



HRVATSKA KOMORA INŽENJERA GRAĐEVINARSTVA

15. Dani Hrvatske komore inženjera građevinarstva Opatija, 2021.

Pristup konstrukcijskoj obnovi crkve Sv. Mihaela u Gračanima

Juraj Pojatina

Juraj Pojatina dipl.ing.građ., Studio Arhing d.o.o., Zagreb

Tamara Horvat mag.ing.aedif., Studio Arhing d.o.o., Zagreb

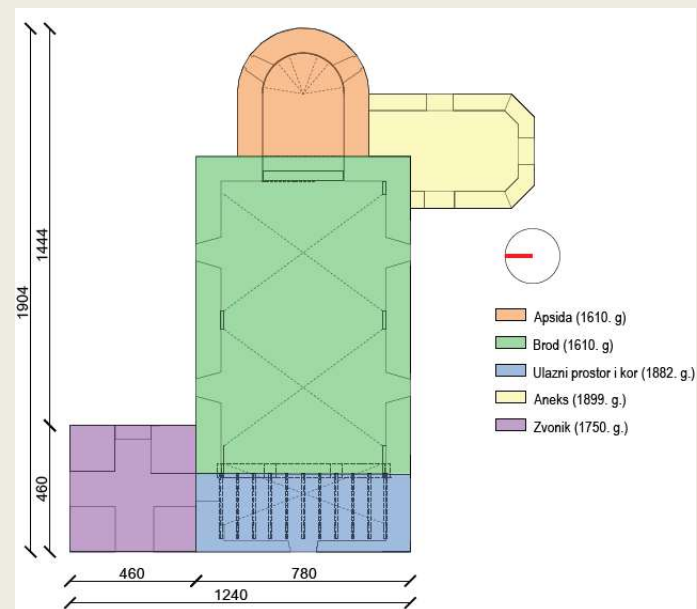
Izv.prof.dr.sc. Mario Uroš, dipl.ing.građ, Građevinski fakultet Zagreb

Maja Baniček, mag.ing.aedif., Građevinski fakultet Zagreb

OPĆENITO



Fotografija građevine (izvor: stranice župe Gračani)

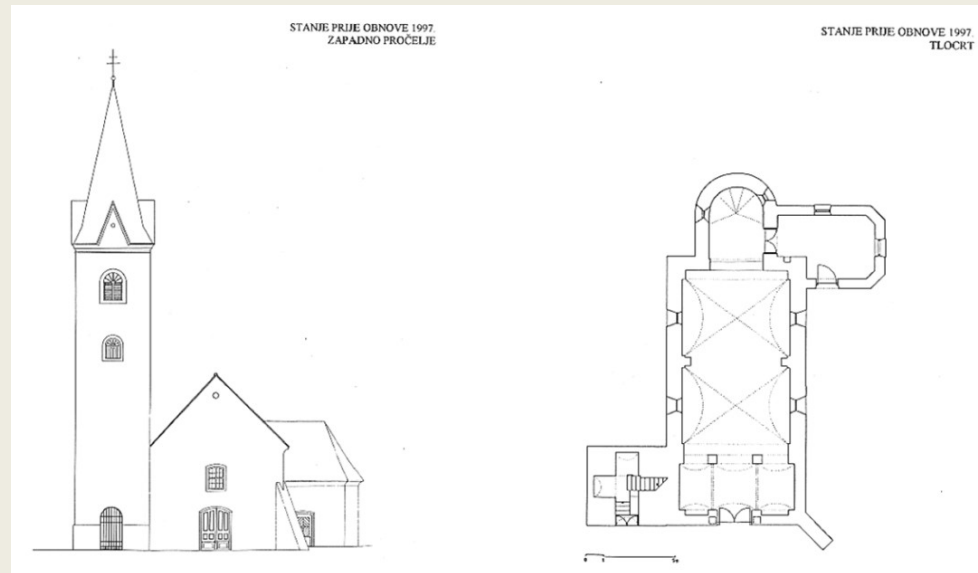


Tlocrtni prikaz građevine s osnovnim dijelovima

Prema zapisima vizitatora, crkva svetog Mihaela Arkandela sagrađena je 1610. godine na uzvisini uz ulicu Isce, u najstarijem dijelu zagrebačkog naselja Gračani. Pretpostavlja se da je graditelj bio grof Ivan Erdödy de Monyorokerek (ugarski biskup). Prvi se put spominje 1622. godine, dok je prvi opširniji opis kapele s tri oltara te grobljem oko nje iz 1695. godine. 1882. godine crkva je proširena prema zapadu te je izgrađen novi kor, no temelji su izvedeni samo ispod stupova i zidova predvorja, ne ispod cijelog zapadnog zida. 1899. izgrađena je nova sakristija. Nema podataka o oštećenju crkve u potresu 1880. te se pretpostavlja da su sva oštećenja sanirana prilikom proširenja i obnove 1882. Obzirom da temelji nisu postojali ispod cijelog zapadnog zida, došlo je do prevelikog slijeganja što je sanirano početkom 20. stoljeća izvedbom kontrafore na jugozapadnom uglu crkve. Krovšte crkve je mijenjano 1997. godine. U toj obnovi izveden je horizontalni serklaž po obodu zida, te se zabat crkve prezidao u omeđeno zide. Zidani zvonik izgrađen je 1750. godine, a 1870. dobiva novi, šiljasti oblik.



ARHITEKTURA I GEOMETRIJA

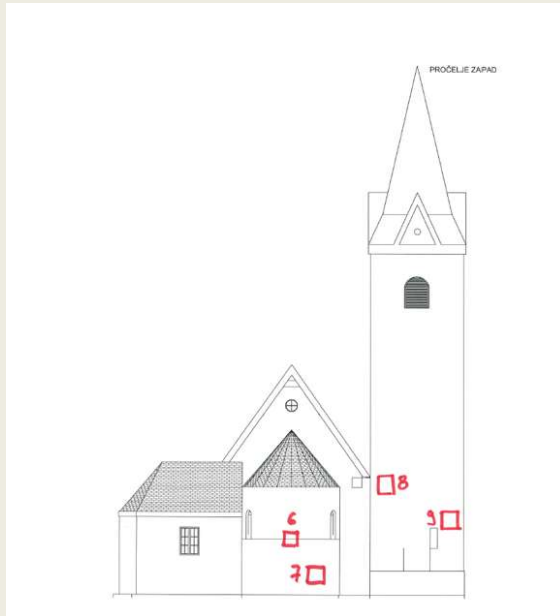


Zapadno pročelje i tlocrt (arhivski nacrt prije obnove 1997.)

Oblikovno se radi o jednobrodnoj crkvi, s polukružno zaključenim svetištem na istočnoj strani, sakristijom s južne strane te zvonikom sa sjeverne strane, u ravnini zapadnog pročelja. Tlocrtno su dimenzije crkve 12,4 m x 19,0 m. Visina broda crkve je 5,4 m (gornja kota svoda), dok se sljeme nalazi na 11,4 m. Visina vijenca sakristije nalazi se na 4,1 m, a sljemena na 6,6 m. Zvonik je najviši element građevina i njegova visina je 17,4 m, odnosno 26,2 m na šiljastom vrhu krova zvonika. Svjetla visina prostora unutar crkve je 5,3 m. Glavni građevni materijali korišteni za izgradnju crkve su opeka i kamen, te drvena građa za kroviste. Zidovi su izgrađeni od kamena s umetnutim dijelovima opeke, ožbukani izvana i iznutra. Debljina zidova iznosi 60 i 90 cm. Svodovi su izvedeni od opeke te su križnog oblika. Svodovi se oslanjaju na zidove koji su na mjestima glavnih linija svodova zadebljani te oblikovani kao stupovi u zidu. Zidovi crkve su na vrhu omeđeni horizontalnim armiranobetonskim serklažem, dimenzije 90×30 cm. Zapadni zabat crkve iznad glavnog ulaza je izveden kao omeđeno zide. Kroviste kapele je klasična drvena visulja s daščanom oplatom i pokrovom crijepom. Rogovi su dimenzija 10×15 cm, stup visulje 16×20 cm, dok je vezna greda 20×22 cm. Zidni elementi korišteni za izgradnju zvonika su kombinacija opeke i kamena, te vezivni materijal niske kvalitete. Debljina zidova se smanjuje s visinom, od 165 cm u prizemlju do 85 cm na vrhu zvonika. Zidovi su ožbukani s vanjske strane i djelomično s unutrašnje. Svaka cca 3,5 m visinski nalaze se drveni međupodest međusobno povezani ljestvama. Konstrukcija zvona je čelična prostorna rešetkasta krnja piramida smještena na zadnjem katu i oslanja se na betonsku ploču debljine 10 cm, dok je kroviste zvonika drveno s daščanom oplatom. Crkva sv. Mihaela Arkandela je upisana u Registar kulturnih dobara Republike Hrvatske kao zaštićeno kulturno dobro pod oznakom Z-0723.



ISTRAŽNI RADOVI

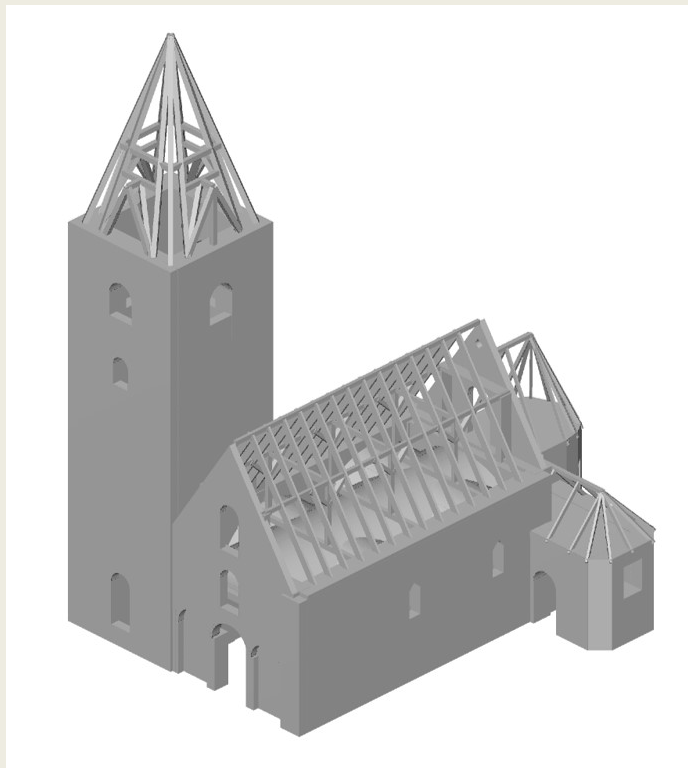


		FOTODOKUMENTACIJE									
		PRESEK									
<p>Pogled</p> <p>Presek</p>											
<p>Nepravilan kameni zid Zid se sastoji od kamenih elemenata različitih dimenzija. Elementi manjih dimenzija koristi su se za popunjavanje praznina između većih elemenata. Uzorak spajanja, vertikalni i horizontalni većim dijelom nepravilan.</p>			OPIS								
<p>Kamen – prirodni kamen Mort – vapneni mort</p>			MATERIJALI								
<p>Dimenzije elemenata: s=20 - 30 cm v=20 - 30 cm t=8 - 22 cm</p>			GEOMETRIJA								
WC	MM	SS	VU	SM	HU	SD		Vertikalno	Vanjski	U rasini	ANALIZA
NF	NF	NF	NF	PF	NF	PF	Kategorija	1	2	3	
							M				
							MQI	1,4	1,05	1,05	
							Mat. karakteristike (min-max)	f _{tk} (MPa)	E (MPa)	f _{yk} (MPa)	
								1,3-2,15	600-800	0,704-0,936	

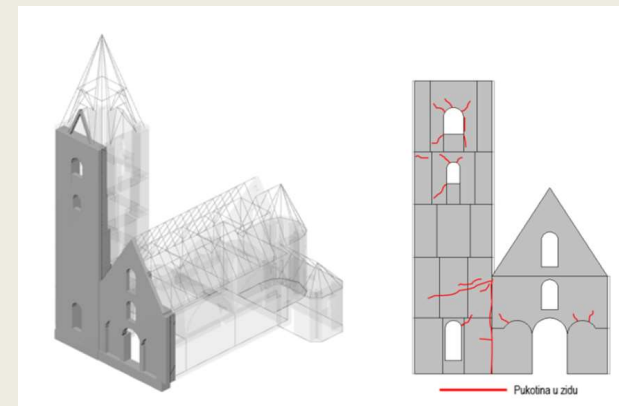
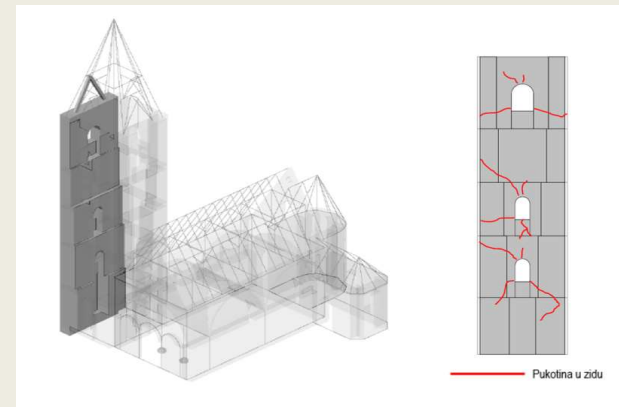
Istražna sondaža zida zvonika s klasifikacijom zida prema Borriju

Stručni pregled građevine sastojao se od detaljnog pregleda nosivih zidova, pregleda stropova i svodova, pregleda krovne konstrukcije, pregleda pročelja i zvonika. Uz navedeno, izvršeno je i mjerenje geometrije nosivih elemenata, izrada fotodokumentacije s detaljima uočenih oštećenja, te istražni radovi na zidovima crkve i zvonika. Također su provedeni i geomehanički istražni radovi sa ciljem ocjene stanja temeljnog tla, te globalne stabilnosti obodnih padina. Klasifikacijom zida i određivanjem mehaničkih karakteristika načelno je potvrđena pretpostavka vizualnog pregleda o stanju zida. U većem dijelu građevine radi se o mješovitom višeslojnom sustavu kamenog zida s mortom loše kvalitete i niskih mehaničkih svojstava. Slojevi zidova u poprečnom smjeru nisu povezani te je upitna nosivost zida okomito na ravninu. Vrsta gradnje i korišteni materijali podudaraju se s vremenom izgradnje, odnosno s kronologijom građenja i dogradnji. Kameno zide je korišteno na najstarijim dijelovima crkve (brod i apsida), dok je materijal na kasnije izgrađenim dijelovima kombinacija kamena i opeke.

OŠTEĆENJA OD POTRESA



3D grafički model s prikazom pukotina

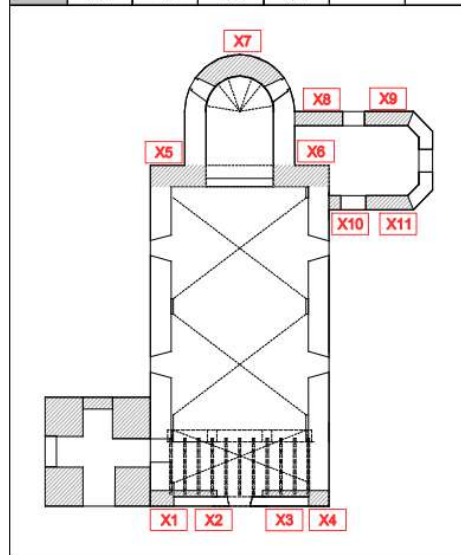


Kao važan segment istražne faze izrađen je detaljan grafički prikaz svih oštećenja koja su se manifestirala prije svega u vidu pukotina na zidanim strukturama. Pravilno iščitavanje dispozicije, smjera i dubine pukotina, te interpretacija istih otkriva nam sve slabosti građevine i određuje smjer planiranja zahvata popravka i pojačanja. Jedna od najvažnijih karakteristika nepravilnog kamenog povijesnog zida su nepravilni lomovi pojedinih zidnih blokova, otkazivanja zidova van ravnine, lokalna urušavanja lica zidova i slično. Takve mehanizme je vrlo teško predvidjeti bez dubinske analize unutarnje strukture zida i nelinearnih analitičkih modela.

SEIZMIČKA ANALIZA (1)

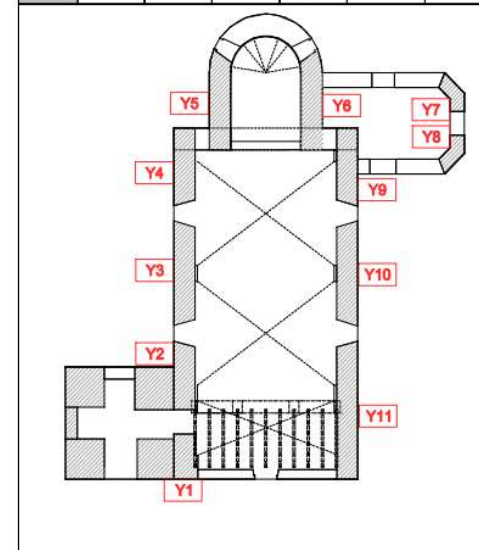
Smjer X

	Zid	Debljina	Duljina	Površina	Ukupna površina zidova jednog smjera [m2]	Postotak zidova jednog smjera [%]
		[cm]	[cm]	[m2]		
Zidovi x smjera	X1	65	101	0,66	13,90	9,05
	X2	25	189	0,47		
	X3	25	189	0,47		
	X4	65	90	0,59		
	X5	90	240	2,16		
	X6	90	240	2,16		
	X7	90	385	3,47		
	X8	60	210	1,26		
	X9	60	200	1,20		
	X10	60	50	0,30		
	X11	60	195	1,17		



Smjer Y

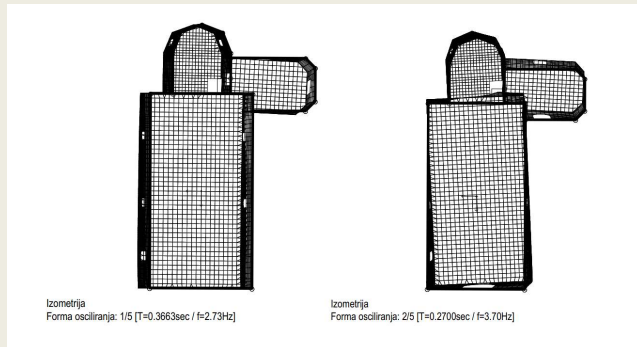
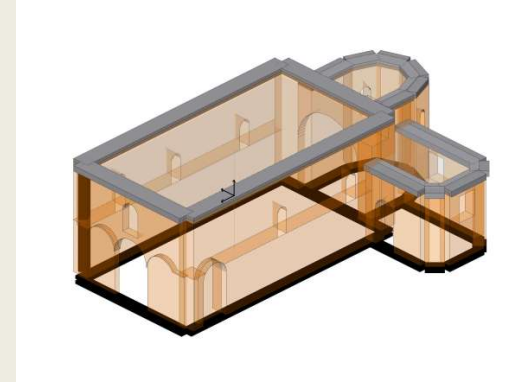
	Zid	Debljina	Duljina	Površina	Ukupna površina zidova [m2]	Postotak zidova [%]
		[cm]	[cm]	[m2]		
Zidovi y smjera	Y1	90	185	1,67	29,91	19,47
	Y2	90	268	2,41		
	Y3	90	400	3,60		
	Y4	90	300	2,70		
	Y5	90	380	3,42		
	Y6	90	380	3,42		
	Y7	60	120	0,72		
	Y8	60	120	0,72		
	Y9	90	300	2,70		
	Y10	90	400	3,60		
	Y11	90	550	4,95		



SEIZMIČKA ANALIZA (2)

Proračunski model

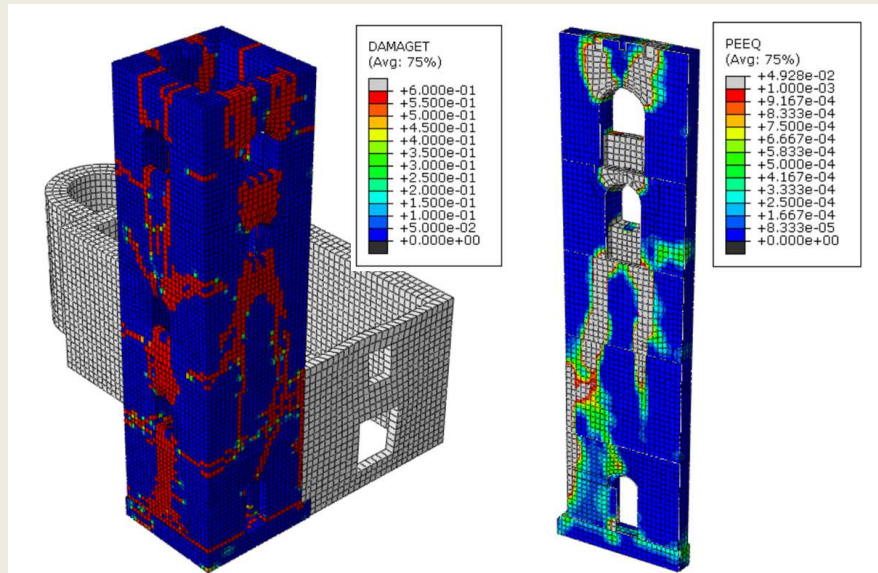
1. Izrada prostornog modela u programu za proračun metodom konačnih elemenata (Tower 8.2).
2. Elastična krutost elemenata konstrukcije je modelirana s četvrtinom vrijednosti, što predstavlja učinak raspucavanja.
3. Unošenje vertikalnog opterećenja na svodove (opterećenje krova nanoseno je površinski na svodove).
4. Modalna analiza - provedena za 5 tonova ($T_k > 3V_n$),
 - u uzdužnom smjeru (X) aktivirano je 99,86% mase
 - u poprečnom smjeru (Y) aktivirano je 99,87% mase
5. Seizmički proračun
 - ubrzanje tla $a = 0,13 \text{ g}$ (za 95-godišnji povratni period)
 - kategorija važnosti objekta: III → Gama = 1 (zgrade čija je potresna otpornost važna s obzirom na posljedice vezane s rušenjem)
 - faktor ponašanja $q = 1,5$
 - kategorija tla C
 - poprečna sila u podnožju :
 - smjer X = 1638 kN (20% ukupne težine crkve)
 - smjer Y = 1462 kN (18% ukupne težine crkve)



E ₀ = 0,035 N/mm ² ν = 0,200 E ₀ = 191,188 kN/mm ² V _{max} = 15,15 kN E ₀ = E ₀ /4 α = 0,5 KL = 2																	R ₀ = min(V _{max} V _{max}) / V ₀			
E ₀ = 0,035 N/mm ² ν = 0,200 E ₀ = 191,188 kN/mm ² V _{max} = 15,15 kN E ₀ = E ₀ /4 α = 0,5 KL = 2																	R ₀ = min(V _{max} V _{max}) / V ₀			
id	L _x [cm]	L _y [cm]	A [dm ²]	V ₀ [dm ³]	M ₀ [kNm]	M ₁ [kNm]	M ₂ [kNm]	σ ₀ [MPa]	σ ₁ [MPa]	σ ₂ [MPa]	L _x [cm]	V ₀ [dm ³]	M ₀ [kNm]	M ₁ [kNm]	M ₂ [kNm]	σ ₀ [MPa]	σ ₁ [MPa]	σ ₂ [MPa]	R ₀	R ₀ = A
X1	200	400	12000	194,4	129,2	115,0	0,108	0,043	0,093	0,095	33	10,3	10,00	69,2	0,28	0,184	0,14	0,093	0,362	19,81



SEIZMIČKA ANALIZA (2)



Rasprostiranje oštećenja tornja zbog vlačnih naprezanja (a) i područje rasprostiranja pukotina u prednjem zidu (prikazan presjek kroz prednji zid) (b)

Proračuni konstrukcije su provedeni u programskom paketu Abaqus Standard. Proračun je utemeljen na metodi konačnih elemenata te je provedena dinamička nelinearna analiza konstrukcije. Simulirano je djelovanje potresa čije ubrzanje tla na lokaciji približno odgovara potresu koji je pogodio Zagreb 22.3.2020. godine. Frekvencijski spektar potresnog zapisa odgovara trenutno važećem propisu u Republici Hrvatskoj. Potres je definiran sa tri komponente zapisa ubrzanja, dvije horizontalne i jedna vertikalna. Zbog geometrije i složenosti modela korišteni su volumni konačni elementi.

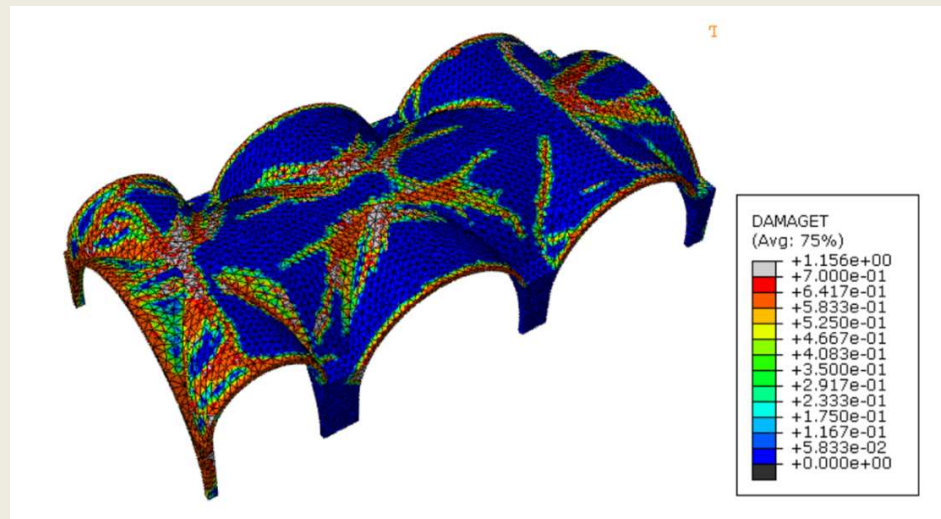
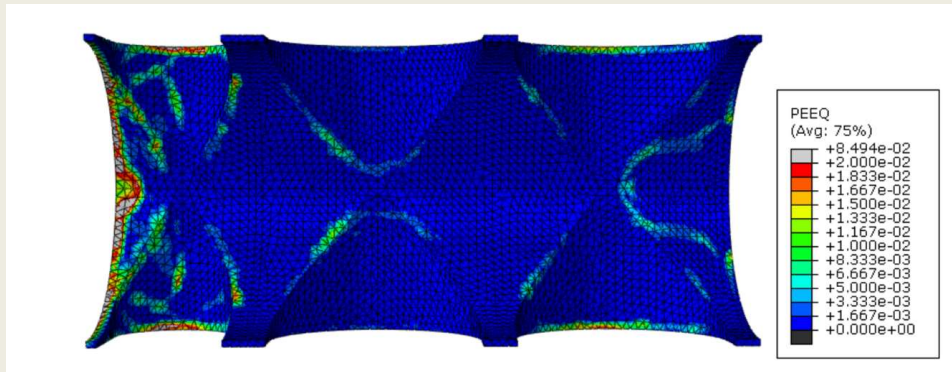
Za simuliranje ponašanje zida korišten je model CDP (engl. Concrete Damage Plasticity) u programskom paketu Abaqus koji dobro opisuje ponašanje zida pri dinamičkom opterećenju.

Odabranim se modelom mogu dovoljno dobro s obzirom na raspoložive podatke opisati mehanizmi otkazivanja konstrukcije pri složenu stanju naprezanja.

Konstitucijski model zida pretpostavlja dva tipa mehanizma sloma, a to su vlačno raspucavanje i drobljenje materijala u tlaku. U tlaku je veza naprezanja i deformacija linearna do određene točke nakon koje slijedi očvršćenje do maksimalnoga naprezanja, a potom slijedi omekšavanje materijala uz neelastične deformacije.

Pri vlačnom naprezanju model slijedi linearnu vezu do pojave pukotine u materijalu. Nakon toga dolazi do omekšavanja s lokalizacijom deformacija u elementu. Ponašanje zida u raspucanom stanju podrazumijeva definiranje poslijekritičnoga naprezanja kao funkcije ovisne o pukotinskim vlačnim deformacijama

NUMERIČKI PRORAČUN (II)



Zbog složenosti i količine rezultata u nastavku su izdvojeni karakteristični rezultati proračuna.

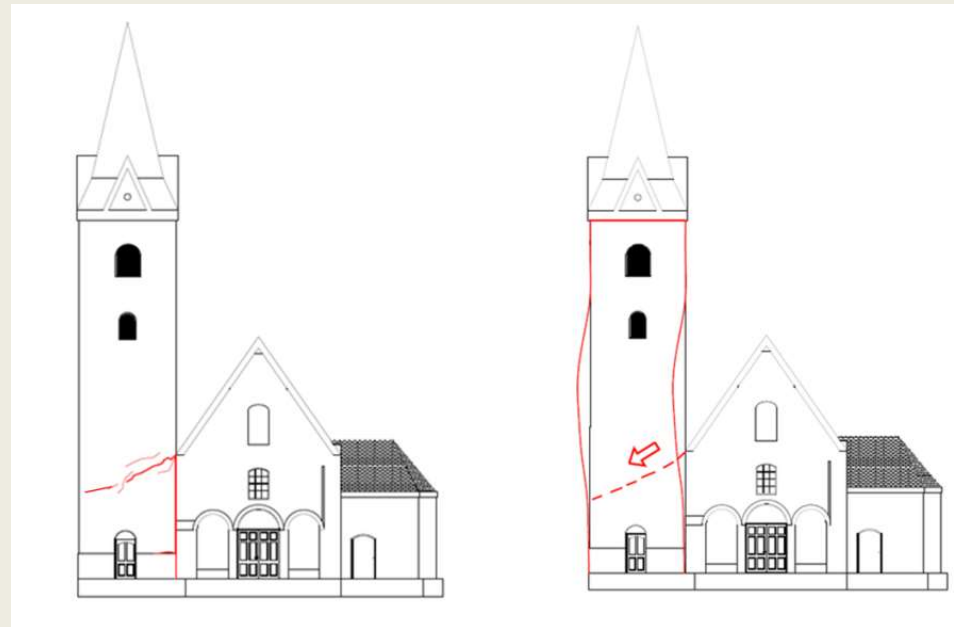
Može se uočiti da numerički model relativno dobro reproducira pukotine koje su se pojavile na tornju i svodu crkve. Treba naglasiti da velik dio pukotina na konstrukciji nije vidljiv zbog fasade ili zato što je u unutrašnjosti zida. Također, numerički su pokazane i mikropukotine koje se potencijalno s vremenom mogu razviti u šire i ozbiljnije pukotine. Pri sljedećim manjim potresima je poseban naglasak na praćenju razvoja tih pukotina.

Područja oštećenja materijala (drobljenje materijala i vlačno raspucavanje) s gornje strane svoda crkve su vizualno teže uočljive zbog samog sastava i slojeva svoda s gornje strane. Međutim, takva oštećenja su opasna jer predstavljaju mjesta propagacije pukotina čak i za stalno opterećenje što vodi na mehanizam otkazivanja konstrukcije svoda koja je vitka i osjetljiva na bilo koje dinamičke i horizontalne utjecaje.

(a) Područje rasprostiranja pukotina s unutrašnje strane svoda crkve prikazanog preko ekvivalentnih plastičnih deformacija

(b) Rasprostiranje oštećenja materijala u svodu zbog vlačnih naprezanja

UTVRĐIVANJE MEHANIZAMA OŠTEĆENJA

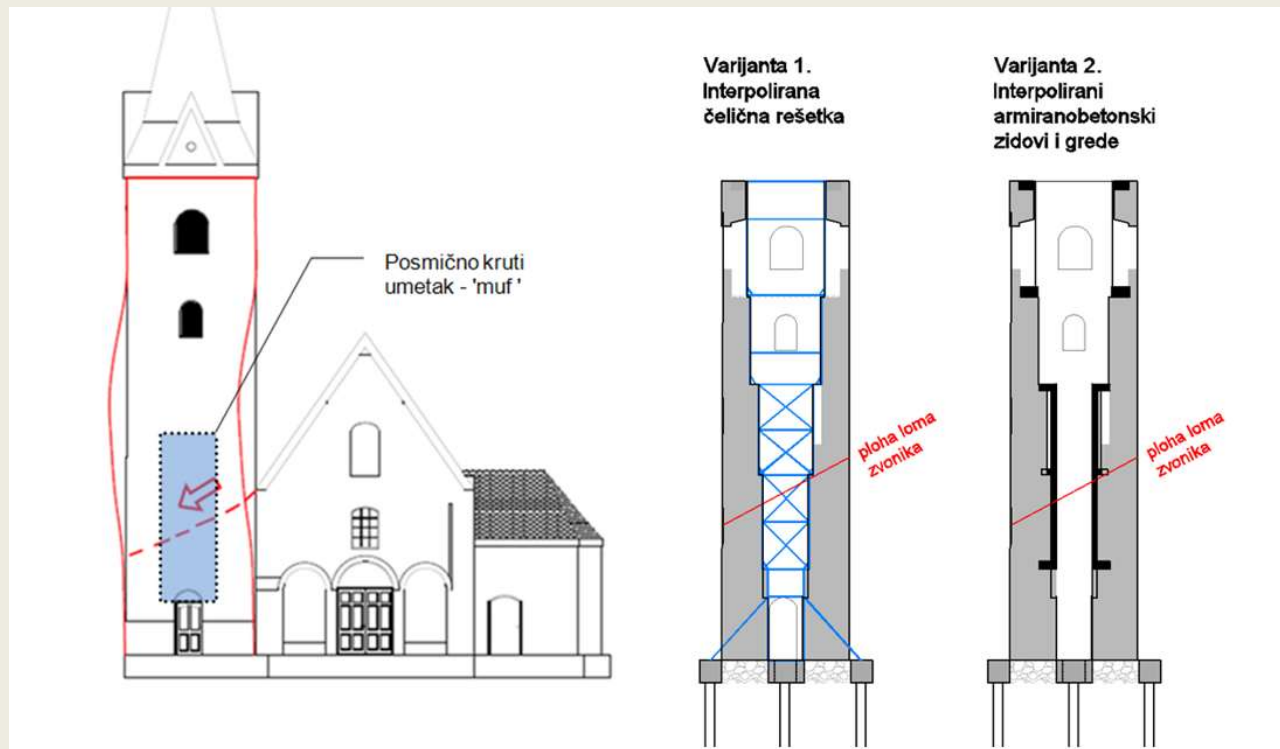


Osnovni mehanizam oštećenja tornja

Popis utvrđenih mehanizama:

- Horizontalni (blago kosi) lom zvonika u visini vijenca crkve. Dominantno vidljiva posljedica potresa je aktivacija klizne plohe na zvoniku uslijed nepovoljnog međudjelovanja crkve i zvonika. Prilikom pregleda dodatno je utvrđeno značajno zakrivljenje vertikalnog brida zvonika na sjevernoj strani koje ukazuje na deformaciju prema prikazanoj shemi
- Lokalni blokovski mehanizmi otkazivanja gornjeg dijela zidova zvonika. Pukotine u gornjem dijelu zvonika ispod vijenca krovništa upućuju na cijeli niz mogućih lokalnih otkazivanja zidova.
- Moguća horizontalna nestabilnost zbog značajnog nedostatka zidova poprečnog smjera (sjever-jug) na ulaznom dijelu crkve. S obzirom na raspored i debljinu zidova i stupova u prizemlju zapadnog pročelja, na tom je mjestu moguća pojava 'mekog' prizemlja.
- Odvajanje zidanog svoda crkve od zidova u oba smjera. Prilikom pregleda unutrašnjosti crkve te svodova s gornje strane, uočeno je odvajanje svodova na mjestima gdje nisu pridržani zategama (sjeverna i južna strana) do širine 15 mm.

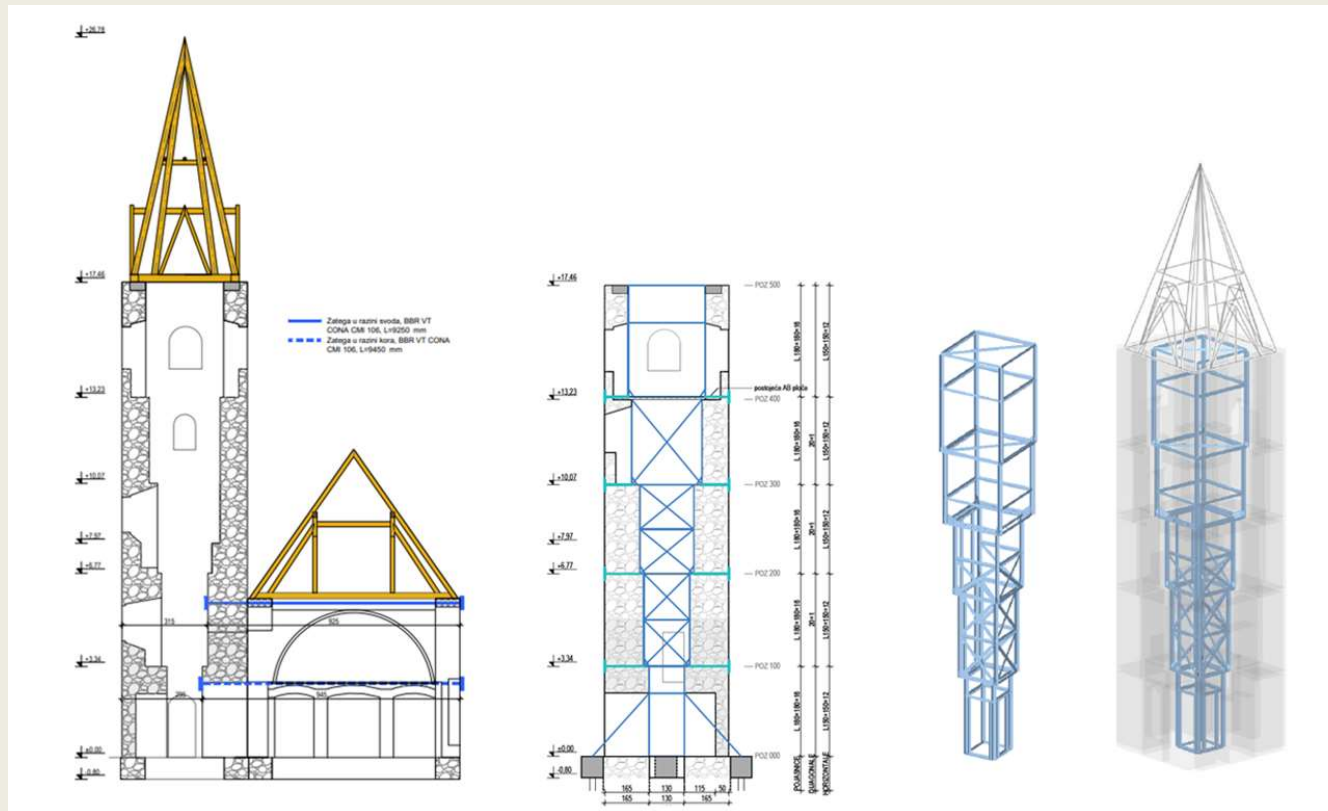
IDEJNA RJEŠENJA OBNOVE TORNJA



Konceptijska rješenja stabilizacije zvonika: interpolirana čelična rešetka ili armiranobetonski zidovi

Stabilizacija zvonika zbog posmičnog sloma u nivou vijenca crkve konceptijski se predviđa interpolacijom nove posmično krute strukture uz unutarnju stijenu zidova zvonika. U statičkom smislu radi se o krutom umetku ('mufu') koji bi trebao preuzeti transfer posmične sile na kritičnom dijelu visine zvonika gdje se utvrdila ploha kosog sloma. S obzirom na važnost za globalnu stabilnost cijele strukture, predloženi koncept je moguće izvesti na dva načina: interpoliranom čeličnom rešetkom diskretno spojenom sidrima s osnovnom zidanom strukturom ili armiranobetonskim umetkom u formi zida jednostrano betoniranog uz unutarnju stijenu u kritičnoj visini zvonika

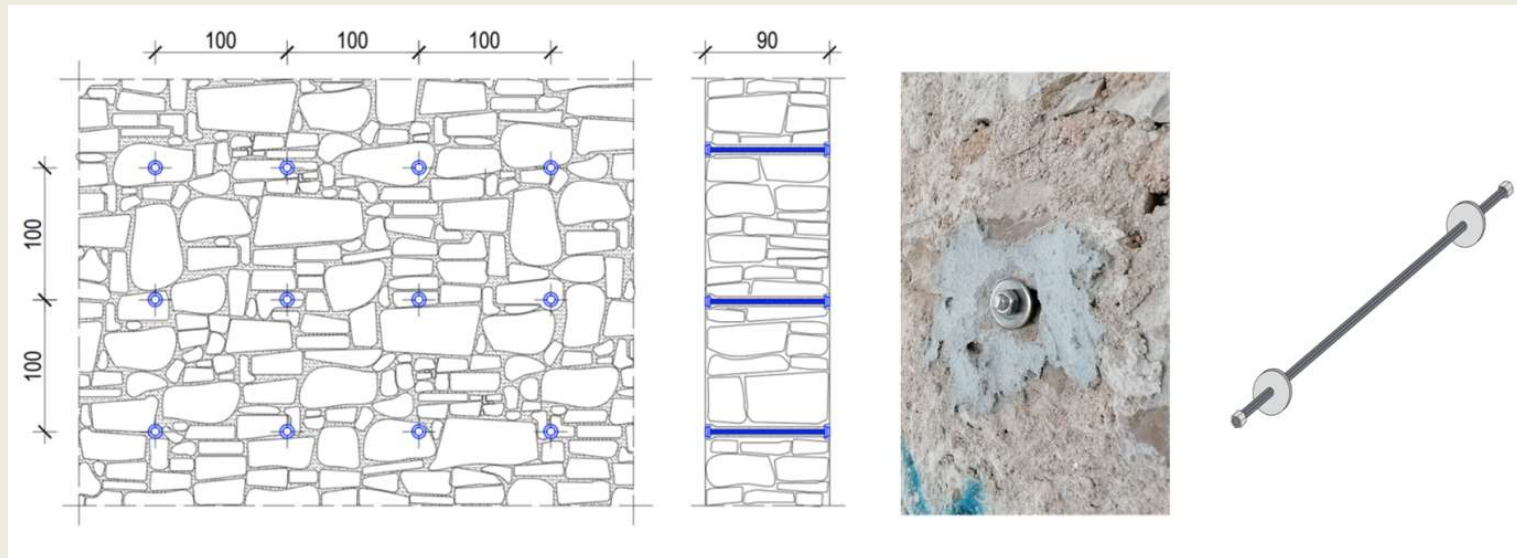
PROJEKT OBNOVE - TORANJ



Odabrano projektno rješenje - stabilizacija zvonika interpoliranom čeličnom konstrukcijom (+ u nivou vijenca crkve su vidljive i zatege za spajanje tornja sa crkvom)

Čelična varijanta iznimno je složena je za ugradnju, ali se radi o reverzibilnom tipu konstrukcije koji ne utječe bitno na izvornu krutost povijesne strukture. Međutim uz vanjske horizontalne obujmice te spojna inox sidra ova čelična nadogradnja višestruko povećava kapacitet protupotesne otpornosti sprječavajući čitav niz prijevremenih lokalnih otkazivanja zidova van ravnine. Čelična struktura imala bi, osim funkcije posmičnog pojačanja na mjestu loma, djelomično preuzela vlačnu komponentu globalne savojne otpornosti zvonika kao konzole i to sa čeličnim vlačnim dijagonalama u dnu stupa. Također je predviđeno pojačanje temelja u vidu roštilja temeljnih traka dodatno stabiliziranih vertikalnim geotehničkim sidrima.

TEHNIKA SPAJANJA ZA SPRJEČAVANJE DELAMINACIJE KAMENOG ZIDA

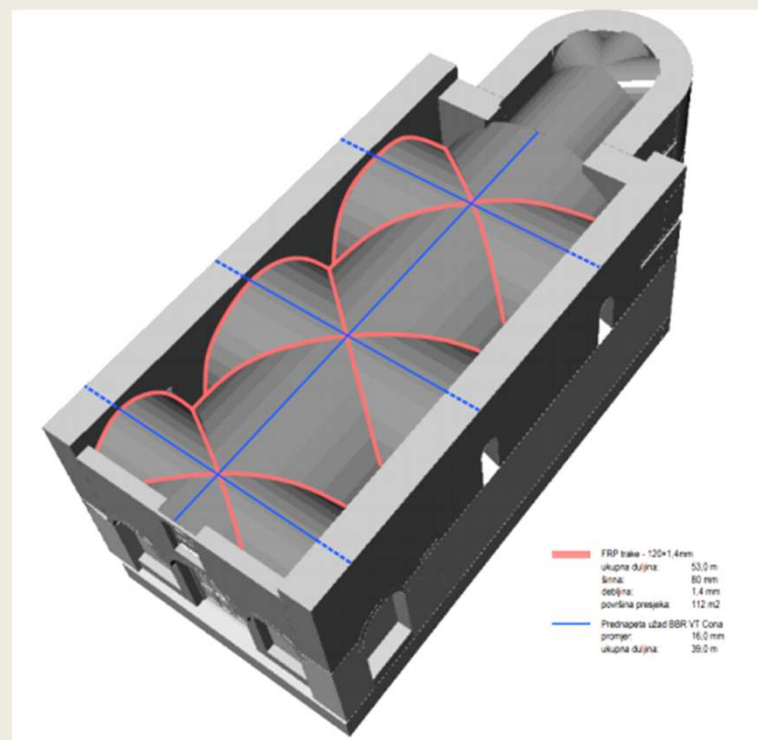
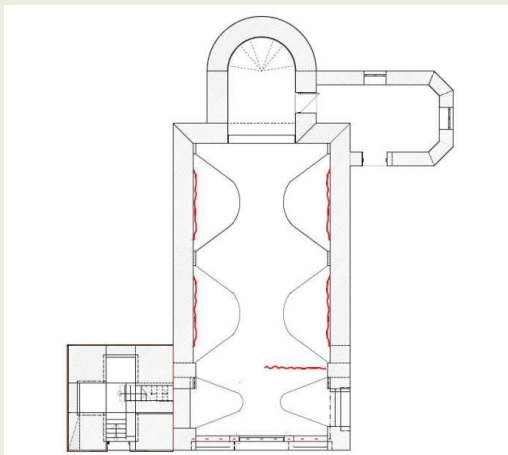


Zbog loše kamene strukture zidanih zidova zvonika utvrđenom istražnim sondažama, te endoskopskim pregledima istraţnih bušotina kroz tijelo zida, predviđaju se mjere povezivanja vanjskih lica zidova inox šipkama sa ciljem sprječavanja delaminacije. Također se u donjem dijelu zidova tornja radi povećanja posmične otpornosti baze predviđa injektiranje.



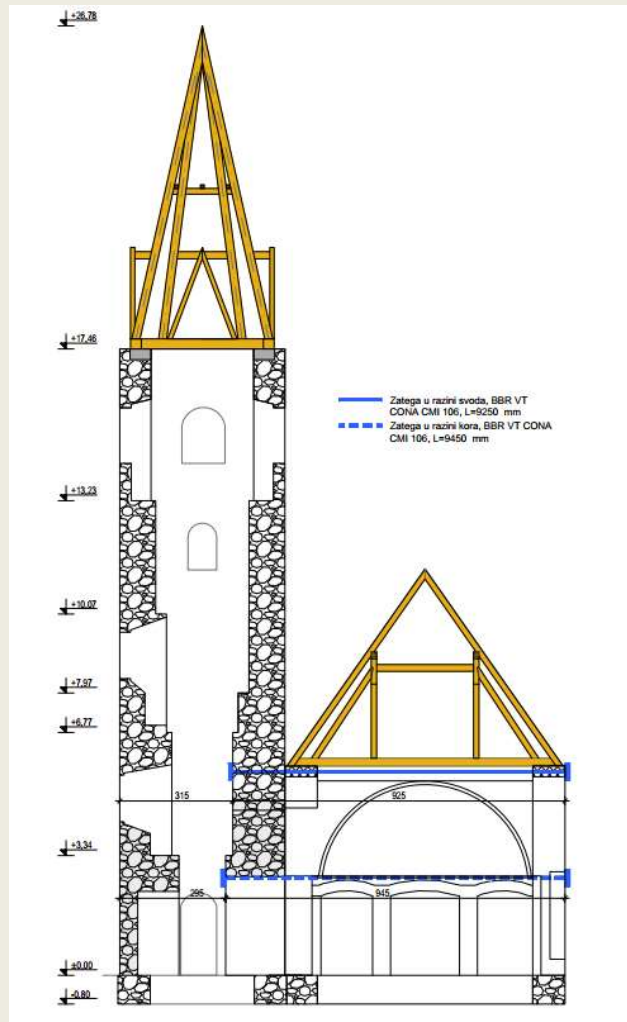
PROJEKT OBNOVE – SVODOVI CRKVE

Iako je postojeći horizontalni serklaž po obodu zidova crkve značajno pridonio dobrom ponašanju strukture u potresu, pa tako i minimalnim oštećenjima svodova, evidentirane pukotine upućuju na početak otvaranja mehanizama oštećenja svoda. Radi se o blagom razdvajanju uzdužnih zidova od svoda čime isti ostaje u nestabilnom polupridržanom stanju koje pri jačim potresima može progresijom rezultirati djelomičnim urušavanjem. Stoga se kao mjera popravka, ali i pojačanja izvode dvije grupe zahvata kojima bi se značajno povećala otpornost te zidane strukture. Kao mjera stabilizacije postavlja se sustav ortogonalnih naknadno prednapetih zatega u oba glavna smjera i to u visini tjemena svodova. Time se smanjuje mogućnost razilaženja glavnih oslonačkih linija. Kao druga grupa zahvata izvodi se linijsko pojačanje presječnih izvodnica križnih svodova ljepljenjem karbonske tkanine nosive u smjeru izvodnica. Oba zahvata spadaju u prihvatljive tehnike revezribilnog tipa kojima se minimalno zadire u osnovnu strukturu i kod kojih se učinkovito može provoditi monitoring i aktivnosti redovnog održavanja



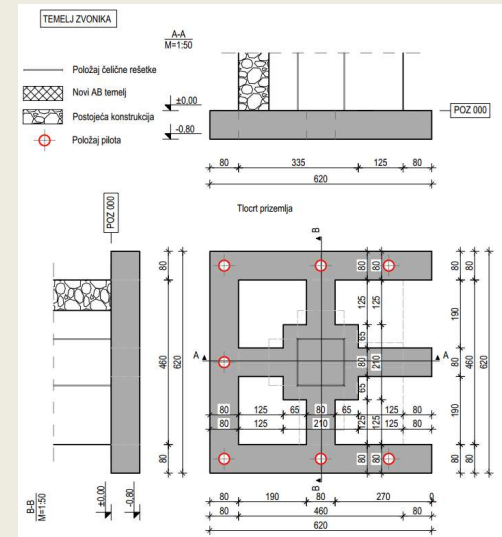
Mjere pojačanja zidanog svoda s gornje strane (plava linija – prednapete čelične zatege i crvena linija – jednosmjerne ljepljene karbonske tkanine)

SPAJANJE DILATACIJA I POJAČANJE TEMELJA

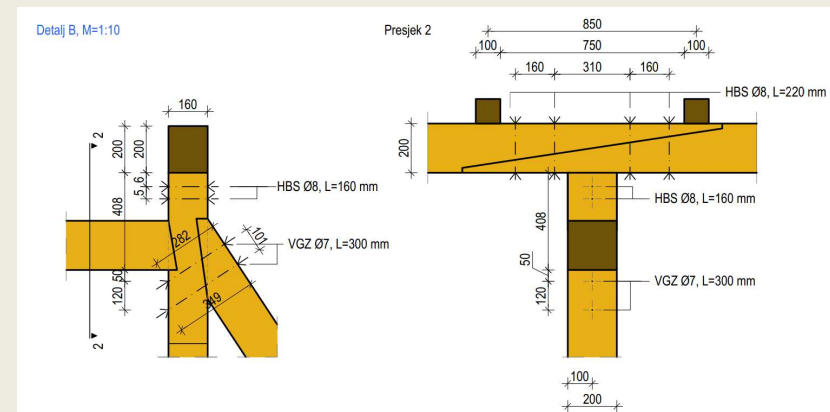
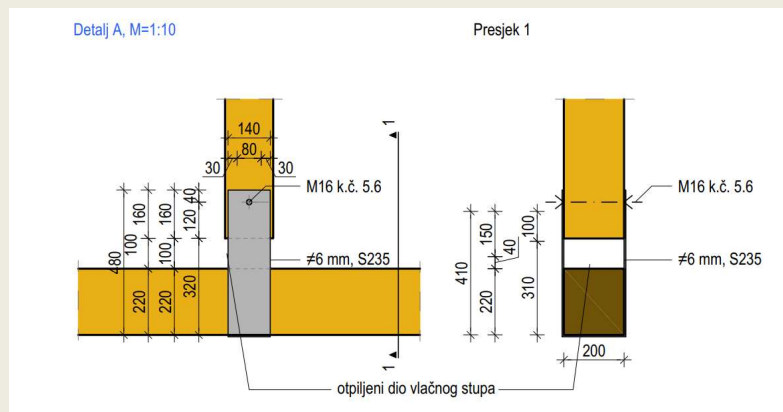
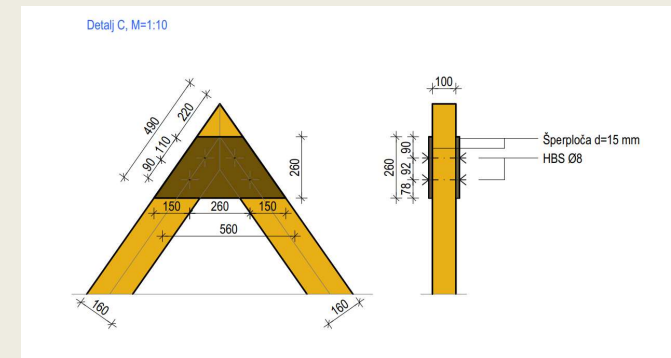
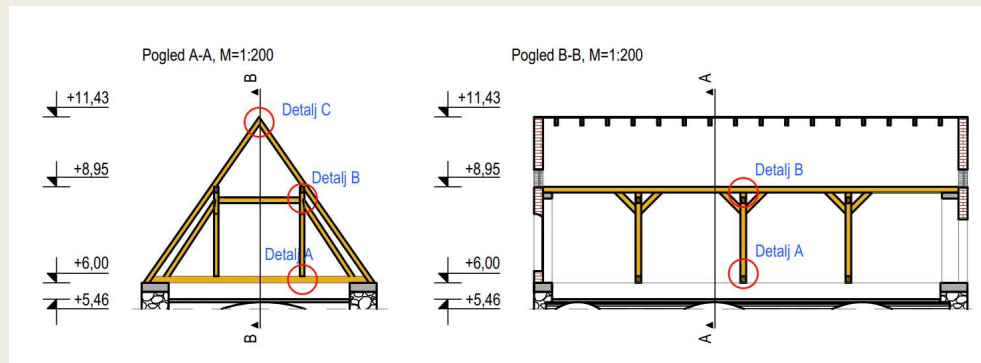


Radi poprečne stabilizacije ulaznog dijela crkve, u razinama kora te potkrovlju predviđa se povezivanje tornja i crkve prednapetim vlačnim čeličnim zategama. Time se osigurava zajedničko djelovanje elemenata crkve i tornja te se crkva, značajno oslabljenih zidova u zapadnom prizemlju, prihvaća za zvonik. S obzirom da se planiranom obnovom ne utječe na masu obaju građevina, te tako niti na temeljno tlo, predmetni zahvat spajanja dilatacija je prihvatljiv i preporučljiv.

Općenito, zahvati seizmičkog spajanja različitih dilatacija moraju imati konsolidirane uvjete u obama temeljnim sustavima, kako ne bi došlo do diferencijalnog slijeganja. Također je pri seizmičkoj analizi potrebno realno pretpostaviti prienos horizontalnih opterećenja na kruće elemente i tako ih i dimenzionirati



LOKALNA POJAČANJA DRVENOG KROVIŠTA



Stanje elemenata:

Prisutne su uzdužne pukotine u gredama i stupovima glavnih nosača- pukotine od isušivanja i volumnog „rada“ drva, iako pukotine bitno ne utječu na kapacitet nosivosti elementa, iste značajno smanjuju trajnost i predstavljaju rizična mjesta biološke zaraze. Vidljive pukotine na mjestu spoja elemenata

Zahvati sanacije i pojačanja- krovšte crkve

Lokalna pojačavanja spojeva vijcima za drvo

Lokalna pojačavanje čeličnim vezicama

ZAKLJUČAK

Zaključno ćemo se osvrnuti na zahtjeve sigurnosti koje do sada nismo spominjali, a nezaobilazna su prepreka u procesu kvalitetne obnove graditeljske baštine. Naime, prema važećoj tehničkoj regulativi za crkvu sv. Mihovila predviđa se cjelovita obnova zgrade pri čemu se proračun potresnog djelovanja provodi za povratni period od 475 godina što je maksimalan zahtjev, kao kod projektiranja nove zgrade. Istovremeno projekt obnove potrebno je izraditi u skladu s posebnim uvjetima koje utvrđuje nadležno tijelo u skladu s propisima kojima se uređuje zaštita i očuvanje kulturnih dobara. Važećom regulativom, dakle, projektant mora predvidjeti tehnička rješenja koja jamče sigurnost ljudi a koja su prihvatljiva u pogledu očuvanja autentičnosti graditeljske baštine, što je gotovo ravno nemogućem. Dosadašnja praksa nema definiran taj vrlo osjetljiv odnos pitanja prilagodbe ili snižavanja kriterija mehaničke otpornost i stabilnosti pojedinoj zaštićenoj građevini. I to je zaključno možda najopasniji i moguće najrazorniji aspekt predstojeće obnove graditeljske baštine.

