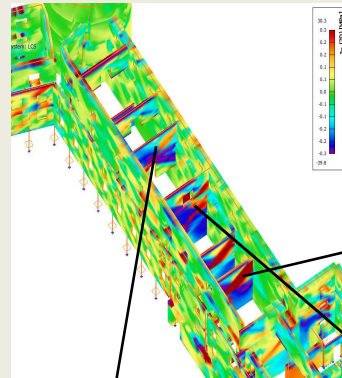
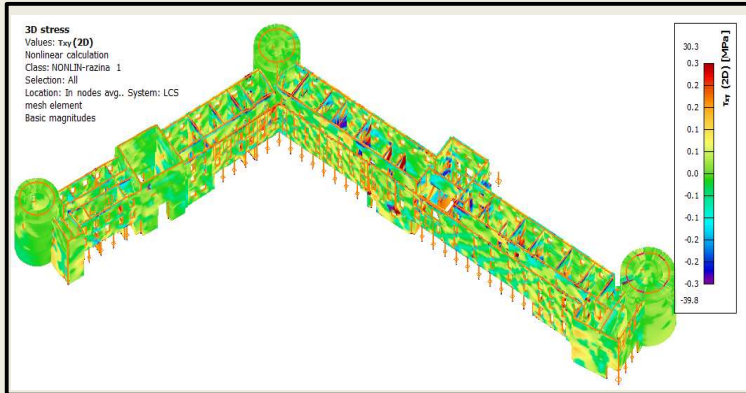
ZAKLJUČAK REZULTATA PRORAČUNSKOG MODELA:

- Međukatne konstrukcije ukrutile fazno građenu konstrukciju (iako ne idealno) – konstrukcija se ponašala poprilično homogeno
- Modalni oblici sukladni očekivanom ponašanju



Usporedba rezultata naprezanja s pukotinskim stanje

Posmična naprezanja za potres ubrzanja tla u iznosu od 0,125g



ZAKLJUČAK USPOREDBE PRELIMINARNOG MODELA I PUKOTINSKOG STANJA:

- Usporedbom utvrđeno zadovoljavajuće stanje komplementarnih pozicija i iznosa naponskog stanja
- Veća tlačna i posmična naprezanja sukladna većem pukotinskom stanju, a manja naprezanja sukladna manjem pukotinskom stanju zidova
- Time se potvrđuje adekvatna točnost preliminarog numeričkog modela za detaljnu analizu stanja postojeće konstrukcije u sklopu izrade „Elaborata ocjene postojećeg stanja konstrukcije



Zaključak postojećeg stanja konstrukcije

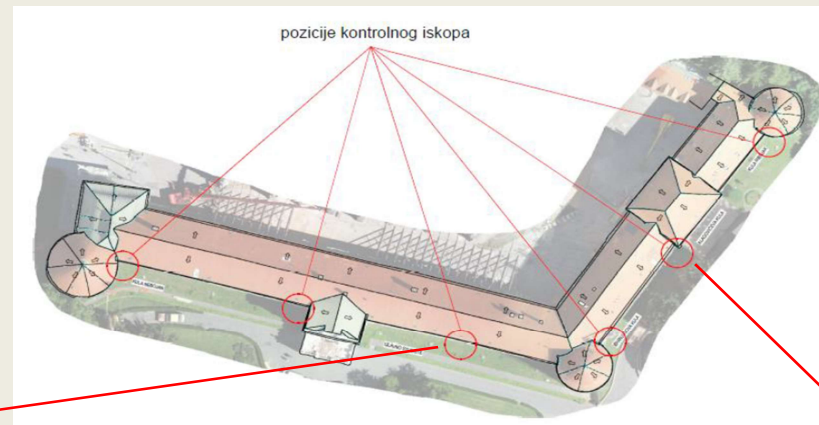
- Izvorno konstrukcija geometrijski **nije koncipirana** za ravnomjeran i kvalitetan prijenos potresnih sila
- Konstruktivni materijali (puna opeka i mort) su **dotrajali i nezadovoljavajućih mehaničkih karakteristika** za prijenos potresnih sila
- Izrazit **manjak potresno otpornih poprečnih zidova** na južnom krilu (smjer sjever jug) te na istočnom krilu (smjer zapad-istok)
- Nezadovoljavajući spoj poprečnih i uzdužnih zidova (razdvajanje pri potresnim pomacima)
- Istražnim iskopima mjestimično utvrđen plitak/nepostojeći temelj
- Konstrukciju potrebno **konceptualno izmijeniti** kako bi bila sposobna prenositi potresne sile u kritičnom poprečnom smjeru
- Potrebno dodati **nove poprečne zidove** temeljene na novim temeljima te ojačati postojeće poprečne zidove
- Potrebno ojačati fasadni dvorišni zid koji se odvaja od ostatka konstrukcije
- Ostvariti **homogenizaciju ponašanja konstrukcije** i povoljniju raspodjelu potresnog opterećenja po zidovima izvedbom horizontalnog krutog diska na razinama međukatnih konstrukcija
- Izvesti ojačanje kula
- Izvesti ojačanje krovne konstrukcije
- Potrebno je ojačati postojeće temelje
- Konstrukciju, prema Zakonu o obnovi, potrebno dovesti na **Razinu 4 (Cjelovita obnova)**



ISTRAŽNI RADOVI NA KONSTRUKCIJI

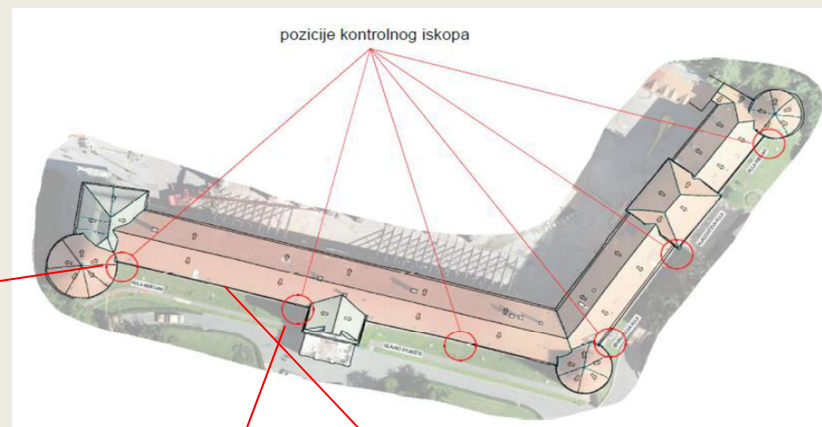
- U svrhu daljnje analize postojeće konstrukcije, pristupilo se istražnim radovima:
 - 1.) Istražni sondažni iskopi temelja
 - 2.) Ispitivanje mehaničkih karakteristika zida
 - 3.) Ispitivanje dinamičkih parametara konstrukcije
- Ciljevi ispitivanja:
 - Dobiti detaljniji uvid u statički koncept konstrukcije
 - Analizirati prosječnu razinu tlačne čvrstoće morta i opeke za precizniju numeričku i proračunsku analizu
 - Eksperimentalnom dinamičkom analizom utvrditi globalno ponašanje konstrukcije i u odnosu na to kalibrirati preliminarni numerički model

1.) Istražni iskopi



ISTRAŽNI RADOVI NA KONSTRUKCIJI

1.) Istražni iskopi



- Temelji mjestimično vrlo „plitki”
- Temelji izvedeni od opeke ili kamenog materijala
- Zbog razlike u terenu postojećeg stanja i stanja za vrijeme izvedbe bedema, došlo je do pojave „plitkih temelja”
- Nisu primijećena diferencijalna slijeganja tla



ISTRAŽNI RADOVI NA KONSTRUKCIJI

2.) Ispitivanje mehaničkih karakteristika zida

17025-HAA EN10304
TEST INSTITUT IGH, d.d.
 Laboratorij IGH, Zavod za materijale i konstrukcije
 Laboratorij za materijale
 HR-10000 ZAGREB, Jankina Rakuše 1
 Tel.: +385 1/6125 129, Fax: +385 1/6125 100, www.igh.hr

IGH

RN 62530888

**IZVJEŠTAJ O ISPITIVANJU
 BROJ 72530-OI/194-197/21**

Naručitelj: **BBIS PLAN d.o.o., Jadranska avenija 6/46, 10020 Novi Zagreb**

Ugovor/narudžba/ponuda: Prihvaćena ponuda br. 72530-0-0153/21 od 23.2.2021.

Građevni proizvod: Puna opeka

Proizvođač: -

Ispitana svojstva: - određivanje tlačne čvrstoće, HRN EN 772-1:2015

Građevina: Istražni radovi na konstrukciji zgrade Nadbiskupskog duhovnog stola u Zagrebu

Datum izvještaja: 2021-03-12

Voditelj ispitivanja: 
 Franjo Budi, dipl.ing.grad.

Voditelj laboratorija za materijale: 
 Karla Ilie, dipl.ing.grad.


Rezultati ispitivanja odnose se samo na ispitane uzorke. Djelomično umnožavanje ovog izvještaja nije dopušteno bez pisanog odobrenja Voditelja laboratorija. Ukupan broj stranica uključujući dodatke: 5.

Dokument: CIBL-HRN EN 772... Izdavanje 4. Stranica 1 od 5


17025-HAA EN10304
TEST INSTITUT IGH, d.d.
 Laboratorij IGH, Zavod za materijale i konstrukcije
 Laboratorij za materijale
 HR-10000 ZAGREB, Jankina Rakuše 1
 Tel.: +385 1/6125 129, Fax: +385 1/6125 100, www.igh.hr

IGH

Izvještaj broj: 72530-OI/194-197/21


 Slika 1. Uzorci POZ15


 Slika 2. Uzorci POZ16


 Slika 3. Uzorci POZ20


 Slika 4. Uzorci POZ21

Izjava: Uzorci su ispitani u skladu s navedenim normama osim navedenog pod „Odstupanja/dodatci/zuzeci od metode”. Metode ispitivanja su u fleksibilnom području akreditacije laboratorija. Rezultati ispitivanja odnose se samo na ispitane uzorke.

- Kraj izvještaja o ispitivanju -

Dokument: CIBL-HRN EN 772... Izdavanje 4. Stranica 5 od 5

17025-HAA EN10304
TEST INSTITUT IGH, d.d.
 Laboratorij IGH, Zavod za materijale i konstrukcije
 Laboratorij za materijale
 HR-10000 ZAGREB, Jankina Rakuše 1
 Tel.: +385 1/6125 129, Fax: +385 1/6125 100, www.igh.hr

IGH

Izvještaj broj 72530-OI/208-212/21

REZULTATI ISPITIVANJA

| OZNAKA UZORKA | Dimenzije uzorka z (mm) | Sila lomna F (N) | Tlačna čvrstoća f_c (N/mm ²) | Srednja vrijednost tlačne čvrstoće $f_{c,m}$ (N/mm ²) |
|---------------|-------------------------|------------------|--|---|
| OI/208-1/21 | POZ14-1 | 17,16 | 513,10 | 1,7 |
| OI/209-1/21 | POZ15-1 | 14,52 | 192,06 | 0,6 |
| OI/209-2/21 | POZ15-2 | 12,41 | 229,51 | |
| OI/209-3/21 | POZ15-3 | 12,14 | 122,83 | 0,40 |
| OI/210-1/21 | POZ16-1 | 10,21 | 657,09 | |
| OI/210-2/21 | POZ16-2 | 18,12 | 313,79 | 1,00 |
| OI/211-1/21 | POZ18-1 | 14,01 | 241,16 | 0,8 |
| OI/211-2/21 | POZ18-2 | 14,23 | 211,42 | |
| OI/212-1/21 | POZ21-1 | 11,40 | 196,46 | 0,80 |
| OI/212-2/21 | POZ21-2 | 11,01 | 244,39 | |
| OI/212-3/21 | POZ21-3 | 14,93 | 252,03 | |

Izjava: Uzorci su ispitani u skladu sa zahtjevima HRN EN 1015-11:2019, osim navedenog pod točkom "Odstupanja, dodaci i zuzeci od metode". Metoda ispitivanja je u fleksibilnom području akreditacije laboratorija.

- Kraj izvještaja o ispitivanju -

Dokument: CIBL-HRN EN 772... Izdavanje 4. Stranica 3 od 3

- Prosječna tlačna čvrstoća ispitanih uzoraka: $f_c \approx 1,0 \text{ N/mm}^2$



ISTRAŽNI RADOVI NA KONSTRUKCIJI

3.) Ispitivanje dinamičkih parametara konstrukcije



CENTAR GRAĐEVINSKOG FAKULTETA
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU, GRAĐEVINSKI FAKULTET
LABORATORIJ ZA ISPITIVANJE KONSTRUKCIJA

Elaborat: Izvješće o ispitivanju dinamičkih parametara na konstrukciji Nadbiskupskog dvora

Oznaka: ZTM-LIK-21-03
Radni nalog: RN 13/2021
Datum izrade: Ožujak, 2021.

Naručitelj: Zagrebačka nadbiskupija
Kaptol 31
HR – 10 000 Zagreb

Izvršitelji: CENTAR GRAĐEVINSKOG FAKULTETA d.o.o.
Sveti Duh 129, HR-10 000 Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU, GRAĐEVINSKI FAKULTET
Zavod za tehničku mehaniku
LABORATORIJ ZA ISPITIVANJE KONSTRUKCIJA
Fra Andrije Kadića Mlišića 26, HR-10 000 Zagreb

IZRADILI:

Voditelj projekta: izv. prof.dr.sc. Domagoj Damjanović, dipl.ing.grad.

Suradnici: doc.dr.sc. Ivan Đuvnjak, dipl.ing.grad.

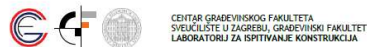
Janko Koščak, mag.ing.aedif.

Suzana Ereiz, mag.ing.aedif.

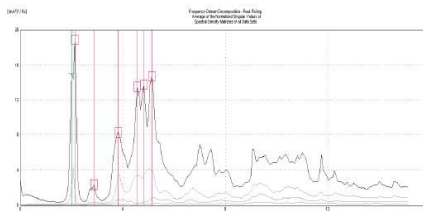
Voditelj laboratorija: doc.dr.sc. Ivan Đuvnjak

Direktorica
Centra građevinskog fakulteta: izv.prof.dr.sc. Danijela Karić

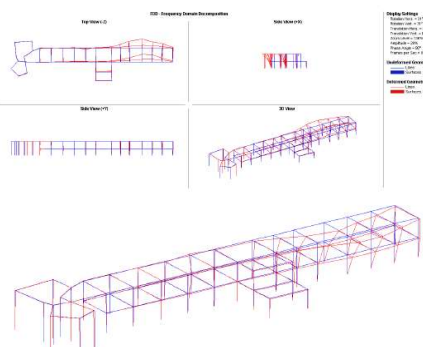
Predstojnik
Zavoda za tehničku mehaniku: prof.dr.sc. Mladen Meštrović



CENTAR GRAĐEVINSKOG FAKULTETA
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU, GRAĐEVINSKI FAKULTET
LABORATORIJ ZA ISPITIVANJE KONSTRUKCIJA



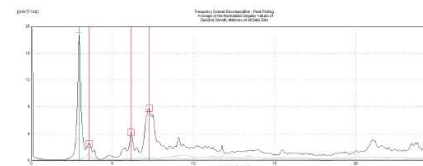
Slika 2. Singularne vrijednosti matrica spektralnih gustoća (južno krilo)



Slika 3. Eksperimentalno određeni oblik titranja na frekvenciji 2,00 Hz

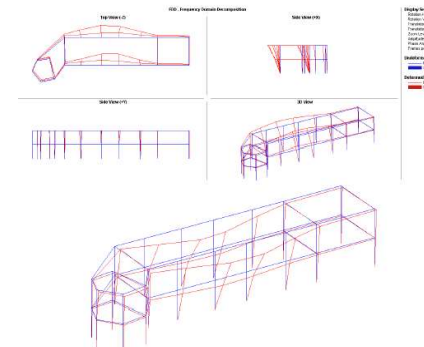


CENTAR GRAĐEVINSKOG FAKULTETA
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU, GRAĐEVINSKI FAKULTET
LABORATORIJ ZA ISPITIVANJE KONSTRUKCIJA

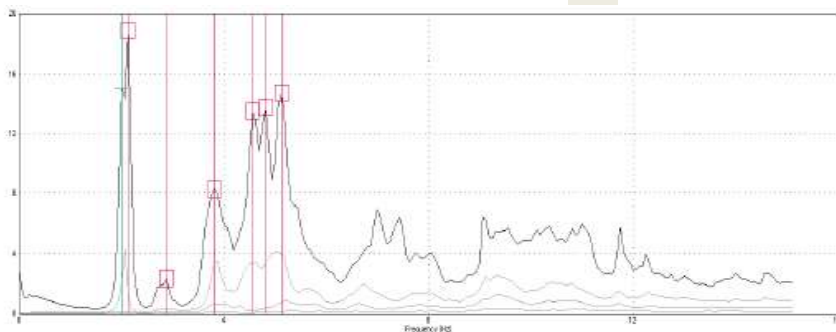


Slika 11. Singularne vrijednosti matrica spektralnih gustoća (istočno krilo)

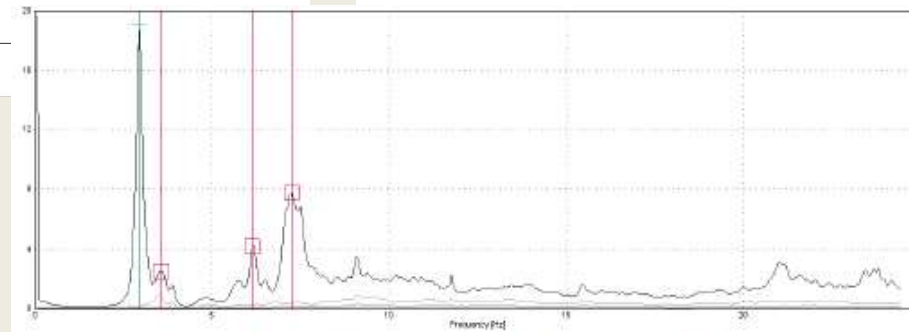
Eksperimentalno određene osnovne vlastite frekvencije i koeficijenti prigušenja na istočnom krilu prikazani su u tablici 2., spektralni zapis singularnih vrijednosti autospektralnih gustoća prikazan je na slici 11, a eksperimentalno određeni oblici titranja prikazani su na slikama 12. do 15.



Slika 12. Eksperimentalno određeni oblik titranja na frekvenciji 2,94 Hz



Slika 2. Singularne vrijednosti matrica spektralnih gustoća (južno krilo)



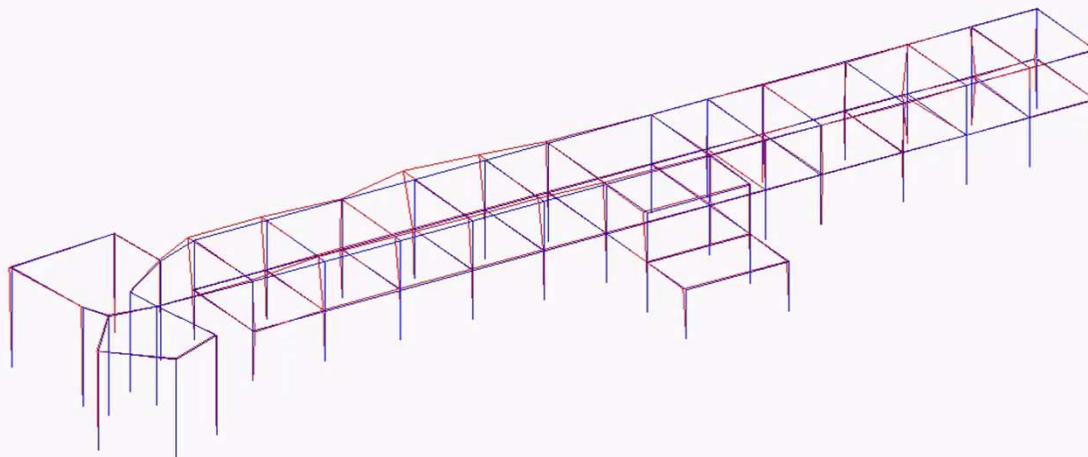
Slika 11. Singularne vrijednosti matrica spektralnih gustoća (istočno krilo)



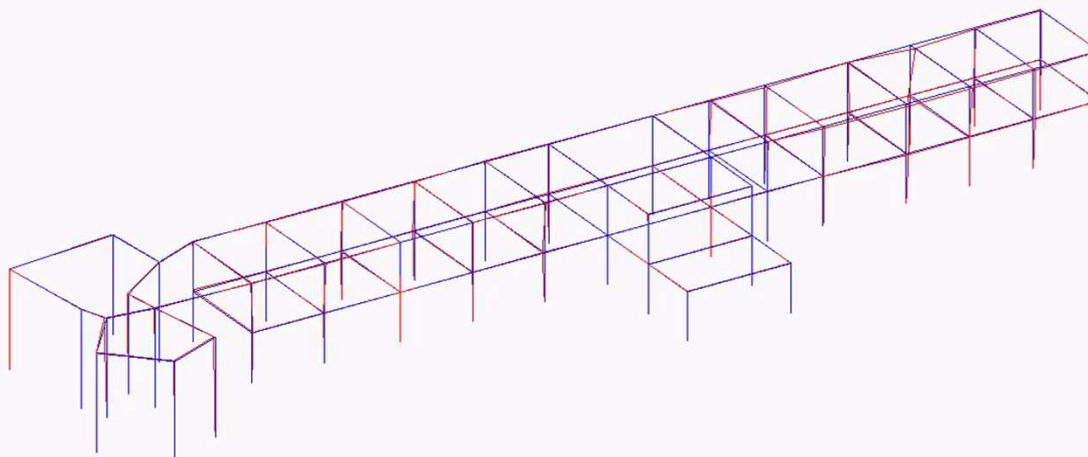
ISTRAŽNI RADOVI NA KONSTRUKCIJI

3.) Ispitivanje dinamičkih parametara konstrukcije

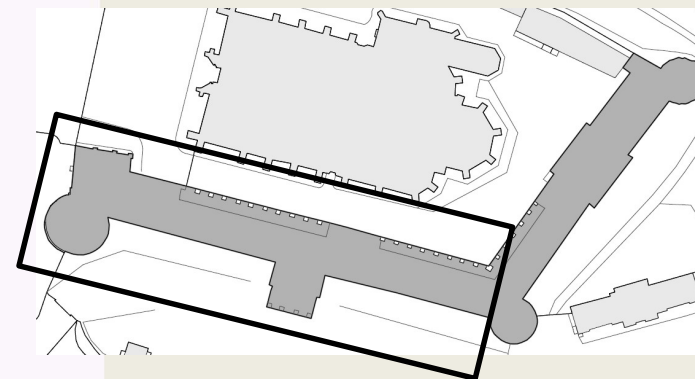
FDD - Frequency Domain Decomposition



FDD - Frequency Domain Decomposition



- 1. modalni oblik južnog krila
- $T = 0,50$ s



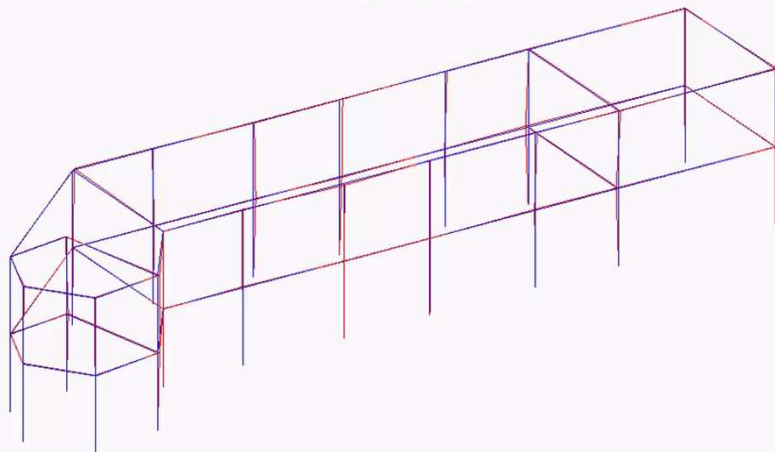
- 2. modalni oblik južnog krila
- $T = 0,47$ s



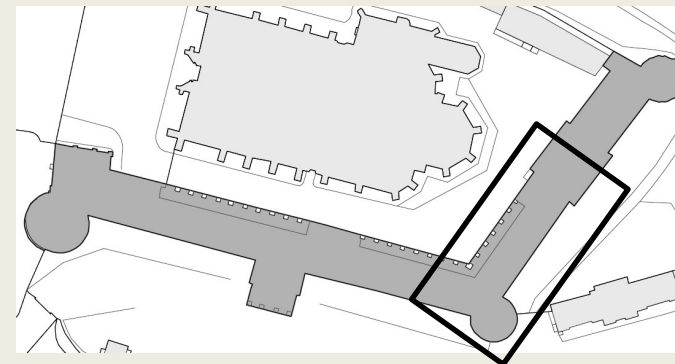
ISTRAŽNI RADOVI NA KONSTRUKCIJI

3.) Ispitivanje dinamičkih parametara konstrukcije

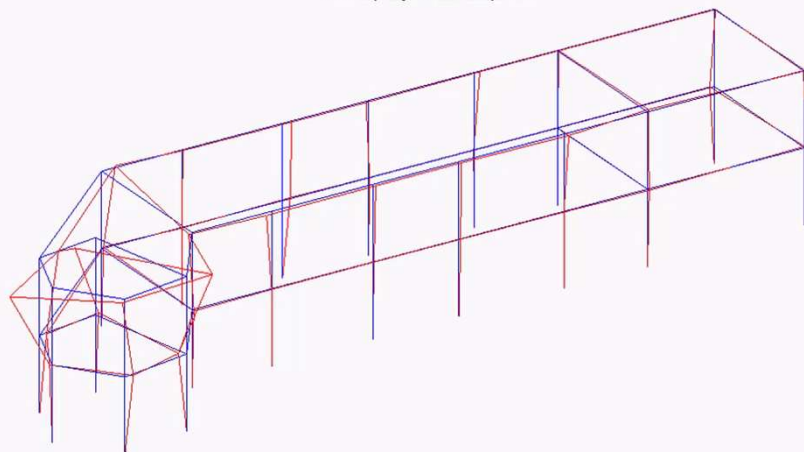
FDD - Frequency Domain Decomposition



- 1. modalni oblik istočnog krila
- $T = 0,34$ s



FDD - Frequency Domain Decomposition



- 2. modalni oblik istočnog krila
- $T = 0,28$ s



KALIBRACIJA PRORAČUNSKOG MODELA I REZULTATI ANALIZE

- Numerički model se kalibrira u odnosu na provedene istražne radnje kako bi se što točnije simuliralo stvarno ponašanje konstrukcije, koje će kasnije poslužiti kao temeljni numerički model za proračun i ponašanje ojačane konstrukcije
 - Na temelju ispitivanja mehaničkih karakteristika prilagođavaju se svojstva zida stvarnom stanju
 - Dodatno se definiraju veze između zidova i grednika (simuliranje nepovezanosti poprečnih zidova i međukatne konstrukcije)
 - Korekcije se vrše u vidu promjene mase koja je sudjeluje u potresnim događajima
 - Korekcije se vrše u vide promjene krutosti oštećenih zidova (smanjenje modula elastičnosti ovisno o stupnju oštećenja)

Korigirana materijalna svojstva

| REZULTATI ISPITIVANJA | | | | | |
|-----------------------|------------|---------------------------------|-------------------------|--|---|
| OZNAKA UZORKA | | Dimenzije uzorka z (mm) | Sila loma F (N) | Tlačna čvrstoća f_c (N/mm ²) | Srednja vrijednost tlačne čvrstoće f_{avr} (N/mm ²) |
| Laboratorij | Naručitelj | | | | |
| OI/208-1/21 | POZ14-1 | 17,16 | 513,10 | 1,65 | 1,7 |
| OI/209-1/21 | POZ15-1 | 14,52 | 192,06 | 0,60 | 0,6 |
| OI/209-2/21 | POZ15-2 | 12,41 | 229,51 | 0,75 | |
| OI/209-3/21 | POZ15-3 | 12,14 | 122,83 | 0,40 | |
| OI/210-1/21 | POZ16-1 | 10,21 | 657,09 | 2,10 | 1,6 |
| OI/210-2/21 | POZ16-2 | 18,12 | 313,79 | 1,00 | |
| OI/211-1/21 | POZ18-1 | 14,01 | 241,18 | 0,80 | 0,8 |
| OI/211-2/21 | POZ18-2 | 14,23 | 211,42 | 0,70 | |
| OI/212-1/21 | POZ21-1 | 11,40 | 196,46 | 0,65 | 0,8 |
| OI/212-2/21 | POZ21-2 | 11,01 | 244,39 | 0,80 | |
| OI/212-3/21 | POZ21-3 | 14,93 | 252,93 | 0,80 | |

Izjava: Uzorci su ispitani u skladu sa zahtjevima HRN EN 1015-11:2019, osim navedenog pod točkom "Odstupanja, dodaci i izuzeci od metode". Metoda ispitivanja je u fleksibilnom području akreditacije laboratorija.

1.) Materijalna svojstva potresno neoštećenih (uglavnom uzdužnih) zidanih zidova:

Materials

| Name | Type | Unit mass [kg/m ³] | E mod [MPa] | Poisson - nu | G mod [MPa] | Thermal exp [m/mK] | Characteristic compressive strength (fk) [MPa] |
|---------|---------|--------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------------|--|
| Masonry | Masonry | 1800,0 | 1.0000e+03 | 0,25 | 4.0000e+02 | 0,00 | 1,0 |

2.) Materijalna svojstva potresno srednje oštećenih i degradiranih (uglavnom poprečnih) zidanih zidova:

Materials

| Name | Type | Unit mass [kg/m ³] | E mod [MPa] | Poisson - nu | G mod [MPa] | Thermal exp [m/mK] | Characteristic compressive strength (fk) [MPa] |
|-------------|---------|--------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------------|--|
| Masonry 75% | Masonry | 1800,0 | 4.5000e+02 | 0,25 | 1.8000e+02 | 0,00 | 0,5 |

3.) Materijalna svojstva potresno značajno oštećenih i degradiranih (uglavnom poprečnih) zidanih zidova:

Materials

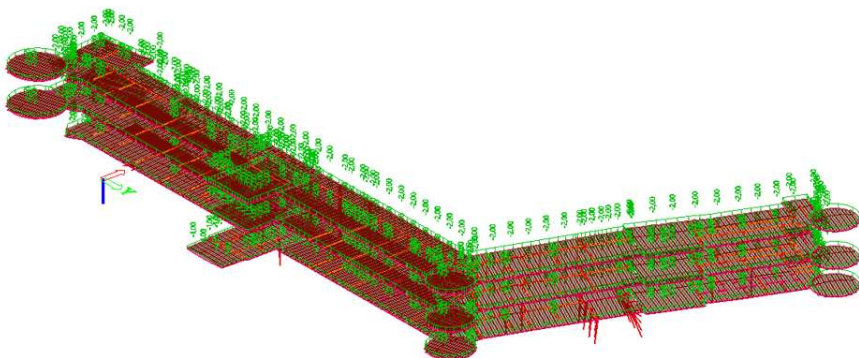
| Name | Type | Unit mass [kg/m ³] | E mod [MPa] | Poisson - nu | G mod [MPa] | Thermal exp [m/mK] | Characteristic compressive strength (fk) [MPa] |
|-------------|---------|--------------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------------|--|
| Masonry 50% | Masonry | 1800,0 | 3.2000e+02 | 0,25 | 1.2800e+02 | 0,00 | 0,3 |



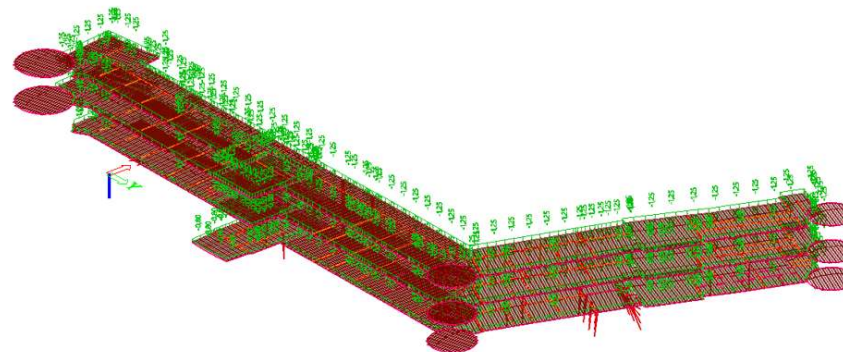
KALIBRACIJA PRORAČUNSKOG MODELA I REZULTATI ANALIZE

Korigirana masa konstrukcije u trenutku provođenja mjerenja

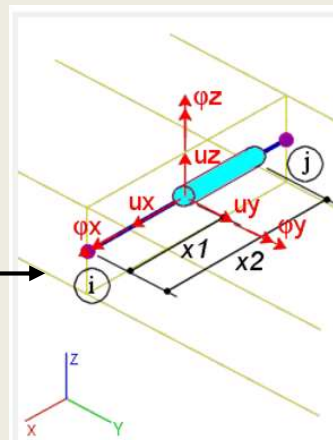
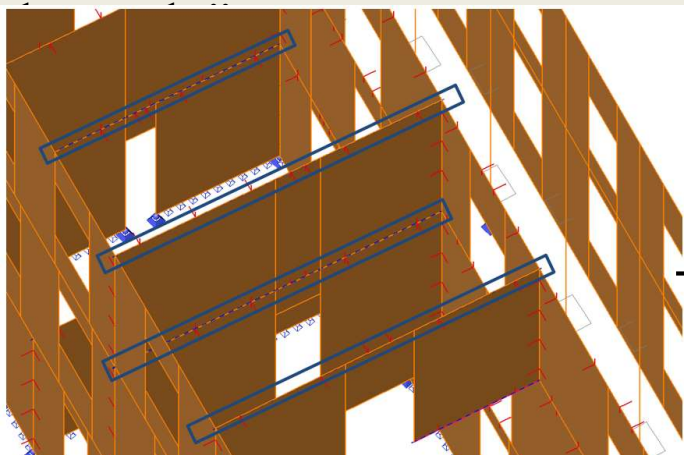
Dodatno stalno: $g=2,0 \text{ kN/m}^2$



Korisno opterećenje: $q = 1,25 \text{ kN/m}^2$



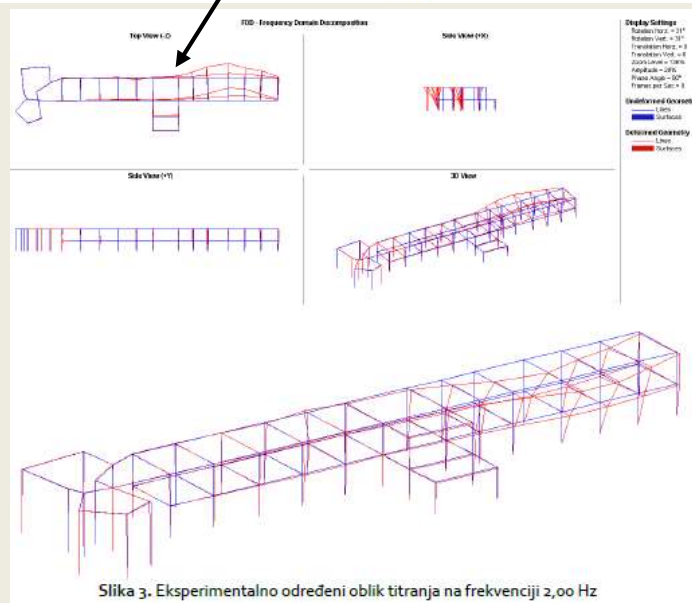
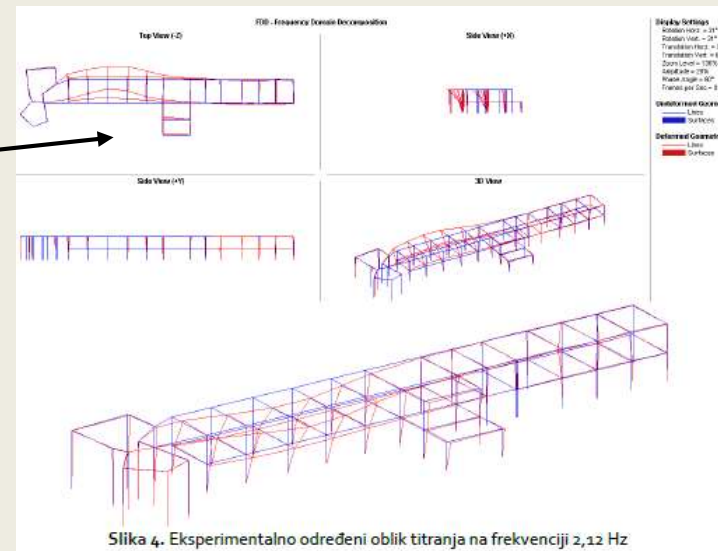
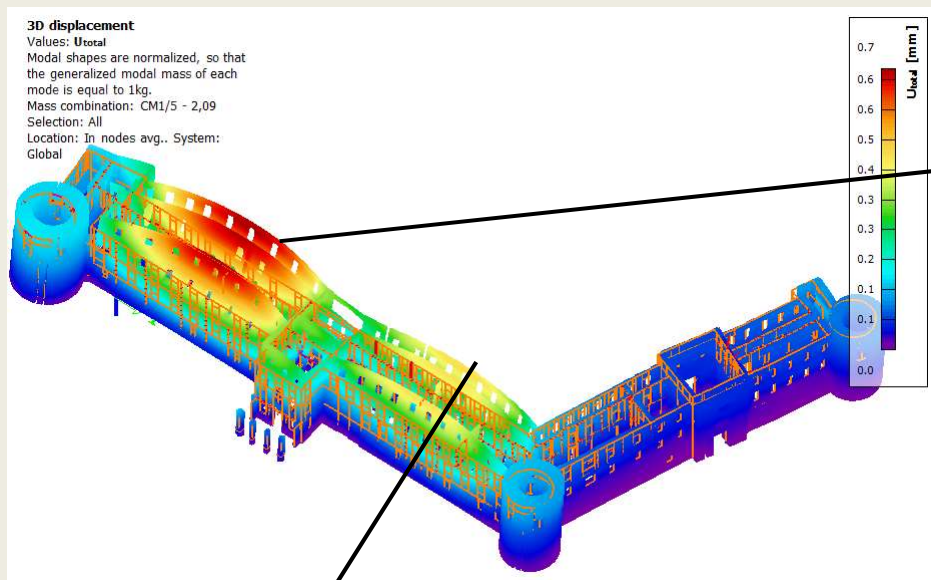
Definiranje numeričkih veza koje simuliraju odnos „pregradni zid” – međukatna



| Name | L134 |
|-------------------|------------|
| ux | Free |
| uy | Rigid |
| uz | Rigid |
| fix | Rigid |
| 2D member | S1323 |
| Geometry | |
| Edge | 1 |
| Coord. definition | Rela |
| Position x1 | 0,000 |
| Position x2 | 1,000 |
| Origin | From start |



Rezultati kalibracije numeričkog modela



1. Modalni oblik

1. Modalni oblik odgovara modalnom obliku, tj. dvaju modalnim oblicima dobivenim eksperimentalnim mjerenjem.

Numerički model – $f = 2,09$ Hz

Eksperimentalno mjerenje – $f \approx 2,06$ Hz

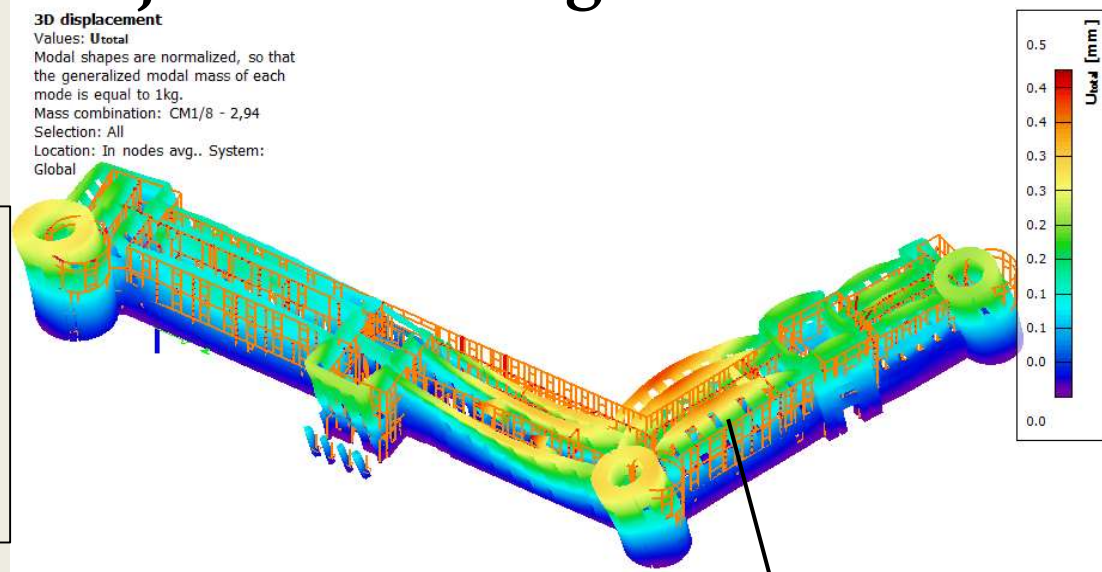
Rezultati kalibracije numeričkog modela

2. Modalni oblik

2. Modalni oblik odgovara modalnom obliku dobivenom eksperimentalnim mjerenjem.

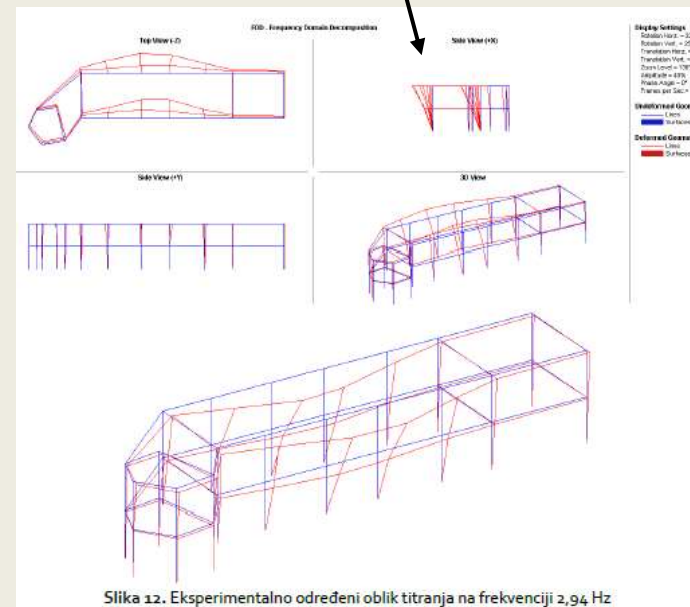
Numerički model – $f = 2,94 \text{ Hz}$

Eksperimentalno mjerenje – $f \approx 2,94 \text{ Hz}$

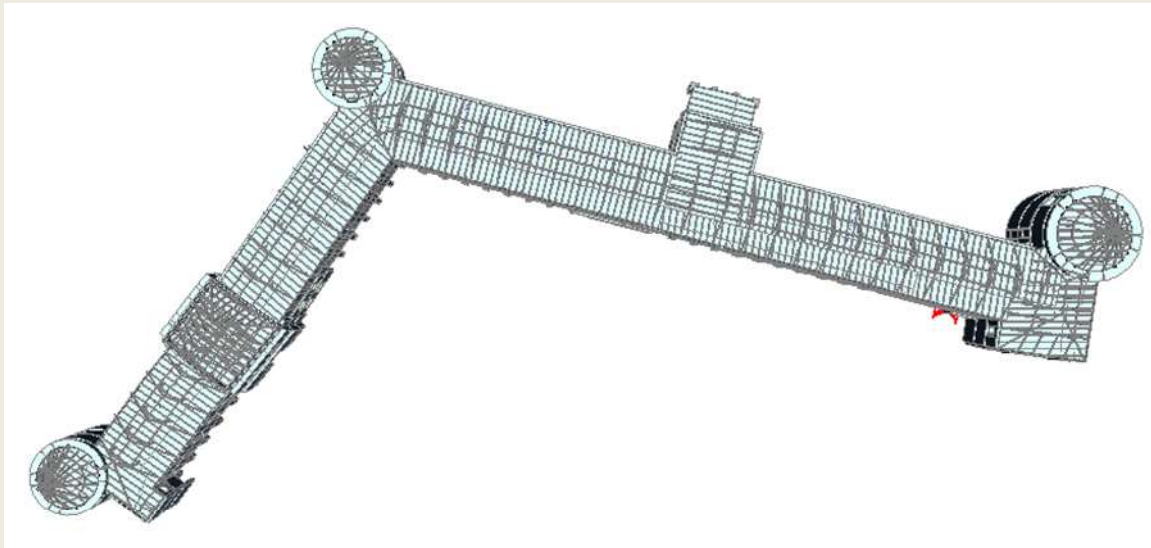
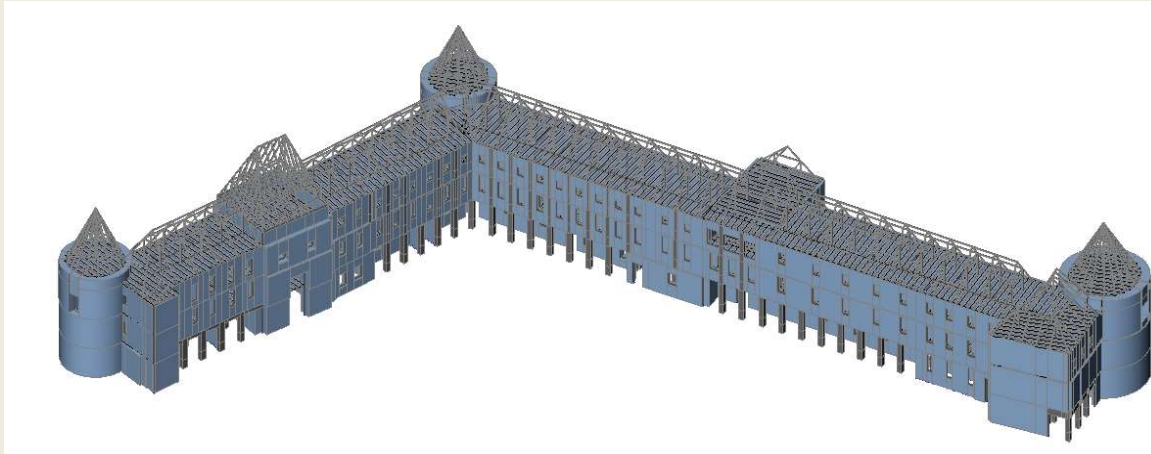


ZAKLJUČAK KALIBRACIJE

- Kalibracijom numeričkog modela dobiveno je ponašanje konstrukcije sukladno eksperimentalno izmjerenim dinamičkim karakteristikama konstrukcije
- Oblik i iznos frekvencija titranja značajno je približen eksperimentalno izmjerenim vrijednostima te se smatra kako je kalibrirani numerički model u značajnoj mjeri sukladan stvarnom dinamičkom ponašanju konstrukcije. usvaja se kalibrirani model kao temeljni proračunski model ojačanog stanja



Proračun ojačane konstrukcije

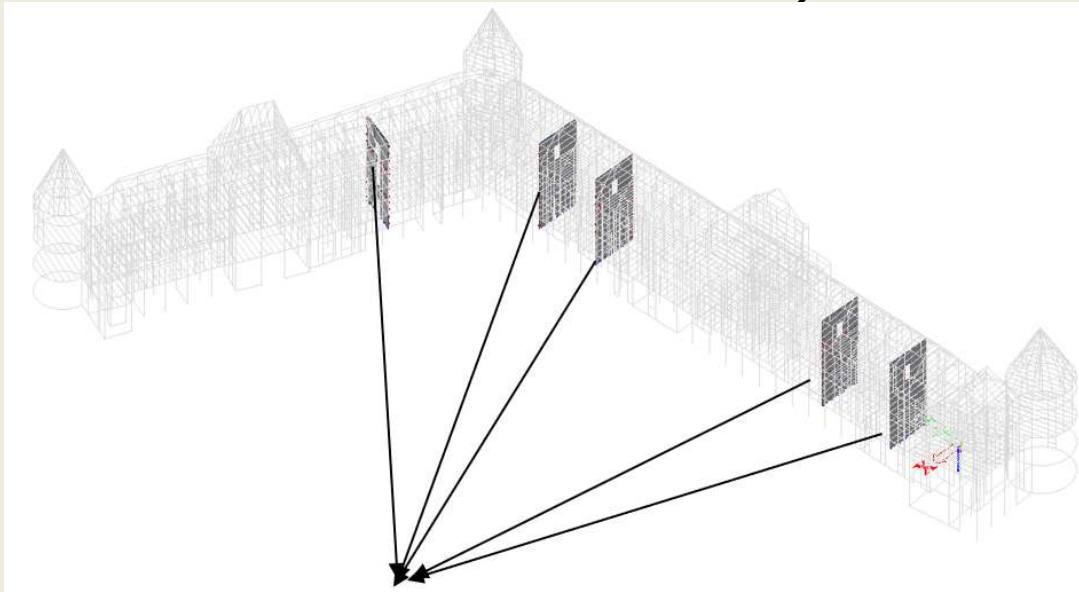


MODEL OJAČANOG STANJA

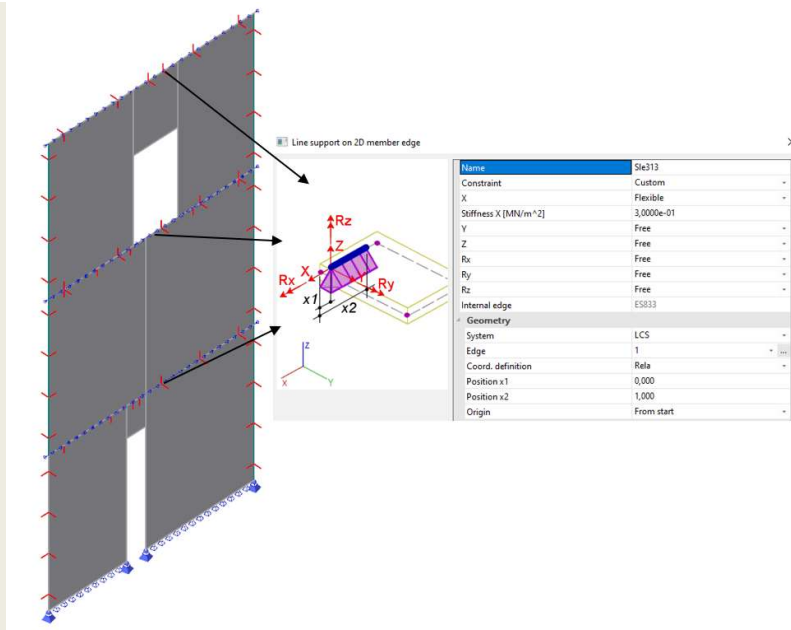
- Ukrućenje konstrukcije u poprečnom smjeru novim AB zidovima debljine 20 cm
- Ostali poprečni zidovi se ojačavaju kombinacijom zamjene sljubnica morta, injektiranjem i/ili ojačanjem FRCM mrežicama
- Bedemi „kula” ojačavaju se sustavom ugradnje čeličnih stupova, FRP traka obujmica te FRCM mrežicama
- Fasadni zid prema katedrali ojačan FRP trakama i sidrima
- Uklanjanje slojeva međukatnih konstrukcije i izvedba višeslojnih OSB ploča spregnutih s mrežicama



Proračun ojačane konstrukcije



Novi AB zidovi

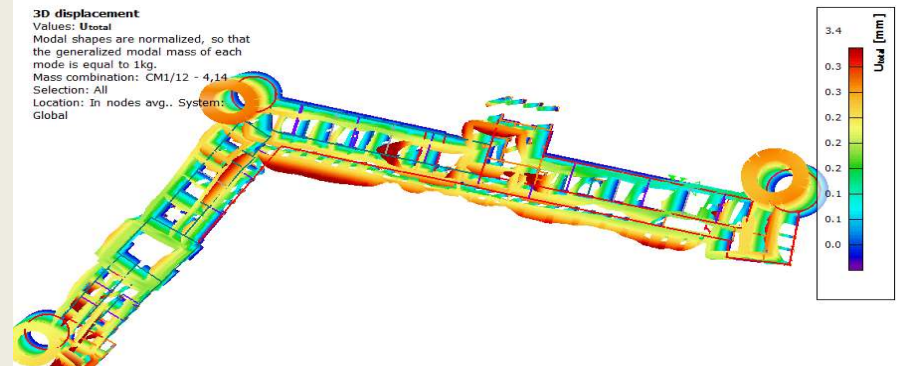
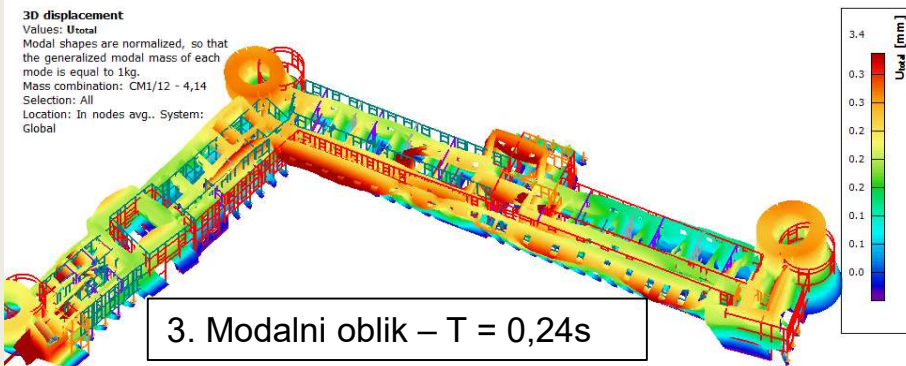
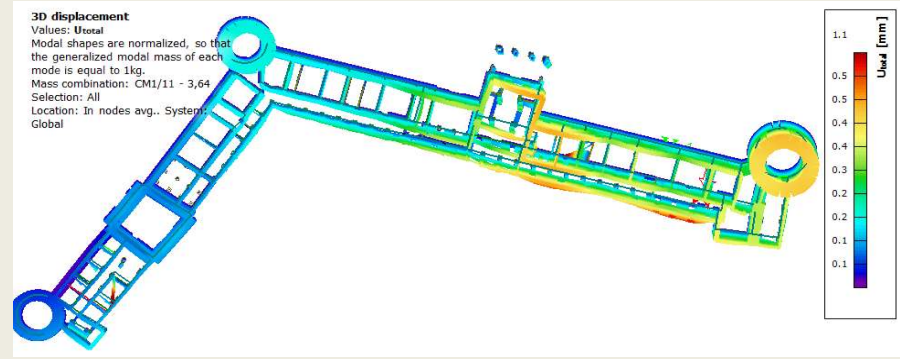
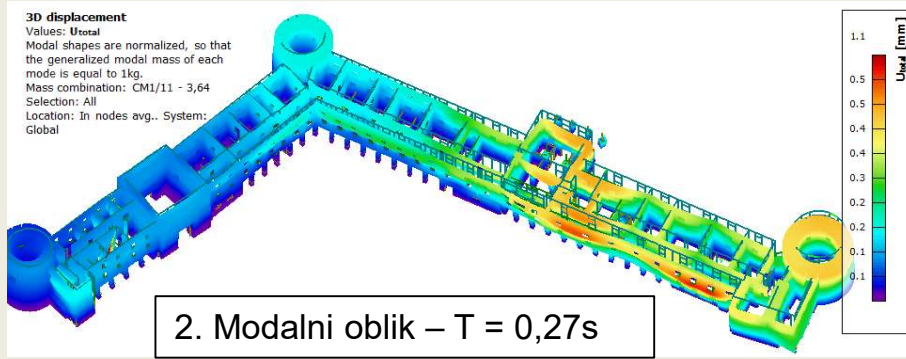
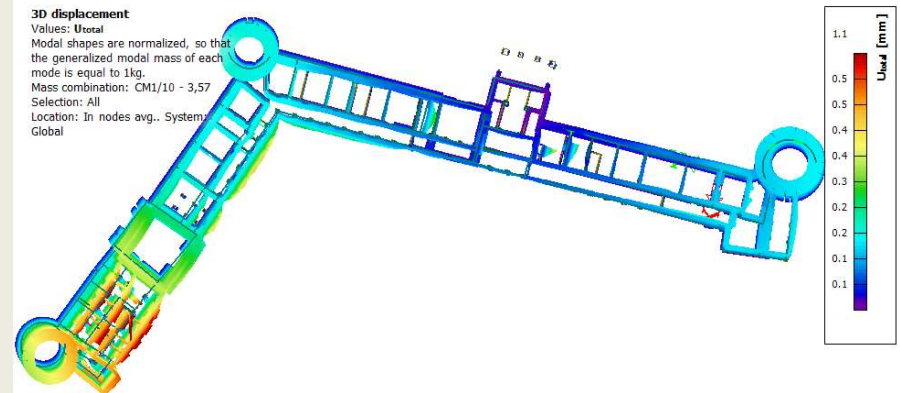
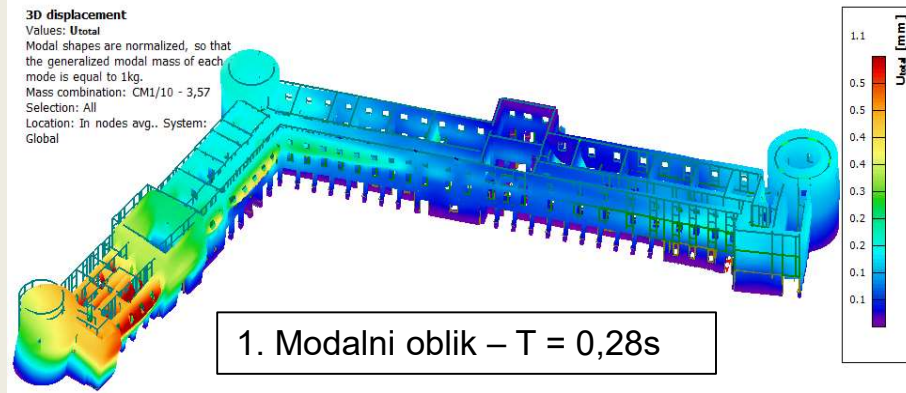


Simuliran fleksibilan prijenos potresnih sila s međukatnih konstrukcija na AB zidove

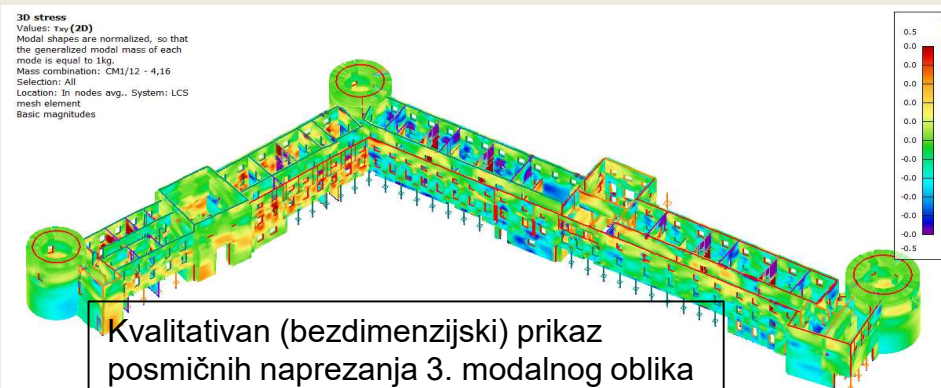
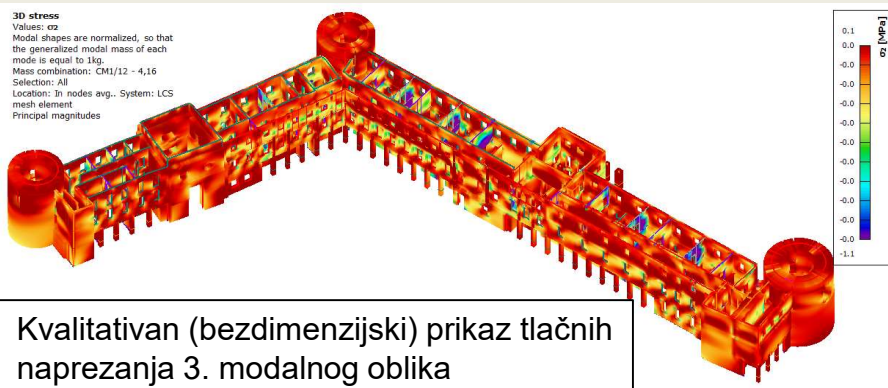
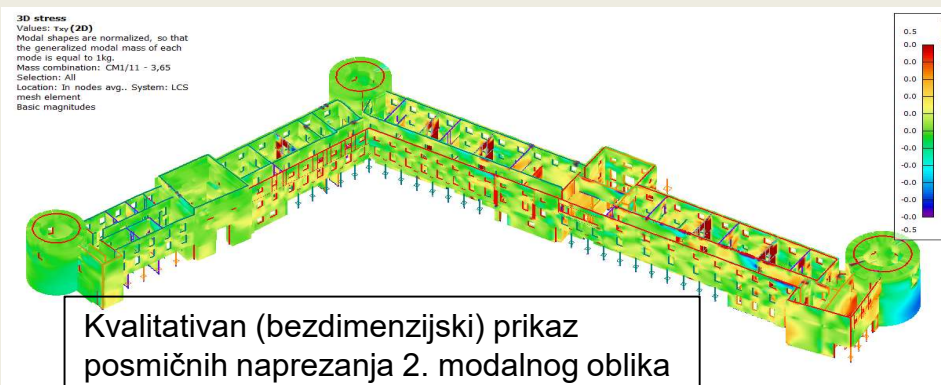
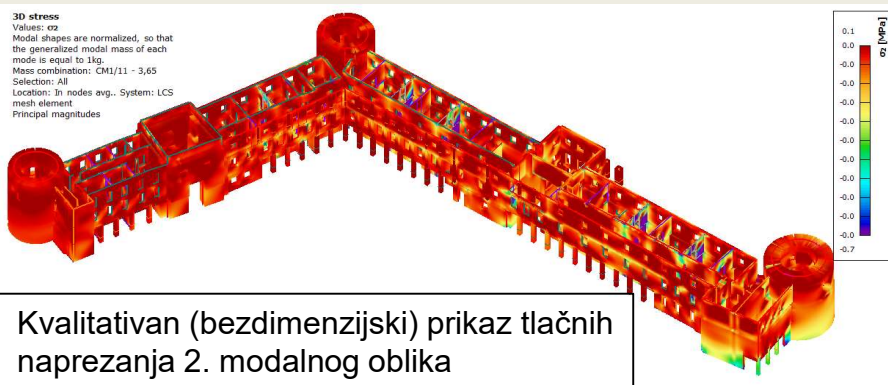
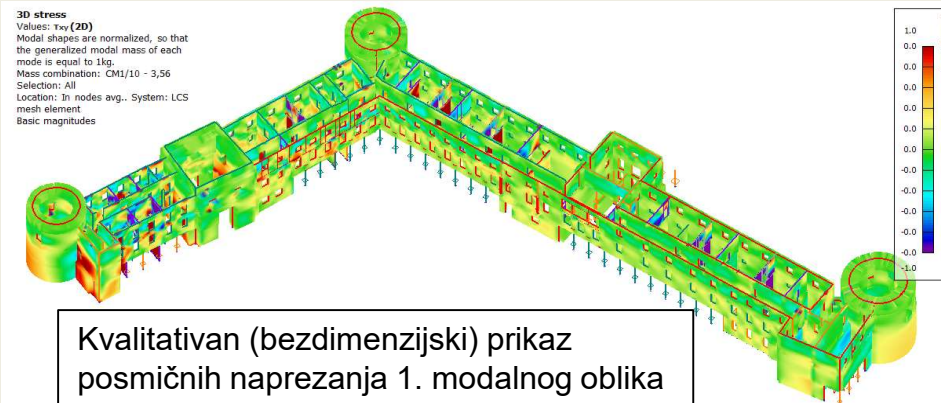
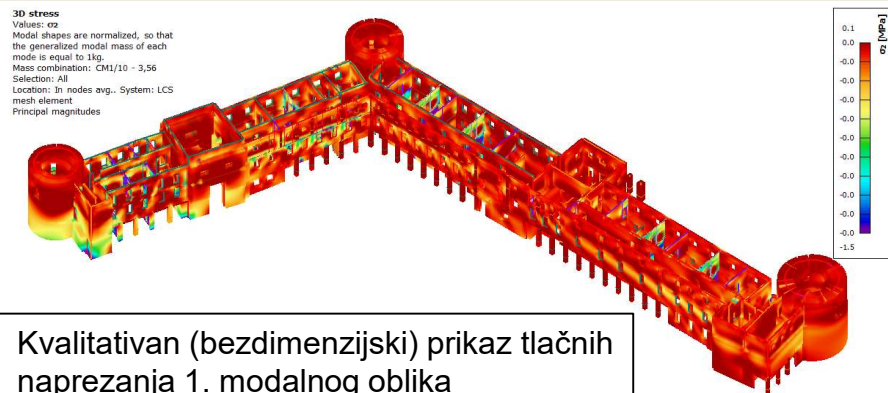
- Uvrštena opterećenja novog stanja građevine
- Ostala opterećenja računata prema Eurokodovima
- Postupak proračuna potresnih sila analogan preliminarnom modelu, uz nove vrijednosti masa
- Provodi se proračun konstrukcije na projektno ubrzanje tla od 0,25 g



Analiza rezultata ojačane konstrukcije

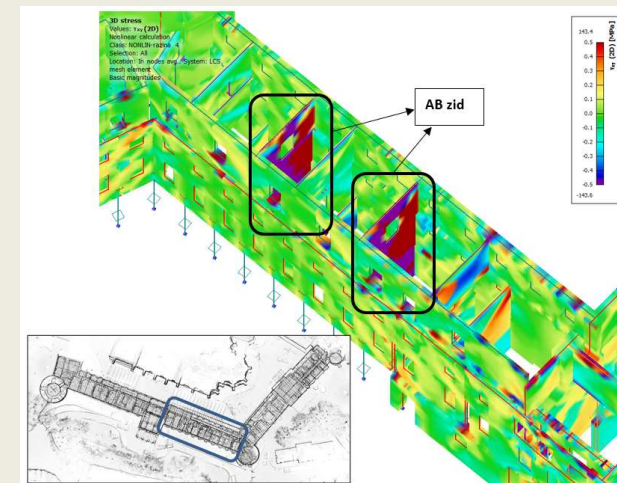
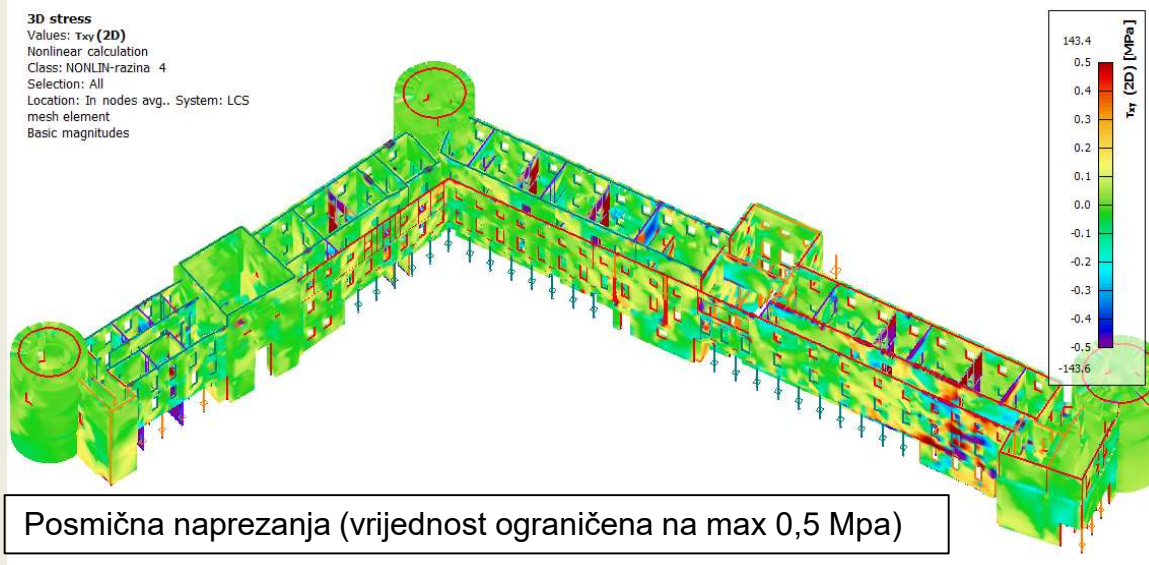
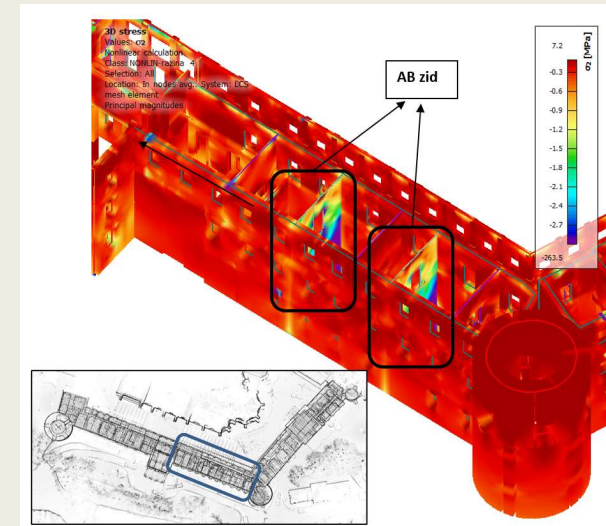
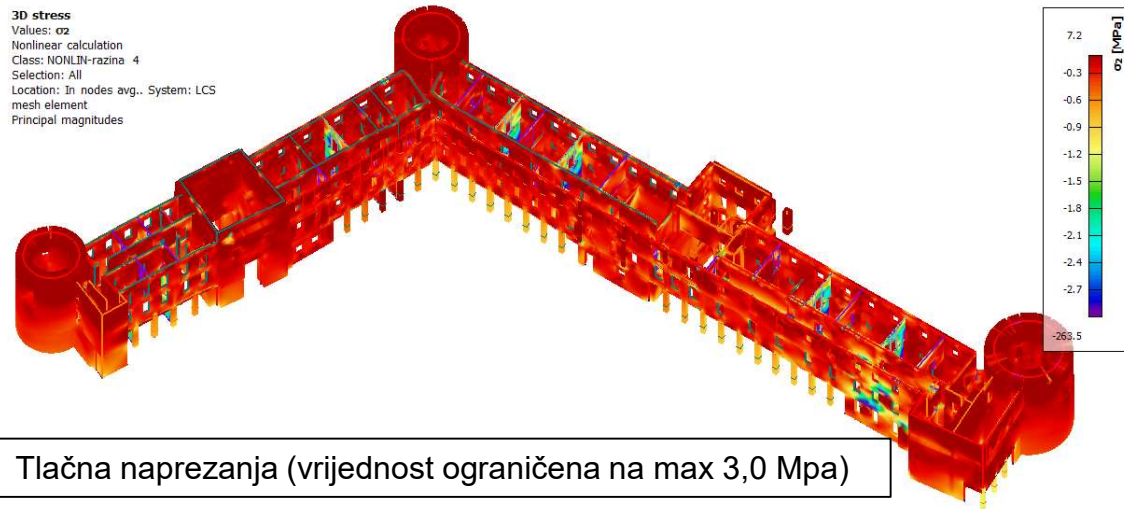


Analiza rezultata ojačane konstrukcije



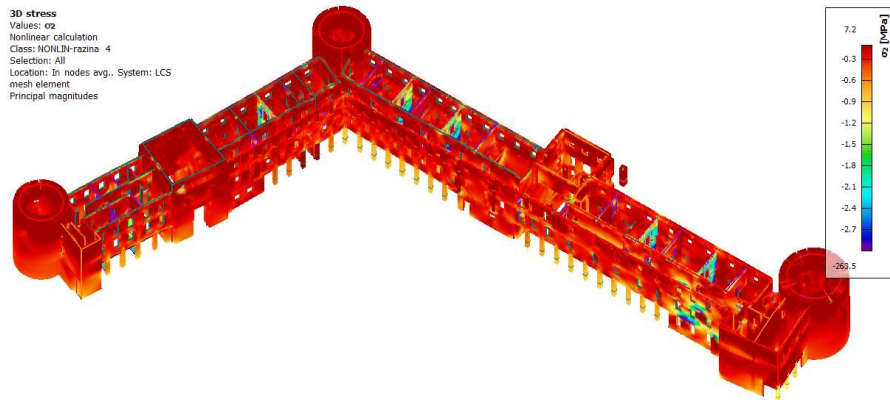
Analiza rezultata ojačane konstrukcije

Potres ubrzanja tla $a_g = 0,25 \text{ g}$



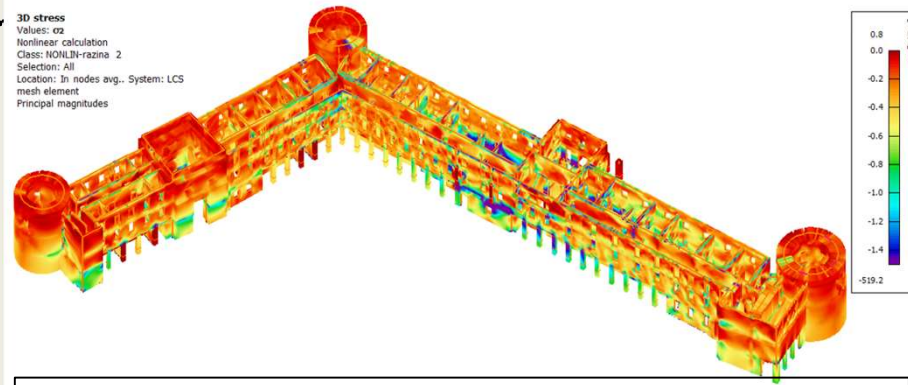
Analiza rezultata ojačane konstrukcije ($a_g = 0,25 g$)

Usporedba naprezanja u odnosu na neojačanu



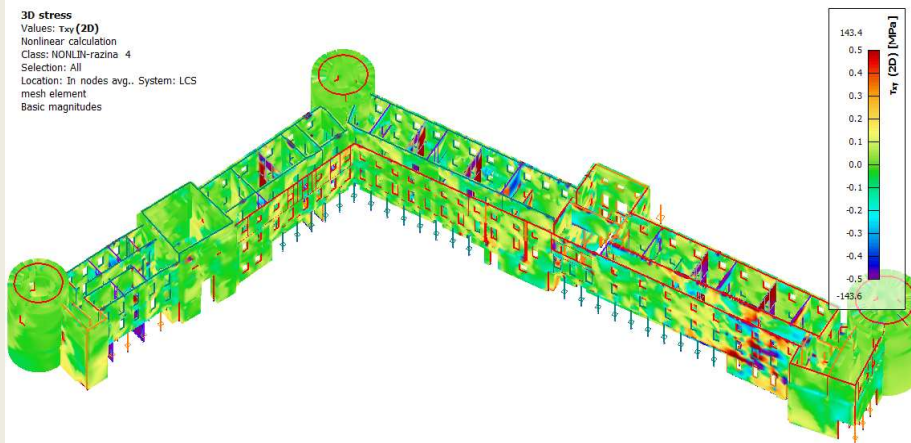
OJAČAN MODEL

Tlačna naprezanja (vrijednost ograničena na max 3,0 Mpa)



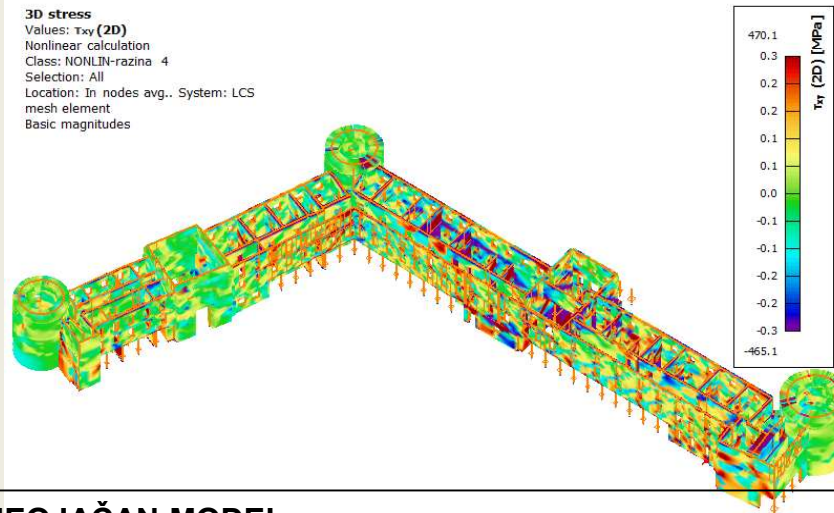
NEOJAČAN MODEL

Tlačna naprezanja (vrijednost ograničena na max 2,6 Mpa)



OJAČAN MODEL

Posmična naprezanja (vrijednost ograničena na max 0,5 Mpa)



NEOJAČAN MODEL

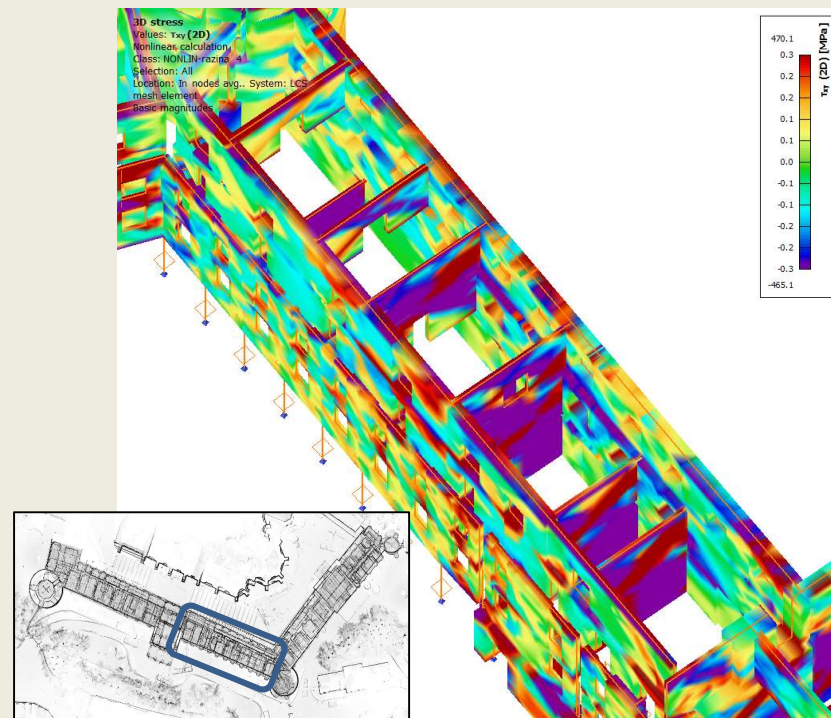
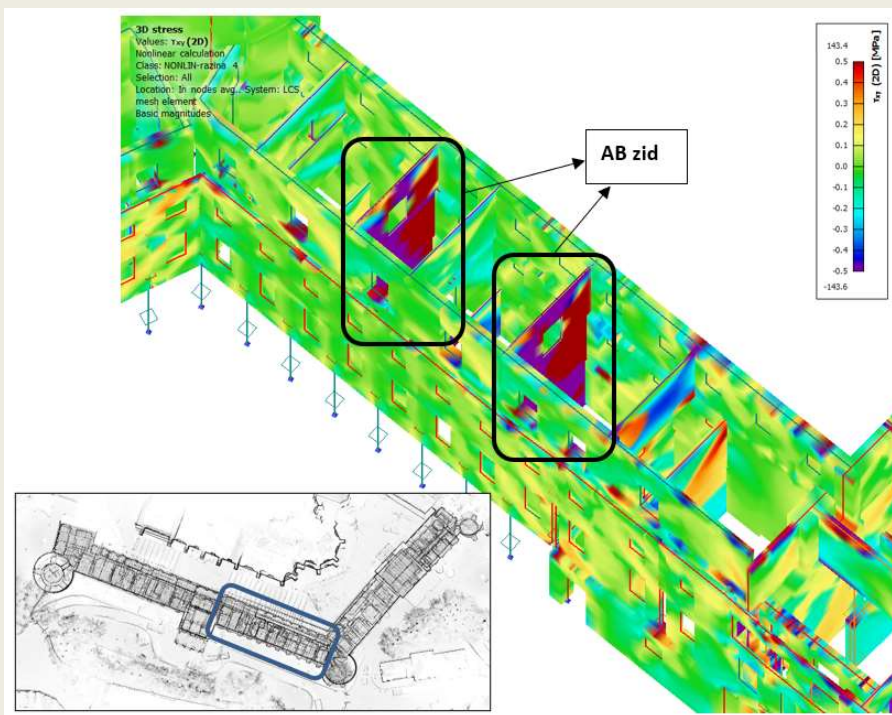
Posmična naprezanja (vrijednost ograničena na max 0,3 Mpa)

Analiza rezultata ojačane konstrukcije ($a_g = 0,25 g$)

Usporedba naprezanja u odnosu na neojačanu konstrukciju

ZAKLJUČAK

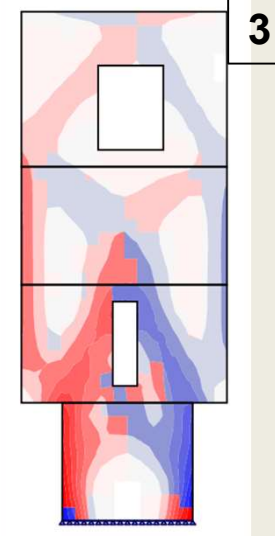
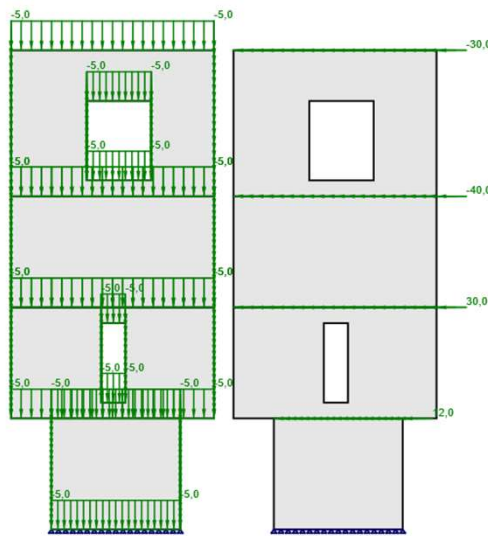
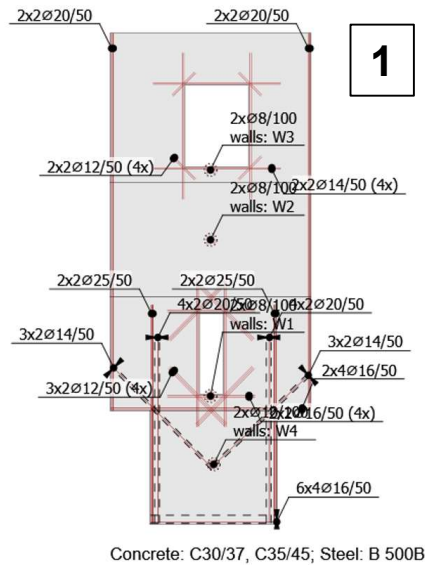
- Posmična i tlačna naprezanja znatno manja u ojačanom modelu u odnosu na neojačani
- Ravnomjernija raspodjela naprezanja unutar konstruktivnog sustava
- Glavnina potresnih sila usmjerena prema novim AB zidovima
- Postojeći zidani zidovi znatno se ojačavaju ili prezidavaju novom opekom
- Smanjena ukupna masa konstrukcije uklanjanjem teških slojeva poda



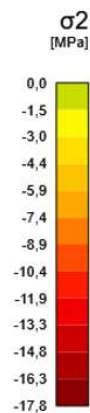
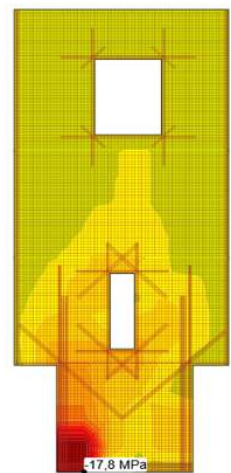
Analiza rezultata ojačane konstrukcije

Proračun AB zidova

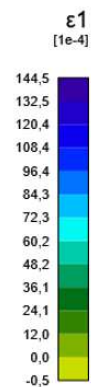
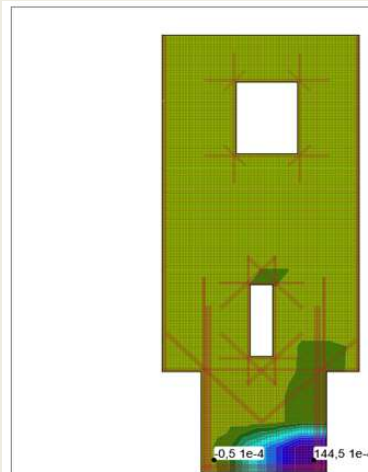
Analiza lokalnog modela AB zida



- 1) geometrijski model i pripadajuća armatura AB zida
- 2) Vertikalna i potresna opterećenja
- 3) Topologija vlačno-tlačnih naprezanja
- 4) Glavna tlačna naprezanja
- 5) Glavne deformacije
- 6) Naprezanja u armaturi



4



5



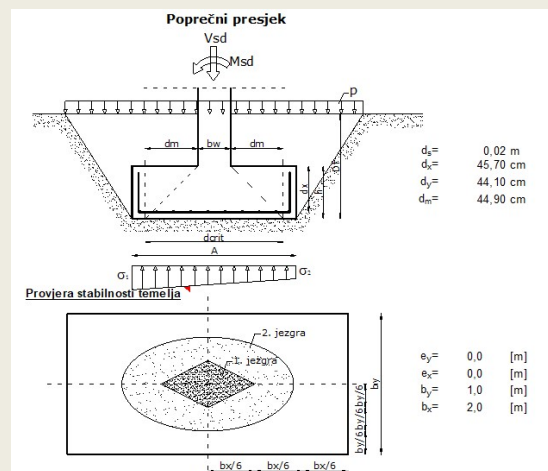
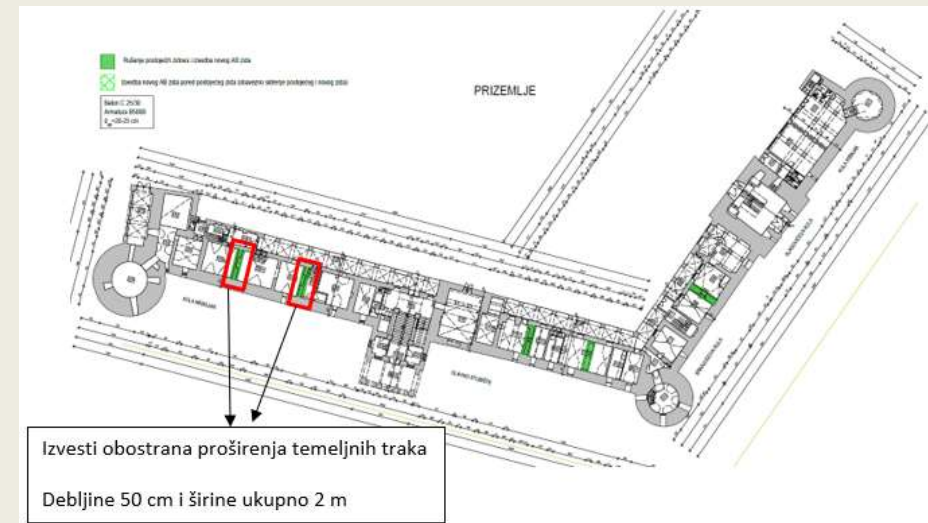
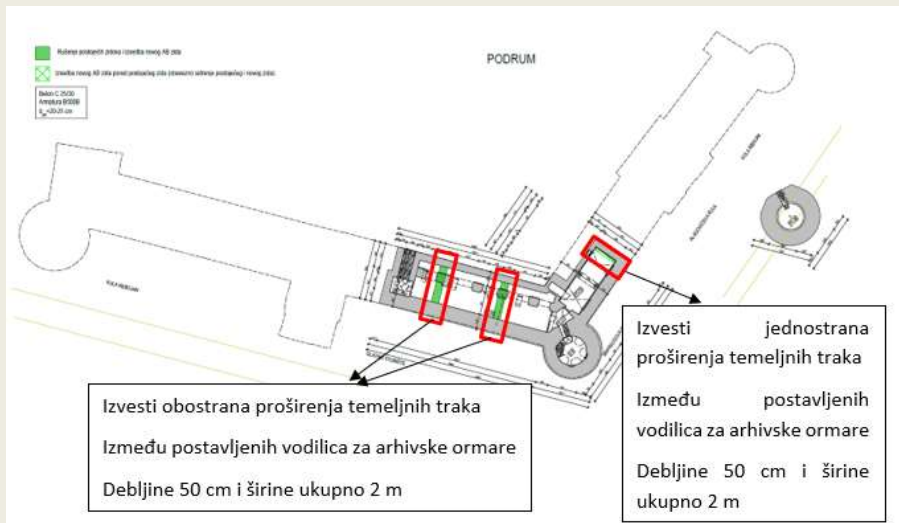
6



Analiza rezultata ojačane konstrukcije

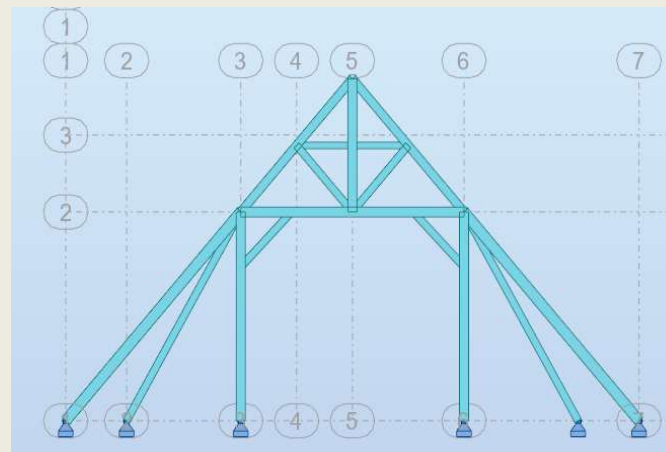
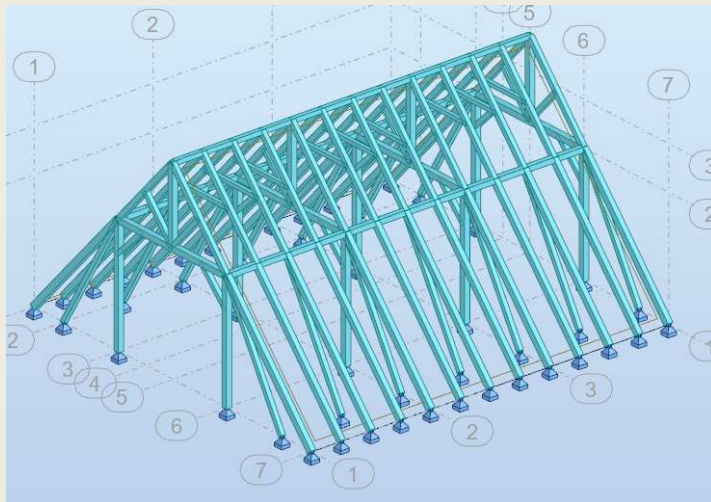
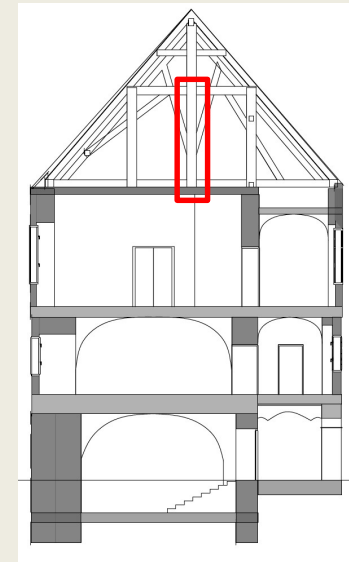
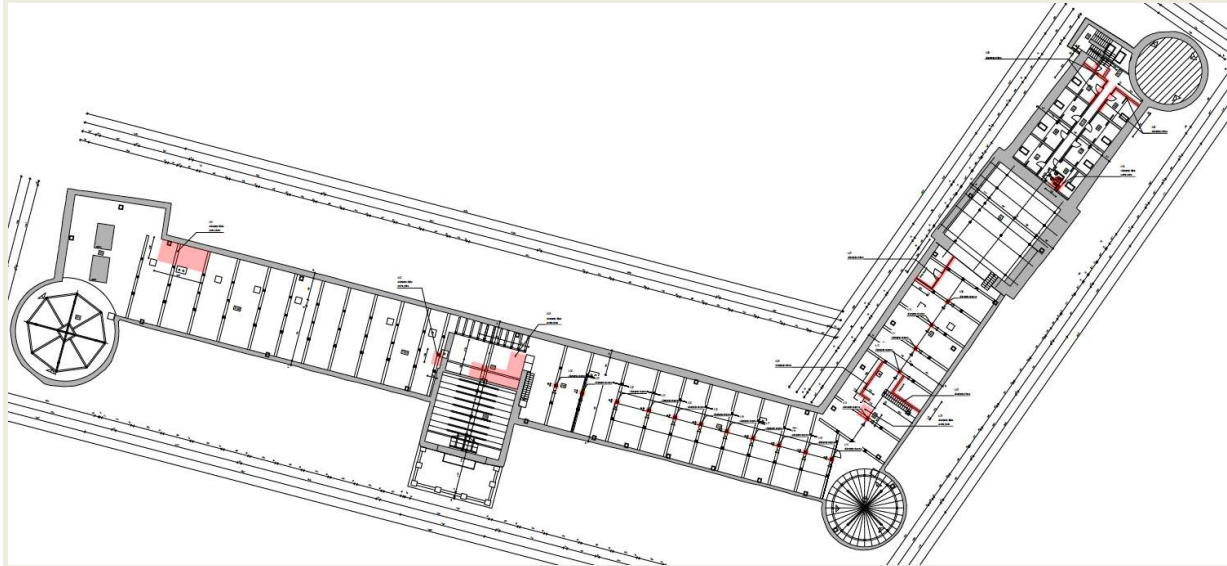
Proračun AB zidova

Lokalni proračuni AB temelja ispod AB zidova



Analiza rezultata ojačane konstrukcije

Promjena krovišnog sustava



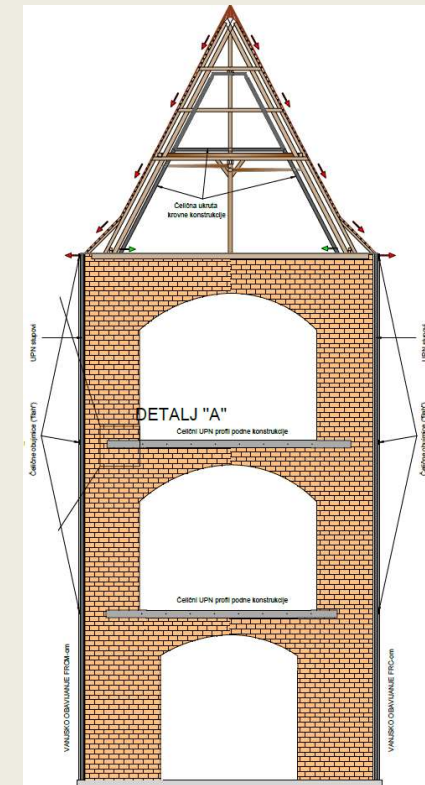
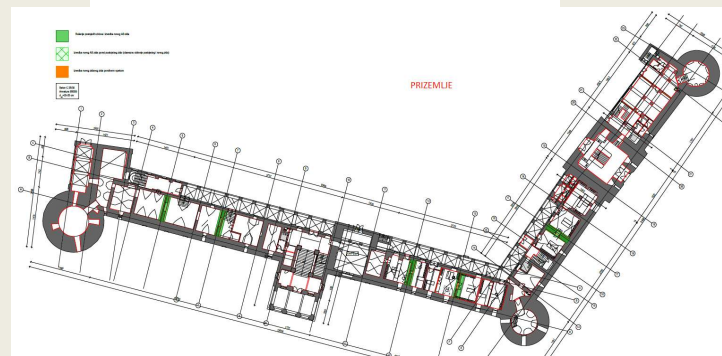
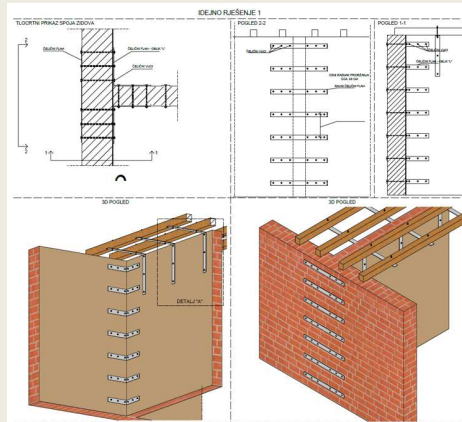
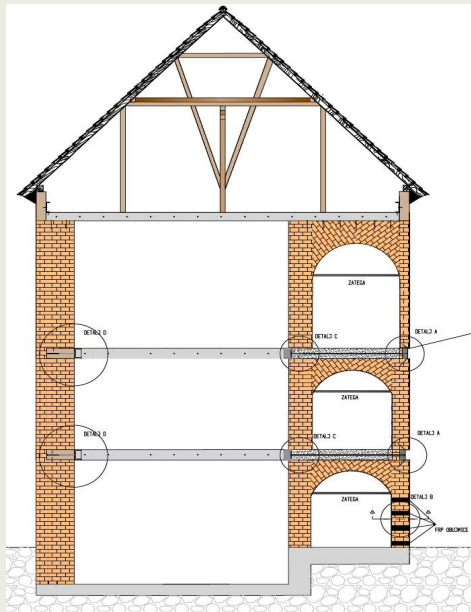
| | | | |
|--|--|--|--|
| CODE: EN 1995-1-2:2004/A2:2014 | | | |
| ANALYSIS TYPE: Member Verification | | | |
| CODE GROUP: | MEMBER: 15 gređa | POINT: 1 | COORDINATE: x = 0.00 L = 0.00 m |
| LOADS: | | | |
| Governing Load Case: 11 ULS/7=1*1.35 + 2*1.35 + 4*0.90 + 3*1.50 (1-2)*1.35+4*0.90+3*1.50 | | | |
| MATERIAL: C14 | | | |
| g _k = 1.30 | f _{m,0,k} = 14.00 MPa | f _{t,0,k} = 8.00 MPa | f _{c,0,k} = 16.00 MPa |
| F _{v,k} = 3.00 MPa | F _{t,90,k} = 2.40 MPa | F _{c,90,k} = 2.00 MPa | E _{0,moyen} = 7000.00 MPa |
| E _{0,05} = 4700.00 MPa | G _{moyen} = 440.00 MPa | Service class: 1 | Beta c = 0.20 |
| SECTION PARAMETERS: 18/18 | | | |
| h _t = 18.0 cm | A _y = 216.00 cm ² | A _z = 216.00 cm ² | A _x = 324.00 cm ² |
| b _f = 18.0 cm | I _y = 2148.00 cm ⁴ | I _z = 2148.00 cm ⁴ | I _x = 13947.0 cm ⁴ |
| t _f = 9.0 cm | W _y = 972.00 cm ³ | W _z = 972.00 cm ³ | |
| STRESSES | | ALLOWABLE STRESSES | |
| Sig _{c,0,d} = N/Ax = 6.77324.00 = 0.21 MPa | f _{c,0,d} = 7.38 MPa | Sig _{m,y,d} = -M _y /W _y = 2.08972.00 = 2.14 MPa | F _{m,y,d} = 6.46 MPa |
| Sig _{m,z,d} = -M _z /W _z = 0.00972.00 = 0.00 MPa | F _{m,z,d} = 6.46 MPa | Tau _{y,d} = 1.5*0.00324.00 = 0.00 MPa | F _{m,d} = 6.46 MPa |
| Tau _{z,d} = 1.5*1.37324.00 = 0.06 MPa | F _{v,d} = 1.38 MPa | Tau _{tor,d} = 0.00 MPa | Tau _{tor,d} = 0.00 MPa |
| Factors and additional parameters | | | |
| kn = 0.70 | ks = 1.00 | knod = 0.60 | Ksys = 1.00 kcr = 0.67 |
| <input checked="" type="checkbox"/> LATERAL BUCKLING PARAMETERS: | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> BUCKLING PARAMETERS: | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> About Y axis: | | <input checked="" type="checkbox"/> About Z axis: | |
| VERIFICATION FORMULAS: | | | |
| (Sig _{c,0,d} /f _{c,0,d}) ² + Sig _{m,y,d} /F _{m,y,d} + km*Sig _{m,z,d} /F _{m,z,d} = 0.33 < 1.00 (6.19) | | | |
| (Tau _{y,d} /kcr*Tau _{tor,d})/kshape/F _{v,d} = 0.00 < 1.00 (Tau _{z,d} /kcr*Tau _{tor,d})/kshape/F _{v,d} = 0.07 < 1.00 (6.13-4) | | | |
| Section OK !!! | | | |



Karakteristični detalji sanacijskih mjera

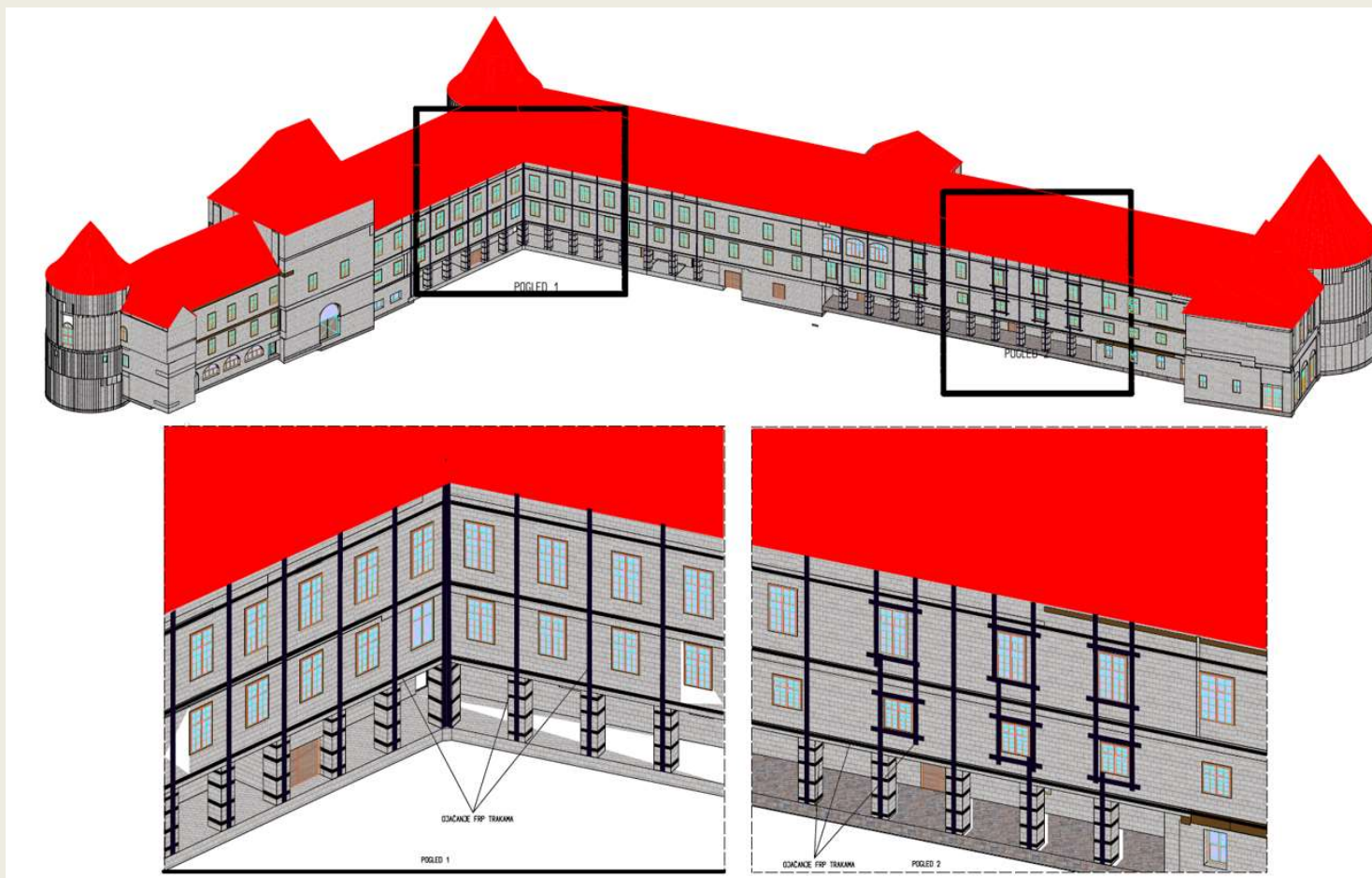
Na temelju numeričke analize, analize pukotinskog stanja, promatranja ponašanja konstrukcije tokom potresa te istražnih radova navedene su glavne točke potrebnih ojačanja:

- ojačanje fasadnog dvorišnog zida koji se „odvaja”
- Ukruta i ojačanje poprečnih zidova te izvedba novih AB zidova
- homogenizacija ponašanja konstrukcije i raspodjela prijenosa opterećenje međukatnim konstrukcijama (OSB ploče)
- Ojačanje „kula”

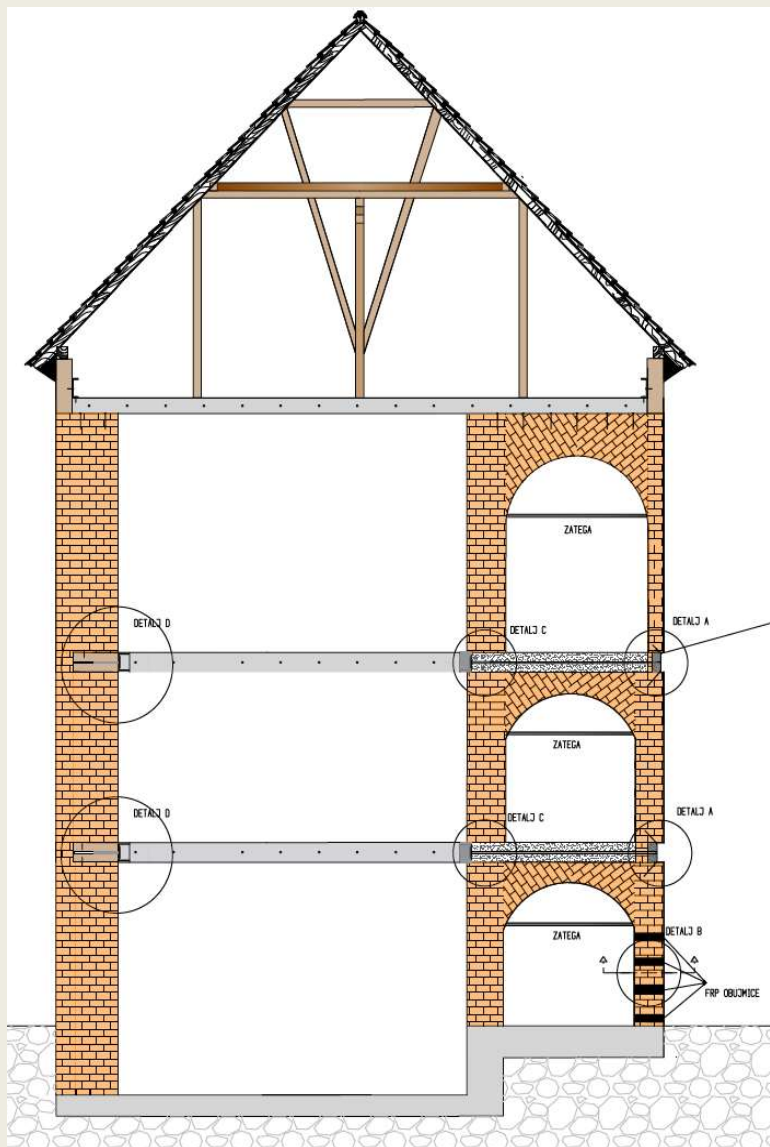


Ojačanje fasadnog zida prema katedrali

- Zid pokazuje tendenciju prevrtanja izvan svoje ravnine
- Potrebno osigurati dodatnu vlačnu i posmičnu čvrstoću zidnog platna ugradnjom FRP traka i FRCM mrežica
- Izvodi se prihvat fasadnog platna čeličnim sidrima u razini međukatnih konstrukcija

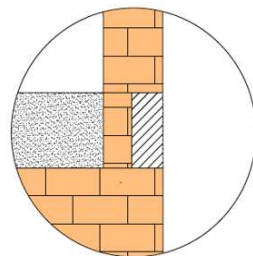


Ojačanje fasadnog zida prema katedrali

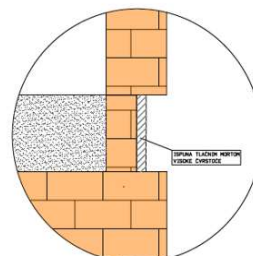


DETALJ A

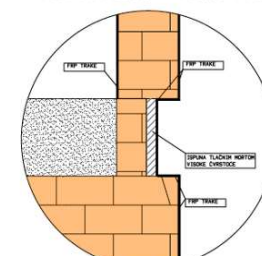
1. FAZA: uklanjanje opeke (15-30 cm)



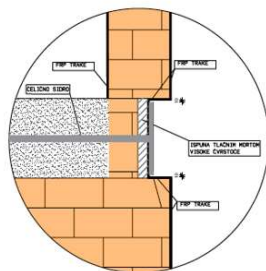
2. FAZA: ispunja supljine slojem morta



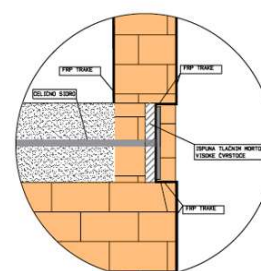
3. FAZA: Postavljanje FRP uzdužnih traka (sa unutrašnjih i vanjskih strana zida)



4. FAZA: Bušenje rupe i ugradnja sidra

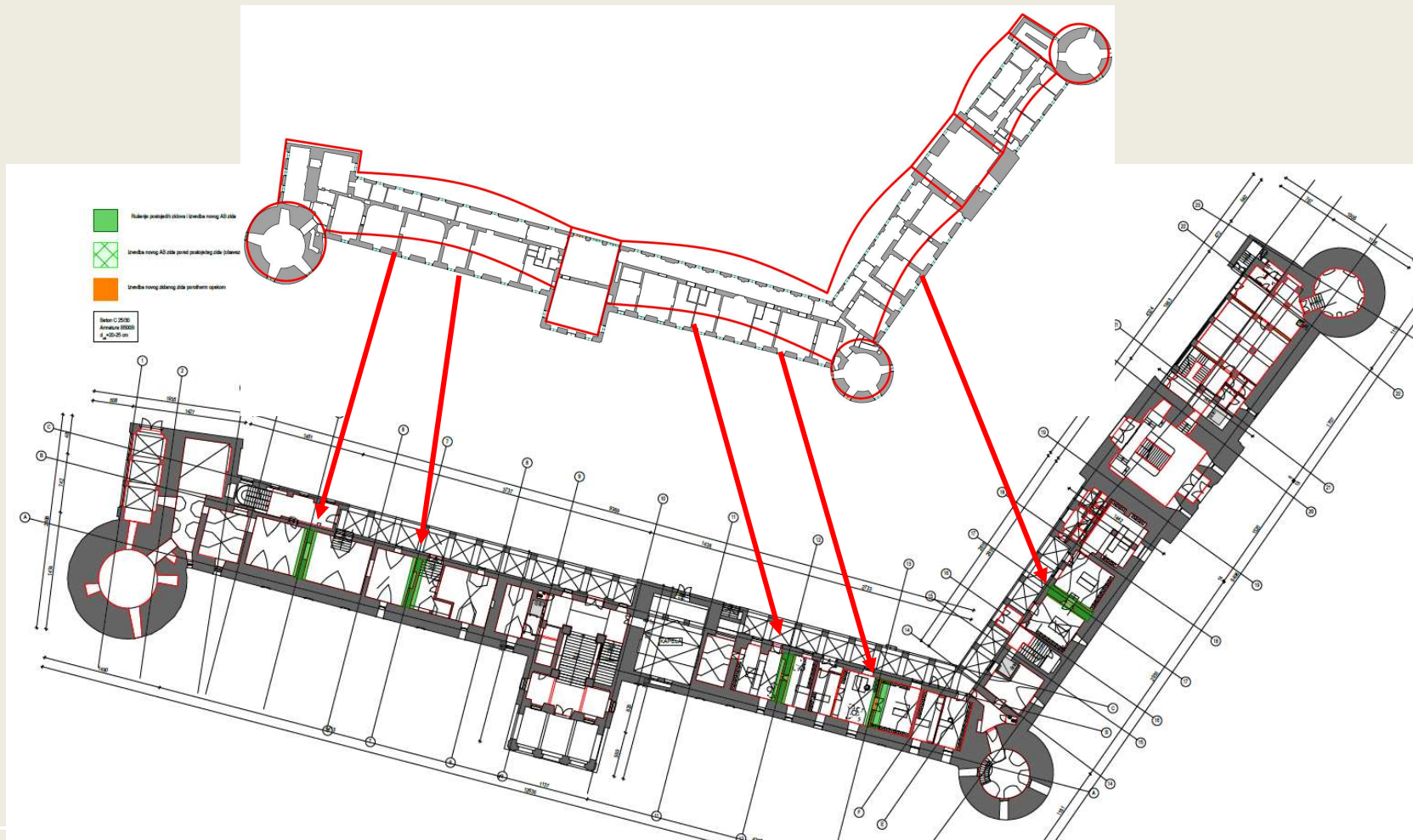


5. FAZA: Vraćanje opeke na početno mjesto



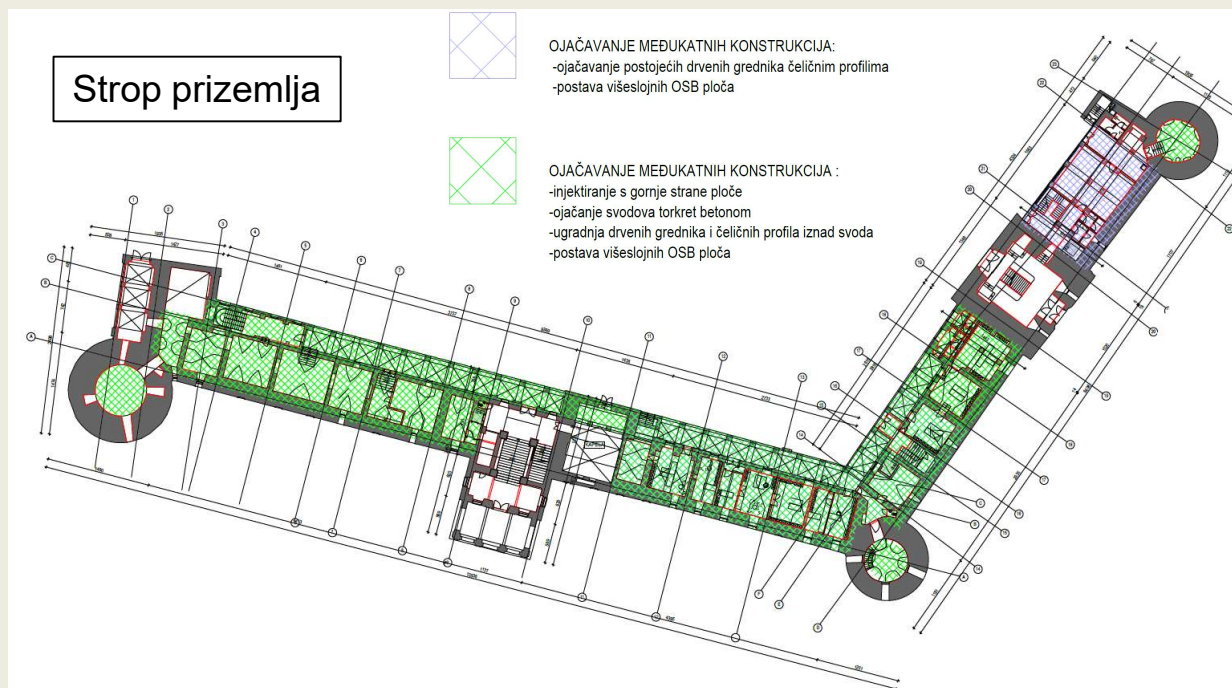
AB zidovi i temelji

- Analizom utvrđena potreba za preraspodjelom prijenosa potresnih sila
- U suradnji s konzervatorskog strukom te uvjetima korištenja prostora odabrale su se pozicije izvedbe novih AB zidova
- Zidovi se prate u kontinuitetu u svim etažama te se temelje na novim AB temeljima



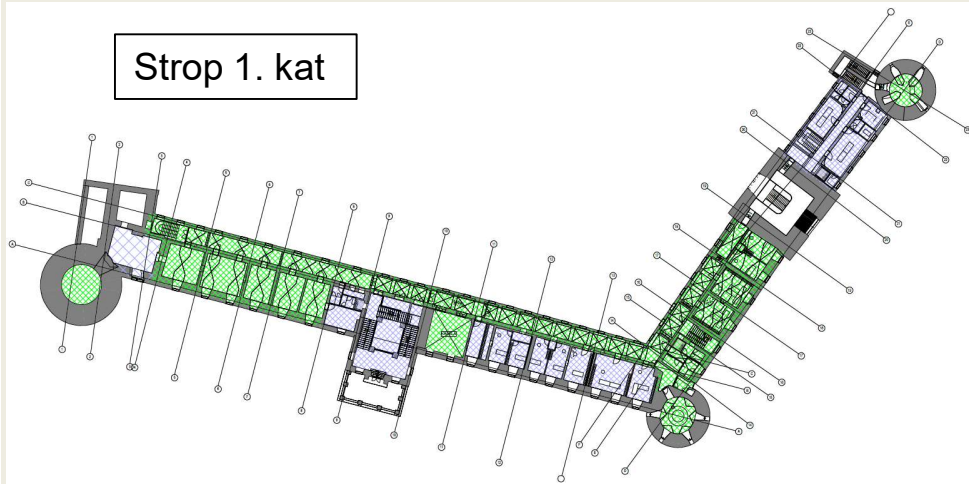
Ukruta međukatnih konstrukcija

- Uklanjanje svih slojeva poda do drvenog grednika i/ili zidanog svoda te izvedba međukatnih krutih diskova s gornje strane podova
- višeslojna OSB ploča
- Između drvenih greda poda postavljaju je čelični I-profilu povezani sa gredama radi ojačanja postojećeg statičkog sustava grednika
- Kruti disk povezuje se moždanicima s drvenim grednicima poda.
- Elementi konstrukcije poda (čelični profili, OSB ploče i drvene grede) se povezuju čeličnim pločevinama, moždanicima, vijcima i sidrima međusobno i sa novoizvedenim i ojačanim poprečnim zidovima kako bi se sva opterećenja kvalitetno prenijela do temelja.

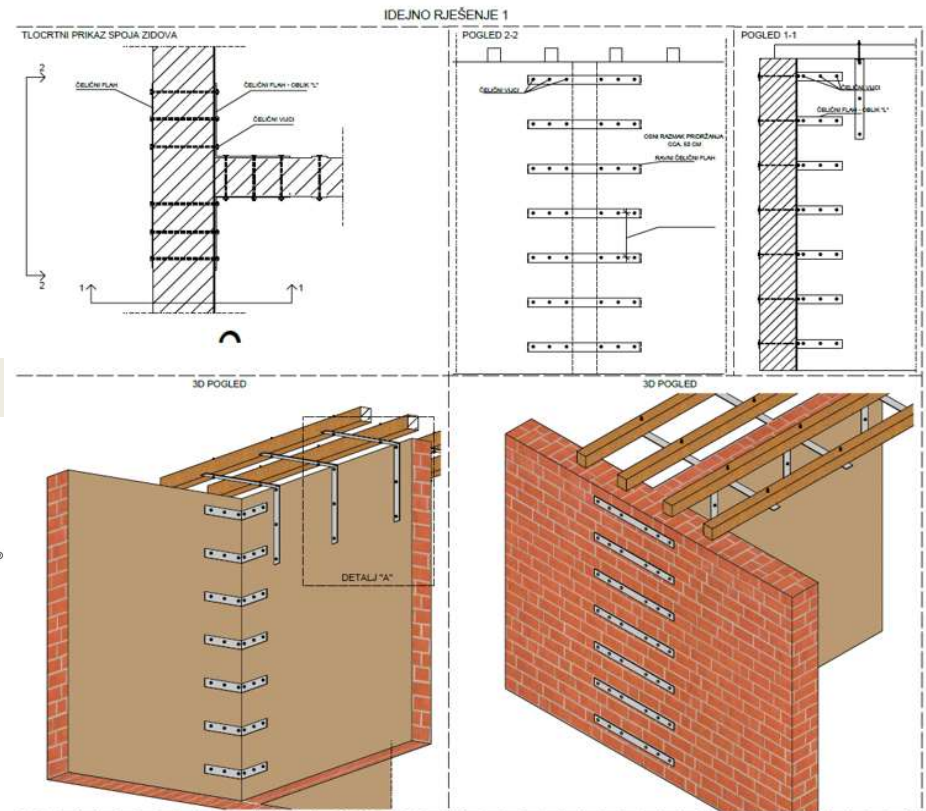
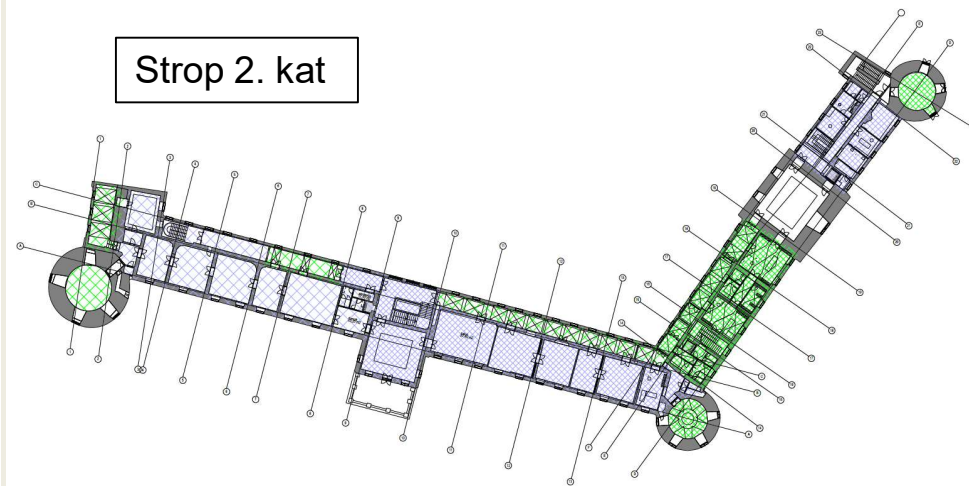


Ukruta međukatnih konstrukcija

Strop 1. kat

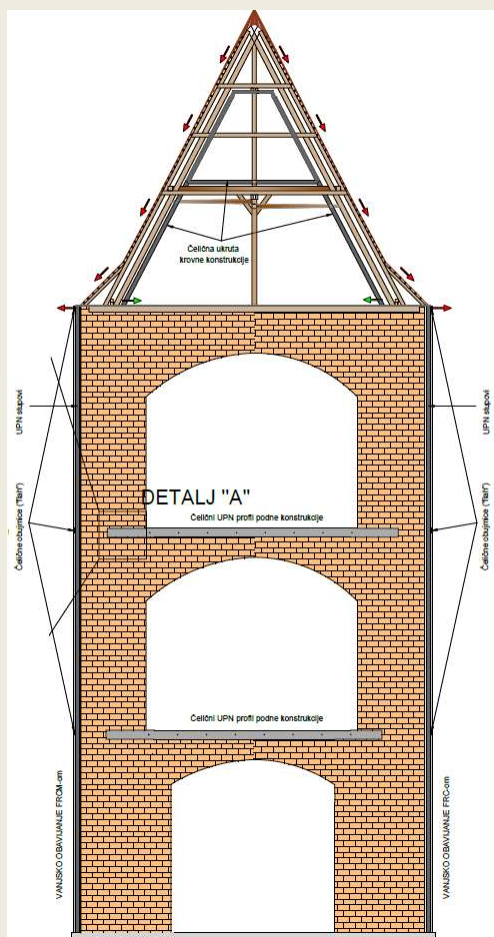


Strop 2. kat

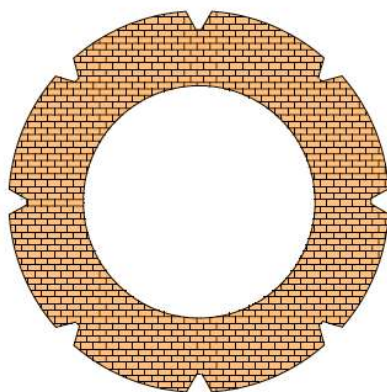


Ojačanje kula

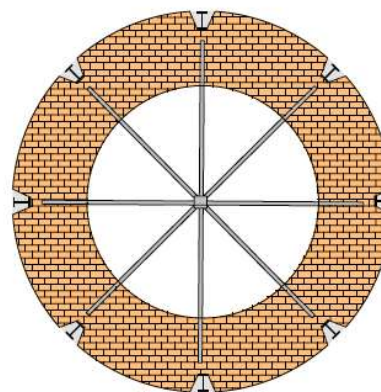
- Ojačanje kula (Nebojan, Branjugova, Alagovićevo, Ribnjak) usjecanjem čeličnih profila u vanjsku fasadu
- Izvedba AB temeljnog prstena
- Zidovi kula injektiraju se obostrano te s vanjske strane ojačavaju mrežicama stakloplastike (FRCM)



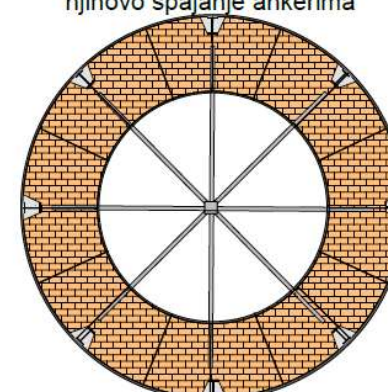
FAZA 1: Šlicanje vanjske strane zida i otvaranje slojeva poda



FAZA 2: Postavljanje "UPN" profila (stupovi i grede)



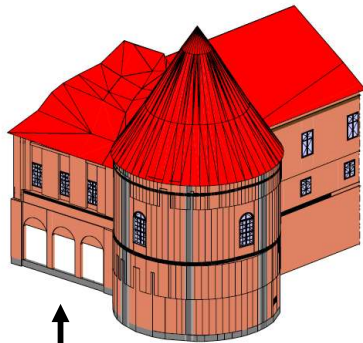
FAZA 3: Nanošenje vanjskog i unutarnjeg plašta FRCC-a te njihovo spajanje ankerima



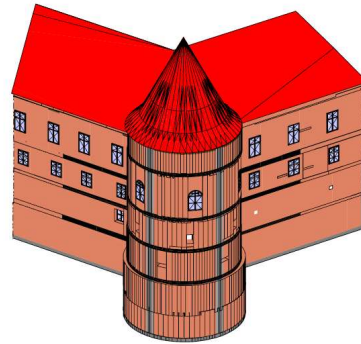
Ojačanje kula

-  OJAČANJE KULA:
-ugradnja čeličnog ojačanja (stupovi i grede)
-postavljanje karbonskih traka
-  Izvedba temelja ispod čeličnih stupova
-  Lokalno injektiranje zidova kule

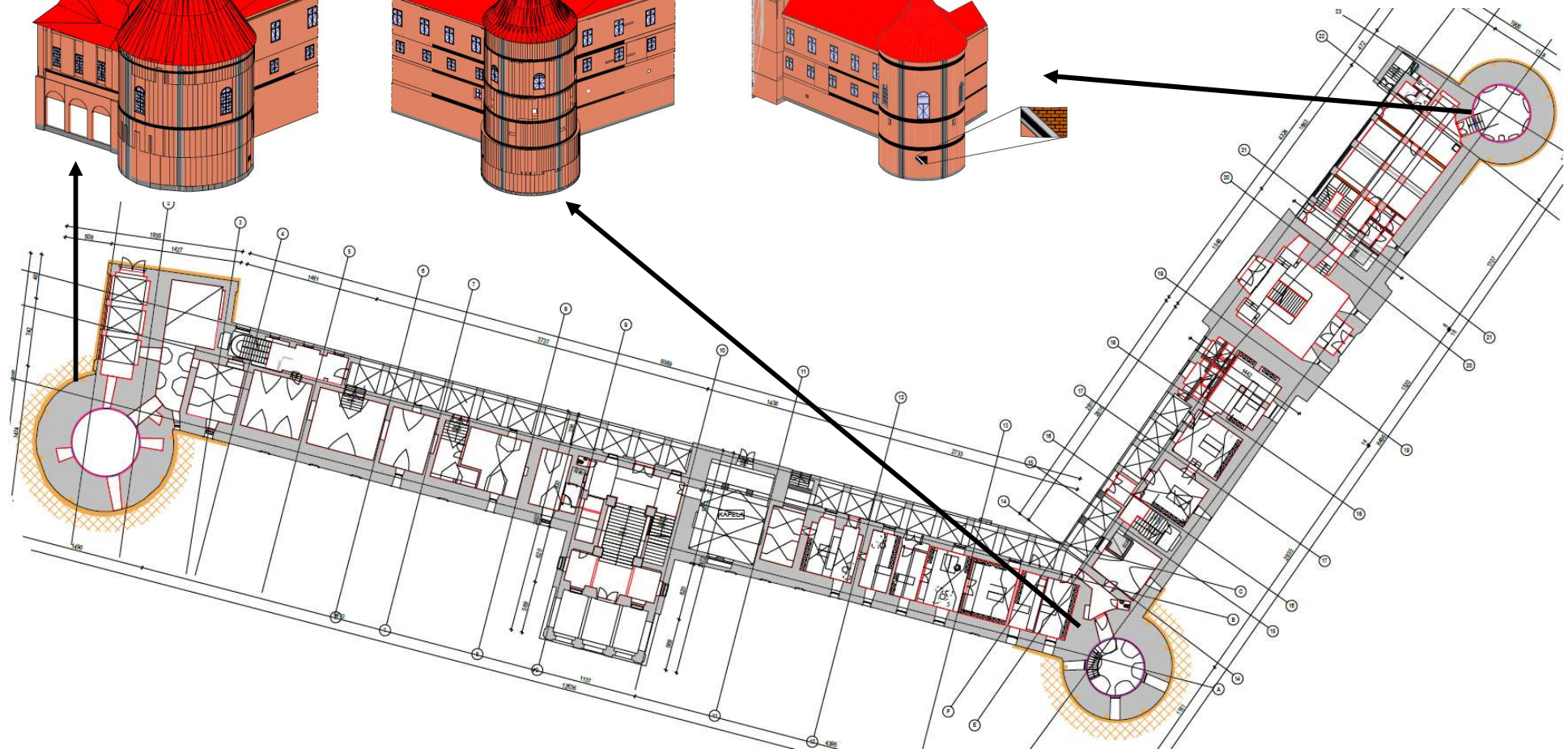
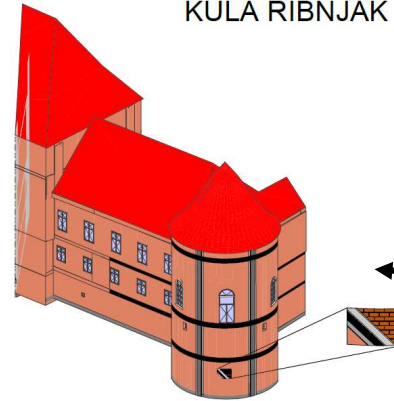
KULA NEBOJAN



BRANJUGOVA KULA



KULA RIBNJAK



ZAKLJUČAK

- Izvorno konstrukcija geometrijski nije koncipirana za ravnomjeran i kvalitetan prijenos potresnih sila – **promijenjen koncept prijenosa potresnih sila (novi AB zidovi i pravilnija raspodjela opterećenja međukatnim dijafragmama)**
- Konstruktivni materijali (puna opeka i mort) su dotrajali i nezadovoljavajućih mehaničkih karakteristika za prijenos potresnih sila – **dotrajali zidovi se prezidavaju, a ostali ojačavaju (FRCM, injektiranje, zamjena sljubnica morta)**
- Nezadovoljavajući spoj poprečnih i uzdužnih zidova (razdvajanje pri potresnim pomacima) – **osigurana poveznica čeličnim flahovima i sidrima**
- Istražnim iskopima mjestimično utvrđen plitak/nepostojeći temelj – **plitki temelji se mikropilotiraju/dobetoniravaju**
- Fasadni dvorišni zid koji se odvaja od ostatka konstrukcije – **ukrućen kombinacijom FRP traka i FRCM-a te sidrima povezan za ostatak konstrukcije**
- Kule masivne i djelomično oštećene – izvodi se ukrućenje te poboljšanja svojstava postojećeg zida (injektiranje, FRCM, zamjena sljubnica morta)
- Krovne konstrukcija mjestimično dotrajala – **zamjena i ukrućenje postojećeg krovišta, izvedba podaskanja**
- Postojeća konstrukcija izvedena od masivnih materijala i slojeva poda – **zamjena teških slojeva poda lakšim materijalima, a ostala ojačanja ne doprinose značajno povećanju mase**
- Postojeća konstrukcija značajno oštećena uslijed potresa tokom 2020. god. – **ojačana konstrukcija dimenzionirana na potres razine 4 ($a_g = 0,25 g$)**



ZAKLJUČAK

- Izvorno konstrukcija geometrijski nije koncipirana za ravnomjeran i kvalitetan prijenos potresnih sila
 - Konstruktivni materijali (puna opeka i mort) su dotrajali i nezadovoljavajućih mehaničkih karakteristika za prijenos potresnih sila
 - Nezadovoljavajući spoj poprečnih i uzdužnih zidova (razdvajanje pri potresnim pomacima)
 - Istražnim iskopima mjestimično utvrđen plitak/nepostojeći temelj
 - Fasadni dvorišni zid koji se odvaja od ostatka konstrukcije
 - Kule masivne i djelomično oštećene
 - Krovne konstrukcija mjestimično dotrajala
 - Postojeća konstrukcija izvedena od masivnih materijala i slojeva poda
 - Postojeća konstrukcija značajno oštećena uslijed potresa tokom 2020. god.
- **promijenjen koncept prijenosa potresnih sila (novi AB zidovi i pravilnija raspodjela opterećenja međukatnim dijafragmama)**
 - **dotrajali zidovi se prezidavaju, a ostali ojačavaju (FRCM, injektiranje, zamjena sljubnica morta)**
 - **osigurana poveznica čeličnim flahovima i sidrima**
 - **plitki temelji se mikropilotiraju/dobetoniravaju**
 - **ukrućen kombinacijom FRP traka i FRCM-a te sidrima povezan za ostatak konstrukcije**
 - **izvodi se ukrućenje te poboljšanja svojstava postojećeg zida (injektiranje, FRCM, zamjena sljubnica morta)**
 - **zamjena i ukrućenje postojećeg krovišta, izvedba podaskanja**
 - **zamjena teških slojeva poda lakšim materijalima, a ostala ojačanja ne doprinose značajno povećanju mase**
 - **ojačana konstrukcija dimenzionirana na potres razine 4 (ag = 0,25 g)**



HVALA NA PAŽNJI!

