Juraj Pojatina, Hrvoje Turkulin

Obnova drvenog krovišta župne crkve Uznesenja Blažene Djevice Marije u Pokupskom

Juraj Pojatina
Studio Arhing d.o.o.
HR – 10000 Zagreb, Ćire Truhelke 49

Hrvoje Turkulin
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije
HR – 10000 Zagreb, Svetošimunska cesta 23

UDK: [[726:272-523.42].025.4(497.521Pokupsko):624
[726:272-523.42].025.1(497.521Pokupsko)"2020":550.34
Stručni rad / Professional paper
Primljeno / Received: 17. 10. 2024.

Ključne riječi: povijesno drveno krovište, konstrukcijska obnova, oštećenja od potresa, ispitivanja drvene konstrukcije, ocjena stanja
Key words: historical wooden roof, structural renovation, earthquake damages, investigations on wooden structure, evaluation of condition

Nakon potresa koji su 2020. godine pogodili Hrvatsku značajno je oštećena crkva Uznesenja Blažene Djevice Marije u Pokupskom. Od oštećenja na crkvi posebice su se isticale široke pukotine i deformacija velike kupole uzrokovane razmicanjem uzdužnih ležajnih ravnina, odnosno naginjanjem obodnih uzdužnih zidova prema van. U sklopu stručnih pregleda nakon potresa, detaljnim je pregledom drvene krovne konstrukcije utvrđeno da ista sudjeluje u nosivom sklopu same kupole te da je dio zajedničkih deformacija također uzrokovao oštećenja u drvenoj konstrukciji. Osim ovoga rijetkog simbiotskog spoja drvenog krovišta i zidane konstrukcije kupole, ispitivanjima je utvrđeno i značajno biološko propadanje ležajnih dijelova drvenih greda, pa se u okviru konstrukcijske obnove crkve pristupilo i konstrukcijskoj obnovi ovoga povijesnog drvenog krovišta. U članku su kronološki prikazane sve aktivnosti u pripremi obnove: od snimanja krovišta, niza ispitivanja i mjerenja drvenih elemenata, proračunskih analiza, projektnih rješenja popravka i pojačanja do specifičnosti izvođenja navedenih zahvata. S obzirom na složenost zahvata, ali i na odgovornost u pristupu, može se zaključiti da je obnova povijesnog drvenog krovišta župne crkve u Pokupskom jedna od najznačajnijih i nadajmo se za budućnost prijelomnih obnova. Svojim je vrhunskim inženjerskim rješenjima postavila standard u području obnove drvenih konstrukcija.

UVOD

Odlukama Ministarstva kulture i medija nakon potresa 2020. godine[1] i kasnije donesenim zakonskim aktima o konstrukcijskim obnovama najznačajnijih pojedinačno zaštićenih nepokretnih kulturnih dobara, a kroz financijsku potporu Fonda solidarnosti Europske unije, Sisačka biskupija pristupila je organizaciji složenog postupka planiranja obnova svojih potresom oštećenih crkvi.

Župna crkva Uznesenja Blažene Djevice Marije (sv. Ladislav), okružena cinktorom s četiri ugaone kule, smještena je u središtu naselja Pokupsko. Izgradnja crkve, pod vodstvom biskupa Jurja Branjuga, započela je 1736., a dovršena 1739 godine.[2] Riječ je o zrelobaroknom rješenju s četverolisnom lađom svođenom kupolastim svodom na koju se nadovezuje pravokutno svetište apsidalnog zaključka. Crkva s arhitektonskog stajališta ima visoku kvalitetu i značaj jer hrvatsko graditeljstvo integrira u tijekove srednjoeuropskog graditeljstva. Prva je u nizu četverolisnih crkava centralnog tipa, i to ne samo na hrvatskom, već i štajerskom području. Crkva je pojedinačno zaštićeno kulturno dobro, upisana je u Registar kulturnih dobara pod oznakom Z-1723.

Tijekom 20. stoljeća u nekoliko su navrata zabilježeni značajniji zahvati na konstrukciji, od čega su najznačajniji nakon potresa 1909. godine te nakon ratnih razaranja 1991. godine, kada je tijekom granatiranja stradao toranj. Krovište iznad crkve pogođeno je u dva navrata, kao i krovište nad svetištem, pri čemu su teška oštećenja zadobili i krovna konstrukcija i kupole. Crkva je potresom 29. 12.

1 MINISTARSTVO KULTURE I MEDIJA, Odluka o provedbi popisa štete na nepokretnim kulturnim dobrima, Odluka o provođenju hitnih mjera zaštite i provedbi popisa štete na nepokretnim kulturnim dobrima, 2020.

2 MINISTARSTVO KULTURE I MEDIJA, Registar kulturnih dobara, Z-1723.

1 a i b Crkva Uznesenja Blažene Djevice Marije u Pokupskom, lijevo nakon potresa, desno pod skelama pri radovima obnove (foto: H. Turkulin, 2021., J. Pojatina, 2024.)

The church of the Assumption of the Blessed Virgin Mary in Pokupsko, left: after the eartquake (photo: H. Turkulin, 2021), right: with the scaffolding during restoration works (photo: J. Pojatina, 2024).

2020. i nizom naknadnih potresa pretrpjela znatna oštećenja te je u brzom pregledu ocijenjena kao neuporabljiva – dobila je tzv. crvenu naljepnicu (sl. 1 a i b).

CRKVA

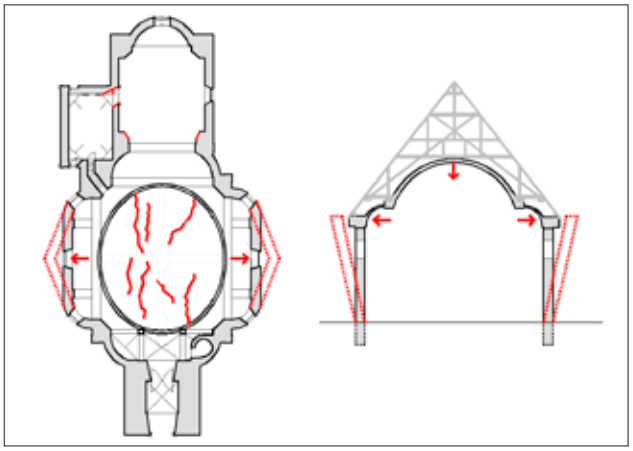
Crkva je arhitektonski izvedena kao jednobrodna, pri čemu se na glavni brod, nadsvođen kupolom oslonjenom na lukove, nastavlja četverokutni oltarni brod s apsidom.[3] Cjelina ima oblik grčkog križa s plitkim zaobljenim krakovima. Na sjevernoj strani oltarnog broda nalazi se sakristija, dok je kor smješten iznad ulaznog, zapadnog dijela građevine. Orijentacija crkve je istok - zapad, pri čemu se zvonik nalazi na zapadnom, ulaznom pročelju, a apsida (svetište) na istoku.

Tlocrtne dimenzije građevine (gledajući najistaknutije točke fasade) iznose 16,90 × 35,80 m. Visina crkve mjerena od kote uređenog terena do sljemena krova iznosi 20,8 m, dok je visina vijenca približno 9,0 m. Vijenac tornja izveden je na visini od 25,3 m, dok je ukupna visina tornja s konstrukcijom kape i križem približno 42,0 m.

Osnovni nosivi sustav crkve za preuzimanje horizontalnih djelovanja izveden je kao neomeđeno ziđe u širini 70-185 cm. Zidana konstrukcija izvedena je od kamena, samo mjestimično s opečnim nabačajem, dok su elementi svođenja (kupole, polukupole i svodovi) mjestimično izvedeni u opeci, pretpostavlja se na mjestu sanacije nakon ratnih razaranja 1991. godine. Prosječna debljina konstrukcije obje kupole iznosi cca. 25 cm. S obzirom da po obodu zidova crkve nije izveden horizontalni serklaž, po izlasku na teren uočen je jasan mehanizam otkazivanja zidova van ravnine (razilaženje uslijed superponiranja horizontalne komponente kupole s horizontalnom silom potresa), pa je hitno saniran izvedbom četiriju čeličnih prednapetih zatega.

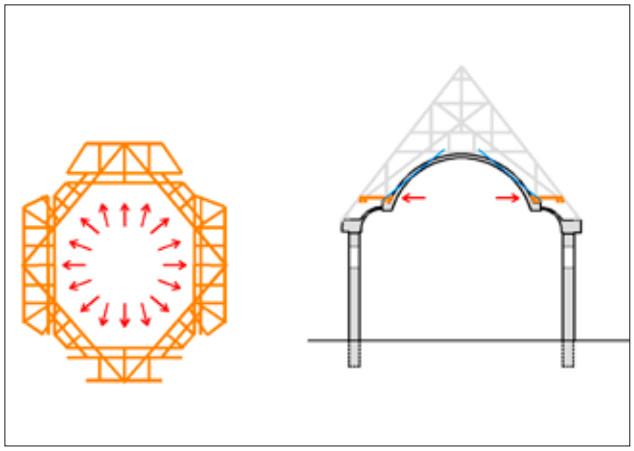
Krovište iznad glavnog broda izvedeno je kao drveno, nagiba 51°, sa srednjim uzdužnim dijelom na dvije vode i stožastim krajevima. Na konstrukciju glavnog broda nastavlja se jednostavno dvostrešno krovište nagiba 50° sa stožastim završetkom nad oltarom i apsidom. Glavno krovište je tlocrtnih dimenzija 19 m × 19 m, a oltarno krovište 12,5 m × 10,5 m. Konstrukcija glavnog krovišta je koncepcijski dvodijelna: kupolu s vanjskim zidovima obodno povezuje i razupire vodoravna, približno 3 m široka rešetka, na čije se krajeve oslanja trokutasta konstrukcija krovišta. Geometrija krova je vrlo složena i predstavlja složeni tip pajantnog krovišta s vlačnim pridržanjima pajanti te križno razuprtim kosnicima. Na dijelu glavnih vezača iznad kupole izvedeno je unutarnje ojačanje povezivanjem donjih pajanti u svojevrstan jaram o koji su bile ovješene željezne zatege usidrene u ziđe kupole. Time su kupola i krovna konstrukcija statički povezani. Manji krov nad oltarom predstavlja isti tip krovišta, ali s manjim brojem pajanti i vlačnih pridržanja. Pokrov je u potpunosti izveden od bakrenog lima.

3 VUČIĆ ŠNEPERGER, BORIS, 2021.



2 Prikaz glavnih pukotina na velikoj kupoli sa shemom glavnog mehanizma oštećenja – razmicanje vanjskih zidova uslijed razupornih sila kupole u poprečnom smjeru. Dodatna pojava ovog mehanizma je i slijeganje kupole prema dolje te ‚povlačenje' krovišta prema dolje (skica: J. Pojatina, 2021.)

Schematic presentation of main cracks at the dome with the diagram of the dominant damaging mechanisms- setting out of the outer walls due to perpendicular forces of the dome in lateral direction. Additional consequence of this mechanism is also the settling down of the dome and dragging of the roof structure downwards (design: J. Pojatina, 2021)



3 a i b Statička shema drvene rešetke kao vlačnog prstena u ležajnoj ravnini velike kupole – izvorno stanje prijenosa opterećenja. Na poprečnom presjeku plavo su označene pozicije izvorno uzidanih zatega (skica: J. Pojatina, 2021.)

Static diagram of the wooden web as a tension ring at the level of the main dome bearing – original condition after the earthquake. Cross section shows in blue the positions of the originally installed strings during building of the dome (design: J. Pojatina, 2021)

Nakon Domovinskog rata provedeno je djelomično saniranje šteta od bombardiranja obnovom dijela kupole,[4] no nemuštim i neprimjerenim tesarskim zahvatima pridržanja i zamjene oštećenih ili izostajućih dijelova drvne konstrukcije, što također treba razmotriti pri projektiranju obnove povijesno-stilske drvene konstrukcije (usp. sl. 8 a i b). Konstrukcija zvonika izvedena je u potpunosti kao kameno zide promjenjive debljine – od 190 cm u podnožju do 80 cm pri vrhu. Zvoniku se pristupa spiralnim stubištem uz kor, dok međukatnu konstrukciju iznad kote vijenca čine drveni podaščani grednici povezani drvenim ljestvama. Konstrukcija nosača zvona izvedena je kao čelična, od kutnika, dok je konstrukcija kape drvena, s pokrovom od bakrenog lima. Po vrhu tornja, ispod drvene konstrukcije kape, izveden je horizontalni armiranobetonski serklaž.

Temelji tijela crkve izvedeni su na dubini od približno 1,3 m, a temelji zvonika na približno 1,2 m, sve mjereno od razine terena. Postojeći temelji izvedeni su od kamena, u širini zidova (bez proširenja). Uz postojeće temelje izveden je drenažni betonski kanal širine 1,2 m.

OŠTEĆENJA NAKON POTRESA, HITNE MJERE I OSNOVNI MEHANIZMI OŠTEĆENJA

Nakon potresa 2020. godine, brzim pregledima projektanta, utvrđene su brojne pukotine i druga oštećenja.[5] Pukotine su posebice bile vidljive zbog činjenice da je crkva iznutra i izvana bila uredno ožbukana te se na takvim podlogama oštećenja jasnije očitavaju. Veći pukotinski sustavi su utvrđeni na velikoj i maloj kupoli s dominantno uzdužnim smjerom rasprostiranja. Širina najvećih pukotina na velikoj kupoli iznosila je čak do 10 cm. Drugi sklop crkve s većim pukotinskim oštećenjima bili su uzdužni zidovi, posebice vrhovi uzdužnih zidova na kojima se pukotine evidentirane u vertikalnom pravcu rasprostiranja, karakteristično za otkazivanje zidova van ravnine. Također su značajne pukotine evidentirane na zvoniku, posebice na višim dijelovima i oko prozora (sl. 2).

U prvim danima nakon potresa pristupilo se izvođenju takozvanih hitnih mjera stabilizacije koje su imale za cilj spriječiti lokalna urušavanja i daljnju propagaciju oštećenja uslijed naknadnih manjih podrhtavanja tla. S obzirom da se prema rasporedu i smjeru pukotina moglo jasno raspoznati osnovni mehanizam oštećivanja kupole, kao hitne mjere u cilju stabilizacije izvedene su četiri čelične zatege u poprečnom smjeru u nivou pete kupole. Zatege su imale funkciju sprječavanja daljnjeg razmicanja ležajnih uzdužnih ravnina, što je prethodno bilo utvrđeno kao osnovni mehanizam oštećenja. Osim zatega, izvedena su lokalna podupiranja tjemenih ploha glavnih četiriju lukova glavnog broda (sl. 3 a i b).

OCJENA STANJA

Kao prva aktivnost u planiranju konstrukcijske obnove izrađena je arhitektonska snimka postojećeg stanja, kako crkve tako i krovišta. Snimku je izradila tvrtka Tablinum d.o.o. iz Zagreba tehnikom geodetskog snimanja tzv. oblaka

4 PEDIŠIĆ, ANĐELKO, 2014., 193-194.

5 POJATINA, JURAJ et al., 2021.

4 Demonstracija posljedica dugoročnih i potresnih pomaka krova (pogled s bočnoga svoda ispod drvene rešetke; kamera je bila nivelirana). Obrubna greda kupole savijena je prema dolje i na van, stoga je rešetka „potonula" prema kupoli te se izmaknula prema nakošenom ziđu (foto H. Turkulin, 2021.)

Demonstration of the consequences of years-long and earthquake-caused movements of the roof (the view from the lateral vault to the lower side of the wooden web, the camera was levelled). The restraining beam of the dome is bent towards out and down causing the web to „sink" with the dome and slide towards the exterior, inclined wall (photo: H Turkulin, 2021)

točaka iz kojeg su se potom izrađivali 2D nacrti.[6] Osim urednih nacrta, koji inženjerima služe pri ocjeni stanja i projektiranju intervencija, tehnika geodetskog snimanja omogućava projektantima direktno očitavanje geometrijskih pomaka, deformacija, progiba. Tako je ova snimka prva evidentirala deformaciju kupole i krovišta, kao i njihov zajednički pomak. Kakogod, geodetsko snimanje oblakom točaka često ne može registrirati neke detalje krovne konstrukcije (stanje na ležajevima, „skriveni" su, tj. kameri nevidljivi ili zaklonjeni elementi), pa je detaljni pregled neophodan za sve rizične pojave na drvenoj konstrukciji.

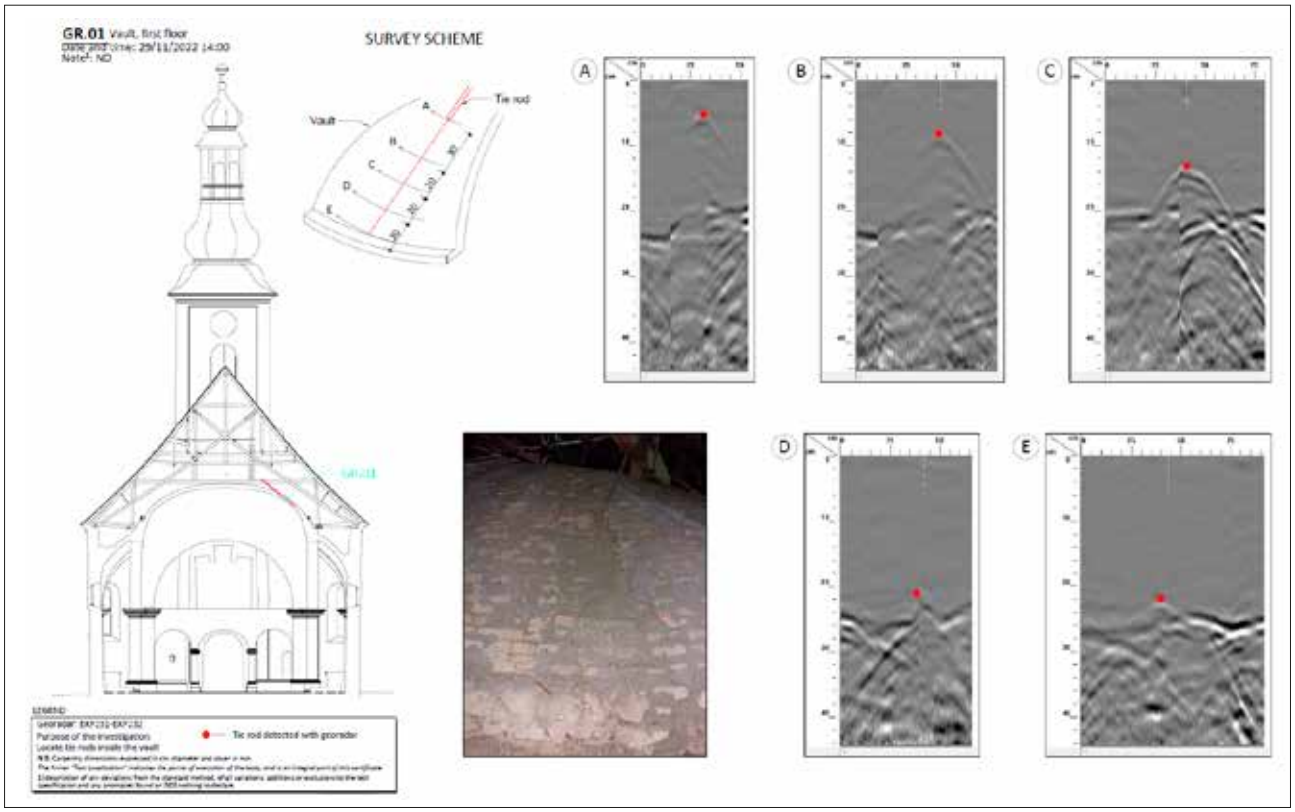
Imajući u vidu posebnosti drvenih konstrukcija kao što su: organsko porijeklo materijala, uporaba tradicijskih spojeva (bez korištenja metalnih spojnih sredstava), utjecaj mikrobiologije (mogućnost zaraze drva), utjecaj vode u materijalu i okolišu i ostalo, evidentno je da se radi o složenoj problematici te da je nužan multidisciplinaran pristup, analiza i obnova. Zato je pri ocjeni stanja važna suradnja konstruktora, arhitekta, konzervatora, ali i drvnotehnološkog inženjera, specijaliziranog za drvo u graditeljstvu. Preliminarni stručni pregled samog krovišta proveli su Juraj Pojatina, dipl. ing. građ. sa suradnicima iz tvrtke Studio Arhing d.o.o., koji je ujedno bio i projektant konstrukcijske obnove, te grupa suradnika s Fakulteta šumarstva i drvne tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, predvođena prof. dr. sc. Hrvojem Turkulinom. Stručni pregled povijesne drvene konstrukcije standardizirana je procedura definirana normom HRN EN 17121 (2019.).[7] Norma definira dvije faze pregleda: preliminarnu i detaljnu, koja pak sadrži niz mjerenja i ispitivanja.

Paralelno s ispitivanjima provedena je preliminarna proračunska analiza te iznimno složene drvene konstrukcije. Analiza je potvrdila urednost izvornoga nosivog sustava, njegov jasan prijenos opterećenja, ali i redundantnost u nosivosti i dimenzijama većine drvenih elemenata krovišta, što je također jedna od specifičnosti povijesnih drvenih konstrukcija. Proračunska analiza provodi se i kako bi se točnije mogli sagledati utjecaji u pojedinom čvoru rešetke te kasnije, u detaljnom pregledu, ocijeniti funkcionalnost spoja.

Međutim, važno je istaknuti da jednostavne proračunske analize drvene krovne konstrukcije daju samo orijentaciju za dio utjecaja koji se nalaze u zatečenoj konstrukciji. Već djelomično spomenuta simbiotska pozicija drvenog krovišta, kao i potporne strukture zidanoj kupoli nalažu jednu zahtjevniju analizu i pristup. Prema utvrđenim spojnim detaljima i nađenim izvornim čeličnim zategama, uzidanim u tijelo kupole, može se pretpostaviti da je kupola zidana nakon što je krovište izvedeno te da je drvena horizontalna rešetka u ležajnoj ravnini kupole služila kao razuporni vlačni prsten. Deformacije utvrđene preko oblaka točaka također govore u prilog toj tvrdnji. Tijekom vremena, uslijed biološke razgradnje uzidanih dijelova drvenih greda i popuštanja tesarskih spojeva, drvena horizontalna konstrukcija

6 VUČIĆ ŠNEPERGER, BORIS, 2021.

7 HRN EN 17121, Povijesne drvene konstrukcije: smjernice za ocjenjivanje, 2021.



5 Grafički dio izvještaja s georadarskog mjerenja uzidanih čeličnih zatega u velikoj kupoli (izradio: F. Casarin, Expin S.l.r., 2022.)

Graphic report of the measurements with the ground penetrating radar showing the iron strings built into the dome (report: F. Casarin, Expin S.l.r., 2022)

popuštala je i u funkciji prihvaćanja razupornih sila kupole te je neminovno došlo do savijanja obrubnih greda kupole na van i razmicanja ležajeva (sl. 4), koji su potom gurali zidove prema van. Ovakve kompleksne analize neizbježne su pri svakom inženjerskom sagledavanju složene problematike povijesnih krovišta, pa tako i ovog.

Jedna od specifičnosti krovišta crkve u Pokupskom su i uzidane čelične zatege koje prolaze krov zidanu plohu svoda tangirajući unutarnju plohu, a prihvaćaju se s donje strane za vanjski zid u liniji rubnog pilastra, a s gornje strane za kosu veznu gredu glavnog nosača krovišta. Tako je krovište na jedinstven način poslužilo kao trajni stabilizacijski element u sklopu nosivosti velike kupole. U svrhu utvrđivanja točne pozicije uzidanih zatega, talijanski ispitni laboratorij za povijesne konstrukcije Expin S.r.l. iz Padove proveo je snimanje georadarom (sl. 5).[8] Ovdje se posebice želi naglasiti da bilo kakvo numeričko modeliranje zidane konstrukcije crkve s kupolom bez čeličnih zatega (kojih je samo u gornjem dijelu zidanog sklopa utvrđeno 12 komada) predstavlja jalov posao, bez ikakve stvarne korelacije s građevinom na terenu.

U globalnom kontekstu nelinearnom statičkom analizom unutar Elaborata ocjene stanja[9] određena je globalna otpornost građevine. Ista je iznosila 36% aktualnom normom zahtijevane potresne otpornosti (HRN EN 1998).[10] S obzirom da je predmetna građevina znatno oštećena u potresu i klasificirana u razred važnosti III (zgrade čija je potresna otpornost važna s obzirom na posljedice vezane s rušenjem), prema Zakonu o obnovi[11] predviđena je cjelovita obnova zgrade (Razina 3). Odabirom Razine 3 potrebno je bilo provesti pojačanje građevinske konstrukcije kojom se postiže mehanička otpornost i stabilnost na potresno djelovanje, i to za poredbenu vjerojatnost premašaja od 20% u 50 godina (povratni period 225 godina) za granično stanje znatnog oštećenja, sukladno Tehničkom propisu o izmjeni i dopunama Tehničkog propisa za građevinske konstrukcije.[12]

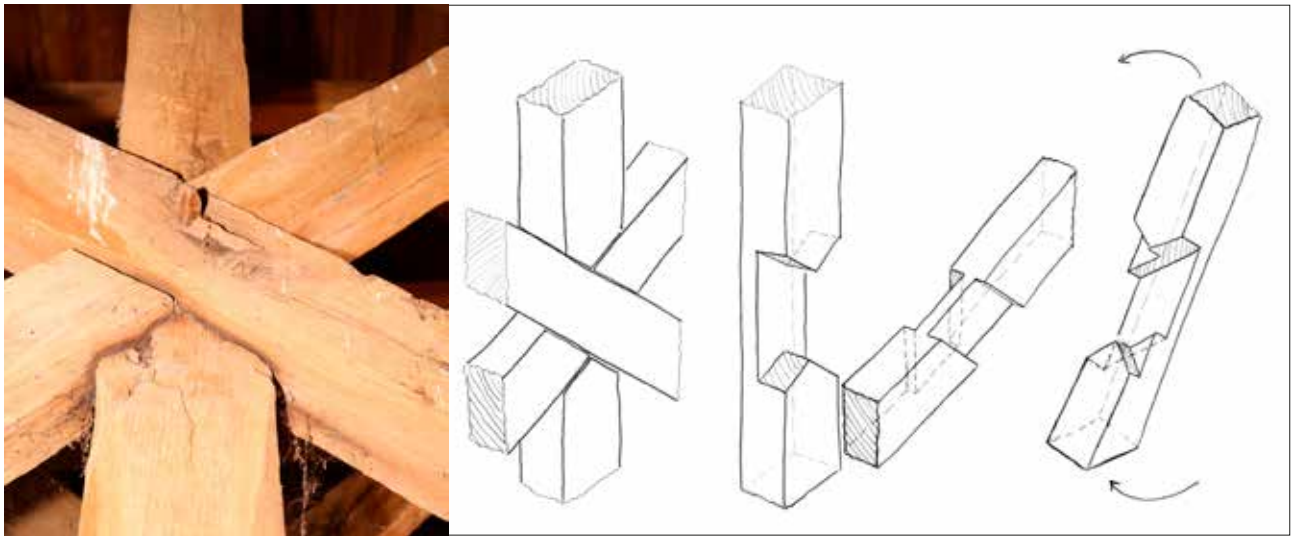
8 CASARIN et al., 2022.

9 POJATINA et al., 2023.

10 HRN EN 1998., Eurokod 8: protupotresno projektiranje

11 Zakon o obnovi zgrada oštećenih potresom na području Grada Zagreba, Krapinsko-zagorske županije, Zagrebačke županije, Sisačko-moslavačke županije i Karlovačke županije, Narodne novine, NN 102/20, 10/21, 117/21); Zakon o obnovi zgrada oštećenih potresom na području Grada Zagreba, Krapinsko-zagorske županije, Zagrebačke županije, Sisačko-moslavačke županije i Karlovačke županije (NN 21/23).

12 Tehnički propis za građevinske konstrukcije, NN 75/20, 2020.



6 a i b Spoj križnog šesterokrakog sastavljanja vrijedan je tehnički detalj i tesarski izazov na ovoj konstrukciji. Iako su grede reducirane na samo 1/3 presjeka, u čvrstom sklopu predstavljaju puni presjek elemenata. Spoj, osiguran samo drvenim trnom, malo je razdvojen, što se može popraviti jednostavnim tesarskim zahvatom i osiguranjem skrivenim metalnim vijcima (foto i skica: H. Turkulin, 2021.)

Three-pieces cross joint (one-third lapped) is a remarkable technical detail and carpenter's challenge in this roof structure. Although the pieces are reduced to only 1/3 of the cross section, jointed together make the full cross section area of each piece. The joint is fixed with only one wooden dowel, and exhibits some detachment, which can be repaired by a simple carpentry work and by additional fixing with screws (sunk heads covered with wooden stoppers)

ISPITIVANJA DRVENE KONSTRUKCIJE

Mjerenja i ispitivanja drva i krovne konstrukcije imaju zadatak pružiti projektantu, ali i investitoru, konzervatorima, arhitektima, pa čak i izvođačima, podatke i saznanja potrebna im za odluke o mjerama sanacije, zaštite i konzervacije krovne konstrukcije. Nastojalo se primijeniti što manje invazivne metode mjerenja i izuzimanja uzoraka za laboratorijska ispitivanja, a prijedlozima rješenja – u dogovoru s ostalim sudionicima – nastoji se očuvati konstrukciju u što je moguće izvornijem obliku (čim manje vidljivi zamjenski dijelovi i ojačanja, primjena iste vrste drva i stilskih onodobnih spojeva itd.).

Vizualna ocjena i perkusija već pri preliminarnom pregledu daju indicije o stanju drva (čvrstoći i zdravosti), a klimatski uvjeti i temperatura površine drva ukazuju na moguća oslabljenja drva. Presslerovim krunskim svrdlom se izbuše 12 mm široki štapići koji služe za laboratorijsko određivanje gustoće i sadržaja vode, a nakon njihove obrade i preparacije rabe se za makrografiju i mikroskopiju (širina goda, učešće kasnog drva, biološka zdravost). Sadržaj vode na mnogim se mjestima *in situ* mjeri elektrootpornim vlagomjerom, a dobiveni iznos i gradijent po debljini važni su za projektiranje nosivosti i predviđanje biološke postojanosti. Otpor prodiranju igle rezistografa naznačava strukturu drva i moguća mjesta oslabljenja (pukotine, biološko oštećenje itd.).[13] Skoro neinvazivne metode (akustičko-vibracijska metoda, čvrstoća izvlačenja vijaka) manje su pouzdane, ali služe za potvrdu glavnih rezultata te omogućuju brz i sveobuhvatan pregled konstrukcije.

Krovište je izrađeno od grubo tesanih hrastovih trupaca, uglavnom s uklopljenim srcem, jamačno od lokalno pristupačne sirovine, tako da je kvalitetu drva teško jednoznačno deklarirati. Drvo je natprosječne gustoće (>730 kg/m^3, literaturna vrijednost pri 12 % vode je 0,65-0,76 kg/m^3),[14] pa se i mjestimične pogreške, koje se pri standardiziranom klasiranju ne bi dopustile (urasle velike kvrge, dugačke pukotine), mogu tolerirati dokle god okolni elementi svojom velikom čvrstoćom mogu preuzimati opterećenja. Dominantna klasa kvalitete, prema normi za klasiranje kvalitete DIN 4074,[15] deklarirana je kao S 10, ali se za proračun preporučilo smanjiti korisni poprečni presjek za izjedene zone bjeljike (zbog napada kukaca i nepreciznosti tesanja) i po 1 cm sa svake strane. Prosječni sadržaj vode s najvećim udjelom vrijednosti između 10,5 i 12,0 %, a s minimalnim gradijentom vlage po presjeku, svrstava drvo u razred uporabe 2 prema HRN EN 1995-1[16] (osim biološki oštećenih dijelova). Time se konstrukcija može računati s razredom nosivosti najmanje D30 prema HRN EN 338, a naznačuje da je drvo već dulje vremena u uvjetima natkritog, stabilno kondicioniranog interijera te se ne očekuje dalji razvoj naprezanja po presjeku elemenata (pojava pukotina, deformacija ili biološke zaraze u prostoru). Neki elementi krovišta su izvijeni (dugački rogovi i kosnici) uslijed dugotrajnog

13 RINN et al. Resistograph and density charts, 1996.

14 *Eigenschaften und Kenngrössen von Holzarten*, 1997., 30.

15 DIN 4074, Klassifizierung von Laubhölzer, 2008.

16 HRN EN 1995-1, 2013, Eurokod 5, Projektiranje drvenih konstrukcija

7 a i b Tamo gdje su spojevi potpuno otvoreni ranijim djelovanjima sila (lijevo) ili potresom (desno), potrebno je zamijeniti cjelokupne elemente ili njihove dijelove do spoja (foto: H. Turkulin, 2021.)

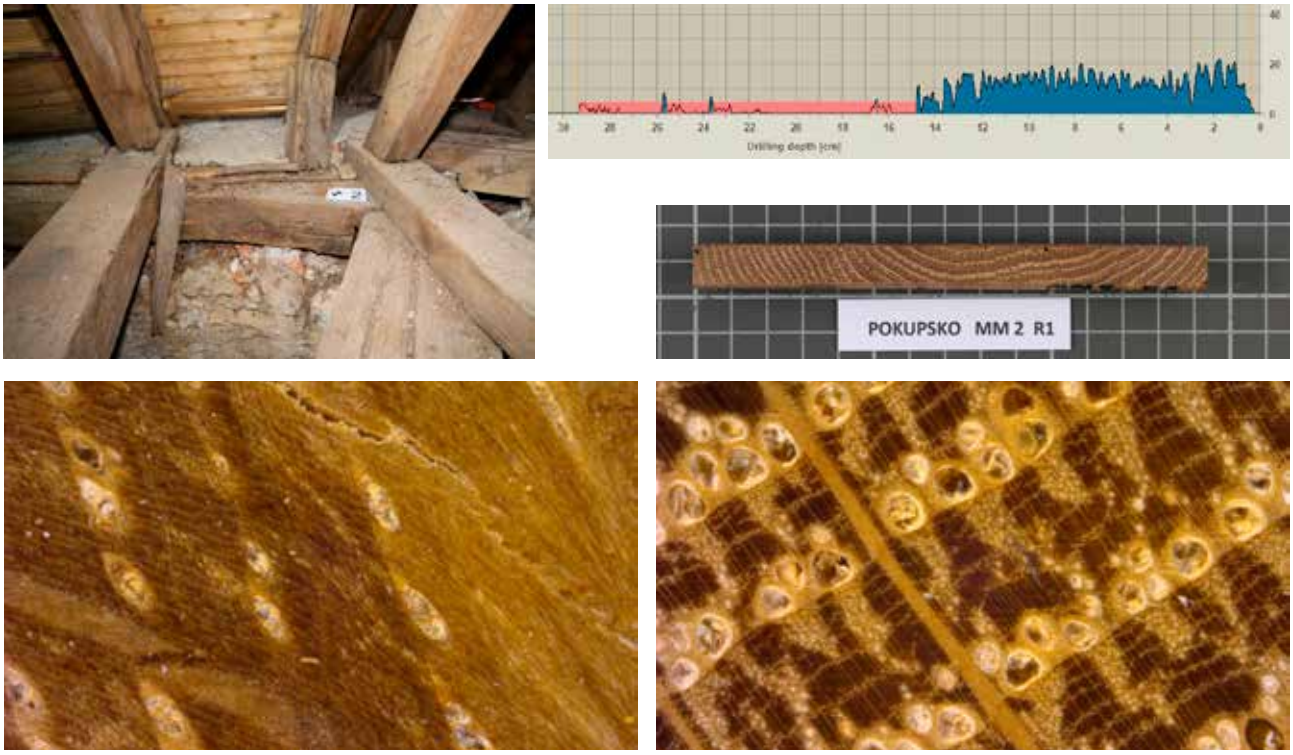
In places the joints are quasi completely opened by former actions of forces (left) or by truss deformations during the earthquake (right). In such cases the end parts or complete elements should be replaces (photo: H. Turkulin, 2021)

8 a i b. Na mjestima oštećenja krovišta bombardiranjem načinjeni su zahvati potpuno neadekvatne sanacije, kako s povijesno-tehničkog stajališta, tako i s aspekta zahtjeva pravilne tesarske tehnike i kvalitete izrade. Vidljiva su privremena podupiranja, neispravno izvedeni spojevi i priručno osiguranje skobama i metalnim vezicama. Projektom sanacije ovakve elemente treba zamijeniti, a dijelove krova obnoviti adekvatnim drvenim dijelovima i spojevima (foto: H. Turkulin, 2021.)

In places where the bombs hit the roof during the Homeland war the remedial measures were executed completely inadequately as from the historical-technical point, as from the correct carpenter's techniques and craftmanship. Figures show temporary stud supports, incorrect joints and short-lasting fixing of the joints with iron clips or straps. All such elements should be replaced within the project of repair, and damaged parts of the roof reconstructed with adequate wooden elements and joints (photo: H. Turkulin, 2021)

puzanja drva pri godišnjim izmjenama opterećenja i vlage, ali se to ne preporučuje korigirati sve dok proračun čvrstoće i funkcionalnost spojeva osiguravaju globalnu održanost konstrukcije.

Ocjena i analiza spojeva ključna je za evaluaciju stanja krovišta. Norma HRN EN 17121 (2019) pokazuje da se povijesni tesarski spojevi mogu smatrati adekvatnima za opterećenja kojima su izloženi, osim ako ne pokazuju pogreške ili lošu izradu. Praktično, cijelo krovište izrađeno je bez metalnih spajala (osim spoja pajanti krajnjih glavnih vezača i stožastih krovišta), generalno spojevima križnog prijeklopa ili kutnog spajanja učepljenjima. Svi su takvi spojevi osigurani drvenim klinovima, ali su ti klinovi na mnogim mjestima poispadali zbog utezanja drva ili su pukli uslijed smičnih sila tijekom dugogodišnjih gibanja. Ponegdje je, zbog izvlačenja spojeva, potrebno umetnuti nove elemente (sl. 7a i b), ali se većina tih spojeva može pritegnuti, osigurati novim klinovima, odnosno dodatno pričvrstiti vijcima s upuštenim glavama i drvenim čepovima kako bi se zadržao izvorni izgled spoja i poboljšala njegova



9 a, b, c, d i e Dvostruka nazidnica, od kojih je vanjska naknadno zabetonirana. To je dodatno potaknulo njezinu trulež, kao što rezistogram pokazuje normalni otpor probojem kroz unutarnju, i izostanak otpora (narančasto) kroz trulo drvo vanjske nazidnice. Mikrografije uzoraka pokazuju zdravu strukturu poprečnog presjeka unutarnje nazidnice i potpuno razorenu strukturu uzidanog drva (foto H. Turkulin (2021.), rezistogram i mikrografije LDG (2020.)

Doubled wall-top beam, the outer beam being recently embedded in concrete, which additionally increased the bio-hazard and rot. The core-drilling diagram shows normal resistance during drilling through the interior beam, and complete lack of resistance (orange) through the rotten wood of the exterior top beam. The micrographs show typical anatomical structure on the cross-section of the interior beam, and completely biodegraded mass of the concreted wood (photo H. Turkulin (2021), resistogram and micrographs by LDG (2020)

stabilnost (sl. 6 a). Primjer rijetkoga spoja šesterokrakoga križnog prijeklopa na spoju stupa visulje pajanti i kosnika predstavlja vrijedno i zanimljivo onodobno tehničko rješenje (sl. 6 b).

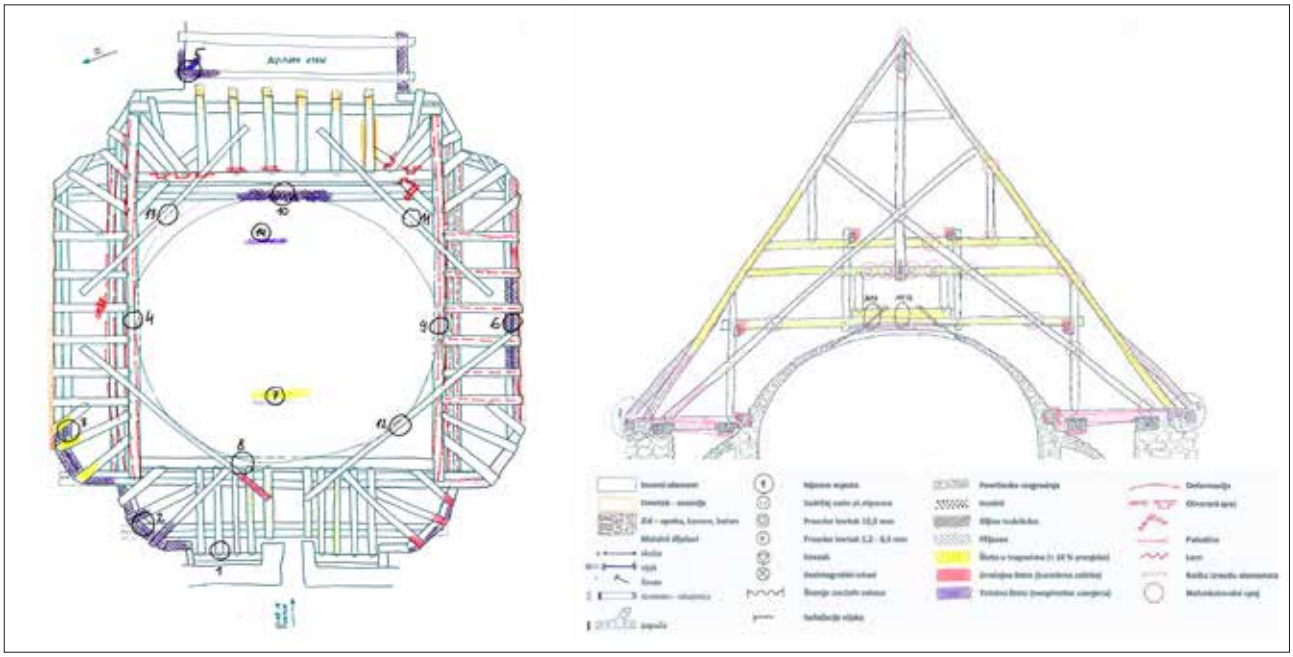
Najveći i najčešći problem trajnosti drvenih dijelova u povijesnim građevinama predstavlja stanje drva na ležajevima i u zidnim usadima. Oni su trajno podložni vlaženju i slabom isušivanju jer su nazidnice na povijesnim građevinama bile uzidane (najčešće opekom) na vrh vanjskih zidova (sl. 9 a). Slaba prozračenost kutnoga prostora krovišta, te moguće češće prokišnjavanje (pogotovo u uvalama pokrova), doveli su mjestimično do razvoja gljiva truležnica. Na crkvi je ta pojava redovita na ležajevima, ali zbog prirodne postojanosti hrastovine i ventilacije krovišta, trulež je ograničena poglavito na nazidnice, krajeve greda rešetke te usade kosnika i rogova (sl. 9 b, c, d i e). U prostoru se nađe drvo oštećeno drvojednim kukcima, ali je to ograničeno na zone bjeljike, u plitkom opsegu, pa se takva šteta može smatrati zanemarivom. Tamo gdje je opseg zaraze intenzivniji, međutim, elementi su označeni za popravak ili izmjenu. Završni rezultat ispitivanja drva i konstrukcije je mapiranje nađenih i zabilježenih oštećenja, deformacija, lomova ili pomaka. Na slikama (sl. 10 a i b) je informativno prikazan način mapiranja u Pokupskom koji omogućuje detaljno planiranje radova sanacije ili rekonstrukcije.[17]

Zaključno se u ocjeni stanja daju smjernice za popravak i pojačanje drvene krovne konstrukcije koje su se ovdje prije svega odnosile na ležajne i uzidane dijelove drvenih greda, prvenstveno u nivou donje horizontalne rešetke (sl. 10 a i b), ali i drugih ležajnih dijelova. Na 3D ilustraciji modela krovišta (sl. 11 a i b) crvenom su bojom označeni dijelovi krovišta za zamjenu. Spojeve (prijeklope, učeljenja) potrebno je po potrebi pritegnuti te osigurati novim drvenim trnovima i dodatno čeličnim vijcima. Sve ranije neadekvatne intervencije potrebno je otkloniti te umjesto tih dijelova (koso podupirući stupovi, daskama obijeni rogovi ili kosnici) nanovo izvesti kvalitetnom građom.

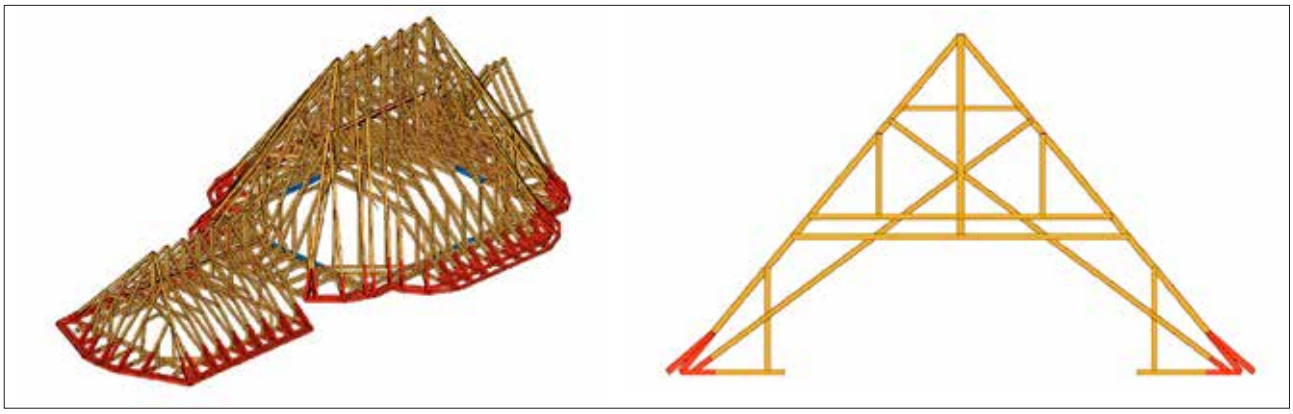
PROJEKTNA RJEŠENJA POPRAVKA I POJAČANJA

Uzimajući u obzir smjernice definirane u Elaboratu ocjene stanja, projekt konstrukcijske obnove odredio je glavni obuhvat zahvata: u tavanskom sklopu sastoji se od zahvata pojačanja i rekonstrukcije koji obuhvaćaju zamjenu dijelova

17 TURKULIN, HRVOJE; SEDLAR, TOMISLAV, 2021.



10 a i b 3D Mapiranje rezultata detaljnog pregleda ispitivanja drva i konstrukcije (skice izradio H. Turkulin, 2021)
Mapping the results from in-situ timber assessment (design: H. Turkulin, 2021)



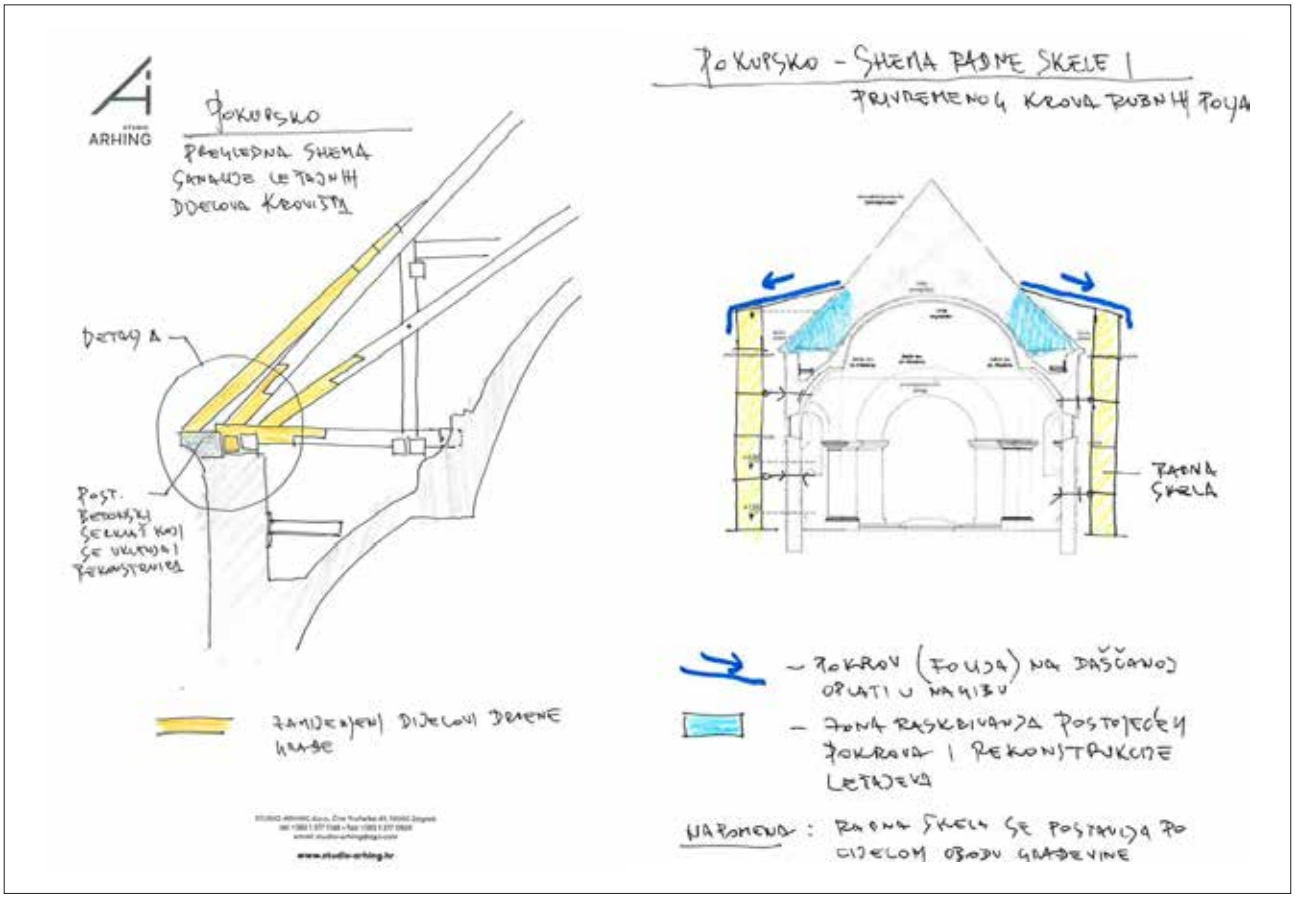
11 a i b 3D prikaz modela krovišta s označenim dijelovima presjeka za zamjenu (model izradili: J. Pojatina i T. Horvat, Studio Arhing, 2022.)
3D presentation of the roof model with marked parts for replacements (design: J. Pojatina i T. Horvat, Studio Arhing, 2022.)

ili kompletnih elemenata krovne konstrukcije, sanaciju spojeva, tj. pritezanje i osiguranje učepljenja i prijeklopa pojedinih elemenata, osiguranje adekvatne ventilacije prostora te sanaciju pokrova na mjestima curenja. Projektom obnove ocijenjena je mehanička otpornost i stabilnost konstrukcije na sva predviđena vertikalna i horizontalna djelovanja te su dani detalji konstruktivnog pojačanja spojeva konstrukcije s ciljem povećanja duktilnosti spojeva pri cikličkom opterećenju.[18] Stabilizacija krovišta iznad glavnog broda osigurana je samim oblikovanjem (šatorasti oblik), ali je dodatno i podaščana, dok je stabilizacija krovišta iznad apside osigurana novom sljemenom gredom b/h=10/16 koja se izvodi obostrano uz vrh vlačnog stupa te povezuje s krovištem iznad glavnog broda. Sve lokalne zamjene predviđene su u drvu razreda čvrstoće najmanje D30 prema HRN EN 338 (hrastovina), tradicijskim tesarskim spojevima (sl. 14).[19]

S obzirom na trajnu povezanost sklopa krovišta s kupolom, bitno je navesti projektno rješenje stabilizacije kupole koje funkcijom slijedi izvorno postavljenu horizontalnu drvenu rešetku smještenu u donju ležajnu ravninu kupole (sl. 12 a). Naime, zbog gubitka funkcionalnosti, tijekom vremena drvena rešetka je predviđena za obnovu, ali ne i vraćanje u izvornu funkciju stabilizacije kupole. Stoga se iznad pozicije drvene rešetke predviđa dodatna čelična rešetka širine oko 2,0 m čiji unutarnji pojas uz kupolu čini armiranobetonski serklaž. Vanjska pojasnica i dijagonale predviđene su U profilom.

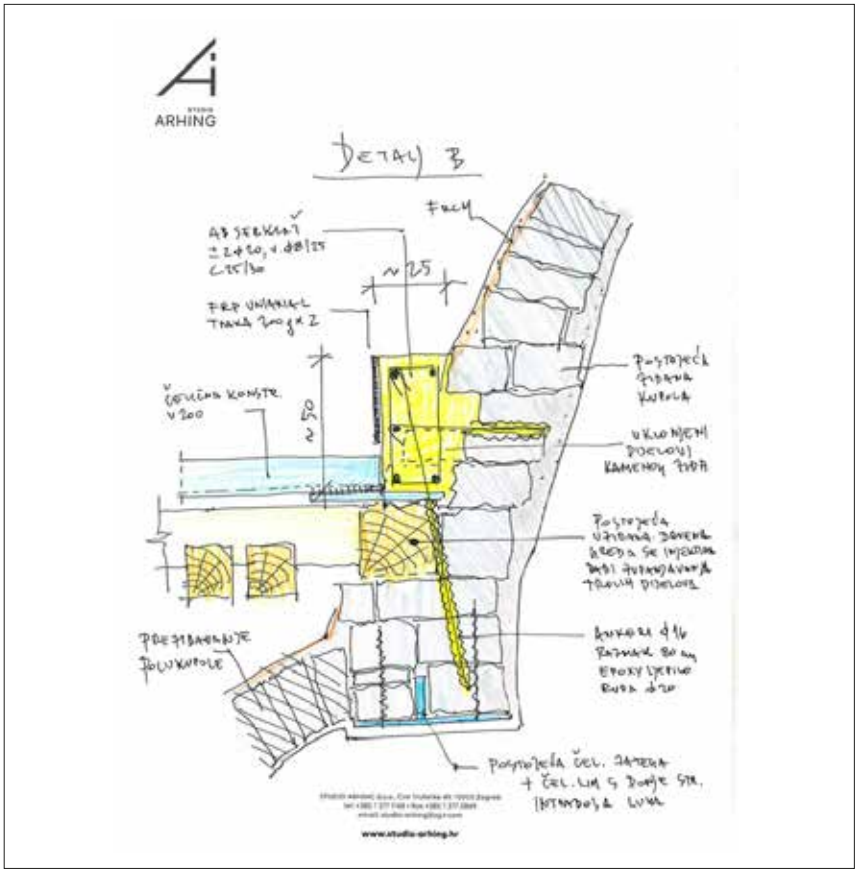
18 POJATINA et al., 2023.

19 HRN EN 338, Konstrukcijsko drvo – razredi čvrstoće, 2016.



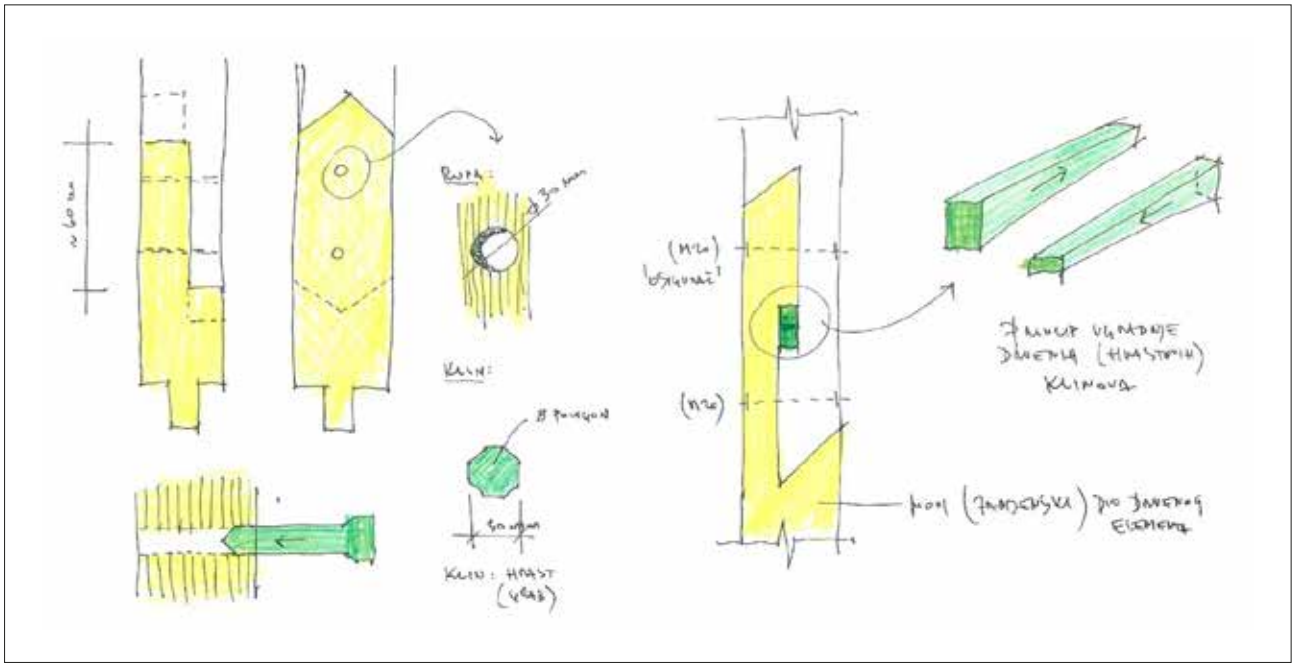
12 a i b Izvedbeni detalj zamjene ležajnih dijelova drvenih greda i shema radnih skela i privremenog krova (skice: J. Pojatina, 2022.)

Detail of the carrying out the replacements of the truss parts near the wall plate and the sketch of the scaffolding and temporary roof (design: J. Pojatina, 2022)



13. Izvedbeni detalj pojačanja ležajne ravnine velike kupole (skica: J. Pojatina, 2022.)

The detail of execution of the reinforcement of the bearing plane of the large dome (design: J. Pojatina, 2022)



14. Projektom definirane mogućnosti spojeva novih i postojećih dijelova drevnih greda (skica: J. Pojatina, Studio Arhing, 2022.)
The choice of joining the new and existing parts of the wooden members as defined by the reconstruction project (design: J. Pojatina, 2022)

IZVOĐENJE RADOVA

Odmah po izradi projektne dokumentacije, Sisačka je biskupija ugovorila radove s renomiranom i pouzdanom tvrtkom za obnovu povijesne baštine – Spegra d.o.o. iz Splita. Radovi su otpočeli u jesen 2022. godine. Započelo se sa sanacijom zidova, što je uključivalo konsolidaciju kamenog ziđa te izradu skele s unutarnje i vanjske strane zidova. Također je izvedena radna skela ispod velike kupole. U prvoj fazi izvedeni su radovi privremene zaštite zidnih pet medaljona kako bi se izvela površinska pojačanja kupole s donje strane. Također su izvedena i privremena podupiranja četiriju glavnih lukova oko velike kupole. U svrhu obnove krovišta, projektom je predviđeno konzolno proširenje radne skele s pripadnim pokrovom radi ostvarivanja prostora za rad i manipulaciju materijala u punoj dužini vijenca. Provedeno je djelomično raskrivanje donjeg pojasa krova u širini cca. 2,0 m. Na taj način se moglo izvoditi radove sanacije krova neometano od atmosferilija (usp. sl. 12 b).

Prije izvođenja radova na drvenoj konstrukciji izveden je armiranobetonski obodni serklaž koji ima funkciju povezivanja vrhova zidova, a istovremeno služi kao novi ležaj za drveno krovište (sl. 15 b). Potom se pristupilo intervencijama na drvenoj konstrukciji. Iako se radilo o nesvakidašnjim i danas skoro zaboravljenim tesarskim tehnikama, majstori Spegre hrabro su i odgovorno pristupili radovima. Trebalo je s posebnom pomnjom razdvajati i demontirati pojedine čepove, trnove, zasjeke, usjeke, uzidane i prezidane drvene elemente. Trebalo je: oprezno i nježno izvoditi privremena pridržanja i zavješenja i tek onda polako rastavljati sklopove sastavljene prije nekoliko stotina godina; kirurški precizno uklanjati zaražene ili trule dijelove kako bi se sačuvao što veći dio zdrave izvorne građe te paralelno pripremati nove hrastove nastavke za ugradnju (sl. 15 a i b). Najosjetljiviji dio bilo je spajanje novog i starog, i to tradicijskim vezovima viđenim danas samo u literaturi. Jedino odstupanje od povijesno autentične zamjene dijelova tradicionalnim spojevima bila je primjena čeličnih protočnih vijaka za dodatno osiguranje stabilnosti spoja. Težak je i naporan to bio posao, ali jedinstven i povijesni u svim mogućim značenjima te riječi.

ZAKLJUČAK

Svojom konstrukcijom, izborom spojeva i načinom gradnje, praktično bez metalnih spajala, krovište predstavlja vrlo kompleksnu strukturu, a dokazanom trajnošću i postojećim stanjem, nakon 250 godina u funkciji i mnogobrojnim doživljenim nedaćama, predstavlja samo po sebi vrijedan spomenik tehničke kulture. Statička interakcija krovišta s kupolom je naročito zanimljiv i vrijedan povijesni konstrukcijski slučaj koji zavređuje posebnu pozornost današnjih stručnjaka koji rade na očuvanju kulturnih dobara.

Iako u Hrvatskoj postoje značajno veća i starija povijesna drvena krovišta, krovište crkve u Pokupskom će, nadajmo se, ući u panteon obnova hrvatske kulturne baštine upravo po inženjerskoj odgovornosti u pristupu, i služit će kao primjer mnogim budućim obnovama povijesnih drvenih konstrukcija. Jer kao što se jednim potezom pera inženjera, krovište moglo zamijeniti novim bez postavljanja suvišnih upita o opravdanosti, beskrajno je veći trud istog

15 a i b Izvođenje radova – Spegra d.o.o. iz Splita (foto: J. Pojatina, 2024.)
Works in progress – Spegra Ltd. company from Split (photo: J. Pojatina, 2024)

pera sačuvao vrijedan spomenik tehničke kulture i jedan mali, ali vrijedan trenutak hrvatske povijesti.

LITERATURA

PEDIŠIĆ, ANĐELKO, Ratna evakuacija i pregled zaštitnih radova na pokretnom inventaru iz župne crkve sv. Ladislava u Pokupskom, *Portal,* 5, 2014., 193-209.

RINN, FRANK; SCHWEINGRUBER, FRANZ-HANS; SCHÄR, ERNST, Resistograph and X-ray Density Charts of Wood. Comparative Evaluation of Drill Resistance Profiles and X.ray Density Charts of Different Wood Species, *Holzforschung*, 50, 1996., 303-311.

Eigenschaften und Kenngrössen von Holzarten, ur. Sell, Jürgen, Zürich: Scweitz Lignum, 1997.

DOKUMENTACIJSKI IZVORI

CASARIN, FILIPPO et al., Technical Report NDT/MDT Structural Tests (Expin – Advanced Structural Control, Report ID: TR-ST), *Laboratory for tests and controls on existing structures construction materials*, 12/2022. Padova, 2022.

DIN 4074: Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 5: Laubschittholz. DIN 2008.

HRN EN 17121 (2019): Očuvanje kulturne baštine – Povijesne drvene konstrukcije – Smjernice za ocjenjivanje nosivih drvenih konstrukcija na licu mjesta

HRN EN 1995-1 (2013): Projektiranje drvenih konstrukcija – Dio 1-1: Općenito – Opća pravila i pravila za zgrade

HRN EN 1995-1-1 (2013/A2:2015): Eurokod 5: Projektiranje drvenih konstrukcija – Dio 1-1: Općenito – Opća pravila i pravila za zgrade

HRN EN 1998-1 (2004+AC: 2009): Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija – 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade

HRN EN 338 (2016): Konstrukcijsko drvo – Razredi čvrstoće

MINISTARSTVO GRADITELJSTVA I PROSTORNOGA UREĐENJA RH, Tehnički propis za građevinske konstrukcije. Zagreb: *Narodne novine* (NN) 17/2021.; Tehnički propis o izmjenama i dopunama Tehničkog propisa za građevinske konstrukcije, NN 10/2020.

MINISTARSTVO KULTURE I MEDIJA REPUBLIKE HRVATSKE, Registar kulturnih dobara Republike Hrvatske. https://registar.kulturnadobra.hr/#/details/Z-1723 (pregledano 14. 11. 2024).

POJATINA, J. et al., Stručno mišljenje s tehničkim rješenjem mjera stabilizacije i zaštite Župne crkve Uznesenja Blažene Djevice Marije u Pokupskom. Studio Arhing d.o.o., TD 79/21: Zagreb: Studio ARHING, 2021

POJATINA, J. et al., Elaborat ocjene postojećeg stanja građevinske konstrukcije: Projekt cjelovite obnove zgrade javne namjene – građevinski projekt konstrukcije Uznesenja Blažene Djevice Marije u Pokupskom TD 41/22-PO. Zagreb: Studio Arhing d.o.o., 2023.

TURKULIN, H.; SEDLAR, T., Ocjena stanja drva i konstrukcije drvenoga krovišta Crkve Uznesenja Blažene Djevice Marije u Pokupskom (LDG 12/2021). Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet šumarstva i drvne tehnologije, Laboratorij za drvo u graditeljstvu (LDG) 2021, str. 1-36.

VUČIĆ ŠNEPERGER, BORIS, Arhitektonska snimka postojećeg stanja Župne crkve Uznesenja Blažene Djevice Marije u Pokupskom (T.D. 1/21) Zagreb: Tablinum d.o.o., 2021.

Abstract

RECONSTRUCTION OF THE WOODEN ROOF OF THE PARISH CHURCH OF THE ASSUMPTION OF THE BLESSED VIRGIN MARY IN POKUPSKO

After the earthquakes that hit Croatia in 2020, the church of the Assumption of the Blessed Virgin Mary in the town of Pokupsko was badly damaged. Particularly bad damage of the church was visible in a form of wide cracks and deformations of the large dome. These were caused by spacing out of longitudinal bearing planes on wall tops and inclinations of lateral longitudinal walls outwards. The preliminary examination after the earthquake, and the detailed investigation of the wood structure established that the roof wood structure participates in a load-bearing concept of the dome. As a consequence, part of the global deformations also caused the damage on the roof structure. Except this rare, „simbiotic" statics of the wood structure and the stone-built dome, the investigations also revealed the significant biological deterioration of the wood material on and near the bearings, therefore the structural reconstruction of the church comprised a complex, simultaneous structural reconstruction of the church walls and the roof structure. The article brings chronological survey of all the activities in preparation of the repair, from mapping of the actual condition of the roof, to the whole set of assessment and testing steps on wood elements, calculation analyses, design of the repair and reinforcement solutions, to specifics of execution of particular measures. Bearing in mind the complexity of the work, but also the responsibility in approach to the reconstructions, it may be concluded that the reconstruction of the historical wood roof of the Parish church in Pokupsko presents one of the most outstanding projects. We sincerely hope that the exquisite engineering tasks employed in this case will serve as a standard in future capital restorations and repair of historic wood structures.