

Povijesna gradnja krovnih konstrukcija u suvremenom kontekstu - tehnologije obnove i ojačanja

Vudrak, Mihej

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:751308>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-05**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET



Mihej Vudrak

POVIJESNA GRADNJA KROVNIH KONSTRUKCIJA U
SUVREMENOM KONTEKSTU – TEHNOLOGIJE OBNOVE I
OJAČANJA

DIPLOMSKI RAD

Mentor: izv. Prof. dr. sc. Zvonko Sigmund

Zagreb, 2024.



TEMA DIPLOMSKOG RADA

Ime i prezime studenta: **Mihej Vudrak**

JMBAG: **0082062401**

Diplomski rad iz predmeta: **Tehnologije obnove i ojačanja zgrada**

Naslov teme
diplomskog rada:

HR	Povijesna gradnja krovnih konstrukcija u suvremenom kontekstu - tehnologije obnove i ojačanja
ENG	Historical roof structures in the modern context - technologies of restoration and reinforcement

Opis teme diplomskog rada:

U ovom diplomskom radu istraživalo bi se kako su se krovne konstrukcije gradile u prošlosti i kako ove konstrukcije, a kao posljedica poslijepotresnih obnova odgovaraju suvremenim potrebama. Fokus bi bio na razumijevanju tradicionalnih metoda gradnje krovova i njihovih materijala, kao i na tome kako se tehnologije obnove i ojačanja primjenjuju kako bi se očuvala i poboljšala stara krovišta. Analizirale bi se različite tehnike obnove i ojačanja, uključujući moderna inženjerska rješenja i materijale koji se koriste za obnovu povijesnih krovova. Cilj bi bio sagledati kako se kombinacijom tradicionalnih i modernih pristupa može postići optimalna zaštita i dugovječnost povijesnih krovnih konstrukcija u suvremenom svijetu.

Datum: **08.04.2024.**

Komentor:

(Ime i prezime komentora)

Mentor:

izv. prof. dr. sc. Zvonko Sigmund

(Ime i prezime mentora)

(Potpis mentora)

SAŽETAK:

U ovom diplomskom radu su promatrana tradicionalna krovništa građena prije više desetaka ili stotina godina u gradu Zagrebu te današnji, moderni zahvati na obnovi takvih krovništa sa ciljem maksimalne iskoristivosti krovništa i uporabivosti prostora ispod istoga uz maksimalnu očuvanost tradicionalnosti svih elemenata krovništa i krovne konstrukcije. Promatrane su vrste krovnih konstrukcija te njihove karakteristike, pa nasljedno tome vrste oštećenja koja se javljaju uslijed nepovoljnih vanjskih utjecaja na drvene elementa krovnih konstrukcija ili tijekom vremena. Kao srž ovog rada su teorijski promatrane tehnologije obnove i ojačanja takvih krovništa sa definiranjem svrhe i načina provođenja neke specifične metode ojačanja krovne konstrukcije nakon čega su promatrana četiri objekta na čijim su se krovništima izvodile intervencije ojačanja ili će se tek izvoditi prema postojećem projektu kako bi se dobio uvid stvarne iskoristivosti teorijski istraženih metoda u praksi. Zaključno sa ovim radom je navedena lista svih metoda ojačanja spoznatih u ovom radu, klasificirano prema mjestu ili vrsti nastanka oštećenja te je kao primjer, sa ciljem upućivanja slijednica projektantima pri definiranju radova na ojačanjima krovnih konstrukcija dan primjer troškovnika za sve, u ovom radu, navedene radove ojačanja.

AN ABSTRACT:

In this diplomic work, traditional roofs built tens or hundreds of years ago in the city of Zagreb were observed, as well as today's modern procedures for the restoration of such roofs with the aim of maximizing the use of the roof and the use of the space below it, with maximum preservation of the traditionality of all elements of the roof and roof structure. The types of roof structures and their characteristics were observed, and consequently the types of damage that occur due to adverse external influences on the wooden elements of roof structures or the passage of time. As the main core of this paper, the technologies of renovation and strengthening of such roofs are theoretically observed, with the definition of the purpose and method of implementing some specific method of strengthening the roof structure, after which four objects were observed on whose roofs reinforcement interventions were carried out or they will be according to the existing project in order to gain an insight into the real usability of the theoretically researched methods in practice. At the end of this work, a list of all strengthening methods known in this work is provided, classified according to the location or type of damage, and as an example, with the aim of guiding designers when defining work on strengthening roof structures, an example of a cost sheet is given for all, in this work, listed strengthening works.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. KROVNE KONSTRUKCIJE.....	2
2.1. Roženički krov	2
2.1.1. Roženički krov	2
2.1.2. Podroženički krov	5
2.2. Stolica	6
2.3. Visulja.....	7
2.4. Ostali tipovi krovnih konstrukcija	11
3. ELEMENTI TRADICIONALNE METODE GRADNJE KROVOVA. 17	17
3.1. Zabatni zid	17
3.2. Kvaliteta i metode izrade drveta	18
3.3. Način oslanjanja i utjecaj krovne konstrukcije na zidani objekt... 20	20
4. TEHNOLOGIJE OBNOVE I OJAČANJA KROVIŠTA.....	21
4.1. Vrste oštećenja	21
4.2. Post naprezanje	22
4.3. Bočna stabilnost	23
4.4. Ojačanje vezne grede	29
4.5. Spojevi	30
4.6. Oslanjanje veznih i stropnih greda	35
5. PRIMJERI OBNOVA I OJAČANJA KROVIŠTA IZ PRAKSE	40
5.1. Rekonstrukcija krovišta Gornjogradske gimnazije	40
5.2. Krovište pri rekonstrukciji crkve sv. Katarine	50
5.3. Krovište pri obnovi stambene zgrade u Palmotićevoj ulici 64A.....	58
5.4. Krovište pri obnovi stambene zgrade u Mrazovićevoj ulici 7	64
6. PREGLED RJEŠENJA OBNOVE I OJAČANJA KROVIŠTA	67
6.1. Zahvati na ojačanju krovišta prema izvoru problema	67
6.2. Troškovnik radova ojačanja krovišta	73
7. ZAKLJUČAK	78

1. UVOD

Početak gradnje prvih građevina u povijesti, počela su se izvoditi i prva krovišta kao njihova zaštita. Svaka građevina, pa i ona najprimitivnija zahtijeva pokrovnu zaštitu, a time i određenu konstrukciju koja dugotrajno pridržava pokrov i sama je u skladnosti sa ostatkom objekta na koji se oslanja. Krov je izrazito značajan dio stambenog objekta, zaštićuje ga od svih vrsta atmosferilija te na prihvatljiv i neosjetan način prenosi oborine koje padaju na njega na prostor okoline objekta. Krovište zaštićuje bića koja se nalaze ispod njega, tj. unutar objekta, ali i sami interijer objekta. Ona se dijele na konstrukciju krovišta i pokrov, pokrov je element krovišta koji je izložen padalinama i eksteran je, a sam pokrov zaštićuje konstrukciju krovišta od padalina, dakle konstrukcija krovišta je unutarnji element koji ne treba biti izložen utjecaju oborina. Oblik krovne konstrukcije definiraju različite metode spajanja krovnih ploha, tj. streha krovišta, čiji raspored uvelike ovisi o tlocrtnoj geometriji objekta ispod krovišta. Obzirom na raspored i količinu krovnih streha, krovove dijelimo na: jednostrešne, dvostrešne, mansardne, ukošene, polu-ukošene, sedlaste-ukošene, stožaste, nazupčane, kupolaste, ljuskaste i dr. o čemu ovisi i sastavljanje konstrukcije krovišta. Krovišta još dijelimo prema strmosti, tj. veličinom nagiba krovne plohe na ravna, položena i strma, gdje su ravna krovišta bez streha, položena do 40° , a strma između 40° i 60° nagiba krovišta. [1]

U ovom radu promatrane su konstrukcije krovišta objekata stare gradnje, ponajviše iz perioda između 15. i 21. stoljeća na području grada Zagreba (gradnja pod utjecajem Austro-Ugarske urbanizacije i nešto prije toga), drvene konstrukcije, najčešće dvostrešnih i mansardnih krovišta drvenih konstrukcija stolica i visulja sa crijepnim pokrovom. Ovaj rad se bavi razumijevanjem tradicionalnih metoda gradnje krovišta te njihovom obnovom i ojačanjima i same tehnologijom izvedbe adaptacije krovišta kako bi se očuvala i poboljšala stara krovišta nakon razornog potresa na području grada Zagreba i obližnje regije 2020. godine. Cilj je navedenim metodama i tehnologijama postići kao posljedicu poslije potresne obnove krovišta, krovne konstrukcije i potkrovnog prostora, zadovoljenje suvremenih potreba vezanih uz korištenje takvih objekata stare gradnje i očuvanje vanjskog izgleda krovišta uz adekvatnu stabilnost i maksimalnu iskoristivost.

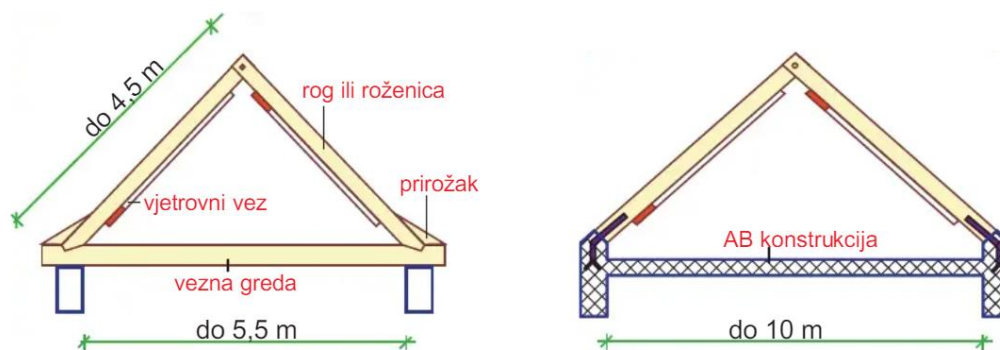
2. KROVNE KONSTRUKCIJE

Konstrukcija krovišta ima isključivo svrhu postizanja statičke stabilnosti samog krovišta, dakle pridržanja svih elemenata pokrova i krovišta te posebice na objektima stare gradnje okvirni spoj vanjskih nosivih zidova te stvaranje jedne univerzalne cjeline sa objektom na kojeg se oslanja. Ona može biti od različitih materijala, drvena, betonska, zidana, čelična i ostalo, a uvelike najzastupljenija konstrukcija krovišta pri starijim objektima je drvena konstrukcija. S obzirom na statički sustav prijenosa opterećenja, razlikujemo tri vrste konstrukcije krovišta: roženički krov, konstrukcije krovišta stolica i visulja.

2.1. Roženički krov

2.1.1. Roženički krov

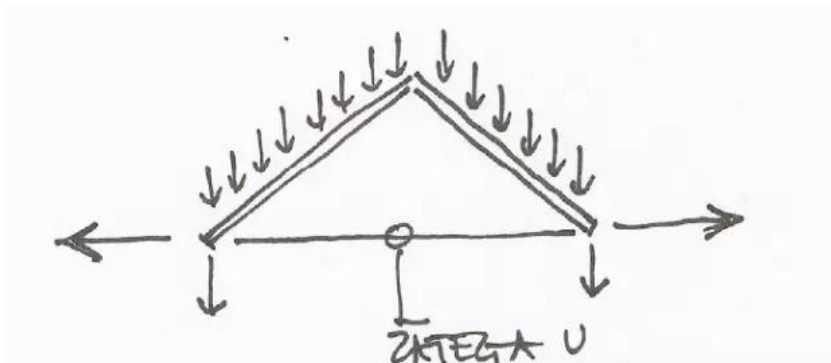
Kao što ime ove vrste konstrukcije krovišta govori, „roženički krov“ je vrsta krovne konstrukcije koju čine isključivo rogovi oslonjeni na nosive elemente konstrukcije objekta ispod krovišta. Roženički krov se predviđa za manje raspone i strmije nagibe, a još se naziva i prazan krov, budući da se ništa ne nalazi u prostoru između rogova. Kod roženičkog krova rogovi u paru čine nosač koji direktno prenosi vertikalno opterećenje na ležaj, a horizontalno razupiranje mora preuzeti zatega. [2]



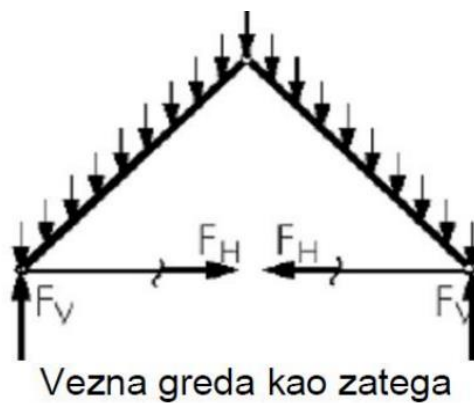
Slika 1. Poprečni pogled roženičkog krova [3]

Statički gledano, konstrukciju roženičkog krova čini puni vez roženičkog krovišta koji se sastoji od para rogova uobičajenih dimenzija na standardnom rasteru 0,7 – 1,0 m. Svaki takav par rogova zasebice čini statički određenu trozglobnju nosivu konstrukciju kojoj su rogovi opterećeni savijanjem i tlakom centriranim na os roga te posebice tlakom na osloncu i tjemenu. Takvo krovište se oslanja na spoj zidova i stropne ploče etaže ispod krovišta, strop koji je

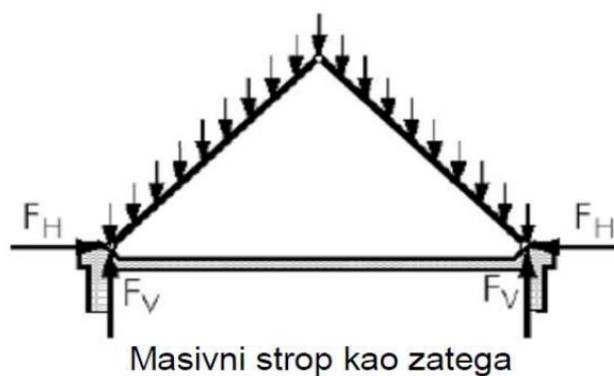
oslonjen na zidove može biti armiranobetonska ploča, strop od drvenih greda ili slično, ali svakako mora služiti kao zatega.



Slika 2. Roženički krov sa čeličnom zategom (prijenos sila) [2]



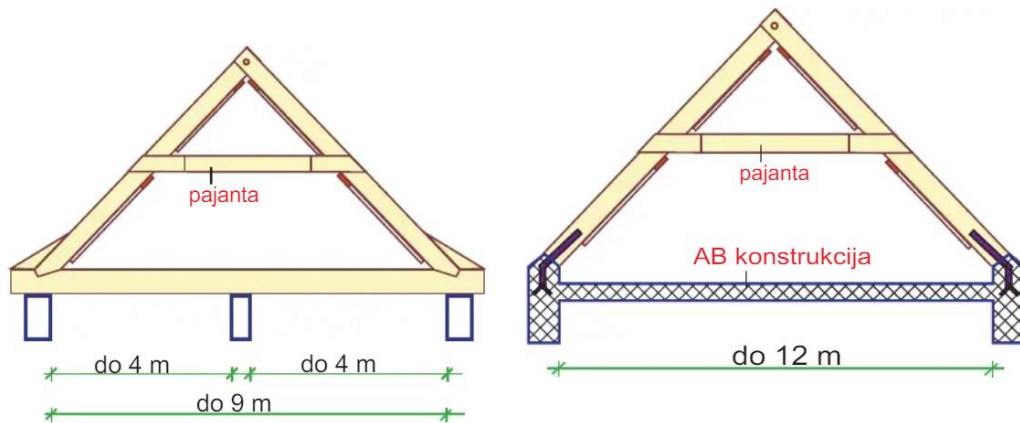
Slika 3. Roženički krov sa veznom gredom (opterećenje i reakcije) [3]



Slika 4. Roženički krov sa AB pločom (opterećenje i reakcije) [3]

Rogovi u ovom sustavu čine dvostrešan krov čiji osnovni statički sustav konstrukcije je trozglojni nosač ili trozglojni nosač sa zategom u vidu drvene grede ili čelične zatega, te ukoliko imamo rogove većih raspona, iz razloga osiguranja bočne stabilnosti rogova ove

konstrukcije, na pola visine ili više (poželjno u gornjoj trećini visine rogova), se ugrađuje razuporna greda koja se naziva „pajanta“ te ona sa rogovima čini pajantno krovište, tzv. „A - krovište“ koje je povoljno i za raspone veće od 7,5 m, a do 12 m razmaka oslonaca te za rogove duljine veće od 6 m.



Slika 5. Poprečni pogled roženičkog krova s pajantom [3]

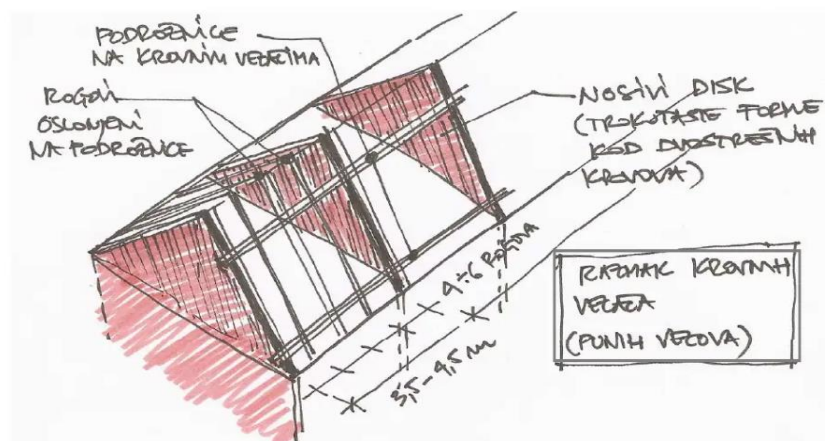
Statički gledano, konstrukciju roženičkog krova čini puni vez roženičkog krovišta koji se sastoji od parova rogova uobičajenih dimenzija na standardnom rasteru 0,7 – 1,0 m. Svaki takav par rogova zasebice čini statički određenu trozglobnu nosivu konstrukciju kojoj su rogovi opterećeni savijanjem i tlakom centriranim na os roga te posebice tlakom na osloncu i tjemenu. Postoje i još neki načini ojačanja takvih krovišta sa vertikalnim stupcima koji onda opterećujuće djeluju na ploču ili veznu gredu ispod te kosim potporama koje utječu na zidove o koje se konstrukcija krovišta oslanja na način da unose dodatnu horizontalnu silu, ali time rastvaraju istu tu horizontalnu silu koja bi bila prenošena isključivo kosim rogom, pa time generalno rasterećuju oslanjanje krovne konstrukcije.

Kod Pajantnih krovišta, tj. krovišta sa razupornom gredom između rogova roženičkog krovišta, najčešće u polovici duljine rogova pa na više, nalazimo dodatni horizontalni stabilizacijski sustav kako bi se ostvarilo horizontalno nepomično krovište i to u vidu rešetkastog sprega ili dijafragme od daščanih ploča čije se opterećenje prenosi na zabatne zidove koji moraju u kombinaciji sa krovištem činiti stabilnu konstrukciju. Horizontalna tlačna greda koju nazivamo „pajanta“ služi kao međusobni oslonac rogova, a može se iskoristiti i kao stropna greda korisnog prostora potkrovlja. [4]

Karakteristike ovakve vrste krovne konstrukcije su da se radi, uglavnom o laganoj konstrukciji koja pokriva relativno manje raspone za koju je potreban znatno manji utrošak drvene građe ili ostalih konstruktivnih materijala za montažu takvog krovišta. Znatna prednost ovakvih krovišta je slobodan prostor potkrovlja bez mnoštva veznih elemenata konstrukcije koji bi zadirali u potencijalno koristan prostor etaže zbog čega se često ovakav krov naziva tzv. „prazan krov“ bez potkonstrukcije koji je uglavnom dvostrešan sa većim nagibima. Ovakvu konstrukciju prati mala bočna stabilnost zbog manjka nosivih elemenata konstrukcije, a ona stvara znatne horizontalne pritiske na ležajeve, tj. oslonce rogova, ponajviše kod krovišta malih nagiba. Također, ovakva konstrukcija je uglavnom sposobna pridržavati lake pokrove u simetričnoj geometriji.

2.1.2. Podroženički krov

Jedna od varijanti izgradnje jednostavne krovne konstrukcije roženičkog krova je podroženički krov koji uz standardnu trozglobnu konstrukciju sastavljenu od parova rogova ima još podrožnice koje primaju dio opterećenja pokrova i rogova, a koje su oslonjene na krovne vezne ravnine, tzv. nosive diskove koje mogu biti zidani ili betonski trokutasti zidovi geometrije samog krovišta ili čelični te drveni rešetkasti nosači, kojima ova konstrukcija može poprimiti karakteristike tipa visulja ili stolica, jednake vanjske geometrije na rasteru svakih 4 – 6 ravniina rogova. Takvi nosivi zidovi uključuju i zabatne zidove na krajevima krovišta, a nosivi diskovi unutar krovišta poprimaju obodnu geometriju sličnu zabatnim zidovima.



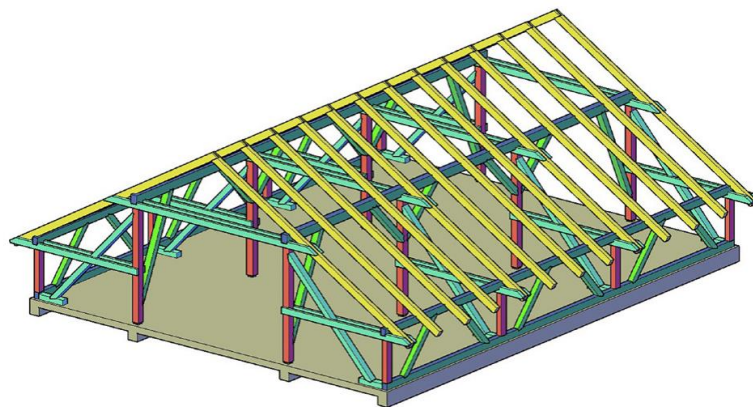
Slika 6. Podroženički krov [2]

Osnovni nosivi sustav konstrukcije krovnih nosača u nosivim, glavnim ravninama krovišta, može biti konstrukcija stolice, visulje, rešetkastog nosača i lameliranog nosača. Na taj način

podroženičko krovište može biti projektirano na veće raspone i složenije sheme geometrije krovišta i to za sve vrste nagiba krovnih ploha.

2.2. Stolica

Konstrukcija krovišta stolica se nalazi na objektima gdje je su nosivi elementi krovišta oslonjeni na više zidova, a ne samo na vanjske, tj. rubne zidove objekta. Stolica se sastoji od rogova koji mogu biti oslonjeni na podrožnicu pri vrhu krovišta koja u tom slučaju predstavlja „sljemenu gredu“, po dvije podrožnice na vrhu nosivih stupova konstrukcije ili kombinirano tri podrožnice, sljemenu gredu i dvije podrožnice na vrhovima stupova koje su u uzdužnom smjeru pridržane i stabilizirane malim kosnicima, tzv. „rukama“ koji se nalaze u spoju jednim krajem na stupu stolice, a drugim krajem na podrožnici koja se oslanja na taj isti stup u mjestu spoja stupa, razuporne grede i podrožnice iznad vrha stupa. Tako se u navedenoj konstrukciji još nalaze element razuporna greda koja spaja dva stupa u jednoj nosivoj ravnini krovišta uz moguću veznu gredu koja se nalazi u konstrukciji stolice u nekim slučajevima kao što se nalazi i u konstrukciji visulje (*vidi str. 9.*), ali u ovom slučaju ona predstavlja kontinuiranu gredu oslonjenu na više ležajeva u vidu nosivih zidova ili stupova konstrukcije objekta ispod konstrukcije krovišta. U slučajevima kada ne postoji vezna greda ispod ležišta stupova krovne konstrukcije, tada se najčešće krovna konstrukcija oslanja na armiranobetonsku ploču na vrhu nosivih zidova objekta, no to pri raspodjeli nosivih elemenata objekata stare gradnje gotovo uvijek nije slučaj, a druge opcije oslanjanja takvog tipa konstrukcije je oslanjanje stupova krovišta direktno na nosive stupove u visini najviše etaže zidova koji prihvaćaju opterećenje krovišta ili oslanjanje na uzdužnu gredu nazidnicu na unutarnjim nosivim zidovima što je kod objekata stare gradnje najčešći slučaj.



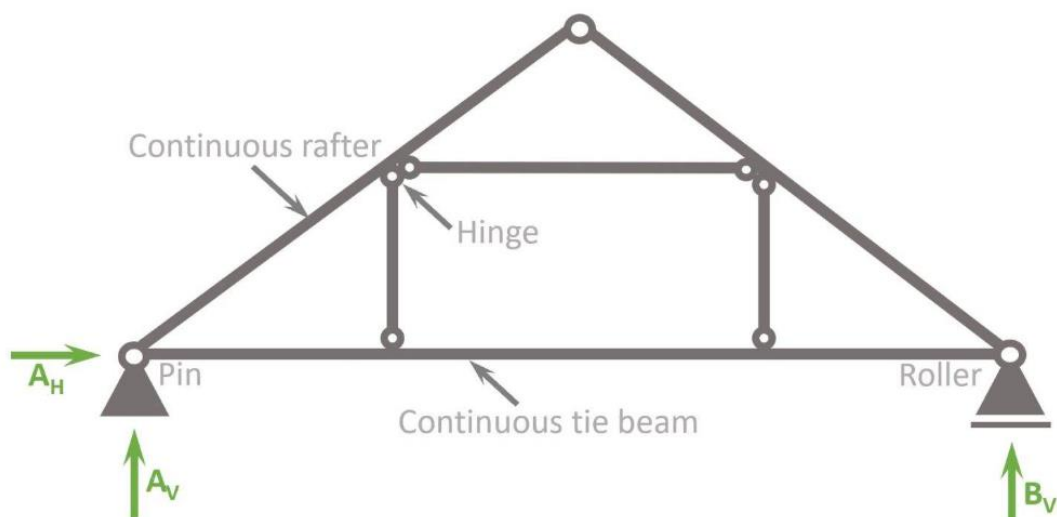
Slika 7. Konstrukcija krovišta stolica oslonjena na armiranobetonsku ploču [5]

Konstrukcija stolice kao glavne vertikalne nosive elemente ima stupove koji su tlačno opterećeni, a oni se trebaju pozicionirati najdalje 60 – 100 centimetara od unutrašnjih nosivih zidova o koje se konstrukcija stolice oslanja, ako već nisu pozicionirani točno iznad takvih zidova. [4] Stolica može biti ona najjednostavnijeg tipa, a to je jednostrešna stolica, te kod dvostrešnih krovništa prema broju stupova oslanjanja mogu biti jednostruka raspona do 7 metara, dvostruka raspona 11 – 14 metara ili trostruka stolica raspona preko 14 metara te kosa stolica u slučaju kada joj nosivi stupovi nisu vertikalni, već nakošeni.

Ova vrsta oslanjanja krovništa reducira prijenos sile opterećenja pokrova i krovne konstrukcije na armiranobetonsku ploču točkasto ili ako se u glavnim nosivim ravninama krovne konstrukcije nalazi vezna greda oslonjena na stupove ili položena preko nosivih zidova, tada se radi o opterećenju na kontinuiranu gredu, što je svakako povoljnija raspodjela opterećenja, nego ona u konstrukcije tipa visulja.

2.3. Visulja

Vrsta krovne konstrukcije tipa visulja je najučestaliji oblik izgradnje, tj. montaže u tradicionalnim metodama gradnje krovova na području zapadne i središnje Europe, pa tako ponajviše i na području Republike Hrvatske i grada Zagreba. Ona u osnovi ima sličan geometrijski princip montaže nosivih elemenata konstrukcije krovništa, ali sasvim različit statički pristup raspodjele elemenata konstrukcije u odnosu na tip stolica, te se također i njezino oslanjanje na objekt ispod nje same uvelike razlikuje. Karakteristika visulje je oslanjanje na prostu gredu, tj. njezinu veznu gredu koja ima raspon jednak ukupnoj širini objekta kojeg prekriva, oslanja se na dva nosiva zida ili njihove horizontalne serklaže, dok joj rogovi imaju oslonac na gredi nazidnici. Uz drugačije oslanjanje vezne grede, ponajveća razlika visulje u odnosu na stolicu jest ta što su nosivi stupovi ove krovne konstrukcije vlačno opterećeni, a ne tlačno kao što je to kod stolice.

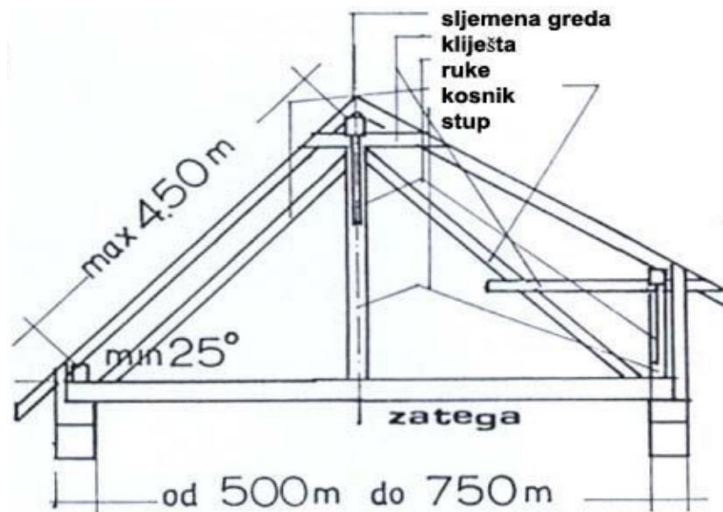


Slika 8. Idealizirani statički sustav visulje [6]

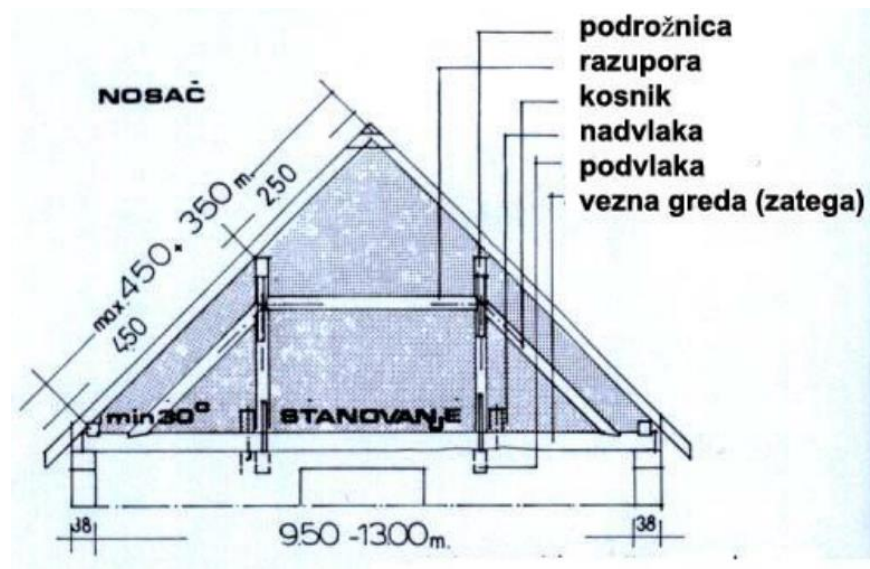
Visulja ostvaruje oslanjanje punog veza na vanjske nosive zidove preko vlačnih veznih greda, kosnika i horizontalne vezne grede - ugradnja kod "mekih" stropnih konstrukcija ili kod otvorenog krovišta, bez stropa. [2]

Sustavi konstrukcija krovišta visulja se također dijele prema količini i načinu ugradnje i oslanjanja na vertikalne nosive elemente koji su vlačno opterećeni, pa tako razlikujemo: jednostruke, dvostruke i višestruke visulje, uglavnom do trostruke visulje. Za takav tip konstrukcije je prema pravilu najoptimalniji razmak podrožnica, na koje se zglobno oslanjaju rogovi (od čega nepomično na jednoj, a pomično na ostalim podrožnicama), 3,5 – 4,5 m, a ukoliko je potrebno postavljanje podrožnica na većem rasteru, to je obavezno opravdati zadovoljavajućom provjerom graničnog stanja uporabljivosti (GSU). [4]

Karakteristike jednostruke, tzv. „trokutaste“ visulje kao što je vidljivo na *Slici 9.* sa jednim nosivim vertikalnim stupom su da joj je najučestaliji raspon do 7,0 m uz minimalni nagib krovišta između 20 – 30°, ovisno oslanja li se krovište dijelom na nadozid, u tom slučaju nagib može biti čak i manji ili veći ukoliko se krovište oslanja na nosive zidove bez nadozida. Dužine roga za takvu konstrukciju su uglavnom 4,5 – 5,0 m, a rogovi u paru su vanjski dio jedne glavne nosive konstrukcije u svojoj ravnini okomito na uzdužni smjer objekta, tj. krovišta. Kod dvostruke, tzv. trapezne visulje, vidljivo na *Slici 10.*, najučestaliji rasponi duljine vezne grede su 9,5 – 13,5 m, najmanji nagib krovišta je između 35 – 45°, dok je najveća duljina roga između 7,0 – 9,0 m. [4]



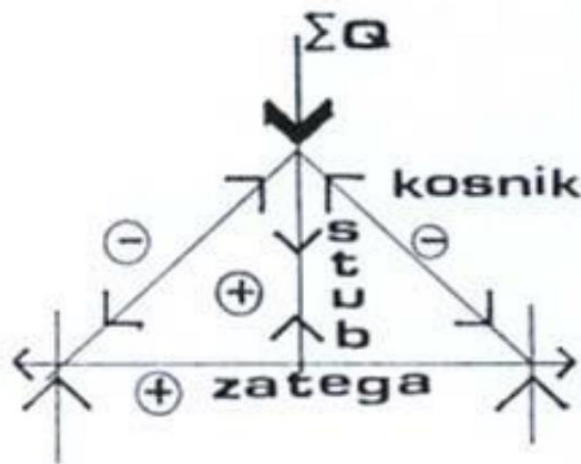
Slika 9. Jednostruka visulja sa nadozidom [4]



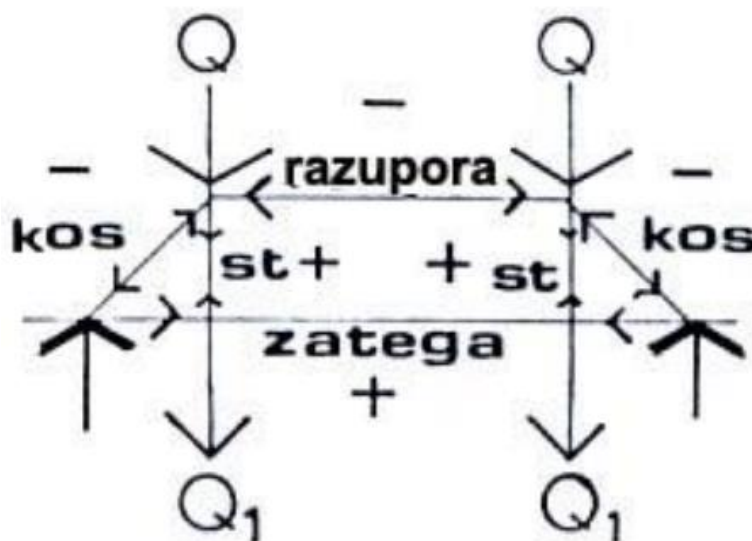
Slika 10. Dvostruka visulja bez nadozida [4]

Svaka glavna nosiva ravnina, kako se još naziva „puni vez“ se sastoji od već navedenog para rogova koji su u nekim slučajevima u svom spoju još dodatno učvršćeni uzdužnom gredom sljemenjačom, podrožnicama na vrhu stupova krovne konstrukcije, tlačno opterećenim razupornim gredama na vrhovima stupova koje spajaju dva stupa konstrukcije, a razupiru dva roga u ravnini na mjestu spoja stupa, podrožnice i roga, nadalje, tzv. „ruku“, tj. kosnika koji služe kao uzdužna stabilizacija cjelokupnog krovišta, a razupiru se između stupa i podrožnice koja naliježe na taj stup, samih vlačno opterećenih stupova ili ako se radi o jednostrukoju visulji, tada jednog stupa, po dva kosnika koji služe kao dodatna stabilizacija u ravnini punog veza

između vrha stupa visulje i vezne grede pri njezinom kraju neposredno prije spoja sa donjom podrožnicom ili drugačijeg oslanjanja roga na veznu gredu ukoliko ne postoji nadozid na vanjskom nosivom zidu, a ako postoji imamo i pripadne horizontalne letve, tzv. kliješta koja služe kao spoj navedenih kosnika i grede nazidnice, te vlačno opterećene vezne grede na koju se oslanjaju stupovi visulje kao i svi elementi jedne glavne nosive ravnine krovišta, a ona sama se oslanja na vrh nosivih zidova ili na grede nazidnice na vrhu nadozida. Poželjni razmak ravnina punog veza je 4,0 m, a prema pravilu može varirati između 3,5 – 4,5 m. [4]



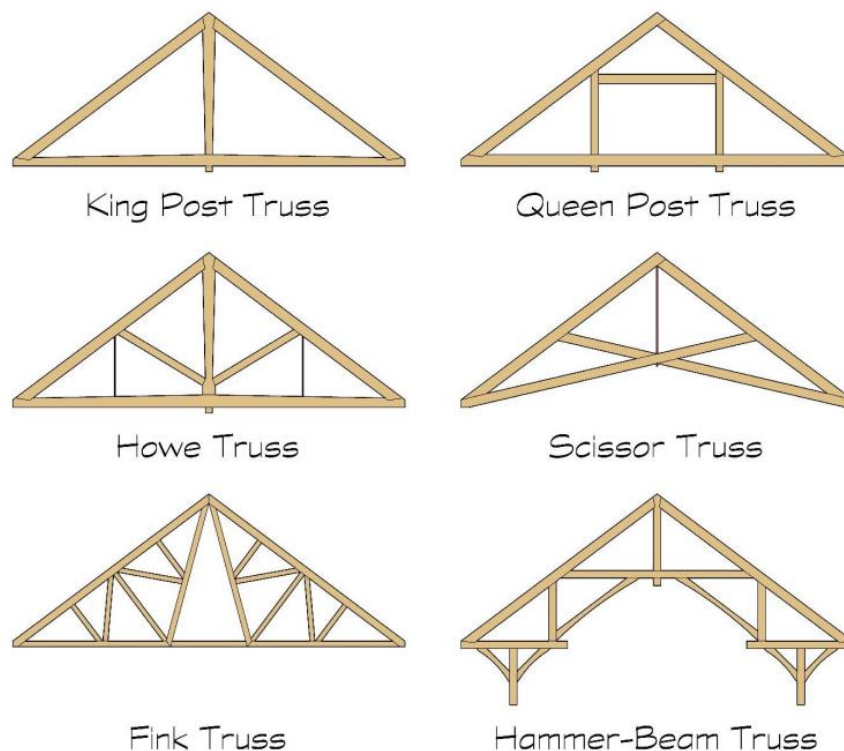
Slika 11. Prijenos opterećenja jednosstrukom visuljom [4]



Slika 12. Prijenos opterećenja dvostrukom visuljom [4]

2.4. Ostali tipovi krovnih konstrukcija

Ovisno o tipu i namjeni građevine, često je postojala potreba za drugačijim oblikom krovišta što je iziskivalo i promjenu u geometriji, a često i drugačijom statičkom raspodjelom elemenata konstrukcije od onih učestalih tipova konstrukcije. U nekim slučajevima krovišta, bila je potrebna određena modifikacija elemenata krovne konstrukcije, kao u slučaju mansardnih krovišta, a u velikom broju slučajeva i potpuno drugačiji i specifičan tip krovišta. Tako iz osnovne strukture dvostrešnih visulja i stolica koje su najučestalije na ovim prostorima postoje i modificirane konstrukcije dvostrešnih krovišta oslonjene na veznoj gredi ili rešetkastim sustavom. Pa tako imamo tip jednostruke stolice ili visulje sa dodatnim kosnicima i zategama, sustav roženičkog krovišta bez vezne grede na koju se rogovi oslanjaju, već njezine supstitucije dvama kosim gredama koje spajaju dno jednog roga i sredinu raspona drugog roga te se u sredini konstrukcije ukrštaju gdje su dodatno pridržane zategom i ovješene o spoj rogova.



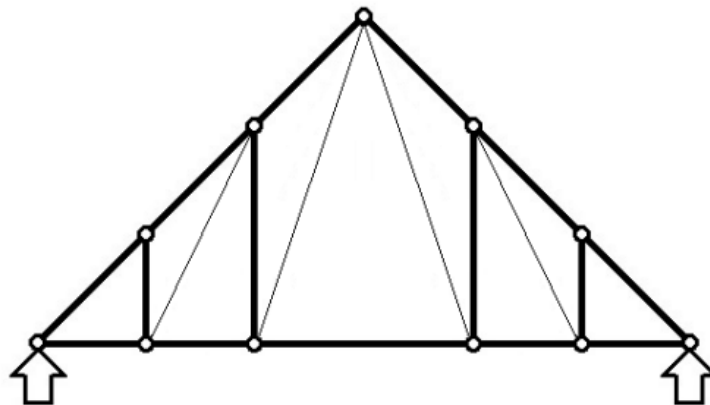
Slika 13. Varijante specifičnih tipova konstrukcije dvostrešnog krovišta [7]

- „HOWE“ KONSTRUKCIJA KROVIŠTA

Ova konstrukcija prikazana na *Slici 13. (srednje lijevo)* krovišta sa jednim vertikalnim stupom u sredini nosača na veznoj gredi koji završava u sljemenom spoju rogova sa dodatnim vertikalnim zategama je osmišljen 1840. godine od inženjera Williama Howea. Po mnogim stručnim mišljenjima se radi o najpopularnijoj, najpraktičnijoj i po jednostavnosti izvedbe, uloženom materijalu i učinkovitosti, najefikasnija struktura. Zanimljivost ove strukture je prednost korištenja čeličnih zatega koje pridržavaju veznu gredu. One u svojoj osnovi teoretski i nisu opterećene, a svakako mogu pomoći u pridržavanju vlastite težine vezne grede, no u slučaju dodatnog opterećenja vezne grede poput ovješnog stropa, oslanjanja podnih obloga za etažu potkrovlja i slično, vertikalne čelične zatege preuzimaju veliku funkciju prenošenja tenzije, tj. vlačnog opterećenja.

- „Pratt“ rešetke

Jedna od poznatijih vrsta konstrukcija koja također rješava pitanje prijenosa vlačnog opterećenja zategama kao i „Howe“ konstrukcija krovišta, a itekako se može primijeniti za krovne konstrukcije je rešetkasti nosač, tzv. Pratt rešetka koja svojim kosim zategama samo smanjuje opterećenje na spojnim elementima konstrukcije te time njezine zatege mogu biti mnogo tanje, tj. mnogo manjeg presjeka. [7]

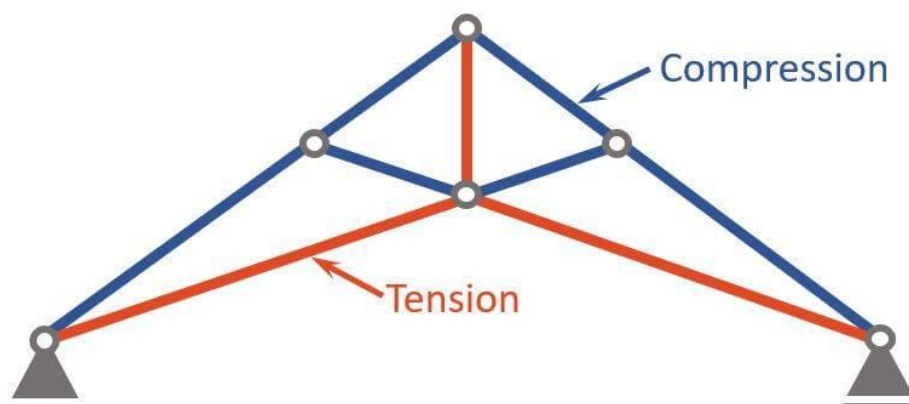


Slika 14. Pratt rešetka [7]

- „UKRŠTENA KROVNA KONSTRUKCIJA“ (engl. Scissors truss)

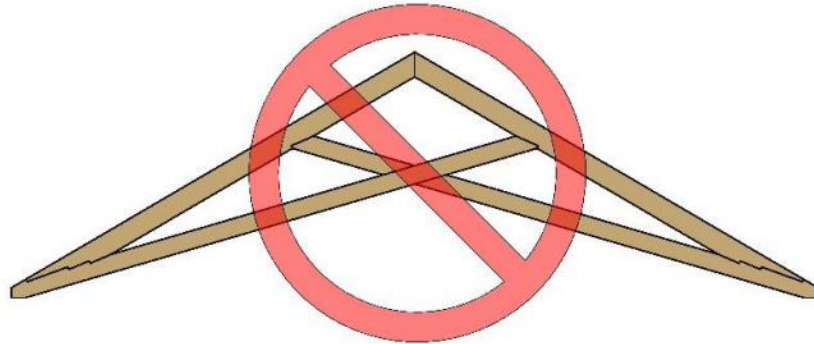
Ukršteni tip konstrukcije vidljiv na *Slici 13. (srednje desno)* je možda tehnološki i jedan od najjednostavnijih sustava, ali korisno izrazito neupotrebljiv. Karakteristika ovog krovišta je zamjena vezne grede sa dvije ukrštene grede koje služe kao uporište rogovima pri dnu, ali drugi kraj im se diže sve do veza sa drugim rogom u glavnoj nosivoj ravnini, a to je u sredini tog roga. Simetrično tome je postavljena i druga kosa vezna greda te se te dvije vezne grede ukrštaju točno ispod sljemena krovišta za čiji su spoj u pravilu prihvaćene vertikalnom čeličnom zategom. Velika mana ovakvog krovišta je praktički neuporabljiv prostor potkrovlja zbog kosih greda koje ne ostavljaju mnogo prostora u razmaku sa rogovima. Međutim, velika prednost ovakve konstrukcije krovišta je potencijalni estetski doživljaj prostorija u prvoj etaži ispod krovišta jer ovakva zamjena vezne grede i oslobađanje centralnog prostora u ravnini prihvata krovišta na nosive zidove omogućava izvedbu zakrivljenih stropova, pa je tako moguće izvesti i strop sa dvije ravnine koje prate linije veznih greda do njihovog spoja, a ono najučestalije je izvedba svodastih stropova koji su karakteristika srednjovjekovnih i baroknih javnih građevina zapadne, središnje i srednje-istočne Europe.

U odnosu na, u prethodnom dijelu navedenoj, „Howe“ konstrukciji krovišta, u ovoj konstrukciji je iznimna važnost čelične zatege u sredini koja potpuno mijenja odnose opterećenja u elementima krovišta, pa tako uz rogove koji su u potpunosti tlačno opterećeni te zatege koja može biti samo vlačno opterećena, vezne grede zbog same zatege mijenjaju prijenos opterećenja, te su iznad točke ukrštavanja i spoja sa zategom tlačno opterećene, a ispod te točke vlačno opterećene (*vidljivo na Slici 15.*). [7]



Slika 15. Opterećenost elemenata ukrštenog krovišta

Kod ovog tipa konstrukcije, izrazito je naglašeno kako je vertikalna čelična zatega u sredini kritični element ove konstrukcije te kako je neizostavna, a za vezne grede se preporuča da radi oslobađanja većeg prostora ispod konstrukcije, ipak ne idu spojem sa rogovima više od sredine duljine rogova.

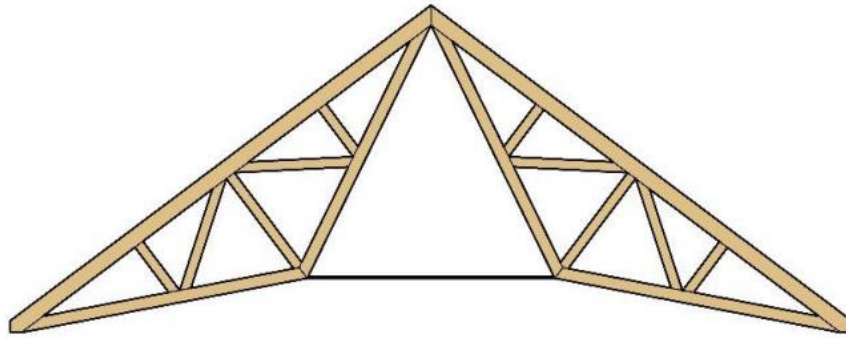


Do not omit the king from a scissor – ever!

Slika 16. Nepravilno ugrađena konstrukcija ukrštenog krovišta [7]

- REŠETKASTA KROVNA KONSTRUKCIJA TIPA „FINK“ (engl. Fink truss)

Rešetkaste krovne konstrukcije su u pravilu najpovoljnije za glavne nosive ravnine krovišta na vrlo širokim rasponima. Tako i rešetkasta konstrukcija tipa „Fink“ prikazana na *Slici 13. (dolje lijevo)* može savladavati vrlo velike raspone, a sastoji se od geometrije koja slični spoju dvije različite rešetkaste konstrukcije okrenute koso na prema dolje, te spojene u jednom kraju, pa tako postoje i razne modificirane varijante ovog nosača koje se zaista spravlja u dva simetrična, tj. identična dijela koji se na mjestu ugradnje spajaju u konačnu rešetkastu konstrukciju. Iz razloga dobivanja na prostoru u dijelu objekta na etaži ispod krovišta, tj. podizanja stropa, gradnje svodastog stropa ili slično, poput ukrštene konstrukcije (engl. „Scissors truss“), moguće je uklanjanje donje vezne grede i njena zamjena horizontalnom čeličnom zategom u obrnutom tjemenu svakog od dva dijela rešetkastog nosača, vidljivo na *Slici 17.*



Slika 17. Modificirani "Fink" rešetkasti nosač [7]

- REŠETKASTI NOSAČ SA KONZOLNIM NOSAČIMA (engl. „Hammer-beam truss“)

Tip konstrukcije krovišta sa oslonjen na konzolne nosače (engl. „Hammer-beam truss“) vidljiv na *Slici 13. (dolje desno)* je vrsta krovišta sa specifičnim načinom oslanjanja na nosive zidove na način da navedene konzole omogućuju pridržavanje uzdignute krovne vezne grede koja također prihvaća u svojoj polovici raspona vertikalni stup koji dolazi do sljemenog spoja rogova. Ovakav sustav krovišta uglavnom se koristio u srednjevjekovnim i gotičkim objektima velikih dvorana i crkava. Važna arhitekturna značajka ovog krovišta je da kod njega prostor potkrovlja u biti ne postoji, samo krovište je strukturnim značajkama najneučinkovitije, najproblematičnije i najneobičnije po pitanju prijenosa opterećenja za jedno krovište. Elementi ovog krovišta su pod utjecajem značajnih momenata savijanja i smicanja, posebice stupovi i kosi elementi. Tako je zanimljivost kod projektiranja ovog krovišta da je pri proračunima otpornosti opterećenja potrebno oba ležaja stupova o koje se krovište oslanja označiti kao nepomične, jer bi u slučaju jednog nepomičnog ležaja te jednog kliznog ležaja ovo krovište dalo nerealno prevelike momente savijanja u stupovima. Kod ovog krovišta je zanimljivost raspodjela sile opterećenja koja sa vertikalnog stupa iz sljemenog spoja rogova opterećuje malu veznu gredu koja se nalazi vrlo blizu samog sljemenog krovišta, spaja dva roga te najveći dio svog opterećenja prenosi na kosnike koji se oslanjaju na stupiće koji također prihvaćaju opterećenja dijela roga i prenose ga na malu „gredu s prepustom“ koja je oslonjena na novi stupić ispod nje i pridržana kosnikom u drugoj točki sve do one zadnje koja više nije oslonjena na stupić, već na nosivi stup u ravni

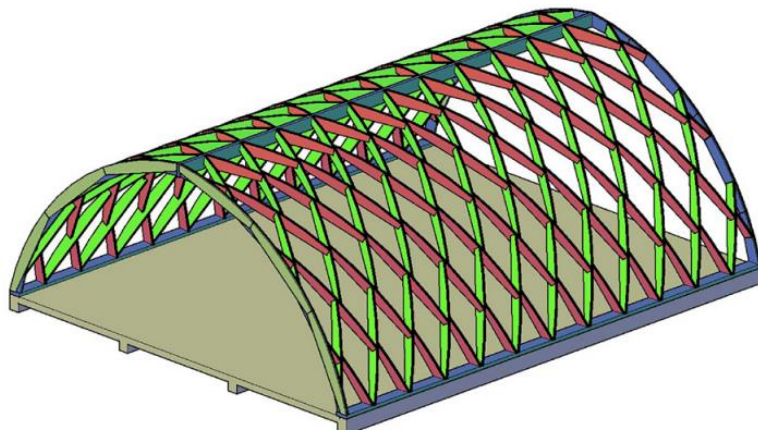
zidova objekta. Kod ove vrste konstrukcije, važno je naglasiti kako je potrebno osigurati i stabilizaciju izvan ravnine, jer ovo krovšte ima tendenciju bočnog savijanja. [7]



Slika 18. Primjer krovšta sa konzolnim nosačima - St. Patrick Church, Redding, SAD [7]

- ZOOLINGER SUSTAV

Tip krovšta imena „Zoolinger sustav“, prikazan na *Slici 19.* je konstrukcija krovšta valjkastog oblika koje počeo primjenjivati Friedrich Zoolinger 1918. godine, sastoji se od jednolikih lamela spojenih u čvorovima vijčanim spojem. Ovaj tip krovšta je možda i najiskoristiviji po pitanju slobodnog prostora ispod samog krovšta te ekonomski isplativiji po količini utrošenog materijala u odnosu na klasična drvena krovšta.



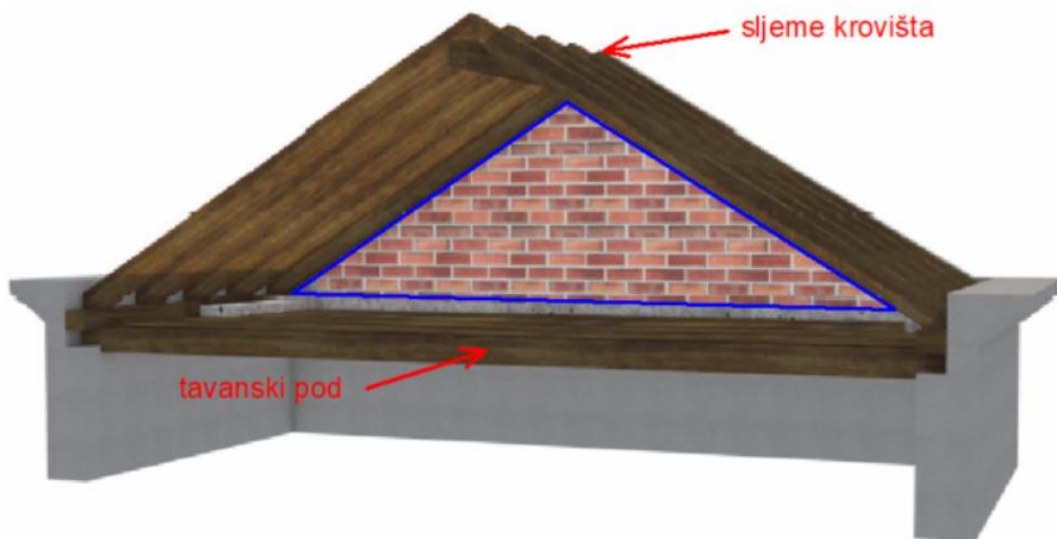
Slika 19. Sustav krovšta "Zoolinger" s kratkim lamelama [5]

3. ELEMENTI TRADICIONALNE METODE GRADNJE KROVOVA

Kada govorimo o stabilnosti krovišta i krovne konstrukcije, u njezinu stabilnost uključujemo i elemente objekta (zidani elementi, betonski elementi, drveni elementi itd.) koji nisu nužno dio same konstrukcije, no itekako pomažu u ostvarivanju stabilnosti krovišta.

3.1. Zabatni zid

Jedan od najvažnijih elemenata koji daje konstrukciji krovišta uzdužnu stabilnost, a manjim dijelom i bočnu jest zabatni zid objekta. Zabatni zid prati geometriju krovišta i može biti bilo kakvog oblika, svih vrsta trokuta, kvadratni i slično, no najčešće je oblika jednakokračnog trokuta što odgovara geometriji dvostrešnog krovišta.



Slika 20. Zabatni zid krovišta [8]

Zabatni zidovi na objektima stare gradnje su građeni kao nastavak zida etaže ispod krovišta, dakle jedina povezanost opečnih elemenata je bio mort. Dakle, većina zabatnih zidova na starim objektima u gradu Zagrebu nema armiranobetonske serklaže. Pri potresu koji je pogodio grad Zagreb, postojeći zabatni zidovi su se pokazali izuzetno nestabilnima, a njihova povezanost sa konstrukcijom krovišta je često bila, praktički nikakva, te su oni samo ispunjavali prazan prostor i zatvarali prostor potkrovlja. Uzrok ovome je slabljenje morta između opeka i spojnih sredstava na krovnim konstrukcijama. Nadalje, većina je takvih zabatnih zidova izgrađena u

debljine 15 – 35 cm te uglavnom bez obostrane žbuke, a takvi su bili izrazito osjetljivi na vanjska djelovanja i prije navedenog potresa. Takvi zidovi bez armiranobetonskih serklaža i drugih vlačnih ojačanja imaju izuzetno malu nosivost na horizontalne sile. [9] Nakon potresa u gradu Zagrebu 2020. godine, provedena je analiza ponašanja objekta stare gradnje korištenjem PBD metode (engl. „Perforamce based design“) u kojoj je za zabatne zidove pri kritičnom ubrzanju od potresne sile, ovisno o njihovom povezivanju s ostalim dijelovima konstrukcije (nosivi i poprečni zidovi, stropovi...), promatrano njihovo otkazivanje na savijanje. Utvrđeno je da tek zabatni zidovi sa pripadnim horizontalnim, vertikalnim i kosim serklažima (*Slika 46.*), adekvatnim spojem sa elementima krovne konstrukcije i oslonjenima na nosivi zid ispod njih koji je povezan sa stropnim pločama na svim etažama, *ne predstavljaju* ugrozu od otkazivanja i sloma ziđa te mogu nesmetano pružati stabilnost krovnoj konstrukciji. [8]

3.2. Kvaliteta i metode izrade drveta

Još jedna bitna značajka o kojoj ovisi stabilnost krovne konstrukcije je stanje drveta od kojeg je konstrukcija montirana. Velik broj krovnih konstrukcija u gradu Zagrebu je starosti preko stotinu ili dvije stotine godina, pa je iznimno važno napraviti analizu, te ispitivanja stanja drveta krovne konstrukcije.

Potrebno je napraviti osnovna ispitivanja kako bi se odredilo biološko stanje drva, veličinu zaostalog poprečnog presjeka drvenih elemenata, fizička i mehanička svojstva materijala i stanje spojeva. Prije svake obnove krovišta se izrađuje elaborat o ocjeni stanja drveta krovne konstrukcije na Laboratoriju za drvo u graditeljstvu (LDG) Fakulteta šumarstva i drvne tehnologije Sveučilišta u Zagrebu koji pomaže svojim metodama i znanjem ocijeniti stanje drva na prihvatljiv način, te da se projektantima, ali i ostalim sudionicima u projektu – najprije arhitektima i konzervatorima, predstave mjere i sredstva sanacije. Rezultat ispitivanja se prikazuje u klasama drveta raspodijeljeno kroz četiri klase gdje za klasu CC0 nema simptoma ugroze konstrukcije, za CC1 postoje manji simptomi koji se otklone jednostavnijim popravcima i mjerama održavanja, za CC2 je lokalizirana šteta (uključujući i napad insekata i trulež) koja zahtijeva zamjenu dijelova, a za CC3 su otkriveni vrlo izraženi simptomi (prokišnjavanje krova i opsežna trulež) koji mogu dovesti do popuštanja konstrukcije i gubitka funkcionalnosti krovišta. vrlo izraženi simptomi (prokišnjavanje krova i opsežna trulež) koji mogu dovesti do popuštanja konstrukcije i gubitka funkcionalnosti. Prvo se provodi preliminarni vizualni pregled drveta konstrukcije, nakon čega slijedi detaljan pregled te mikro-mehanička razorna ispitivanja drveta te se još ispituju sadržaj vode, rezistografsko ispitivanje te čvrstoća izvlačenja vijaka. [10]



Prema normi HRN EN 16096 za utvrđivanje stanja nepokretne baštine krovna konstrukcija se ocjenjuje sljedećim razredima stanja:

Parametar	Oznaka	Obrazloženje
Razred ocjene stanja	CC 3	Mehanička oštećenja, vlaženje iz zidova s posljedičnim oštećenjima i znatna šteta uzrokovana biološkom zarazom
Razred hitnosti otklanjanja rizika	UC 3	Potrebna neodgodiva i hitna intervencija
Razred preporučenih mjera	RC 3	Potrebna opsežna intervencija na osnovi dijagnosticiranih saznanja

Ova se analiza zasniva samo na nadziranim, izvorno zapisanim i ovdje prikazanim rezultatima mjerenja i analize predmetnog slučaja te na za tu svrhu dostavljenim ili sa zgrade izuzetim uzorcima i dokumentima, čime se osigurava neovisnost u kontrolnom postupku. Ispitno osoblje potpisom izričito iskazuje da ni na koji način ne sudjeluje u bilo kojem postupku vezanim uz uključene strane ili uz proizvode koji se ispituju ili ocjenjuju te ne sudjeluje niti u jednoj aktivnosti koja bi mogla biti u sukobu s neovisnošću njihove prosudbe. Ispitno osoblje je funkcijski neovisno od uključenih strana ili nadležnih institucija (ministarstva ili agencija). Rezultat ispitivanja ne ovisi o financijskim uvjetima.

Mišljenje izradili:

Dekan Fakulteta šumarstva i drvne tehnologije


Prof. dr.sc. Hrvoje Turkulin

Ovlašteni sudski vještak drvne tehnologije



Prof. dr.sc. Josip Margaletić

Slika 21. Primjer rješenja analize drvne konstrukcije [11]

3.3. Način oslanjanja i utjecaj krovne konstrukcije na zidani objekt

Tradicionalna gradnja objekata na području grada Zagreba i srednje-istočnom dijelu Europe zasnivala se na punoj opeci, „cigli“ kao glavnom materijalu pri gradnji. Takvi objekti bi pretežito bili oslonjeni na debele zidove od kamena, tzv. „bedeme“, koji bi bili ukopani u zemlju te su predstavljali određenu zamjenu za današnje armiranobetonske temelje kakve mi znamo, na njima bi se gradili debeli nosivi zidovi od 60 cm pa i do preko 1 m debljine od male, pune opeke. Takva forma nosivih zidova je značila da nigdje nema betona, pa tako niti na vrhovima nosivih zidova iznad posljednje etaže. To znači da je krovšte kompletno bilo oslonjeno na nosive zidove i to preko grede nazidnice, koja bi u smislu drveta bila zamjena za moderno rješenje, koje predstavlja horizontalni serklaž na vrhovima nosivih zidova. Radi korištenja potkrovlja ili povećanja tavanskog prostora iz raznih razloga, mnogi objekti imaju nastavak nosivog zida iznad drvenih greda stropne konstrukcije posljednje etaže, taj nastavak nosivog zida iznad nazivamo nadozid koji nikada nije viši od 1 m, jer u suprotnom taj element treba tretirati kao zid etaže iznad. Posjedovao objekt elemente nadozida ili ne, svakako je najprikladnije da postoji armiranobetonski horizontalni serklaž ispod same drvene grede nazidnice, kako bi se krovšte što stabilnije oslanjalo na zidove zgrade, tj. kako bi se opterećenje krovišta što ravnomjernije raspodijelilo. Ukoliko objekt ima elemente nadozida, svakako je poželjno da na mjestu iznad nosivog zida posljednje etaže tj. ispod nadozida postoji armiranobetonska stropna ploča ili sličan sistem ostvarivanja bočne stabilnosti iznad svake etaže objekta.

4. TEHNOLOGIJE OBNOVE I OJAČANJA KROVIŠTA

U današnje vrijeme, diljem Europe, gotovo svaki veći grad, pa tako i grad Zagreb i ostali značajniji gradovi Republike Hrvatske posjeduju jezgru grada koju nazivaju popularno, tzv. „stari grad“. Stari gradovi se sastoje od mnoštva objekata stare gradnje koji posjeduju drvena dvostrešna ili mansardna krovišta oslonjena na debele nosive zidove. Takvi objekti starosti stotinjak, pa i do pet stotina ili šest stotina godina su od strane ministarstva kulture konzervatorskim odjelima zaštićeni kao objekti kulturne baštine te ih je nakon svake adaptacije potrebno detaljno vratiti u izvorno stanje. Oni posjeduju mnoga oštećenja, te im je potrebno ojačati elemente, neke elemente, trošne obzirom na starost i zamijeniti, stabilizirati kompletnu konstrukciju, pa tako i kompletno krovište ojačati, obnoviti i osigurati njegovu svrhu za neki veći povratni period, dakle podložiti objekt procesu cjelovite obnove. Poseban razlog za takvu obnovu imaju stari objekti grada Zagreba koji su 2020. godine bili podvrgnuti snažnom potresu magnitude 5,5 prema Richteru. Navedeni potres na području grada Zagreba je bio samo dodatna motivacija i poticaj za pokretanje projekata cjelovite obnove starih, značajnih objekata i većinom objekata kulturne baštine zaštićenih „Zakonom o zaštiti i očuvanju kulturnih dobara“, a time i obnove njihovih krovišta. Krovišta mnoštva starih objekata kulturne baštine grada Zagreba su bila u potrebi za obnovom i izuzevši sam utjecaj potresa iz razloga nepogodnih utjecaja na drvo i drvenu konstrukciju takvih krovišta tijekom vremena.

4.1. Vrste oštećenja

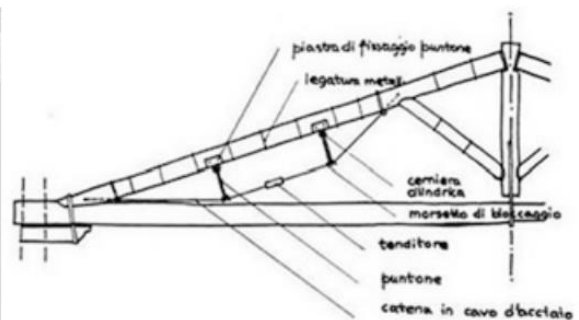
Tako uglavnom poznajemo tri glavna razloga za propadanje drvenih krovišta, a to su: problemi raspadanja drveta najčešće u područjima oslanjanja konstrukcije krovišta (vidi *Slika 40.*), oštećenje ili nedostatak čvrstoće ili krutosti spojeva te oštećenje ili nedostatak čvrstoće ili krutosti jednog elementa ili cijele drvene građe strukture. Prema tome, izvore oštećenja drvenih krovišta nalazimo u nekoliko točaka:

- Prirodne mane tipa drveta u postojećoj konstrukciji
- Biološko raspadanje drveta tokom vremena
- Požar
- Utjecaj okoliša i atmosferski čimbenici, primarno utjecaj vlage
- Pogreške u izvornom dizajnu i geometriji, montaži, održavanju i intervencijama
- Prekomjerno opterećenje. [12]

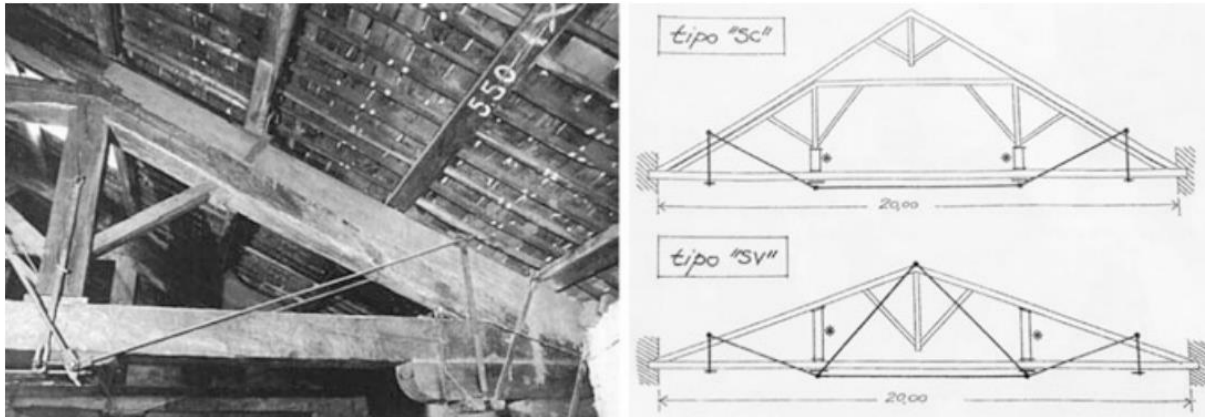
Prije same obnove krovišta te prije određivanja i projektiranja planiranih zahvata na konstrukciji krovišta, potrebno je vrlo temeljito i ispravno procijeniti materijal drveta konstrukcije, samo zatečeno stanje drveta te utjecaj truljenja drveta i eventualna oštećenja od napada insekata. Nakon procjene stanja postojećeg drveta i drvene konstrukcije je potrebno procijeniti utjecaj planirane zamjene elemenata ili spojeva, popravka i rješenja ojačanja konstrukcije koristeći pravila struke, znanja i inovativnosti manipulacije krovnim konstrukcijama kako bi poštovali kulturni značaj objekta te pri tome postigli obnovu krovišta uz određene ograničene troškove. [12]

4.2. Post naprezanje

Pri gradnji konstrukcija krovišta te pri rekonstrukciji istih, još od početka 19. stoljeća se primjenjuju „post-tensioning“ metode, tj. metode naknadnog zatezanja elemenata krovne konstrukcije kao jednoliko opterećene strukture pomoću čeličnih zateznih elemenata kao specifičan način naprezanja konstrukcije. Post-naprezanje je globalno korištena tehnika ojačanja krovnih nosača. U sustavu visulja i stolica sa vertikalnim i kosim drvenim elementima te veznim gredama spojevi vertikalnih i kosih stupova mogu prenijeti tlačno opterećenje, ali ne mogu ostvariti i tlačno naprezanje. Tako tokom vremena i konstantne izloženosti opterećenjima dolazi do skupljanja i deformacija drveta uslijed opterećenja okomitog na smjer vlakana drvenog elementa (reološko ponašanje drveta) gdje dolazi do gubitka ostvarivosti naprezanja kakvo je ono bilo početno prilikom ugradnje drvenih elemenata. Drugom polovicom 20. stoljeća se otkrilo kako se takvi nosivi sustavi u ravnini, čiji su drveni elementni pretrpili određeni zamor materijala, mogu ojačati post-naprezanjem uvođenjem čeličnih zatega u ravnini glavnog nosača, tj. paralelno sa smjerom vlakanaca drvnih elemenata glavne nosive ravnine vidljivo na *Slikama 22. i 23.* [12]



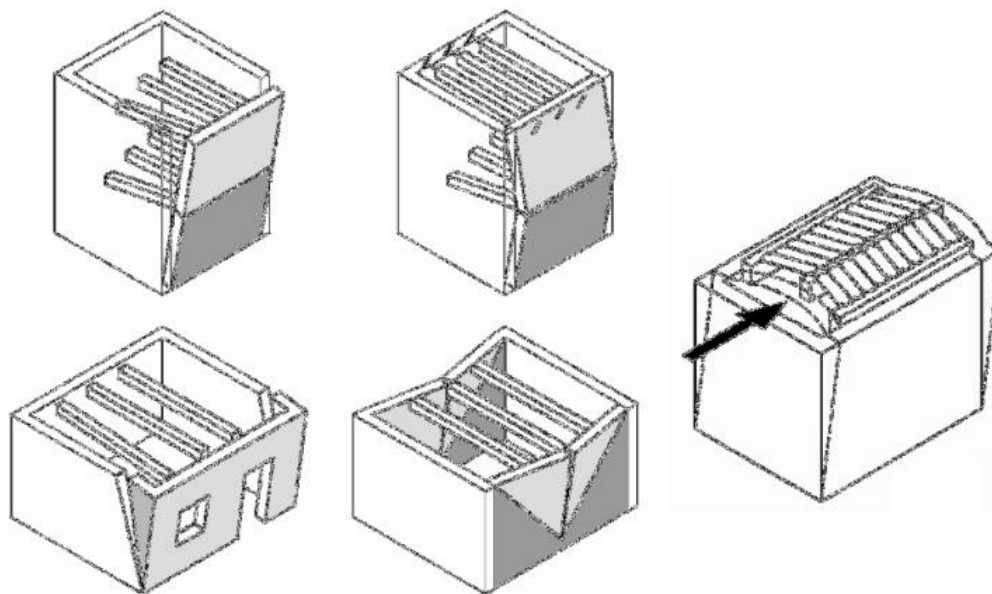
Slika 22. Post-naprezanje elementa roga teatra u Sarteanu, Italija [12]



Slika 23. Post-naprezanje elementa vezne grede teatra u Savoni, Italija [12]

4.3. Bočna stabilnost

Stare konstrukcije drvenih krovišta propadaju najčešće zbog truljenja drveta tokom vremena, uglavnom se događa propadanje potporne površine (drveni dijelovi greda ugrađeni u vanjske nosive zidove) te od prevelikih progiba uslijed savijanja u ravnini glavne nosive vezne grede koja je često u formi opterećene proste grede ili kontinuirane grede (ovisno radi li se o konstrukciji visulje ili stolice), a može služiti kao pričvršćenje dasaka i stropnih ploča pričvršćenih na donju plohu grede i kao oslonac daščanog poda potkrovlja, gdje su daske prikucane na vezne grede sa gornje strane. Posljedica nedovoljnom dijafragmatičnom ukrućenju, tj. savijanja izvan vertikalne ravnine veznih greda, jest da zidani zidovi mogu se naći u nedovoljnom otporu na bočna opterećenja koja djeluju izvan ravnine. Kao što je prikazano na Slici 24., pokazalo se da neadekvatna krutost poda u ravnini uzrokuje prevrtanje zidova okomito na seizmičko djelovanje, a uloga krute dijafragme, tj. ukrućenja veznih greda krovišta u sprječavanju prevrtanja nosivih zidova je omogućivanje prijenosa sila na zidove paralelno sa seizmičkim djelovanjem.[13]



Slika 24. Prevrtnanje zidova uslijed potresne sile uz nedovoljnu dijafragmatičnu otpornost [13, 16]

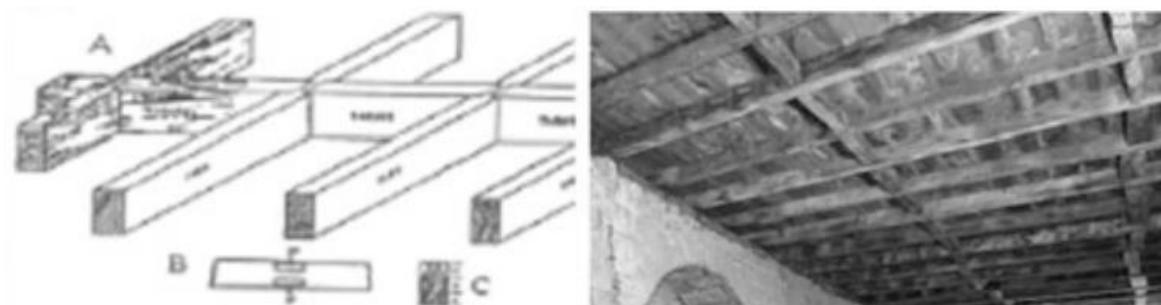
Tradicionalni drveni podovi uglavnom se sastoje od drvenih dasaka zakovanih na vezne grede, a te vezne grede su najčešće služile kao dijafragmatično ukrućenje vanjskih zidova objekta, pa je često sustav greda bio postavljen kroz nekoliko razina, a završno na vrhu sa veznom gredom koja je ujedno i dio konstrukcije krovišta. Stara tehnika za ojačavanje sustava drvenih podova je postavljanje drugog sloja drvenih ploča ili dasaka postavljenih okomito na postojeće, a često je vrlo zadovoljavajuće rješenje takvog ojačanja dva dijagonalno postavljena sloja u odnosu na vezne grede, a međusobno su okomiti. [12] No, to često nije bio slučaj, pri gradnji takvih krovišta su daske bile postavljene okomito i paralelno sa smjerom veznih greda, ako se radilo o dva sloja daščane obloge, a često se postavljao samo jedan sloj okomit na vezne grede. Pri projektu ojačanja takvog krovišta važan aspekt koji treba pažljivo razmotriti je krutost dijafragmi drvenog poda, koje mogu utjecati na stabilnost postojećeg nearmiranog zida. Za slučaj zgrade izložene bočnim opterećenjima, jednostavno rješenje ojačanja bočne stabilnosti veznih greda, a time i krovišta objekta, te dijelom i samog objekta je postavljanje drvenih podova s dijagonalno raspoređenim slojevima drvenih dasaka.[13] Ojačanje dijafragmatskog djelovanja drvenih krovišta i katova smatra se uspješnim ojačanjem zgrada protiv jakih potresnih djelovanja. Gledajući navedenu metodu, pokazalo se kao najučinkovitiji način koristiti CLT ploče od križno-lameliranog drveta za povećanje krutosti drvenih podova u

ravnini, kroz koje se ponašanje kompozitne strukture može značajno mijenjati, ovisno o primijenjenoj vezi. [8] Dodatna metoda ojačavanja bočne stabilnosti glavnih nosivih ravnina krovišta, tj. ukrućenje krovišta u uzdužnom smjeru je slično zakucavanju sloja drvenih ploča, također najpoželjnije CLT ploča preko rogova konstrukcije, vidljivo na *Slici 25*. [14]



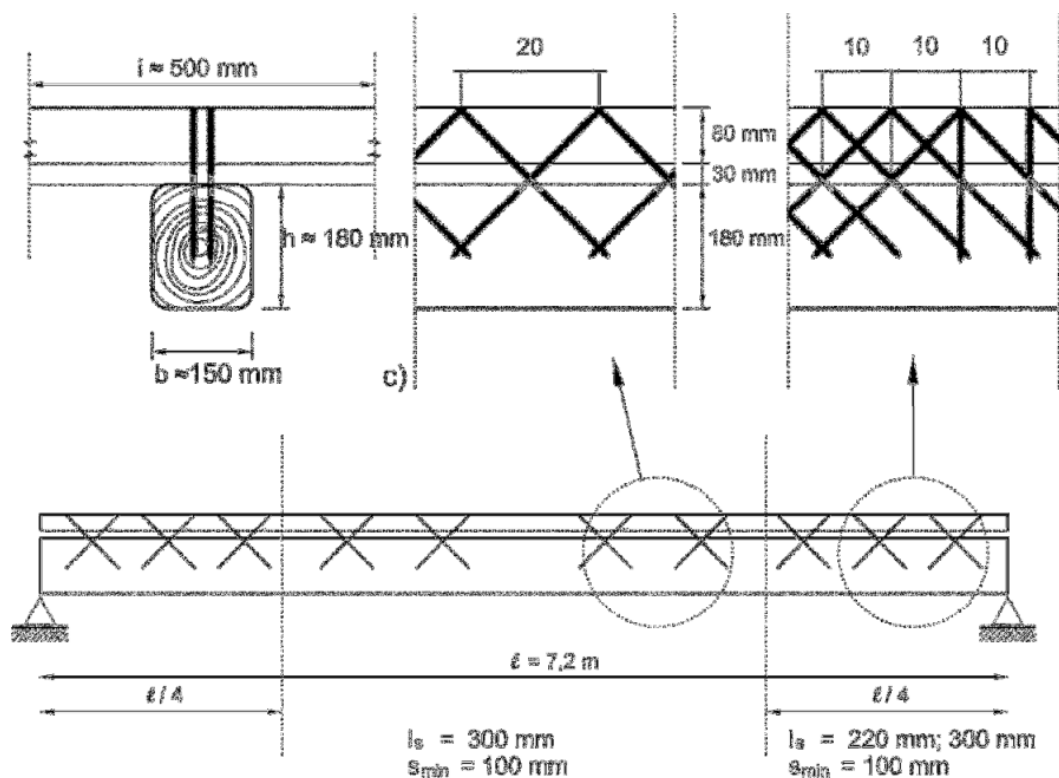
Slika 25. Zakucavanje drvenih i CLT ploča na rogove krovišta [14]

Druga, također učinkovita metoda bočne stabilizacije veznih greda, tj. glavnih nosivih ravnina krovišta je ugradnja drvenih spona (vidi *Slika 26*.), gdje se na vezne grede spajaju sekundarne, podne grede, okomite na vezne grede, s čime se postiže seizmičko poboljšanje otpornosti zgrade. Cilj svake strukturne obnove takvih krovišta je postići zadovoljavajuću krutost na savijanje te čvrstoću glavnih nosivih elemenata, a kod navedenih konstrukcija, to je vezna greda oslonjena na nosive zidove koja pridržava cijeli ostatak konstrukcije krovišta. Bočna stabilnost i učvršćivanje veznih greda se može postići ugradnjom čeličnih ili FRP ploča, ugradnjom veznih šipki, ugradnjom tanke betonske ploče ili zakucavanjem drvenih dasaka, OSB ploča, šperploča u nekoliko slojeva i ostalih ploča na bazi drveta na gornje plohe veznih greda. Ojačanje veznih greda, a time i nosivosti cijele ravnine jednog glavnog nosača konstrukcije krovišta može se postići i dodavanjem novih podupirača. Ugradnjom spomenutih rješenja postiže se preraspodjela bočnih seizmičkih opterećenja i učinkovita veza nosivosti zidova poboljšavajući seizmičku otpornost cijele zgrade. [12]

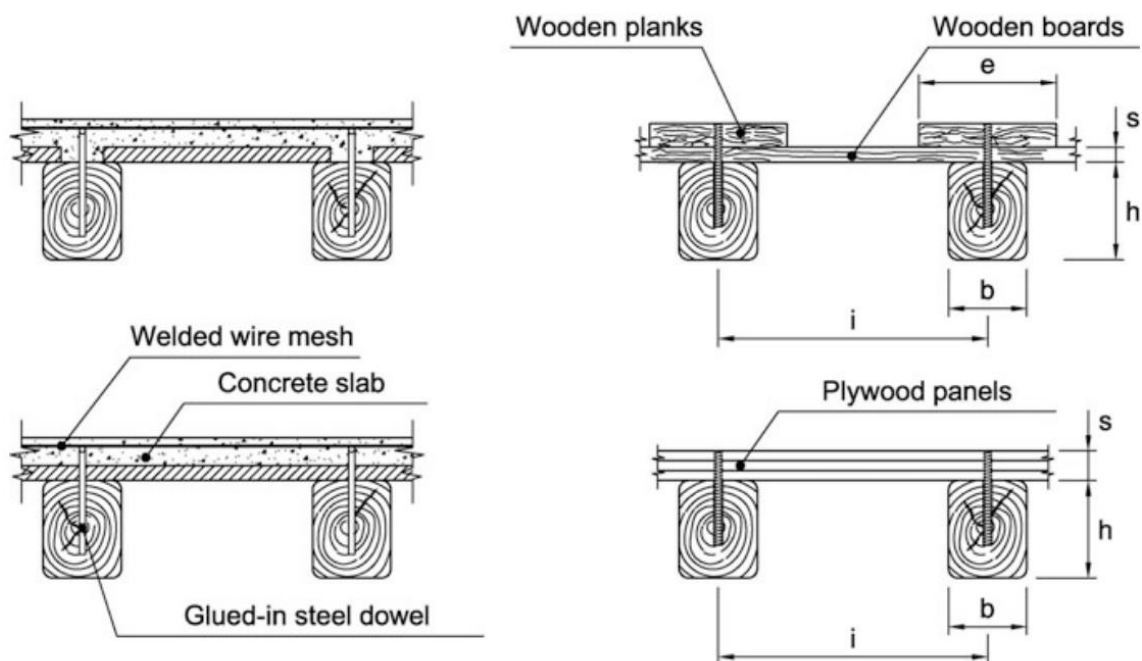


Slika 26. Bočno ojačanje veznih greda ugradnjom okomitih spona [12]

Na određenoj količini objekata čije su se vezne grede ojačavale na način zakucavanja dva sloja dasaka ili drvenih ploča na njih, su provedena ispitivanja kako bi se utvrdila učinkovitost ojačanja koja je dobivena kao usporedba krutosti drvenih greda, prije i poslije intervencije. A pokazalo se da je koso bušenje klinova ili zakucavanje dugačkih čavala pod kutom od 45° u vezne grede dalo najbolje rezultate ispitivanja krutosti na savijanje kao što je prikazano na Slici 27. [13]

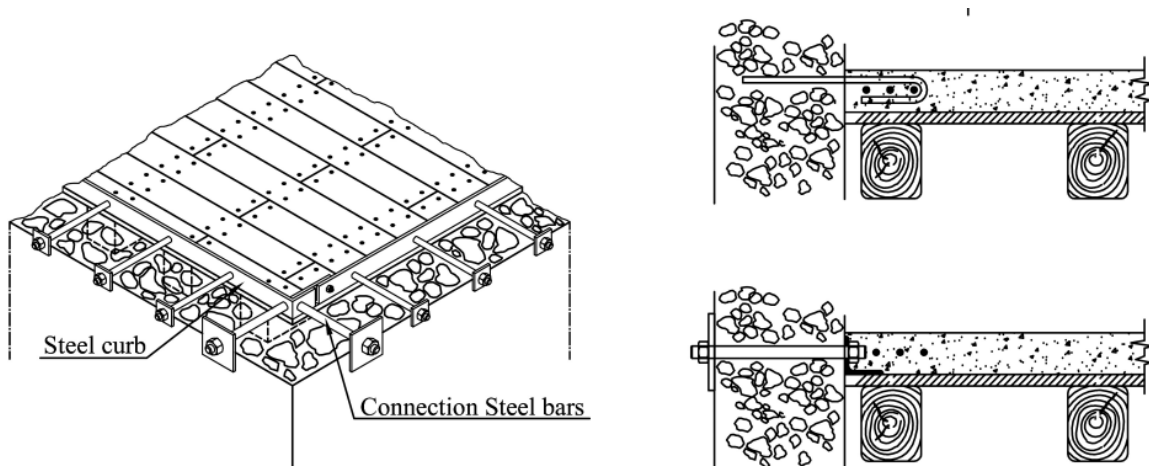


Slika 27. Koso zakucavanje dasaka na vezne grede [13]



Slika 28. Bočno ukrućenje veznih greda krovišta [12]

Kako bi se povećala nosivost poda potkrovlja koji je oslonjen na vezne grede, tj. kako bi se opterećenje ravnomjerno raspodijelilo, te na taj način osigurala i bočna stabilnost nosivih veznih greda od konstrukcije krovišta, ugrađuju se čelične ploče, drvo ili ploče od drva prikovane čavlima ili vijcima na glavne grede. [12] Pored svih navedenih ojačanja, možda i najefikasnija je jedna od najčešće korištenih i najučinkovitijih tehnika za ojačavanje podova, ugradnja nove, tanke betonske ploče visine 40–50 mm na postojeće vezne drvene grede kao što je vidljivo na *Slici 28. (gore lijevo i dolje lijevo)*. Novi kompozitni dio osigurava značajno povećanje krutosti poda, dok je betonska ploča povezana s rubnim nosivim zidovima na koje se krovište oslanja i može pružiti učinkovito djelovanje ploče poboljšavajući bočnu otpornost na opterećenje zidanih elemenata zgrada u seizmičkim područjima. [10] Armiranobetonska ploča treba biti zadovoljavajuće povezana sa vanjskim nosivim zidovima, a to se postiže na nekoliko načina. Jedan od načina je urezivanje nosivog zida i ubetoniranje ploče u urezani dio što može oslabiti nosivost zida ukoliko se iznad navedenog ureza nastavlja zid ili nadozid koji pridržava krovište. Drugi način je ugradnja čeličnih „L“ profila na rubovima ploče, tj. u spoju ploče i nosivog zida te sidrenje u zidove što je vidljivo na *Slici 29*. Najučinkovitija opcija je kombinacija urezivanja armiranobetonske ploče i ugradnja sidara u nosive zidove. [12]



Slika 29. Način povezivanja AB ploče sa nosivim zidovima [12]

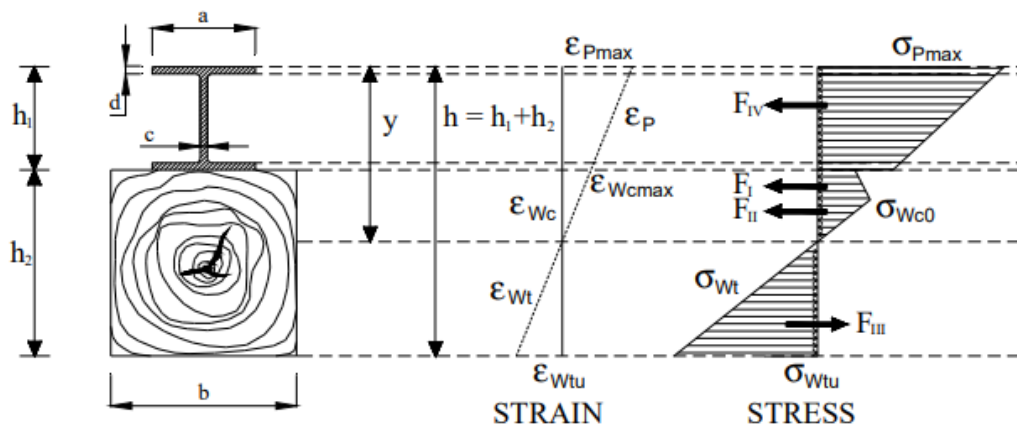


Slika 30. Ugradnja betonske ploče preko veznih greda objekta [14]

Ugradnja betonske ploče također osigurava zvučnu i požarnu izolaciju i povećava prirodnu frekvenciju poda. S druge strane, betonska ploča mora biti tanka jer se njome dobiva nepoželjnu dodatna težinu na nosivim gredama te općenito povećava težina objekta, a posljedično se povećavaju seizmička opterećenja i opterećenja temelja. Problem prakticiranja ove tehnike ojačanja veznih greda i time krovne konstrukcije, te time i cijelih krovništa je njezino učestalo neodobranje od strane konzervatorskih odjela za zaštitu zgrada kao kulturnih dobara.[14]

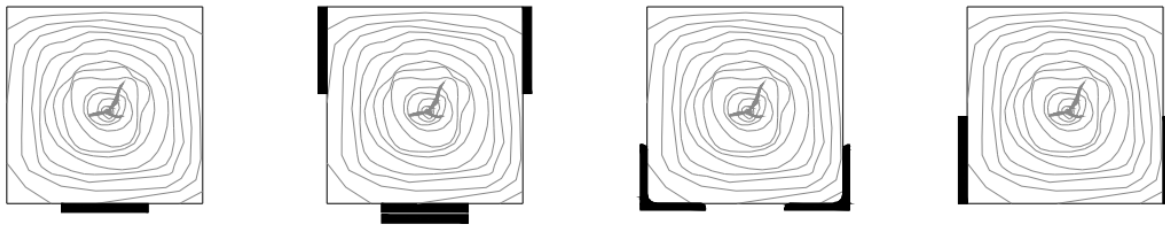
4.4. Ojačanje vezne grede

Zanimljiva opcija ojačanja veznih greda, a time i ostatka krovišta je postavljanje čeličnih H ili HEA profila, greda iznad postojećih drvenih greda. Takvim ojačanjem se postiže bočna stabilnost, ali uvelike pospješuje otpornost na savijanje u ravnini. Time se stvara miješana čelično-drvena greda, tj. dvije grede u funkciji jedne grede. Ovo ojačanje značajno povećava čvrstoću, krutost i duktilnost te povećava razinu maksimalnog napreznja i razinu deformacije koju greda može postići (vidi *Slika 31.*). [14]



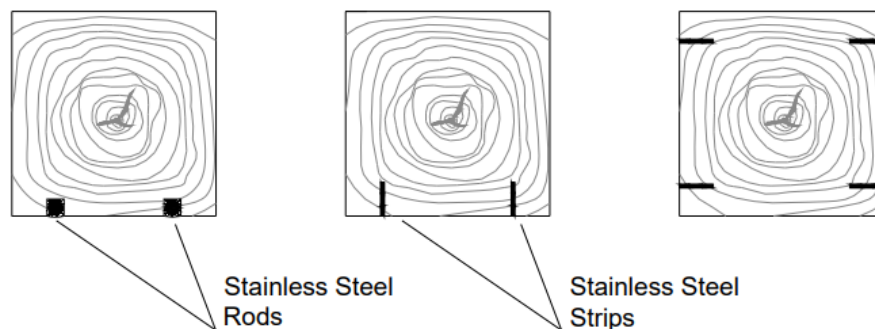
Slika 31. Ojačanje drvene grede čeličnom "HEA profil" gredom [14]

Moguća metoda ojačavanja nosivosti i otpornosti na savijanje veznih greda je ugradnja čeličnih pločica sa vlačne strane grede ili „L“ gredica koje obuhvaćaju donje bridove grede. Na *Slici 32.* je prikazano postavljanje čeličnih pločica sa donje strane grede ili duple postave pločica ispod ukoliko se ustanovi kako sama drvena greda pretrpljuje prevelika opterećenja u odnosu na svoju dimenzioniranost i mehanička svojstva te bočno postavljanje pločica za ostvarivanje bočne stabilizacije. Kod navedene metode ojačanja je potrebno površine drveta koje će biti u stalnom kontaktu sa čeličnim pločicama premazati biološki anti-degradacijskim premazima jer će u sloju spoja drveta i čelika biti potencijalno nakupljanje vlage i stvaranje uvjeta za ubrzano raspadanje drveta. Za spoj drveta i pločice je moguće koristiti određena ljepljiva na bazi smole, no preporuke su spajati pločice na drvo mehaničkim sredstvima (vijcima, navojnim šipkama, posebnim čavlima i sl.) ukoliko se radi o tvrdom drvetu, jer kod mekog drveta mehanička spojna sredstva mogu prouzrokovati lokalna oštećenja grede te je u tom slučaju preporuka koristiti „epoksi“ ljepljiva. Glavna prednost u odabiru baš ove metode ojačanja je brzina njezine izvedbe te činjenica da se prilikom ojačavanja postojeća greda minimalno oštećuje. [14]



Slika 32. Primjeri ugradnje čeličnih pločica uz veznu gredu [14]

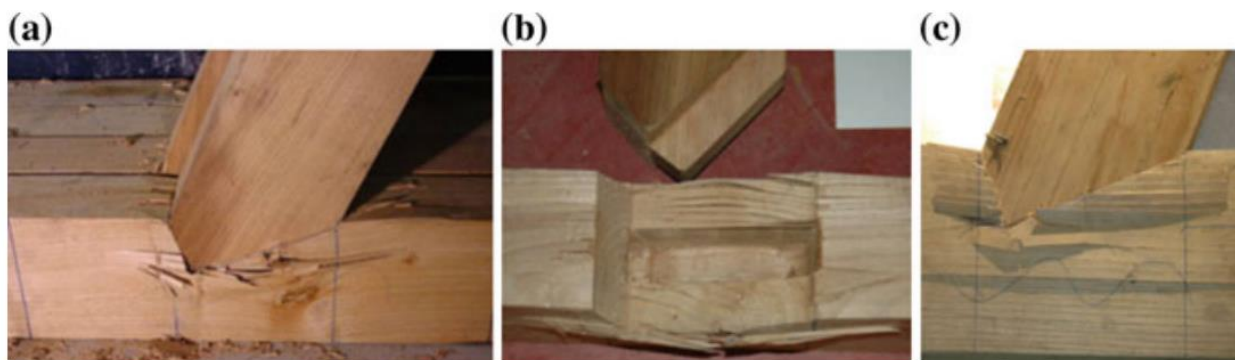
Slična metoda već spomenutoj je ugradnja ojačavajućih staklo-plastičnih traka ili FRP karbonskih šipki urezom u gredu u njezinoj vlačnoj zoni. Ovi kompozitni elementi imaju visok omjer čvrstoće i krutosti u odnosu na vlastitu težinu. Nedostatak im je mala linearna elastičnost pri opterećenju tokom vremena, dakle ovi elementi najbrže oslabljuju na vlačnu čvrstoću i krutost tokom vremena u odnosu na ostala metalna ojačanja veznih greda krovišta. [14]



Slika 33. Urezivanje FRP šipki ili traka u veznu gredu [14]

4.5. Spojevi

Uz drvene grede i stupove te ostale elemente konstrukcije krovišta, možda i najvažniji elementi su spojevi elemenata konstrukcije. Spojevi su ključna mjesta za prijenos sila opterećenja sa jednog elementa na drugi, a mogu biti ostvareni uz pomoć drvenih zarezova, drvenih spojnika, željeznih klinova i ostalih metalnih pločica, vijaka, navojnih šipki i slično. [12]



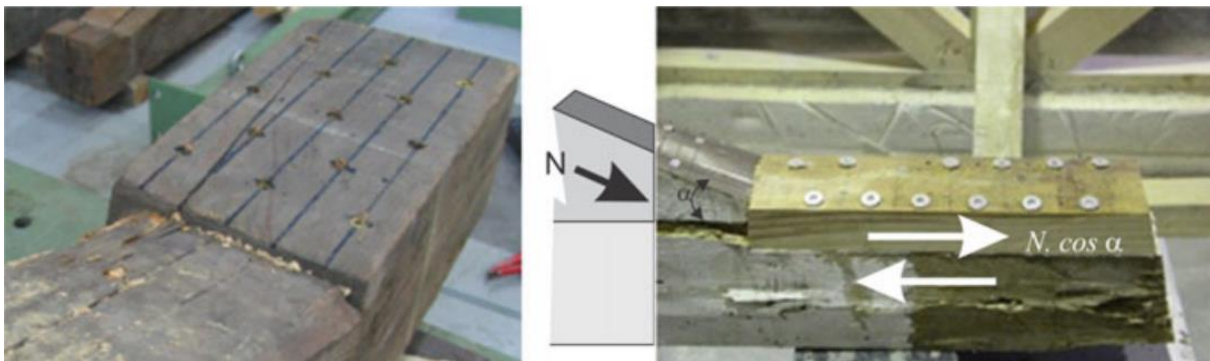
Slika 34. Oštećenje tesarskog spoja kosog elementa oslonjenog na gredu; a) oštećenje uslijed tlačnog opterećenja u ravnini; b) oštećenje uslijed nedovoljne bočne stabilnosti spoja; c) kombinirano oštećenje uslijed tlaka u osi i bočnog ispupčenja [12] --> (17)

Drveni spojevi: Pri gradnji krovništa starih objekata se najčešće koristio drveni spoj zarezom drvenog elementa, tzv. „tesarski spoj“ te spoj željeznim klinovima. Tesarski spojevi ovise o konstrukcijskom sustavu, o ograničenim duljinama drvene građe, lokalnoj tradiciji gradnje krovništa te stanju tehnologije i obrtništva svakog razdoblja i područja. Pri rekonstrukciji takvih krovništa sa tesarskim spojevima, uočena su znatna oštećenja pri dugotrajnom tlačnom opterećenju povezana s lomom smicanja. Promatrano na licu mjesta takvih krovništa uočeno je da se većinom radi o loše projektiranom spoju (premale kontaktne površine) ili neočekivane sile tlaka u jednom elementu vidljivo na *Slici 34*. [12] Zapravo, najčešća oštećenja drvenih krovniških konstrukcija su uzrokovana neučinkovitim spojevima, pogrešno projektiranim i/ili pogrešno izvedenim. Obično zglobovi, tj. spojevi između krovniških konstrukcijskih elemenata napravljeni su zarezima, koji se nazivaju jednostruki u slučaju jednog zareza, a kada ima više od jednog zareza, radi se o dvostrukom ili višestrukum spoju. [13]

Kada govorimo o ojačanju takvih spojeva, obično je nužna zamjena dijela ili cijelih elemenata od spoja pa nadalje. Jedna od najstarijih tehnika ojačanja takvih spojeva je ugradnja drvenog klina te i ona može biti zadovoljavajuće sredstvo ukoliko je isključivo takvo ojačanje bilo primijenjeno prilikom montaže spojeva te je zahtijevana obnova na način da se spojevi izvedu identično kao i prethodno. Tehnike ojačavanja koje se danas koriste pokušavaju reproducirati stare tehnike čak i kada se koriste nove metalne ploče, trake i pričvrtni elementi poput vijaka i navojnih šipki. Uglavnom je ugradnju drvenih klinova pratilo dodavanje zabodenih klinova bočno na dva elementa kako bi se ostvarilo dodatno učvršćenje, a posljednjih godina stvaraju se razne nove tehnike ojačanja takvih spojeva konstrukcije krovništa kao što su: upotreba vijaka (uključujući navojne šipke), metalnih elemenata (ploče, trake i dr.), lijepljeni kompoziti

(staklena ili ugljična vlakna, pleteni tekstil) i zalijepljene šipke ili pločice, ili čak potpuno injektiranje tekućim ljepilima. [12]

Kod tesarskih spojeva je u većini slučajeva potreban i popravak kraja vezne grede zbog propadanja i za nadomještanje degradiranog materijala koristi se koristiti drvena proteza (vidljivo na Slici 35). Proteza se može izraditi od drvenih elemenata (punih ili lijepljenih), čeličnih elemenata ili smole mehanički spojene na zdravo drvo s čeličnim spojnicama ili različite vrste zalijepljenih i vijčano spojenih pločica.



Slika 35. Vijčano spojena proteza ojačanja urezanog spoja ojačana za posmična naprezanja [12]

Osim ugradnje ojačanja u vidu drvene proteze, ovakav spoj se može još ojačavati i bočnim, vijčano spojenim pločicama, metalnim vijcima, trakom za uvezivanje i navojnim šipkama prikazano na Slici 37. Važno je napomenuti da način ojačanja ovisi o stanju opterećenja spoja i vrsti naprezanja za koje je potrebno prenijeti opterećenje. Kod svih navedenih ojačanja spojeva dimenzioniranje odabrane tehnike temelji se na proračunu otpornosti na smicanje novih spojnih elemenata. [12] Izvedba spoja vezne grede i rogova je ključna, zbog toga jer su to najčešće zone u kojima je biološko degradiranje najveće, a u tom spoju su i visoke razine naprezanja zato što predstavljaju zone koja su ondje koncentrirana. Spojevi moraju biti u stanju oduprijeti se horizontalnim pomacima. Sile trenja su nedovoljne da se odupru horizontalnim pomacima uzrokovanim potresima, pa je stoga adekvatno, proračunato sidrenje i ojačanje spoja nužno. Tlačno opterećenje pri ovakvim spojevima se prenosi kontaktnim površinama drvenih elemenata, dok se vlačna opterećenja najčešće prenose metalnim ugradbenim elementima ojačanja spoja. [13]

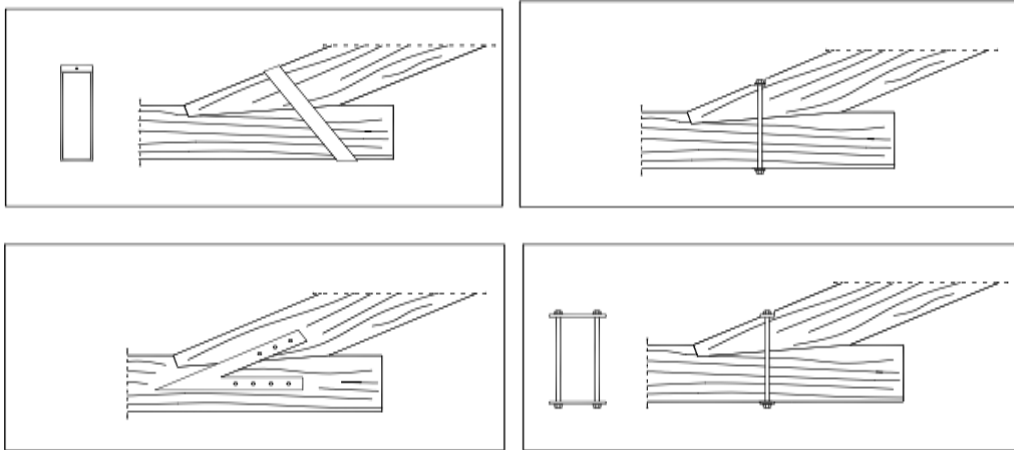


Slika 36. Spoj novog dijela elementa sa starim zdravim dijelom nosivog elementa uz ojačanje navojnim šipkama [12]

Analizirajući raspodjelu sila koji se javlja unutar zgloba vezne grede i roga, zaključilo se kako se ponajviše treba obratiti pozornost na četiri parametra:

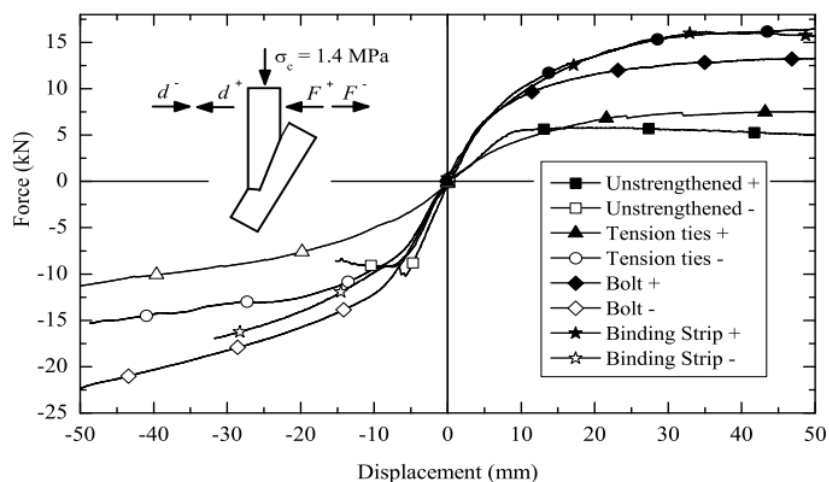
- Postojanje nezanemarive napetosti okomito na vlakanca često praćena značajnim posmičnim naprezanjima
- Koncentracija naprezanja uzrokovana određenim oblikom ureza svakog povezanog elementa
- Mogućnost postepenog stvaranja pukotina u blizini spoja
- Ekscentricitet u prijenosu sile. [12]

Četiri osnovne vrste ojačanja koje se provode u ovom spoju su: traka za vezivanje, vijak u osi elemenata u spoju, prihvatne bočne pločice i par vijaka sa pločicama kao što je navedenim redoslijedom prikazano na *Slici 37*. [13]

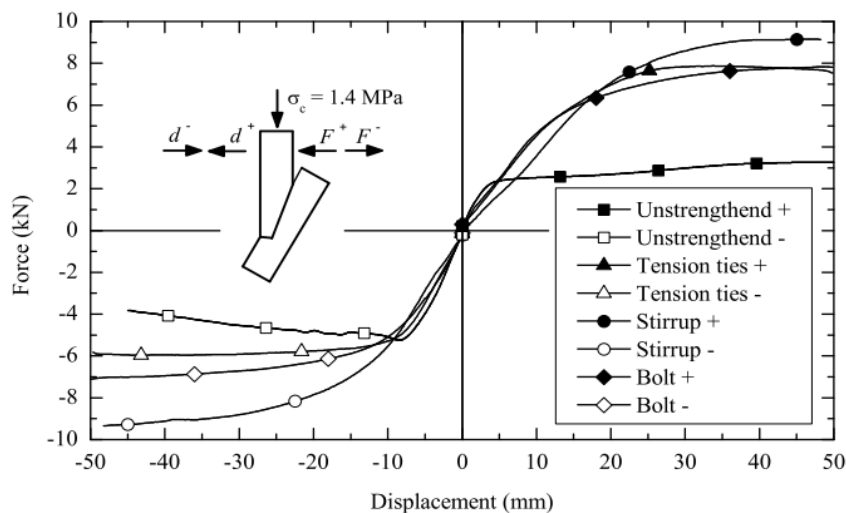


Slika 37. Metalna ojačanja spoja vezne grede i roga [13]

Za navedeni spoj su provođena ispitivanja elasto-plastičnog ponašanja spoja vezne grede i roga koji se oslanja na nju u slučaju gdje se rog na veznu gredu oslanja pod kutom od 30° i pod kutom 60° . Na Slikama 38. i 39. je vidljivo promatranje i rezultati neojačanog spoja u odnosu na različite veličine pritiskujućeg i odizujućeg opterećenja. Stanje spoja predstavljaju nelinearne krivulje zavisnosti povećanja pomaka uslijed povećanja opterećenja na kojima su prikazane točke, tj. znakovi koji prikazuju koliki je pomak roga pri spoju pri točno određenim veličinama sila koje se nanose na ispitivani spoj. [13]



Slika 38. Ovisnost pomaka grede pri spoju s rogom pod kutom 30° pri različitim ojačanjima [13]



Slika 39. Ovisnost pomaka grede pri spoju s rogom pod kutom 60° pri različitim ojačanjima [13]

Stoga, u odnosu vijka i vezne trake, ojačanje vijkom je učinkovitije u smislu kapaciteta duktilnosti, čije je povećanje i sami cilj potrebnih ojačanja te osiguranje boljeg seizmičkog ponašanja veze, dok se kod pritiskujućeg djelovanja ojačanje bočnim prihvatnim pločicama pokazalo najefektivnije. [13]

4.6. Oslanjanje veznih i stropnih greda

Završeci veznih nosivih greda, ugrađeni u zidane zidove ili naslonjeni na njih, su najviše izložene zone biološkim utjecajima. Kako bi se, pri obnovi krovništva, spriječila bilo kakva biološka degradacija obnovljenog drveta krovništva, krajevi greda obično su obojeni bojom, premazani uljem, otopinom olova ili katranom. [12]



Slika 40. Primjer oštećenja oslonca veznih greda na nosivim zidovima [12]

Oštećenja ne moraju biti toliko izražena kao na prethodnoj slici, ali i manja oštećenja na osloncima veznih greda na nosive zidove mogu uzrokovati znatne deformacije tokom vremena poput nejednolikog slijeganja krovnih nosivih ravnina uslijed oštećenja kraja rogova i veznih greda na osloncu nosivih zidova vidljivo na *Slici 40*. [15]



Slika 41. Prikaz nejednolike deformacije krovnih ravnina [15]

Prema načinu zamjene i ojačanja takvih oštećenih elemenata, najčešće se koriste dva različita načina obnove trošnih elemenata, najzastupljenija metoda korištenjem ojačanja od drveta, materijala na bazi drveta i čeličnim elementima, te druga metoda fokusirana na zaštitu i ojačanje drvenih nosivih greda krovišta, korištenjem smola i FRP polimerima ojačanim vlaknima. [13]

- Korištenje ojačanja od drveta, materijala na bazi drveta i čeličnim elementima

Pri korištenju takvih ojačanja elemenata krovišta, podrazumijeva se zamjena raspadnutog dijela grede sa elementom koji je također od drveta jer svako novo drvo treba biti iste vrste kao izvorno i trebaju imati isti koeficijent upijanja vlage. Čelična ojačanja su predviđena kao dodatni, novi elementi ukoliko je to potrebno kako bi ukrutili spoj i pomogli pri prenošenju opterećenja na nosive zidove. Čelična ojačanja mogu biti u vidu: čeličnih pločica ili „I“ profila bočno spojenih na oštećene grede, čeličnim kvadratnim prstenovima koju obuhvaćaju oštećene grede, zalijepljenim i utisnutim čeličnim pločicama u oštećenu gredu, navojne šipke kroz oštećenu gredu i slična

rješenja (vidi *Slika 37.*). [16] Pri ojačavanju krovišta sa metalnim ojačanjima, uglavnom se koriste nehrđajući čelici koji imaju visoku kompatibilnost sa drvetom što spojevima i elementima krovišta omogućuje laku i jednostavnu potencijalnu zamjenu u budućnosti. Kako su čelična ojačanja elementi koji često nisu postojali u osnovnoj konstrukciji, konzervatorski odjeli ponekad pokušavaju izbjeći njihovu upotrebu, no njihovo djelovanje je toliko efikasno, da je upotreba nehrđajućih čelika kao ojačanja neophodna. Na *Slici 42.* je prikazano u kojim slučajevima su određene vrste čeličnih ojačanja prikladna za krovišta kulturno zaštićenih objekata.

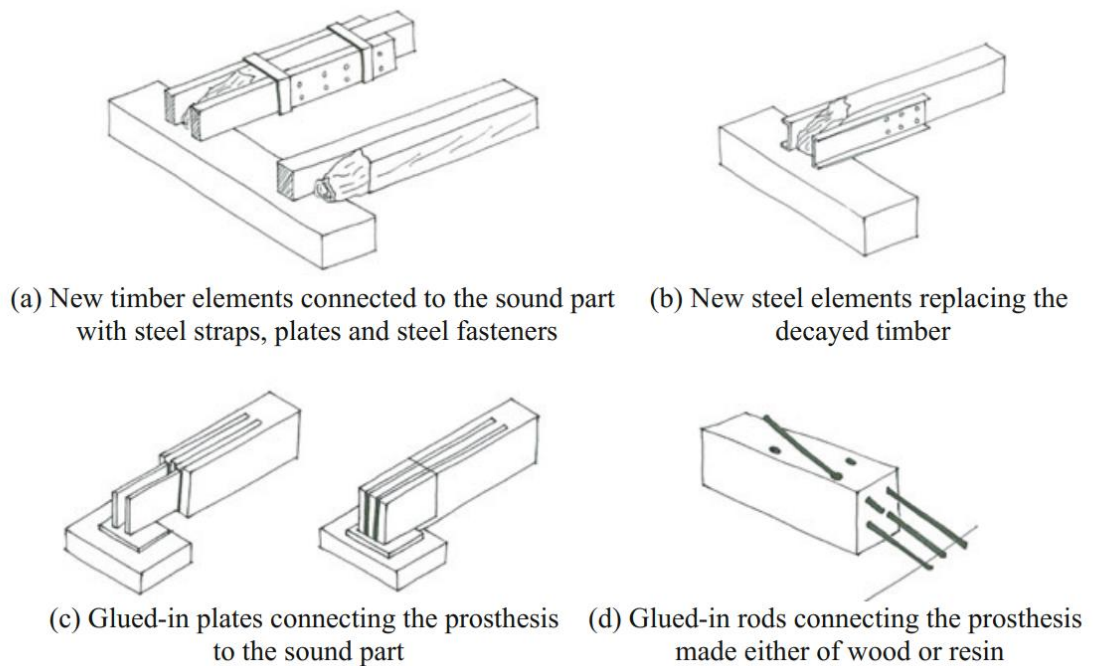
Table 2. Repair methods using stainless steel elements.

Method	Appropriate for Historic Structures	Appropriate for Repair of Beam Ends	Appropriate for Repair/Reinforcement of Truss Joints
Fasteners	Yes	No	Yes
Press-bended sheets	Yes	Yes	No
H-, T-, L-, I-shaped Profiles	Yes	Yes	Yes
Rods and prostheses	Yes/No ¹	Yes	Yes
Nail-plates	No	No	Yes

¹ This often depends on the used approach of a local conservation body.

Slika 42. Prikladnost čeličnih ojačanja za dio krovišta [14]

Postoji i ograničenja u korištenju nehrđajućih čelika kao ojačanja poput visokih cijena legura od nehrđajućeg čelika, korištenje kompozitnih materijala (FRP) i percepcija javnosti da FRP-ovi imaju izvrsnu svojstva u odnosu na čelik te ograničena dostupnost, na građevinskom tržištu, strukturnih profila od nehrđajućeg čelika, negativni utjecaj temperature na čelične elemente unutar i oko drveta te moguće prekomjerno zatezanje okretnog momenta u vijcima koje može proizvesti značajna oštećenja, posebno na mekom drvetu. Međutim, korištenje čeličnih ojačanja ima mnoge značajne prednosti u odnosu na nove kompozitne materijale poput veće reverzibilnosti u konstrukciji tokom vremena, dužoj trajnosti uslijed svojstva anti-korozivnosti, boljoj kompatibilnošću sa konstrukcijskim drvetom te postizanje velike otpornosti na opterećenja i duktilnosti. [14]



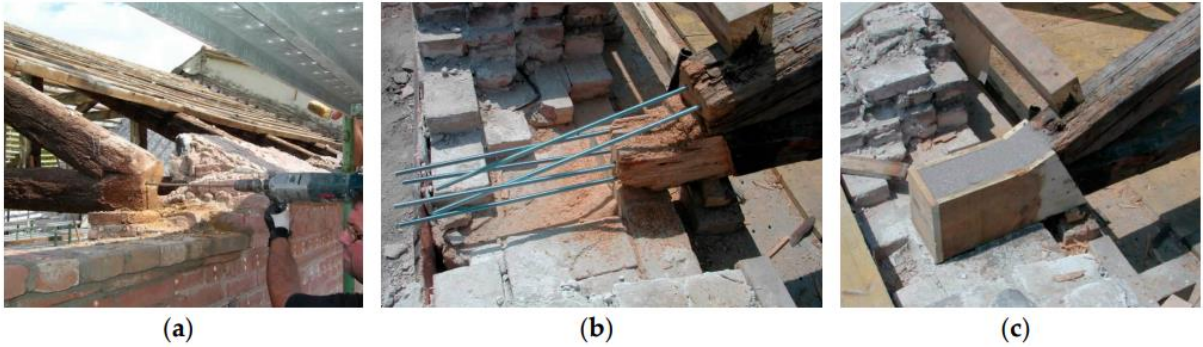
Slika 43. Primjeri čeličnih ojačanja kraja drvene grede [12]

- Zaštita i ojačanje drvenih nosivih greda krovišta, korištenjem smola i FRP polimera ojačanim vlaknima

Ova metoda ojačanja krovišta uključuje ojačanja protezama na bazi smole ili FRPa. FRP je skraćenica za „Fiber Reinforced Polymers“, u prijevodu Vlaknasto ojačani polimeri, a počeli su se koristiti osamdesetih godina prošlog stoljeća. Pri ovoj metodi se trošni ili raspadnuti dio grede zamjenjuje pomoći zalijepljenih kompozitnih ploča ili šipki na bazi polimera ili smole. Iznimno je značajna karakteristika zamjene drveta takvim sredstvom ojačanja to da i navedeni element ojačanja ima identična ili barem jako slična svojstva momenta otpora kao i zdravo drvo elementa koji se mijenja. Prema tome se veličina, količina i raspodjela takvih šipki ili pločica izračunava kako bi se najpravilnije dimenzionirali elementi ojačanja. [12] Nekoliko je studija pokazalo da je moguće ojačati ili popraviti drvene konstrukcije pomoću kompozitnih ploča, šipki ili traka, no glavni nedostaci u korištenju FRP-a uključuju njihovu malu trajnost, lošu kompatibilnost s matičnim materijalima i degradaciju vlakana kompozitnog elementa. [14]

Još jedna zanimljiva vrsta ojačanja krajnjih dijelova veznih greda pri njihovom oslanjanju je, kao što se vidi na *Slici 44.*, izrezivanje oštećenih dijelova drvene grede te zamjena oštećenog dijela armirano betonskim završetkom. Ova vrsta proteze se čini na način da se u zdravi dio grede sidre šipke, koje mogu biti: od staklo plastike, karbonske

FRP šipke ili obične armaturne rebraste šipke od nehrđajućeg čelika. Nakon što se navedene šipke sidre sa posebnim ljepilima za sidrenje metalnih sidara u drvo, prestali dio do oslonca se zatvara oplatom te se zapunjava posebnim, čvrstim betonom male granulacije. Ova metoda često nije ekonomičnija od ugradnje drvene proteze, ali joj je prednost jednostavnost ugradnje.[14]



Slika 44. Ojačanje oštećene vezne grede; a) bušenje rupa za sidrenje ojačanja, b) sidrenje metalnih ili FRP šipki, c) zapunjavanje odrezanog dijela čvrstim betonom [14]

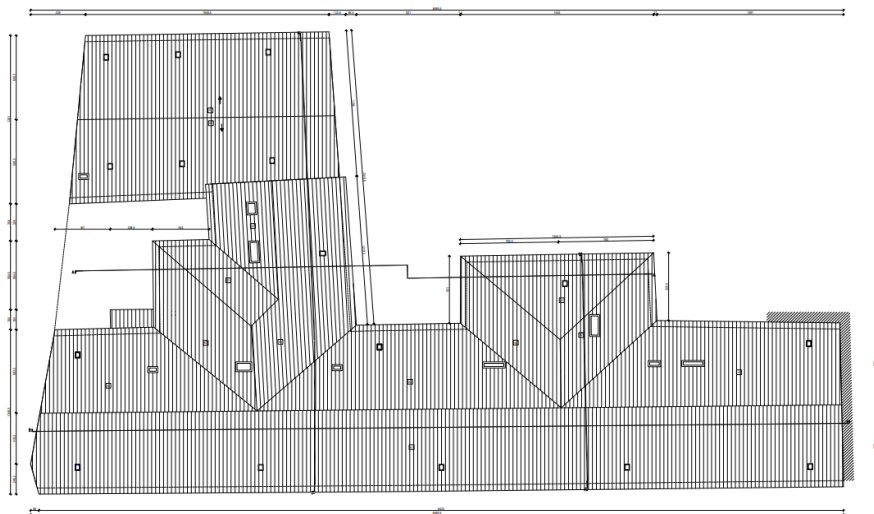
5. PRIMJERI OBNOVA I OJAČANJA KROVIŠTA IZ PRAKSE

U sklopu ovog rada promatrano je četiri gradilišta u gradu Zagrebu, tj. objekata pod projektom cjelovite obnove koji uključuje i intervencije na konstrukciji krovišta poput zamjene trošnih i na druge načine oštećenih dijelova, ojačanja same konstrukcije, ojačanja i izmjene postojeće konstrukcije u novi tip konstrukcije ili demontažu dijela krovišta ili cijelog krovišta te gradnju novog krovišta.

5.1. Rekonstrukcija krovišta Gornjogradske gimnazije

Objekt Gornjogradske gimnazije u Zagrebu nalazi se na lokaciji Trg Katarine Zrinske 5. Zgrada je stara više od pet stotina godina te je do Zagrebačkog potresa 2020. godine prošla kroz nekoliko obnova, no ne konstrukcijskih, pa je tako objekt od razine suterena do vrha prvog kata očuvan kao originalno izgrađen u 15. stoljeću u funkciji Benediktinskog samostana. Navedene karakteristike ne vrijede i za samo krovište, jer prvobitni krov demontiran, etaža drugog kata, pa tako i postojeće krovište izgrađeno nešto kasnije kada je objekt prenamijenjen u prvu zagrebačku gimnaziju.

Sam objekt je veličine površine etaže drugog kata, a time i tlocrtna projekcija streha krovišta ukupno 1127,05 m². Kao što je vidljivo na tlocrtu *Slike 45.*, objekt se sastoji od tri dijela konstrukcije krovišta nad glavnim dijelom objekta i posebnim dvostrešnim krovištem na ulaznom dijelu objekta. Zgrada ima ukupno 10 streha, tj. 10 različitih padina krovišta.



Slika 45. Tlocrtni prikaz krovišta Gornjogradske gimnazije

Konstrukcija krovišta je klasična visulja na velikom dijelu objekta sa dva manja dijela krovišta okomita na uzdužni smjer glavnog krovišta gdje je jedan veći dio također visulja spojena na veliku krovnu konstrukciju iznad većeg dijela objekta, a manji dio modificirana verzija visulje na vrlo maloj tlocrtnoj površini objekta. Iznad posebnog dijela objekta sa sjevernog pročelja se nalazi zasebno odvojeno dvostrešno krovište koje predstavlja specifičnu verziju visulje/stolice koja se rijetko nalazi u praksi. Nakon prvobitne montaže postojeće konstrukcije krovišta, naknadno su bili sazidani opekom zidani stupići za pridržanje konstrukcije krovišta ispod drvenih stupova koji se oslanjaju na veznu gredu, ali samo sa jedne strane glavne nosive ravnine, tj. samo ispod jednog od dva drvena stupa, što je izrazito neuobičajeno. Navedena izmjena u svojoj formi narušava definiciju konstrukcije visulje, no osnovna izgrađena konstrukcija krovišta je tipa visulja.

Iznad zasebnog dijela objekta, sa specifičnim, odvojenim krovištem, nije predviđen nikakav projekt izmjene, zamjene ili ojačanja same konstrukcije krovišta, već su samo zabatni zidovi ojačani, tj. jedan zabatni zid je kompletno demontiran, te je izgrađen novi zabatni zid sa horizontalnim, vertikalnim i kosim armiranobetonskim serklažima na koje su spojene podrožnice tog krovišta te elementi posljednje glavne nosive ravnine krovišta koja se nalazi uz sami zabatni zid sa metalnim sidrima u vidu navojnih šipki. Zabatni zid sa zapadnog pročelja se nalazi uz susjedni objekt te je njegovo rušenje bilo uvelike otežano, no budući da je zabatni zid debljine 35 cm, a nosivi zid ispod zabatnog zida debljine 70 cm te je zabatni zid smješten na polovici nosivog zida ispod njega sa strane do susjednog objekta, te su na strani nosivog zida sa unutrašnjosti krovišta u kontaktu sa zabatnim zidom izbetonirani armiranobetonski horizontalni, vertikalni i kosi serklaži koji su na identičan način spojeni na konstrukciju krovišta kao i na drugom zabatnom zidu.



Slika 46. Gradnja novog zabatnog zida

Sve planirane intervencije ojačanja krovišta su planirane na velikom krovištu iznad glavnog dijela objekta. Prema inicijalnom projektu, projekt cjelovite obnove objekta je obuhvaćao rekonstrukciju cijelog objekta osim krovišta. Krovište je procijenjeno kao konstrukcija u zadovoljavajućem stanju te je bila predviđena samo zamjena manjeg broja dotrajalih elemenata krovišta prema procjeni glavnog izvođača radova te zamjena pokrova identičnim „Biber“ crijepom. Na zahtjev investitora projekta, grada Zagreba i uprave same Gornjogradske gimnazije, donesena je odluka o izmjeni projekta prema kojoj etaža potkrovlja postaje budući korisni prostor. Navedena izmjena bila je tehnički nemoguća za izvesti jer je visina između veznih i razupornih greda konstrukcije samo 2,2 m, što je nedovoljno za ostvarivanje korisnog prostora bez da neka od navedenih greda ne zadire u prostor. Doneseno rješenje od strane projektanta te odobreno od stručnog nadzora i investitora je bilo takvo ojačanje konstrukcije krovišta gdje će vezne grede u središnjem rasponu između drvenih stupova biti odsječene (vidljivo na *Slici 55*).

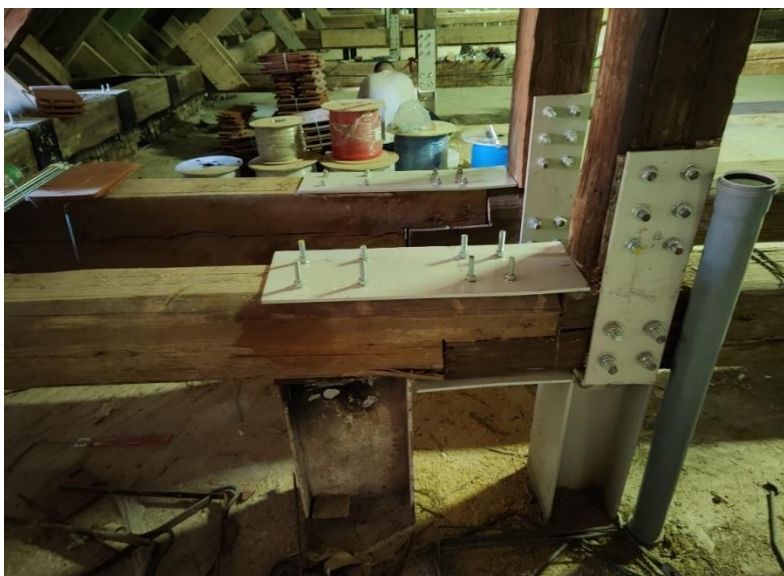
OJAČANJE:

Prvi korak je bila demontaža starog pokrova i letvi, no intervencija je bila takva da zamjena pokrova nije utjecala na tijek radnji izmjene krovne konstrukcije, tako da je prvi korak pri radovima na konstrukciji krovništa bila zamjena trulih i na ostale načine neuporabljivih drvenih elemenata krovništa. Paralelno sa tim radom, izvodila se demontaža starog zidanog vijenca i izvedba novog armiranobetonskog vijenca spojenog na također novi horizontalni serklaž na vrhu svih nadozida objekta sa sjevernog i istočnog pročelja, tako da je i na dubini 20 cm ispod drvene grede nazidnice zid bio demontiran, a ona sama pridržana metalnim stupićima. Navedeni postupak je omogućio izmjenu dotrajalih dijelova grede nazidnice koja je bila najviše degradirana od svih krovnih elemenata. (Slika 47.)



Slika 47. Armiranje horizontalnog serklaža oko drvene grede nazidnice

Od ostalih elemenata su mijenjane i ruke, nekoliko stupova, pa čak i djelomično nekoliko veznih greda koje su spojene tesarskim spojem te je sam spoj ojačan navojnim šipkama prikazano na *Slici 46*.



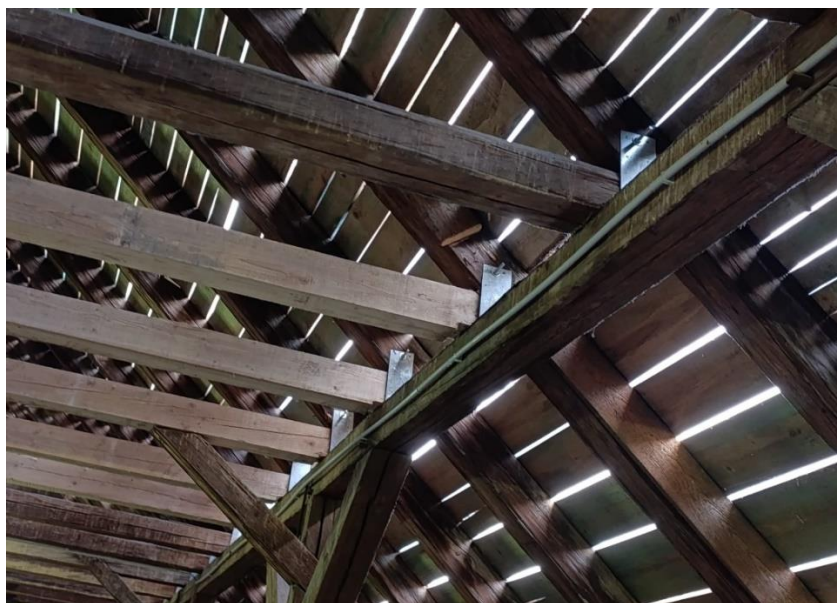
Slika 48. Ojačanje spoja novog sa starim dijelom vezne grede

Svaki rog se oslanja na gredu nazidnicu, no ne direktno već preko malih, kratkih greda koje su oslonjene na gredu nazidnicu. Te grede na jednoj strani prihvaćaju rogove, a na drugoj strani se usjekom vežu na posebne uzdužne grede udaljene 1 m od nadozida prema unutrašnjosti objekta na rasponu između dvije susjedne visulje. Spoj takvih kratkih greda za prihvaćanje rogova i navedenih uzdužnih greda je ojačan čeličnim „U“ profilima pričvršćenim vijčanim spojem za drvene elemente. Također, svaki spoj roga i takve kratke grede je nakon toga ojačan koso ugrađenim drvenim fosnama pričvršćenim navojnim šipkama kroz elemente krovišta, a takvo ojačanje je primijenjeno i na spoj kosnika visulje sa veznom gredom (vidi *Slika 49*).

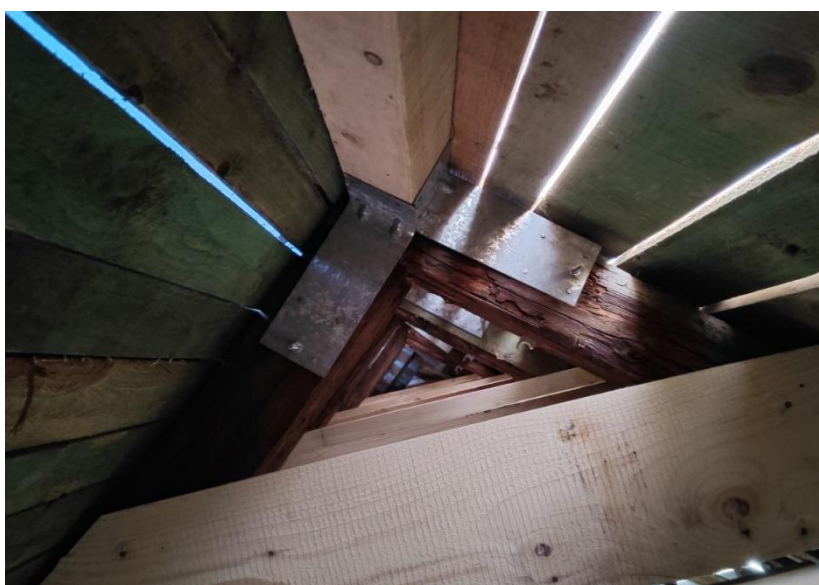


Slika 49. Ojačanje čeličnim "U" profilima(crni metal) i drvenim fosnama

U svakoj ravnini para rogova se na podrožnici nalazi spoj razupore i roga te je svaki takav spoj prema *Slici 50.* ojačan čeličnim „L“ pločicama sa obje strane roga i razupore te spojen sa drvenim elementima pomoću čavala. Projektant je također za postizanje dodatne uzdužne stabilizacije krovišta predvidio ugradnju sljemene grede koja nije u kontinuitetu, tj. sljemenih greda na rasponu između svakog para rogova pričvršćenih čeličnim „L“ pločicama spojenima za drvo također pomoću čavala (*Slika 51*).



Slika 50. Ojačanje spoja podrožnice, razupore i roga čeličnom "L" pločicom



Slika 51. Ojačanje ugradnjom sljemene grede između para rogova

Najvažniji element ojačanja krovne konstrukcije su bili čelični „HEA“ stupovi centrirani točno ispod drvenih stupova konstrukcije visulje kako bi oni veznu gredu prihvatili točno ispod drvenih stupova te time stvorili novu, modificiranu konstrukciju stolice koja bi kasnije omogućila odstranjivanje veznih greda na rasponu između stupova svake glavne nosive ravnine. Kako je objekt bio bez armiranobetonske ploče iznad etaže 2.kata, koja je krajnja etaža ispod krovišta, između nosivih zidova velikih prostorija su originalno bile ugrađene drvene grede koje su bile podašćane, a iznad hodnika su gusto postavljeni drveni balvani koji su ostavljeni i nakon rekonstrukcije kao nosivi elementi iznad kojih je ugrađena armiranobetonska ploča. Između drvenih greda u velikim prostorijama su ugrađeni čelični „IPE“ profili visine 30 cm oslonjeni na ugrađene betonske ležajeve unutar nosivih zidova. Navedeni „IPE“ profili su kasnije služili kao oslonac za „HEA“ profile okomite na smjer „IPE“ profila i oslonjene na dva susjedna „IPE“ profila na pozicijama točno ispod drvenih stupova visulje kao što je prikazano na *Slici 52*. Sa druge strane se točno ispod drvenih stupova svih visulja glavnog dijela objekta nalazio unutrašnji nosivi zid udaljen samo 2,5 metara od vanjskog nosivog zida, te je na ta dva zida posebno oslonjen čelični „HEA“ profil točno ispod svake visulje te je na rubu takve grede iznad unutrašnjeg nosivog zida, a ispod drvenog stupa također ugrađen čelični „HEA“ stup koji je vijčano spojen sa čeličnim „U“ profilom koji je prihvatio svaku veznu gredu i drveni stup krovne konstrukcije (*Slika 53*).



Slika 52. "HEA" profil greda oslonjena na "IPE" profil grede pridržanja stropne AB ploče



Slika 53. Prihvatanje vezne grede i drvenog stupa konstrukcije

Navedene čelične grede od „HEA“ profila su dodatno učvršćene betoniranjem armiranobetonske ploče oslonjene na već napomenute „IPE“ profile te ta ploča predstavlja podnu ploču potkrovlja, a ima važnu ulogu u ostvarivanju bočne stabilnosti objekta (*Slika 54*). Za postizanje dodatne stabilnosti oslanjanja krovne konstrukcije na nosive zidove, projektant je predvidio armaturno ojačanje, tzv. „torkret“ na zabatne zidove velikog krovišta te „torkretiranje“ svih nadozida glavnog dijela objekta.



Slika 54. Izbetonirana AB ploča potkrovlja

IZMJENA:

Nakon, projektantom određenih, svih potrebnih radova na ojačanju krovne konstrukcije te betoniranju armiranobetonske ploče i ojačanja zidova oslanjanja krovišta, pristupilo se izmjeni krovne konstrukcije na način da su vezne grede, na rasponu razmaka između dva drvena stupa visulje, odsječene te je krovna konstrukcija nakon izmjene postala konstrukcija stolica (vidi *Slika 55.*), a time se dobila potrebna visina između betonske ploče i razupornih greda oslonjenih na podrožnice iznad drvenih stupova kako bi se ostvario koristan prostor. Dodatna izmjena elemenata krovne konstrukcije je bilo rezanje nekolicine rožnih greda kako bi se osigurao slobodan prostor za buduće velike krovne prozore gdje su vijčanim spojem ubačene po dvije grede između rogova koji se ne sijeku, a između njih je originalno bio postavljen jedan rog koji je odsječen, te je to područje osigurano kao što je prikazano na *Slici 56.* i ojačano vijčanim spojevima.



Slika 55. Odsječene vezne grede konstrukcije krovišta



Slika 56. Rezanje rogova za postavu krovnih prozora

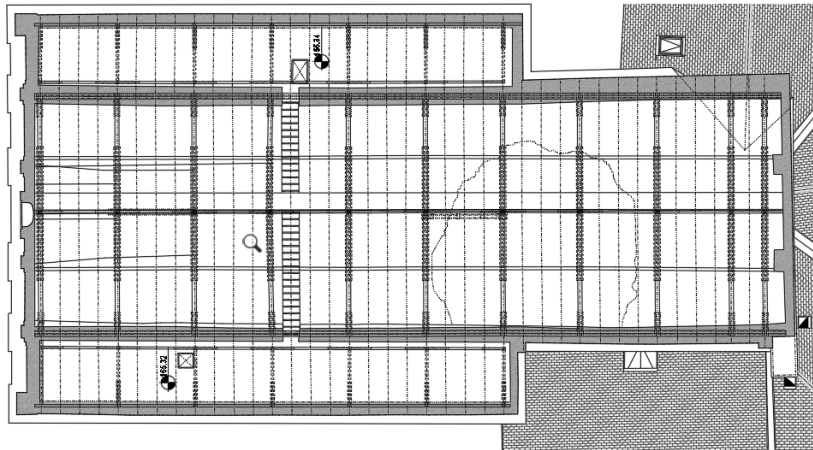
Nakon završenih konstrukcijskih radova, projektom je određeno da se svi drveni konstruktivni elementi krovišta, radi ostvarivanja svojstava protupožarnosti, budu obloženi protupožarnom gips kartonskom oblogom svojstava EI60, što predstavlja 60-minutnu otpornost da element ne bude zahvaćen vatrom u slučaju eventualnog požara. Svi zidovi nove etaže su predviđeni kao gips kartonski pregradni zidovi te nemaju utjecaj na konstrukciju krovišta, a prije njihove ugradnje, sav prostor krovišta je toplinski zaštićen postavljanjem mineralne vune kao izolacije između svih rogova krovišta. Uz ugradnju cementnog estriha, instalaterskih radova te svih ostalih završnih radova, nekada tavanski nekoristan prostor postaje moderan, dovoljno osvijetljen, udoban i siguran prostor nove etaže potkrovlja.

5.2. Krovište pri rekonstrukciji crkve sv. Katarine

Crkva sv. Katarine Aleksandrijske u Zagrebu se nalazi na lokaciji Katarininog trga, a datira još iz 17. stoljeća kada je izgrađena u periodu između 1620. – 1632. godine. Ovaj objekt predstavlja najpoznatiju hrvatsku baroknu crkvu koja je izgrađena u sklopu nekadašnjeg isusovačkog kompleksa na zagrebačkom gornjem gradu. Crkva sv. Katarine je jednobrodna crkva sa šest bočnih kapela i apsidom, gdje se bočne kapele nalaze u prostoru između dvaju nosivih zidova sa svake strane tako da se crkva sastoji od četiri paralelna uzdužna nosiva zida, dva vanjska i dva unutarnja. Kao i većina starih objekata u gradu Zagrebu, i ona je bila znatno oštećena u potresu 2020. godine, no njezino krovište nije pretrpjelo nikakva oštećenja.

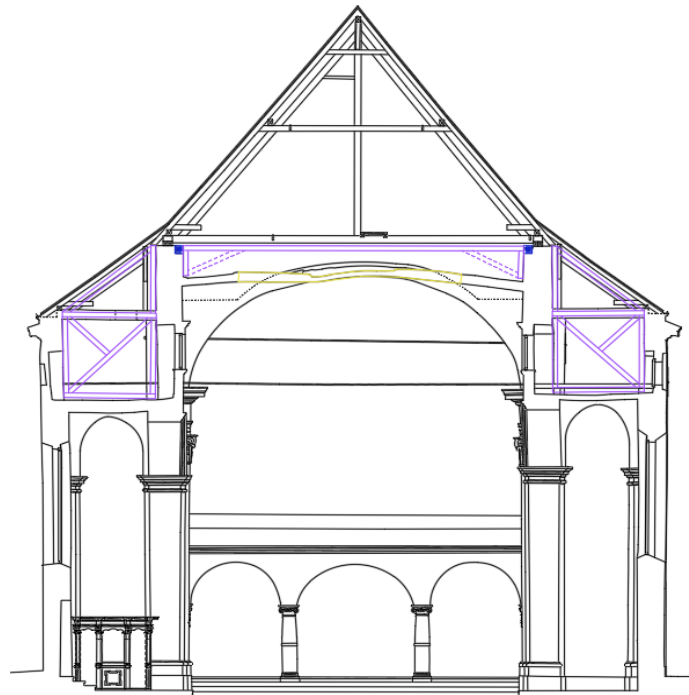


Slika 57. Pogled prednjeg pročelja crkve sv. Katarine



Slika 58. Tlocrt krovista crkve

Krovište ove građevine se sastoji od tri dijela, kako postoji glavni crkveni prostor između dvaju unutrašnjih nosivih zidova debljine 130 cm koji su na razmaku 10,11 m, na njih se oslanja glavna konstrukcija krovista koja je forme jednostruke visulje (*Slika 60*). Sa svake strane uzdužno se iznad prostora kapela nalazi po jedno, jednostrešno kroviste forme jednostruke stolice koje se oslanja na vanjski nosivi zid i unutrašnji nosivi zid udaljen 1,95 m od vanjskog sa svake strane. Navedene tri konstrukcije se spajaju u jedno kroviste te globalno na objektu čine dvostrešno kroviste sa prijelomima streha.



Slika 59. Poprečni presjek crkve sv. Katarine



Slika 60. Konstrukcija jednostruke visulje na crkvi



Slika 61. Konstrukcija stolice malih bočnih krovišta

Nakon detaljnog pregleda krovišta i krovne konstrukcije, projektom je predviđeno da se krovna konstrukcija ne izmjenjuje, te nije bilo potrebe za znatnim ojačanjima same krovne konstrukcije, već samo ojačanje ili zamjena trošnih dijelova konstrukcije. Međutim, projektom je predviđeno ojačanje elemenata objekta koji su usko vezani uz konstrukciju krovišta te imaju velik utjecaj na ostvarivanje stabilnosti cijelog objekta. Kako je već razmotreno da je na takvim tradicionalnim objektima konstrukcija krovišta služila kao vezni element vrha nosive konstrukcije zidova objekta koja je zadržavala zidove od bočne nestabilnosti i deformacija, tako je za ovaj objekt percipirano kako ova konstrukcija nema zadovoljavajuće stabilizirajuće djelovanje na zidove objekta te je zidove objekta u prostoru, neposredno ispod krovne konstrukcije bilo neophodno ojačati armiranobetonskim serklažima, torkretom i jedinstvenom čeličnom konstrukcijom.

OJAČANJA:

U unutrašnjim nosivim zidovima je predviđena ugradnja vertikalnih armiranobetonskih serklaža. Kako su zidovi debljine 130 cm, vertikalni serklaži su napravljeni po dva na istom mjestu debljine 40 cm usječeno u zid sa svake strane (*Slika 62*). Na vrhu unutarnjih nosivih zidova se nalazi nadozid visine 70 cm, na kojem se nalazi drvena greda nazidnica, te koji je upola tanji od debljine zida ispod te se nalazi sa vanjske strane zida gledajući od sredine. Takav raspored elemenata je značio kako se unutrašnje polovice nosivog zida, tj. na vrhu nosivog zida može izvesti horizontalni serklaž, pa su se tako izvela četiri horizontalna serklaža, dva dugačka na unutrašnjim nosivim zidovima, te po dva ispod zabatnih zidova čineći time betonski, horizontalni okvir nad nosivim zidovima. Vertikalni serklaži su bili izvođeni u vertikalnim osima oslanjanja čelične konstrukcije za ostvarivanje bočne stabilnosti objekta.



Slika 62. Spoj vertikalnog sa horizontalnim serklažem

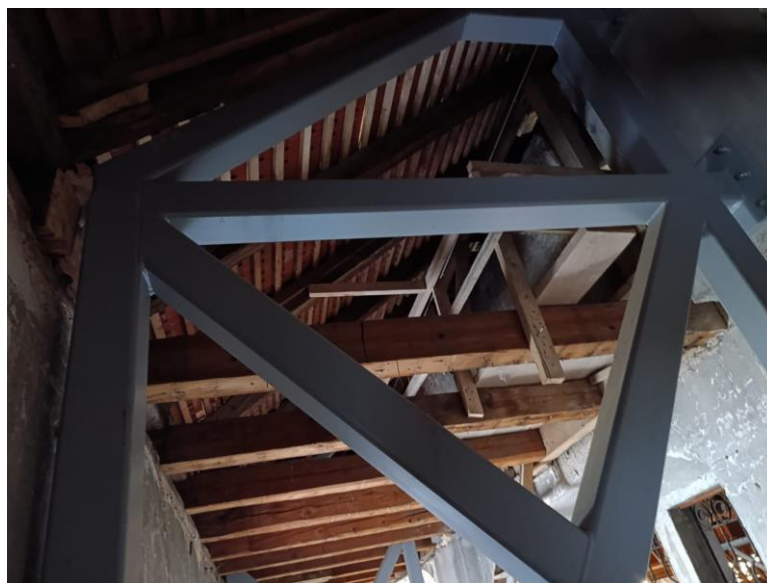
U bočne prostore malih krovništa su posebno, u vertikalne serklaže vijčano sidrene čelične rešetkaste konstrukcije koje služe za ostvarivanje bočne stabilnosti dijelova objekta između vanjskih i unutarnjih nosivih zidova. Na središnjem dijelu objekta ispod konstrukcije krovništa

je montirana posebna horizontalna rešetkasta konstrukcija, koja se sastoji od čeličnih elemenata međusobno vijčano spojenih. Sama konstrukcija ostvaruje bočnu stabilnost objekta između najvećeg i glavnog i dijela objekta, tj. između dva unutarnja nosiva zida (vidljiva na *Slici 63*).



Slika 63. Horizontalna čelična rešetkasta konstrukcija između unutarnjih nosivih zidova

Navedena horizontalna čelična konstrukcija je oslonjena na vertikalne i horizontalne serklaže te je navojnim šipkama kroz same serklaže spojena sa prethodno navedenim čeličnim rešetkastim konstrukcijama malih bočnih krovništa. (*Slika 64.*)



Slika 64. Rešetkasta konstrukcija bočnog krovništa



Slika 65. Spoj konstrukcije navojnim šipkama kroz serklaže

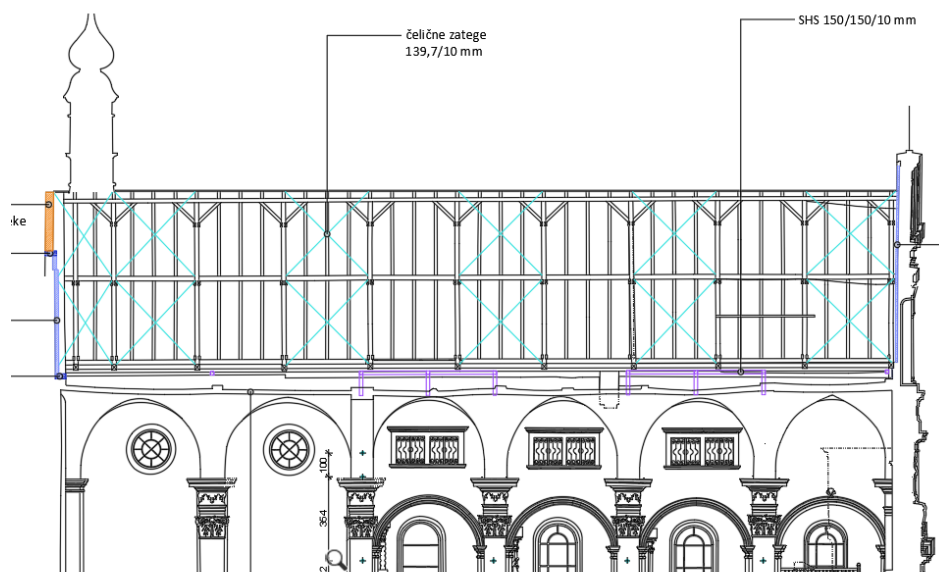
Ovom tehnikom ojačanja konstrukcije je omogućena stabilnost konstrukcije objekta neovisno o intervencijama na konstrukciji krovišta. To znači da će u budućnosti navedeno krovište biti u mogućnosti u potpunosti demontirati, zamijeniti, izmijeniti ili drugo prema potrebama, bez da se time utječe na stabilnost objekta.

Važna intervencija ojačanja konstrukcije je bilo izvođenje ojačanja armiranja i betoniranja zabatnih zidova sa unutrašnje strane. Navedeno ojačanje pomaže u uzdužnoj stabilnosti krovne konstrukcije, a samo je vrlo slično postupku torkretiranja zidova, iako se ovdje radi samo o izlivanju betona u tanki sloj ojačanja uz zid. Navedena metoda se izvodila jer je ona bila najjednostavnija za izvedu na visini u krovištu objekta.



Slika 66. Betoniranje zabatnog zida

Za dodatno ostvarivanje uzdužne stabilnosti krovne konstrukcije je projektom predviđena ugradnja čeličnih spregova između susjednih glavnih nosivih ravnina konstrukcije visulje, tj. između susjednih visulja. (Slika 67.)



Slika 67. Projektom predviđeno ojačanje spregovima

Od dodatnih intervencija na drvenoj konstrukciji krovišta, bitno istaknuti kako su se izrađivale proteze na horizontalnim gredama konstrukcije stolice na malim, bočnim krovištima i to na mjestima gdje je zamijećeno truljenje drveta na način da su uz oštećenu gredu prislonjene dvije kraće, zdrave drvene grede sa svake strane koje su oslonjene na jednom zidu gdje je originalna greda oštećena te su navojnim šipkama kroz staru drvenu gredu spojene. Navedeno ojačanje je prikazano na *Slici 68*.



Slika 68. Proteze od novih greda uz trošne grede obostrano

Uz zamjenu navedenih elemenata, bila je potrebna i zamjena manjeg broja dotrajalih rogova, a ostatak drveta konstrukcije je nakon ispitivanja dobio rezultate zadovoljavajućeg stanja koje ne predstavlja ugrozu sa stabilnost konstrukcije.

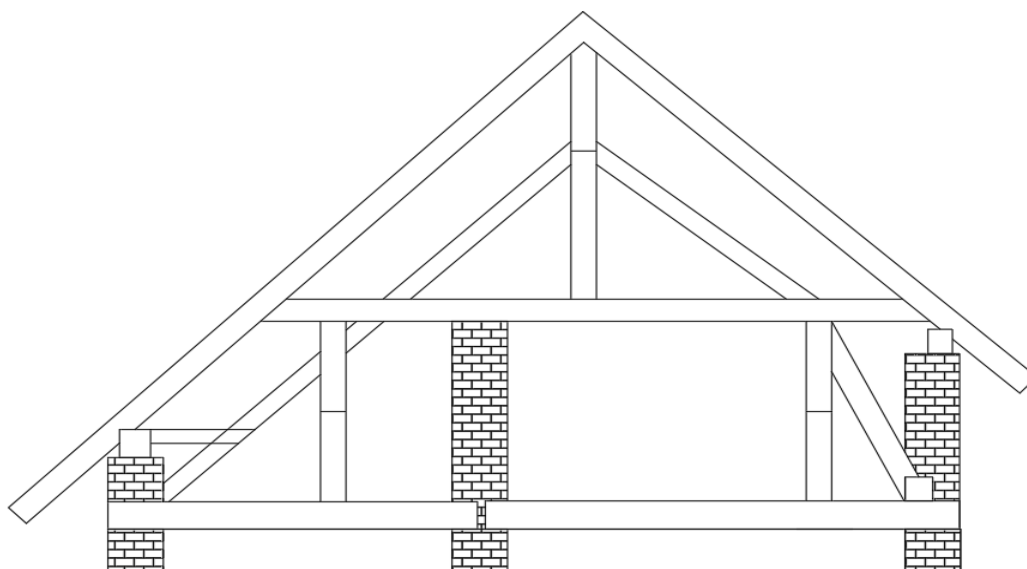
5.3. Krovište pri obnovi stambene zgrade u Palmotićevoj ulici 64A

Na lokaciji Palmotićeve ulice 64A nalazi se stambena zgrada sa pet etaža uključujući etažu potkrovlja, zgrada je visine oko 20 m te se nakon potresa u gradu Zagrebu 2020. godine pokazala kao jedna od najoštećenijih zgrada u gradu. Trenutno traje njezina konstruktivna obnova te se u tijeku pregleda objekta u svrhu ovog rada izvela većina konstruktivnih ojačanja na tri i pol etaže od prizemlja te se sa rješavanjem stabilnosti krovišta tek počinje kalkulirati.



Slika 69. Stambena zgrada - Palmotićeva ulica 64A

Konstrukcija krovišta se sastoji od jednog velikog dvostrešnog krovišta sa jednim malim dvostrešnim bočnim krovištem, okomitim na glavno krovište. Konstrukcija krovišta je izrazito nepravilna forma potencijalne visulje gdje se jedan dio konstrukcije ponaša kao visulja oslonjena na dva zida, a drveni stup se oslanja na veznu gredu u slobodnom prostoru, tj. nikakav konstruktivni element se ne nalazi ispod njega. Međutim, gredu o koje se krovište oslanja ne možemo promatrati kao veznu gredu, jer se ona proteže samo do polovine širine objekta, kao da je presječena na pola i na toj polovini je oslonjena na jedan središnji, uzdužni nosivi zid, pa se ovdje zapravo uočava mnoštvo greda sa jedne i sa druge strane tog nosivog zida prema van, tj. prema jednom vanjskom zidu i prema drugom.



Slika 70. Shema glavnog krovišta stambene zgrade

Projektom je predviđeno ojačanje konstrukcije krovišta na način da se izvedu novi armiranobetonski nadvoji iznad prozora na uzdužnim zidovima posljednje etaže ispod potkrovlja, jer se grede na koje se oslanja cijelo krovište oslanjaju na postojeće drvene nadvoje iznad prozora u čak četiri od 6 glavnih ravnina krovišta. Također je predviđeno ojačanje spojeva navojnim šipkama i vijcima, te čeličnim pločicama „L“ profila uz zamjenu trošnih elemenata krovišta prema procjeni izvođača. Što se tiče uzdužne stabilnosti krovišta, također je predviđeno kompletno rušenje (vidi *Slike 73. i 74.*) i građenje novih zabatnih zidova sa pripadnim armiranobetonskim horizontalnim, vertikalnim i kosim serklažima.



Slika 71. Zabatni zid objekta

Navedena rješenja zabrinjavaju glavnog izvođača koji se ne slaže sa inicijalnim rješenjima projekta obnove ovog krovišta te inicira sa projektantom, stručnim nadzorom i investitorom izmjenu planiranih zahvata na krovištu u rješenje o potpunom rušenju postojeće konstrukcije krovišta i gradnju potpuno novog krovišta. Glavni razlozi sa brigu su nepravilnost elemenata konstrukcije krovišta gdje kao što je prikazano na *Slikama 70. i 74.* se grede na koje se oslanja cijela konstrukcija krovišta oslanjaju na drvene nadvoje iznad prozora koji su u izrazito lošem stanju te je njihova ugradnja u nosivom zidu popustila, te se oni u velikoj mjeri oslanjaju na ugrađene prozore, što znači da veliki dio opterećenja krovišta prenose prozori posljednje etaže objekta ispod potkrovlja.



Slika 72. Drveni nadvoj o koji se oslanjaju grede konstrukcije krovišta

Posebno zabrinjavajuće je stanje drveta konstrukcije krovišta koje je često u polu raspadnutom stanju, već vizualnim pregledom se uviđa površinsko rahljenje drveta te nosive grede glavnih ravnina konstrukcije koje pridržavaju drvene stupove konstrukcije imaju značajno velike progibe pod opterećenjem krovišta.



Slika 73. Krovište sa dvorišne strane



Slika 74. Konstrukcija krovišta sa ulične strane

5.4. Krovište pri obnovi stambene zgrade u Mrazovićevoj ulici 7

Nedaleko od prethodnog objekta u Palmotićevoj ulici, u Mrazovićevoj ulici 7 se nalazi jedan manji stambeni objekt, zgrada na 3 etaže sa također specifičnim krovištem. Ova zgrada je manja stambena zgrada koja se sastoji od tri etaže te dva različita krova, gdje polovica objekta ima ravan krov šljunčanog pokrova, konstrukcijski oslonjen na drvenim gredama koje se direktno oslanjaju na nosive zidove kao što je vidljivo na *Slici 75*. Visina ovog krova je na razini oko 1 m visine ispod sljemena drugog krovišta.



Slika 75. Oslanjanje ravnog krova preko drvenih greda

Drugi dio krovišta koji se promatra u svrhu ovog rada je konstrukcija jednostrešne stolice oslonjene na nosivi zid sa svoje više strane, koji je duplo deblji na etaži ispod tavanskog prostora nego uzdužni zid uz konstrukciju krovišta, pa se tako konstrukcija oslanja na unutarnju polovicu nosivog zida, a drugom stranom na nadozid sa ulične strane. Na bočnu stabilnost konstrukcije također utječu i zabatni zidovi koji prate oblik krovišta. (vidi *Slika 76*.)



Slika 76. Konstrukcija krovišta u Mrazovićevoj 7

Specifičnost ove jednostruke stolice su kosi drveni stupovi sa gredom razuporom i dodatnom dijagonalom koja je spojena sa gredom nazidnicom na nadozidu sa pripadnim kliještima koja ih spajaju. (Slika 77.)



Slika 77. Kosi stupovi konstrukcije krovišta

Značajnija oštećenja na konstrukciji nisu zamijećena, ali je projektom predviđena potpuna zamjena krovišta, a prostor ispod krovišta prema planu i dalje treba ostati slobodan tavanski prostor. Od ikakvih oštećenja, vrijedi napomenuti kako su grede nazidnice, na koje se oslanja cijelo krovište preko drvenih stupova, dislocirane sa svoje pozicije na vrhu nosivog zida. Također, radi mogućnosti održavanja ravnog krova, postojeće se nalaze vrata iz većeg krovišta koja su u visini polovicom iznad sljemena promatranog krovišta sa uzdignutom strehom posebno za navedeni otvor, te je zbog njih sljemena greda prerezana kao što je vidljivo na *Slici 78.*, što ne predstavlja oštećenje konstrukcije, no svakako izvedbom novog krovišta, navedeni otvor će se uklopiti u razliku visina dvaju krovišta te će nova sljemena greda biti u kontinuitetu.



Slika 78. Otvor za ulaz na ravni krov

6. PREGLED RJEŠENJA OBNOVE I OJAČANJA KROVIŠTA

U slijedećoj cjelini prikazan je pregled danih rješenja u ovom radu, sukladno metodologiji četvrte cjeline; „Tehnologije obnove i ojačanja krovništva“ gdje su rješenja istražena i objašnjena, a nekolicina njih je primjenjivana na krovništima objekata cjelovite obnove koji su promatrani u narednoj cjelini Primjera obnove i ojačanja krovništva iz prakse. U ovoj cjelini je navedena podjela rješenja prema orijentaciji problema oslabljenja ili nedostatka konstrukcije krovništva sa pripadnim opisima svrhe pojedinog ojačanja te njegovog ograničenja ili mane. U drugom dijelu svrhu sugeriranja prema odabiru najprihvatljivijih rješenja od strane projektanta, a detaljnim opisima u svrhu pojašnjenja zahvata izvođaču radova, dan je i primjer osnovnog troškovnika bez količina i cijena isključivo za radove na ojačanju krovništva.

6.1. Zahvati na ojačanju krovništva prema izvoru problema

Tablica 1. Opcije pri odabiru ojačanja napregnutih elemenata

Post-naprezanje			
Oznaka:	Opis:	Svrha:	Ograničenje:
4.2.1.	Postavljanje čeličnih zatega jednostrano ili dvostrano neposredno uz konstrukciju visulje.	Najefektivnije pružanje dodatne otpornosti na vlačnu silu u vlačno opterećenim elementima. Zatege preuzimaju značajnu vlačnu silu, čime rasterećuju drvene elemente, a da pri tome ne zauzimaju velik prostor unutar krovništva.	Korištenje čelika za elemente koji se time ne uklapaju u izvornost tradicionalnog krovništva. Visoka cijena materijala koji se koristi te složenost izvedbe, a time i visoka cijena montiranja elemenata. Dodatno otežavanje potencijalnih izmjena konstrukcije krovništva u budućnosti. Slabljenje presjeka drvenih elemenata bušenjem i sidrenjem kroz iste.
4.2.2.	Zamjena vlačnih elemenata visulje sa novim elementima koji zadovoljavaju na prijenos vlačne sile.	Najčešće uslijed truljenja drveta ili mehaničkih oštećenja koja narušavaju nosivost vlačno opterećenih elemenata se obnavlja vlačno naprezanje u elementu koji je zamijenjen. Uz pravilna pridržanja „zdravog“ dijela elementa se oštećeni dio uklanja te se na njegovo mjesto ugrađuje novi drveni element koji se pravilno spaja sa ostatkom starog elementa. Ostvaruje se ojačanje kojim se čuva tradicionalnost konstrukcije te se raspored elemenata krovništva ne mora mijenjati. Relativno jednostavan zahvat.	Prekid kontinuiteta elementa te stvaranje novih spojeva. Stvaranje mogućnosti za pojačana oštećenja u budućnosti na mjestu spoja. Potrebna primjena različitih materijala kako bi se osigurao spoj. Stvaranje nehomogenih karakteristika elemenata konstrukcije (staro-novo drvo).

4.2.3.	Izmjena tipa konstrukcije sa trajnim uklanjanjem oštećenih/problematičnih elemenata uz dodatno pridržanje konstrukcije.	Nakon utvrđivanja o mogućnosti izvedbe zahvata, mijenja se statička forma konstrukcije krovišta. Elementi koji se ne uklanjaju se zasebno ojačavaju i pridržavaju (I, IPE, HEA i dr. profilima čeličnih stupova, drvenim stupovima i kosnicima ili dr.) kako bi ostali trajno stabilni nakon uklanjanja određenih elemenata konstrukcije čime se dolazi do naknadne promjene i pojave novih naprezanja u elementima krovišta. Složen i često skup zahvat koji omogućuje ostvarivanje većeg korisnog prostora potkrovlja i dr.	Visoka rizičnost zahvata ukoliko nije izveden detaljno prema projektu. Velik trošak ugradnje novih čeličnih ili drvenih elemenata pridržanja konstrukcije. Složenost zahvata obzirom na specifične zahvate pridržanja elemenata koji se ne uklanjaju. Gubitak osnovne forme i tradicionalnosti izvornog krovišta.
--------	---	---	---

Tablica 2. Ostvarivanje bočne stabilnosti krovišta

Ostvarivanje bočne stabilnosti konstrukcije krovišta			
Oznaka:	Opis:	Svrha:	Ograničenja:
4.3.1.	Ugradnja armiranobetonske ploče na stropne grede posljednje etaže ispod krovišta	Ostvarivanje krutosti zidanog objekta koji je povezan AB pločom iznad posljednje etaže. Ostvarivanje bočne stabilnosti na način da se sprječava bočno izvijanje i torzija stropnih greda etaže ispod krovišta.	Moguće prekomjerno opterećenje na zidove objekta. Složenost ugradnje, tj. betoniranje na visini. Cijena ugradnje armature i betona.
4.3.2.	Podaščavanje dva reda dasaka, OSB ili CLT ploča na stropne grede ispod krovišta.	Ostvarivanje otpornosti na bočno savijanje stropnih greda i greda krovišta zakucavanjem dasaka ili ploča u dva međusobno okomita smjera. Vrlo jednostavna, financijski jeftina i brza intervencija za ostvarivanje bočne stabilnosti greda ispod krovišta ili veznih greda u istoj visini.	Često nedovoljno za ostvarivanje potpune bočne stabilnosti greda. Potrebna kombinacija sa još nekom metodom ojačanja. Degradiranje greda koje se učvršćuju višestrukim bušenjem vijaka ili zakucavanjem dugačkim čavala.
4.3.3.	Ugradnja drvenih greda „spona“ okomitih na smjer stropnih greda ispod krovišta.	Jednostavan zahvat te relativno složen postupak ugradnje. Uz ugradnju AB ploče najučinkovitiji zahvat pri osiguravanju greda na bočno izvijanje pri čemu se ne degradira niti jedan element konstrukcije krovišta i objekta.	Velik broj spojeva i spojnih sredstava, time i bušenja ili zakucavanja pri spojevima. Složen postupak ugradnje sa podizanjem greda na visinu.

4.3.4.	Ugradnja dodatnih kosnika „ruku“ na gornjim dijelovima drvenih stupova prema podržnici.	Jednostavan postupak dodatne ugradnje kosnika („ruku“) na drvene stupove kako bi se ostvarila uzdužna stabilnost krovišta, ali i bočna stabilnost glavnih nosivih ravnina konstrukcije krovišta.	Degradiranje glavnih elemenata krovišta bušenjem ili zabijanjem čavala. Zauzimanje prostora sa novim drvenim elementima. Postavljanje novih elemenata na visini.
4.3.5.	Podaščavanje sa donje strane stropnih greda posljednje etaže	Uz korištenje pokretnih skela relativno jednostavan i financijski jeftin postupak ostvarivanja bočne stabilnosti vrlo sličan podaščavanju greda sa gornje strane. Također najpoželjnije zakucavanje dasaka ili ploča u dva okomita smjera.	Kao i za podaščavanje sa gornje strane stropnih greda, samo u ovom slučaju nakon učvršćenja se onemogućuje bilo kakva intervencija na gredama od ispod, a pri kombinacijama sa podaščavanjem od gore se onemogućuju bilo kakva intervencija na gredama.
4.3.6.	Popločavanje rogova „OSB“ ili „CLT“ pločama	Najjednostavniji i vrlo jeftin postupak koji se često koristi kao pričvrsnica za letve kao nosače pokrova, no ima ulogu i u ostvarivanju stabilnosti na bočna izvijanja glavnih krovnih ravnina.	Zahvat zahtijeva kombinaciju sa još jednom ili još nekoliko rješenja ojačanja krovnih ravnina.
4.3.7.	Kombinacije rješenja	Ukoliko se statičkim proračunom pokaže da je jedno rješenje nedovoljno za zahtijevanu razinu stabilnosti krovišta ili jest dovoljno, no ono predstavlja prevelik financijski izdatak	Upitnost ekonomičnosti troška nekolicine odabranih rješenja u odnosu na demontažu cijelog krovišta te gradnju novog.

Tablica 3. Ojačanje vezne grede visulje

Ojačanje vezne grede visulje			
Oznaka:	Opis:	Svrha:	Ograničenja:
4.4.1.	Postavljanje čeličnih „H“ ili „HEA“ profila na vezne grede visulje	Povećavanje maksimalnog naprezanja i deformacije koju greda može prenijeti te povećavanje krutosti i duktilnosti elementa.	Korištenje čelika velikog presjeka na drvenoj konstrukciji te narušavanje tradicionalnosti krovišta. Znatno povećavanje vlastite težine konstrukcije krovišta.

4.4.2.	Postavljanje drvenih greda ili fosni kao povećanja presjeka elementa	Povećavanje maksimalnog naprežanja i deformacije koju greda može preuzeti. povećavanje presjeka uz korištenje jednakog materijala kao i izvorne grede.	Znatno povećavanje dimenzija vezne grede te povezivanje starog i novog drveta.
4.4.3.	Ugradnja čeličnih „L“ pločica i/ili ravnih pločica (flahova) ispod vlačne zone grede te sa bočnih strana	Ojačanje vezne grede u kritičnoj zoni pucanja, vlačnoj zoni uz korištenje elemenata ojačanja vrlo malog presjeka, a time i neznatnog opterećenja na konstrukciju.	Vidljivi čelični elementi sa bočnih strana grede. Najčešće ostvarivanje spoja lijepljenjem.
4.4.4.	Urezivanje „FRP“ šipki ili traka u gredu na strani vlačne zone presjeka	Korištenje vrlo laganih materijala i elemenata sitnog presjeka koji ne mijenjaju oblik konstrukcije krovišta urezivanjem u vlačnu zonu vezne grede.	Oštećivanje presjeka postojeće grede zarezivanjima i korištenje različitih vrsta materijala u odnosu na drvo.
4.4.5.	Kombinacije rješenja	Radi dodatnog ojačavanja vezne grede odabir rješenja ojačanja vezne grede sa gornje strane njezinog presjeka te odabir rješenja ojačanja u vlačnoj zoni te njihova kombinacija.	U većini slučajeva prevelika količina bušenja i zakucavanja postojeće grede te time slabljenje njezinog presjeka. Ostvarivanje velikog broja spojeva. Cijena koštanja spojnih sredstava.

Tablica 4. Ojačanje spojeva

Ojačanje spojeva			
Oznaka:	Opis:	Svrha:	Ograničenja:
4.5.1.	Zamjena ili dodatna ugradnja drvenih klinova ukoliko je to potrebno	Ojačanje spojeva nabijanjem drvenog klina kroz spoj ukoliko je potrebno očuvanje izvornosti i tradicionalnosti konstrukcije krovišta, pa tako i spojeva.	Onemogućavanje korištenja čeličnih ojačanja kroz elemente pri spoju (čelični klinovi, navojne šipke, dugački čavli...).
4.5.2.	Zamjena ili dodatna ugradnja čeličnih klinova	Ojačanje spojeva nabijanjem čeličnih klinova u oba element pri spoju radi ostvarivanja veće krutosti spoja.	Slabije ostvarivanje krutosti spoja u odnosu na čelična ojačanja. Dodatna zaštita spoja od atmosferskih djelovanja.
			Zahvat zauzima poprilično velik period radnog vremena ukoliko se ugrađuje ručno. Teško primjenjivo rješenje u kombinaciji sa drugim rješenjem na istom spoju. Kreiranje velikih rupa u presjeku elementa.

4.5.3.	Spojevi ojačani učvršćivanjem navojnih šipki	Bušenje, te uvijanje navojnih šipki kroz spoj 2 elementa kako bi se ostvarila maksimalna krutost spoja.	Često bušenje velikih rupa kroz sredinu elemenata pri spoju. Velika količina ručnog rada (bušenje, prodor, postavljanje pločica, učvršćivanje). Teško primjenjivo rješenje u kombinaciji sa drugim rješenjem na istom spoju.
4.5.4.	Ugradnja pločica, šipki ili traka oko spoja	Ostvarivanje stabilnosti spoja manje razornim metodama za presjek elemenata pri spoju, postavljanje elemenata pričvršćenja oko spoja ili bočno uz sami spoj.	Moguće odvajanje od drveta ili nedovoljna razina ukrućivanja spoja uslijed lošeg pričvršćenja za drvo. Često potrebna kombinacija sa dodatnim zahvatom kako bi se ostvarila željena čvrstoća spoja.
4.5.5.	Zamjena oba elementa pri spoju, pa ponovno izvođenje tesarskog spoja	Kod ekstremnog oštećenja nosivosti spoja u vidu prevelike deformacije, pucanja, ili truljenja drveta je potrebno privremeno osigurati ostatak konstrukcije i potpuno zamijeniti oštećene elemente te izvesti usjecanje novog spoja.	Nemoguće izvoditi bez adekvatnog osiguranja stabilnosti ostatka konstrukcije koji se ne mijenja. Uz kreiranje tesarskog spoja, često potrebno još jedno rješenje u kombinaciji za ojačanje spoja.

Tablica 5. Ojačanje oslonaca krovišta

Ojačanja oslonaca drvenih greda krovišta na nosive zidove			
Oznaka:	Opis:	Svrha:	Ograničenje:
4.6.1.	Izvođenje serklaža ispod grede nazidnice	Povećavanje stabilnosti zidova ispod krovne konstrukcije te osiguravanje jednolikog nalijeganja grede nazidnice ili veznih greda na nosivi zid.	Često je područje izvođenja horizontalnog serklaža zid na koji se nastavlja zidani vijenac objekta te to čini izvedbu AB serklaža složenim postupkom. AB serklaž iznad svih nosivih zidova predstavlja određeno opterećenje za zide ispod. Složen rad – betoniranje na visini, pridržanje grede nazidnice ili stropnih greda i visulja.

4.6.2.	Ugradnja nove ili zamjena oštećene grede nazidnice	Ostvarivanje jednolikog nalijeganja konstrukcije krovništva i prijenos uzdužne sile na vrhu nosivog zida ukoliko ne postoji AB horizontalni serklaž na vrhu zida i neće se izvoditi.	Složenost umetanja nove grede nazidnice pod stropne grede i visulje. Ostvarivanje novih spojeva. Potrebno odstranjivanje dijela zida kako bi se ustanovilo kompletno stanje degradacije drvene grede.
4.6.3.	Ugradnja drvenih ili čeličnih proteza u blizini oslonca	Jednostavna i vrlo isplativa metoda zamjene nosivosti oštećenog dijela elementa tako da se neposredno uz dio zdravog postojećeg elementa navojnim šipkama, jednostrano ili obostrano postavlja dio nove drvene ili čelične grede koja preuzima silu opterećenja u oštećenom elementu i prenosi ju na oslonac.	Moguće povećano savijanje elementa koji je ojačan ukoliko se ne koristi dostatan broj veznih sredstava ili se ona ne ugrađuju pravilno. Znatno povećavanje presjeka grede sa ugrađenim dodatnim gredama. Mijenja se smjer osi prijenosa opterećenja. Velik broj spojeva.
4.6.4.	Zaštita greda u kritičnim točkama oslanjanja korištenjem smola i FRP polimera ojačanim vlaknima	Zaštita drveta od upijanja vlage i ostalih atmosferskih faktora koji negativno utječu na karakteristike drveta korištenjem raznih premaza na bazi smole, polimera i drugih izolacijskih materijala.	Velika količina ručnog rada premazivanja drveta ili nanošenja zaštite u spreju.
4.6.5.	Kombinacija rješenja	Kako bi se osiguralo trajno nepomično oslanjanje krovništva, moguće je izvoditi zahvate ojačanja ležaja krovništva (zid sa serklažem, greda nazidnice) u kombinaciji sa ojačanjima na elementima krovne konstrukcije koji se oslanjaju na zid.	Složenost zahvata u kojem se odstranja dio zida koji služi kao ležaj krovnoj konstrukciji uz osiguravanje konstrukcije te zahvati na kritičnim dijelovima krovništva.

6.2. Troškovnik radova ojačanja krovišta

Tablica 6. Troškovnik radova ojačanja krovišta

Radovi na ojačanju krovne konstrukcije		
Oznaka:	Opis stavke:	Mjerna jedinica:
4.7.1.	Postavljanje čeličnih zatega dvostrano neposredno uz nosive krovne ravnine visulje te sidrenje sustava zatega kroz drvene grede visulje. Dvije ravnine sustava zatega se spajaju čeličnom šipkom (sidrom) kroz drvo te se vijcima učvršćuju na sustav u njegovim spojevima elemenata. Stavka obuhvaća sve potrebne radove pridržanja konstrukcije, bušenja drveta, dovoza i podizanja čeličnih šipki i spojnih elemenata za postavljanje sustava zatega te njihovo montiranje na licu mjesta. Obračun se vrši po kg ugrađenog čelika.	kg
4.7.2.	Zamjena veznih greda visulje sa novim drvenim gredama identičnog poprečnog presjeka. Stavka se izvodi postepeno do kompletne izvršenosti jedne glavne ravnine visulje nakon čega se prelazi na slijedeću za koju je detaljnim pregledom utvrđena potreba za zamjenom grede. Rad obuhvaća pravilno prihvaćanje ostatka konstrukcije prije uklanjanja jedne vezne grede ili oštećenog dijela grede te samo uklanjanje grede i postavu nove grede. Novu gredu ili dio grede je potrebno pravilno spojiti tesarskim zarezom, proračunatom količinom navojnih šipki kroz spoj. Stavka se obračunava po m ³ ugrađenog drveta.	m ³
4.7.3.	Izmjena tipa konstrukcije sa trajnim uklanjanjem oštećenih/problematičnih elemenata uz dodatno pridržanje konstrukcije. Konstrukcija krovišta se izmjenjuje trajnim uklanjanjem veznih greda na način da se najprije postave čelični elementi „HEA“ profil pozicionirano ispod drvenih stupova visulje te čeličnim „U“ profilima uz proračunat broj navojnih šipki kroz drveni stup prihvatiti djelovanje opterećenja u stupu. Nakon ojačanja konstrukcije pristupa se uklanjanju dijelova veznih greda. Stavka se sastoji od dva dijela; ojačanja konstrukcije koje se obračunava po kg utrošenog čelika i uklanjanja dijelova greda uz vertikalni transport i odvoz izvršeno po m ³ uklonjenog drveta.	
	a) Postavljanje čeličnih „HEA“ i „U“ profila sa potrebnim spojnim elementima	kg
	b) Uklanjanje dijelova veznih greda	m ³
4.7.4.	Ugradnja armiranobetonske ploče na stropne grede posljednje etaže ispod krovišta. Stavka se sastoji od tri dijela; a) tesarski radovi, b) armirački radovi i c) betonski radovi.	
	a) Dobava materijala i montaža oplata za stropnu ploču posljednje etaže ispod krovišta. Oplata se postavlja sa zadovoljavajućim brojem podupirača te bočnim oslanjanjem na stropne grede koje će pridržavati betonsku ploču. Obračun stavke se vrši po m ² tlocrtna površine ploče.	m ²
	b) Dobava, čišćenje, sječenje, savijanje, polaganje, te vezivanje armature betonske ploče potkrovlja. Armatura se ugrađuje te obračunava prema iskazu armature. Prije betoniranja nadzorni inženjer mora pregledati ugrađenu armaturu i upisom u dnevnik potvrditi odgovara li ona projektiranoj. Obračun u kg neto armature.	kg

	c) Dobava betona i betoniranje AB ploče stropne konstrukcije potkrovlja. Izvodi se armirano betonska ploča debljine 12 cm od betona čvrstoće C25/30, razreda izloženosti XC1. Beton ploče potkrovlja armira se betonskim čelikom kvalitete B500B. Tlačna ploča se izvodi na oplati oslonjenoj na potkonstrukciji stropnih greda etaže ispod. Stavka se obračunava prema m ³ ugrađenog betona.	m ³
4.7.5.	Podaščavanje dva reda OSB ili CLT ploča sa gornje strane stropnih greda etaže ispod potkrovlja. Ploče se postavljaju u dva reda na način da su okrenute pod kutem 45° u odnosu na grede za koje se zakucavaju, a međusobno su okomite. Svaki sloj ploča se učvršćuje zasebno, a učvršćivanje se izvodi dugačkim čavlima za drvo 7×250 mm pod približnim kutem od 60° u odnosu na gornju plohu greda u dva smjera. Uzevši u obzir sve elemente ručnog rada te spojne elemente, obračun stavke se vrši po neto kvadratnoj površini ugrađenih ploča.	m ²
4.7.6.	Ugradnja drvenih greda „spona“ okomitih na smjer stropnih greda ispod krovišta. Dobava i rezanje drvenih greda identične visine kao što su i stropne grede ispod etaže potkrovlja. Navedene grede se režu na dužinu razmaka dvije susjedne stropne grede posljednje etaže te se pomoću pokretnih skela podižu na visinu ugradnje te se okomito postavljaju između stropnih i veznih greda uz pripadne spojne elemente u vidu čeličnih pločica „L“ profila i čavala. Stavka se računa po m ³ ugrađenog drveta.	m ³
4.7.7.	Postavljanje dodatnih kosnika, „ruku“ na gornjim dijelovima svih drvenih stupova prema podrožnici. Dobava i rezanje drvenih greda identične debljine kao i elementi drvenih stupova krovišta. Grede se režu na način da svojim zasjecima odgovaraju dijagonalnom smjeru koji spaja drveni stup sa podrožnicom koja se oslanja na njega na identičan način kao što je to bilo izvedeno i na ostalim stupovima objekta. Izvođač u cijenu stavke obračunava spojna sredstva i rad. Obračun se vrši prema m ³ ugrađenog drveta.	m ³
4.7.8.	Podaščavanje dva reda OSB ili CLT ploča sa donje strane stropnih greda etaže ispod potkrovlja. Ploče se postavljaju u dva reda na način da su okrenute pod kutem 45° u odnosu na grede za koje se zakucavaju, a međusobno su okomite. Svaki sloj ploča se učvršćuje zasebno, a učvršćivanje se izvodi dugačkim čavlima za drvo 7×250 mm pod približnim kutem od 60° u odnosu na gornju plohu greda u dva smjera. Uzevši u obzir sve elemente ručnog rada te spojne elemente, obračun stavke se vrši po neto kvadratnoj površini ugrađenih ploča. Ukupna količina obračunate stavke se množi sa standardom utvrđenim koeficijentom k = 1,08 zbog otežanog rada na visini.	m ²
4.7.9.	Popločavanje rogova sa gornje strane OSB ili CLT pločama prije ugradnje letve i crijepnog pokrova. Ploče se postavljaju u dva reda te zakucavaju na rogove u okomitom smjeru čavlima 4,2×100 mm. Obračun se vrši po neto kvadratnoj površini ugrađenih ploča.	m ²
4.7.10.	Postavljanje čeličnih HEA 160 profila na vezne grede visulje radi povećanja duktilnost greda. Čelični profili se postavljaju na vezne grede sa gornje strane između dva drvena stupa konstrukcije krovišta cijelom dužinom. Stavka obuhvaća postavljanje spojnih elemenata i bušenja kroz drvene grede. Stavka se naplaćuje prema kg utrošenog čelika.	kg

4.7.11.	Postavljanje drvenih greda poprečnog presjeka 16×20cm, identične širine kao i vezne grede, na vezne grede visulje radi povećanja otpornosti na savijanje. U stavku se uključuje i bušenje cijelom visinom obje grede te postavljanje spojnih elemenata, navojnih šipki, čeličnih pločica te matica za pričvršćivanje, a rad se obračunava kroz količinu ugrađenog drveta. Stavka se sastoji od dva dijela, gdje je drugi dio ugradnja fosni širine 30 cm bočno na već spojene grede. Radi ostvarivanja otpornosti na bočno savijanje, fosne se ugrađuju obostrano po 15 cm na visinu svake grede. Fosne se obračunavaju po broju ugrađenih komada.	
	a) Drvene grede 16×20 cm	m ³
	b) Fosne širine 30 cm	kom
4.7.12.	Dobava i ugradnja čeličnih „L“ profila na donje bridove vezne grede. Ugrađuju se čelični profili 50×40×4 mm sa već radionički izvedenim rupama za učvršćivanje vijcima u drvo prema projektiranom detalju ojačanja danom od strane projektanta. Stavka se obračunava prema količini ugrađenog čelika.	kg
4.7.13.	Ugradnja čeličnih flahova debljine t = 3 mm, širine 16 cm, ravnih pločica na donje plohe veznih greda radi povećanja otpornosti na savijanje. Pločica se postavlja cijelom dužinom vezne grede sa već prethodno izrađenim rupama za izvođenje spojeva sa navojnim šipkama kroz visinu grede prema detalju projektanta. Stavka se obračunava prema količini ugrađenog čelika.	kg
4.7.14.	Ugradnja FRP šipki u donju zonu veznih greda krovišta. Vezne grede se urezuju za ubacivanje šipki, te se 3 šipke ugrađuju u urez u gredi dužinom cijele grede uz primjenu dvokomponentnog epoxy ljepila za metal i drvo. Stavka se obračunava po m dužine ugrađenih šipki.	m
4.7.15.	Dodatna ugradnja drvenih klinova na sve spojeve za koje je to projektom predviđeno te zamjena degradiranih prema odobrenju nadzornog inženjera. Klinovi se izvođe jednakih dimenzija kao i izvorni, a obračunavaju se po količini ugrađenih klinova.	kom
4.7.16.	Dodatna ugradnja čeličnih klinova na sve spojeve za koje je to projektom predviđeno te zamjena prekomjerno korodiranih ili na neki drugi način oštećenih postojećih klinova. Klinovi se ugrađuju identično kao i postojeći, prethodno izvođenjem rupa bušenjem te nabijanjem klinova na mjesto učvršćenja. Stavka se obračunava prema količini ugrađenih klinova.	kom
4.7.17.	Ojačanje spojeva uvijanjem navojnih šipki kroz spoj 2 elementa na svim spojevima gdje je to projektom predviđeno te dodatno prema mišljenju projektanta ili stručnog nadzora. Stavka uključuje prethodno bušenje, uvijanje navojnih šipki, postavljanje podložnih pločica te učvršćivanje maticama sa obje strane. Stavka se računa prema ukupnoj dužini ugrađenih šipki koje se na gradilištu sijeku prema potrebi spoja.	m
4.7.18.	Ugradnja čeličnih traka (prstenova) oko spojeva projektom predviđenih (spojevi 2 elementa koji su međusobno pod kutem manjim od 45°). Čelični prstenovi su savijeni flahovi širine 5 cm, debljine 3 mm sa prethodno izvedenim rupama kroz koje se spajaju za drvo čavlima 4,2×100 mm. Prije ugradnje se vanjska strana oba elementa, u blizini spoja gdje naliježe prsten, urezuje kako bi prsten nalegao u zarez. Stavka se obračunava prema težini ugrađenog čelika.	kg

4.7.19.	Zamjena drvenih elemenata pri spoju ili u cijelosti, utvrđeno prema razini degradiranosti drveta iz elaborata drveta krovne konstrukcije te prema mišljenju projektanta ili nadzornog inženjera. Nakon zamjene elemenata se na elementima urezuje dio pri spoju koji predstavlja novi tesarski spoj, sposoban prenijeti naprezanje opterećenja krovišta. Stavka se naplaćuje prema količini utrošenog drveta koje se mijenja.	m^3
4.7.20.	Izvođenje armiranobetonskih serklaža ispod grede nazidnice. Serklaži se izvode punom širinom zidova, a visinom ispod drvene grede nazidnice, te sa vanjske strane uz samu gredu visinom do vrha grede. Stavka obuhvaća i pridržanje drvene grede čeličnim stopama, a sastoji se od 3 dijela; a) tesarski radovi, b) armirački radovi i c) betonski radovi.	
	a) Dobava materijala i montaža oplata za horizontalne serklaže ispod i oko grede nazidnice. Oplata se postavlja sa unutrašnje strane od vrha zida do dna grede te sa vanjske strane po vanjskom rubu zida do visine jednake vrhu grede. Obračun stavke se vrši po m^2 utrošene oplata.	m^2
	b) Dobava, čišćenje, sječenje, savijanje, postavljanje, te vezivanje armature horizontalnih serklaža ispod i oko grede nazidnice. Armatura se ugrađuje te obračunava prema iskazu armature. Ovaj dio stavke uključuje postavljanje čeličnih stopa za pridržanje drvene grede nazidnice. Prije betoniranja nadzorni inženjer mora pregledati ugrađenu armaturu i upisom u dnevnik potvrditi odgovara li ona projektiranoj. Obračun u kg neto armature.	kg
	c) Dobava betona i betoniranje AB horizontalnog serklaža ispod grede nazidnice. Izvodi se armirano betonski serklaž poprečnog presjeka u „L“ obliku ispod grede od betona čvrstoće C25/30, razreda izloženosti XC3. Beton serklaža potkrovlja armira se betonskim čelikom kvalitete B500B. Stavka se obračunava prema m^3 ugrađenog betona.	m^3
4.7.21.	Zamjena oštećene grede nazidnice nakon uklanjanja dijelova zida i žbuke koji smetaju u promatranju grede. Dijelovi grede se uklanjaju prema mišljenju projektanta i stručnog nadzora. Prije uklanjanja, podupiračima se osigurava ostatak konstrukcije krovišta koji se oslanja na dio grede koji se uklanja. Nova greda se postavlja sa pripadnim zarezima na kraju kako bi se ostvario spoj sa postojećom neoštećenom gredom. Obračun se vrši po m^3 ugrađenog drveta.	m^3
4.7.22.	Ugradnja drvenih proteza kao zamjene za oštećeni dio drveta. Drvene grede koje su degradirane pod utjecajem vlage ili na druge načine oštećene na mjestu oslonca ili u neposrednoj blizini se ojačavaju novim kratkim drvenim gredama identične visine $h = 20$ cm koje svojim jednim krajem naliježu na oslonac, a drugim prelaze oštećeni dio postojeće grede do zdravog drveta. Nove grede se ugrađuju obostrano te povezuju navojnim šipkama kroz sve 3 grede i to minimalno 4 navojne šipke u jednom metru dužine. Izvođač u cijenu stavke uzima u obzir dovoz podizanje na visinu, sve spojne elemente i rad, a stavka se obračunava prema m^3 utrošenog drveta.	m^3

4.7.23.	Ugradnja čeličnih proteza kao zamjene za oštećeni dio drveta. Drvene grede koje su degradirane pod utjecajem vlage ili na druge načine oštećene na mjestu oslonca ili u neposrednoj blizini se ojačavaju čeličnim IPN profilima identične visine $h = 20$ cm, sa obje strane grede, koji svojim jednim krajem naliježu na oslonac, a drugim prelaze oštećeni dio postojeće grede do zdravog drveta. Na IPN profilima se prethodno buše rupe kroz sredinu visine na hrbtu kako bi se navojnim šipkama kroz drvenu gredu u sredini, čelični elementi povezali sa minimalno 4 navojne šipke u metru dužine grede. Obračun se vrši prema količini ugrađenog čelika.	kg
4.7.24.	Zaštita greda u kritičnim točkama oslanjanja krovništa na zidove višestrukim temeljnim, specijalnim premazom impregnacijskog sredstva za zaštitu od vanjskih utjecaja. Prilikom izvođenja radova, obračun se vrši prema kontroli i odobrenju stručnog nadzora. Stavka se računa prema količini utrošenog materijala.	kg

7. ZAKLJUČAK

Promatrajući tradicionalna drvena krovista u gradu Zagrebu i regiji na objektima starim više od sto, dvjesto, pa i preko tristo godina starosti, uočljivo je kako se radi o, većinom, klasičnim krovistima konstrukcije stolice ili visulje, od čega kod velikih i značajnih objekata učestalo visulje. Pravilnost rasporeda elemenata za određeni tip konstrukcije se razlikuje od objekta do objekta, no većina objekata ipak ima pravilne konstrukcije koje već desetljećima omogućavaju nesmetan prijenos opterećenja cijelog krovišta. Nepravilno izvedene konstrukcije zahtijevaju potpuno uklanjanje te gradnju novog krovišta prema potrebama i mogućnostima investitora, a glavna mjerila za određivanje budućih intervencija na pravilnim krovistima su stavke proučene u temi „*Tehnologije obnove i ojačanja krovišta*“ ovog rada, a to su: stanje drveta konstrukcije koje je neposredna posljedica održavanja pokrova i krovišta te izloženosti drveta, stanje spojeva elemenata, mogućnosti oslanjanja krovišta, oštećenja elemenata i oštećenja dijelova objekta u neposrednoj interakciji sa konstrukcijom krovišta.

Iako su mnoga krovista na području grada Zagreba izvedena prema pravilima struke za vrijeme u kojem su se izgrađivala te i danas čine pravilnu krovnu konstrukciju, tako se na gotovo svakom objektu može naći određenih nedostataka koji moraju biti sanirani i oštećenja i oslabljenja elemenata ili dijelova konstrukcije koja moraju biti ojačana. Tako su u prethodno navedenoj temi „*Tehnologije obnove i ojačanja krovišta*“ ponuđena rješenja, tj. zahvati koji se mogu izvoditi kako bi se konstrukcije krovišta pravilno ojačale, izmijenile i poboljšale prema željama investitora u ograničenim resursima i vremenu. Mnoga od navedenih rješenja su već široko u primjeni na rekonstrukcijama krovišta u Zagrebu, a neka od njih su izuzetno posebne metode ojačanja koja se još uvijek vrlo slabo primjenjuju na navedenom području, poput metoda „Post-naprezanja“, ugradnje drvenih okomitih spona, ugradnja čeličnih „H“ ili „HEA“ profila na elemente veznih greda, zamjenu ili ugradnju novih drvenih klinova u spojevima itd.

Rješenja za ojačanja konstrukcija krovišta koja su se navodila u ovom radu su ograničena za jedan problem u zavisnosti gdje jedno rješenje pokriva jedno oslabljenje. U većini slučajeva na konstrukciji krovišta i dijelovima objekta koji su u neposrednoj interakciji sa krovistom ne postoji samo jedno ograničenje i jedan problem, već više njih, pa je tako za svako potpuno ojačanje krovišta potrebno izabrati kombinaciju rješenja. Promatrajući razna moguća rješenja tehnologija obnove i ojačanja krovišta na teorijski način u istoimenoj cjelini te analizirajući primjene takvih rješenja u praksi na četiri objekta različitog tipa cjelini broj 5 ovog rada, postavio se cilj proučiti o rješenjima ojačanja, promotriti njihovu primjenu u praksi te sugerirati

na najbolji mogući odabir rješenja. Tako se zapazilo da je prema stručnom mišljenju svih aktera projekta, osim onoga investitora na objektu u Palmotićevoj ulici neophodno rješenje rušenje postojećeg krovišta te gradnja novog, što nije plan prema projektu, a na primjer, na objektu u Mrazovićevoj ulici to nije neophodno, ali je unutar plana projekta. Iz navedenog se zaključuje kako je „Elaborat procjene stanja drveta“, koji se ne radi nužno za manja krovišta često izrazito potreban kako bi se odredila razina oštećenja drveta i time napravila procjena učinkovitosti obnove. Zaključak govori kako je u mnogim slučajevima iniciranje od strane projektanta ili izvođača za provođenje elaborata procjene stanja drveta konstrukcije itekako poželjno, a često i neophodno.

Na svim promatranim obnovama je zamijećeno da se daje velika važnost ojačanju zidanih elemenata objekta koji su u neposrednoj interakciji sa krovom, poput zidova, nadozida, izvedbe serklaža i slično, a na tri od četiri objekta se izvodila armiranobetonska ploča iznad posljednje etaže objekta, koja se nalazi ispod krovne konstrukcije te je ona bila želja i na četvrtom objektu, no iz strukturalnih razloga, njezina izvedba nije bila moguća.

Iz svega promatranog se zaključuje kako je najbolje rješenje za ojačanje krovišta i objekta u zavisnosti od konstrukcije krovišta ojačanje svih nosivih zidanih elemenata u neposrednoj blizini krovišta te izvedba tanke spregnute armiranobetonske ploče kako bi se dobila potpuna struktura i povezanost zidanih elemenata objekta te omogućila dostatna stabilnost objekta neovisno od izmjene na konstrukciji krovišta, a od intervencija na samom krovu, najvažnije je stabilizirati i dostatno ojačati sve spojeve krovišta, poželjno jednom od ponuđenih metoda u ovom radu te zamijeniti degradirane elemente krovišta sukladno provedenom elaboratu ocjene stanja drveta te imati u dugoročnom planu redovit pregled i održavanje prostora potkrovlja i elemenata krovišta. Uz adekvatno ojačane konstrukcije krovišta i dijelova objekta uz njih, uvelike se smanjuje mogućnost i nestaje strah od urušavanja zidova, nadozida, vijenaca te na posljetku i samih krovišta pri eventualnim ponovnim potresima ili nekim drugim nepogodnim djelovanjima po nosivost i stabilnost krovne konstrukcije.

POPIS SLIKA:

Slika 1. Poprečni pogled roženičkog krova [3]	2
Slika 2. Roženički krov sa čeličnom zategom (prijenos sila) [2].....	3
Slika 3. Roženički krov sa veznom gredom (opterećenje i reakcije) [3].....	3
Slika 4. Roženički krov sa AB pločom (opterećenje i reakcije) [3]	3
Slika 5. Poprečni pogled roženičkog krova s pajantom [3]	4
Slika 6. Podroženički krov [2]	5
Slika 7. Konstrukcija krovišta stolica oslonjena na armiranobetonsku ploču [5].	6
Slika 8. Idealizirani statički sustav visulje [6].....	8
Slika 9. Jednostruka visulja sa nadozidom [4]	9
Slika 10. Dvostruka visulja bez nadozida [4].....	9
Slika 11. Prijenos opterećenja jednosotrukom visuljom [4]	10
Slika 12. Prijenos opterećenja dvostrukom visuljom [4].....	10
Slika 13. Varijante specifičnih tipova konstrukcije dvostrešnog krovišta [7] ...	11
Slika 14. Pratt rešetka [7]	12
Slika 15. Opterećenost elemenata ukrštenog krovišta	13
Slika 16. Nepravilno ugrađena konstrukcija ukrštenog krovišta [7].....	14
Slika 17. Modificirani "Fink" rešetkasti nosač [7]	15
Slika 18. Primjer krovišta sa konzolnim nosačima - St. Patrick Church, Redding, SAD [7].....	16
Slika 19. Sustav krovišta "Zoolinger" s kratkim lamelama [5].....	16
Slika 20. Zabatni zid krovišta [8]	17
Slika 21. Primjer rješenja analize drvene konstrukcije [11]	19
Slika 22. Post-naprezanje elementa roga teatra u Sarteanu, Italija [12].....	22
Slika 23. Post-naprezanje elementa vezne grede teatra u Savoni, Italija [12]....	23
Slika 24. Prevrtnje zidova uslijed potresne sile uz nedovoljnu dijafragmatičnu otpornost [13].....	24
Slika 25. Zakucavanje drvenih i CLT ploča na rogove krovišta [14].....	25
Slika 26. Bočno ojačanje veznih greda ugradnjom okomitih spona [12].....	26
Slika 27. Koso zakucavanje dasaka na vezne grede [13]	26
Slika 28. Bočno ukrućenje veznih greda krovišta [12].....	27
Slika 29. Način povezivanja AB ploče sa nosivim zidovima [12].....	28
Slika 30. Ugradnja betonske ploče preko veznih greda objekta [14].....	28
Slika 31. Ojačanje drvene grede čeličnom "HEA profil" gredom [14]	29
Slika 32. Primjeri ugradnje čeličnih pločica uz veznu gredu [14]	30
Slika 33. Urezivanje FRP šipki ili traka u veznu gredu [14]	30
Slika 34. Oštećenje tesarskog spoja kosog elementa oslonjenog na gredu; a) oštećenje uslijed tlačnog opterećenja u ravnini; b) oštećenje uslijed nedovoljne	

bočne stabilnosti spoja; c) kombinirano oštećenje uslijed tlaka u osi i bočnog ispupčenja [12] --> (17).....	31
Slika 35. Vijčano spojena proteza ojačanja urezanog spoja ojačana za posmična naprezanja [12].....	32
Slika 36. Spoj novog dijela elementa sa starim zdravim dijelom nosivog elementa uz ojačanje navojnim šipkama [12]	33
Slika 37. Metalna ojačanja spoja vezne grede i roga [13]	34
Slika 38. Ovisnost pomaka grede pri spoju s rogom pod kutom 30° pri različitim ojačanjima [13]	34
Slika 39. Ovisnost pomaka grede pri spoju s rogom pod kutom 60° pri različitim ojačanjima [13]	35
Slika 40. Primjer oštećenja oslonca veznih greda na nosivim zidovima [12]	35
Slika 41. Prikaz nejednolike deformacije krovni ravnina [15]	36
Slika 42. Prikadnost čeličnih ojačanja za dio krovišta [14].....	37
Slika 43. Primjeri čeličnih ojačanja kraja drvene grede [12].....	38
Slika 44. Ojačanje oštećene vezne grede; a) bušenje rupa za sidrenje ojačanja, b) sidrenje metalnih ili FRP šipki, c) zapunjavanje odrezanog dijela čvrstim betonom [14].....	39
Slika 45. Tlocrtni prikaz krovišta Gornjogradske gimnazije	40
Slika 46. Gradnja novog zabatnog zida	42
Slika 47. Armiranje horizontalnog serklaža oko drvene grede nazidnice	43
Slika 48. Ojačanje spoja novog sa starim dijelom vezne grede	44
Slika 49. Ojačanje čeličnim "U" profilima(crni metal) i drvenim fosnama	44
Slika 50. Ojačanje spoja podrožnice, razupore i roga čeličnom "L" pločicom ..	45
Slika 51. Ojačanje ugradnjom sljemene grede između para rogova	45
Slika 52. "HEA" profil greda oslonjena na "IPE" profil grede pridržanja stropne AB ploče	46
Slika 53. Prihvatanje vezne grede i drvenog stupa konstrukcije	47
Slika 54. Izbetonirana AB ploča potkrovlja	48
Slika 55. Odsječene vezne grede konstrukcije krovišta.....	49
Slika 56. Rezanje rogova za postavu krovni prozora	49
Slika 57. Pogled prednjeg pročelja crkve sv. Katarine	50
Slika 58. Tlocrt krovišta crkve.....	51
Slika 59. Poprečni presjek crkve sv. Katarine	51
Slika 60. Konstrukcija jednostruke visulje na crkvi	52
Slika 61. Konstrukcija stolice malih bočnih krovišta	53
Slika 62. Spoj vertikalnog sa horizontalnim serklažem.....	54
Slika 63. Horizontalna čelična rešetkasta konstrukcija između unutarnjih nosivih zidova.....	55
Slika 64. Rešetkasta konstrukcija bočnog krovišta	55

Slika 65. Spoj konstrukcije navojnim šipkama kroz serklaže.....	56
Slika 66. Betoniranje zabatnog zida	57
Slika 67. Projektom predviđeno ojačanje spregovima	57
Slika 68. Proteze od novih greda uz trošne grede obostrano	58
Slika 69. Stambena zgrada - Palmotićeve ulica 64A.....	59
Slika 70. Shema glavnog krovišta stambene zgrade	60
Slika 71. Zabatni zid objekta	61
Slika 72. Drveni nadvoj o koji se oslanjaju grede konstrukcije krovišta	62
Slika 73. Krovište sa dvorišne strane	63
Slika 74. Konstrukcija krovišta sa ulične strane.....	63
Slika 75. Oslanjanje ravnog krova preko drvenih greda.....	64
Slika 76. Konstrukcija krovišta u Mrazovićevoj 7	65
Slika 77. Kosi stupovi konstrukcije krovišta.....	65
Slika 78. Otvor za ulaz na ravni krov	66

POPIS TABLICA:

Tablica 1. Opcije pri odabiru ojačanja napregnutih elemenata	67
Tablica 2. Ostvarivanje bočne stabilnosti krovništva	68
Tablica 3. Ojačanje vezne grede visulje	69
Tablica 4. Ojačanje spojeva	70
Tablica 5. Ojačanje oslonaca krovništva	71
Tablica 6. Troškovnik radova ojačanja krovništva	73

LITERATURA:

- [1] Živa Deu, Elementi građevina, *Građevinar* (2009); 61(12), 1203-1206
- [2] B. Tardozi, Kosi krovovi, *Arhitektonske konstrukcije III*, Arhitektonski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, (2011)
- [3] Ž. Koški i dr., *Elementi visokogradnje II*, Građevinski fakultet u Osijeku, (2013), str. 6-8
- [4] Vlatka Rajčić, *Konstrukcije krovova i pokrovi*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; Dostupno: https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/KROVOVI_i_pokrovi_R.pdf, [Pristupljeno: 16.06.2024.]
- [5] Čizmar D, Volarić I. Usporedba zollinger sustava i klasičnog drvenog krovišta. *Polytechnic and design*. (2017) [pristupljeno 16.06.2024.]; 5(3):187-200. <https://doi.org/10.19279/TVZ.PD.2017-5-3-04>
- [6] Laurin Ernst, *Queen Post Trusses Explained*, (2024); Dostupno: <https://www.structuralbasics.com/queen-post-truss/>, [Pristupljeno: 24.06.2024.]
- [7] J. DeStefano i dr. *Design Guide for Timber Roof Trusses*, Timber frame engineering council (TFEC), (2020), str. 6-33
- [8] LJ. Perić, I. Matorić, Pouzdanost tradicionalnih zidanih građevina s drvenim stropovima na potresno djelovanje, *Građevinar 72 vol.10*, (2020), str. 869-893
- [9] Stručni članak; Urušavanja tavanskih zidova, *Dominvest* (2020); Dostupno: <https://www.dominvest.hr/sanacija-od-potresa-urusavanja-tavanskih-zidova/>, [Pristupljeno: 12.08.2024.]
- [10] H. Turkulin, *Dijagnostika drva povijesnih građevina u postupcima obnove – 1.dio*, Stručni članak, (2021), Dostupno: <https://korak.com.hr/dijagnostika-drva-povijesnih-gradevina-u-postupcima-obnove/>, [Pristupljeno: 17.08.2024.]
- [11] H. Turkulin, Ocjena stanja drva i konstrukcije drvenoga krovišta Gornjogradske gimnazije u Zagrebu, Trg Katrine Zrinske 5, *Fakultet šumarstva i drvne tehnologije Sveučilišta u Zagrebu*, (2023)

- [12] J.M. Branco i dr., Repair and Strengthening of Traditional Timber Roof and Floor Structures, Strengthening and Retrofitting of Existing Structures, A. Costa i dr. *Building Pathology and Rehabilitation* (2018), vol. 9, str. 113-139
- [13] J.M. Branco, R. Tomasi, Wood in floors and roofs, *Structural Rehabilitation of Old Buildings* (2014), str. 235-258
- [14] M. Corradi i dr., *Repair and Reinforcement of Historic Timber Structures with Stainless Steel*, *Metals* (2019), vol 9, (106)
- [15] A. Candelaz-Gutiérrez, M. Borallo-Jimenez, Methodology of Restoration of Historical Timber Roof Frames. Application to Traditional Spanish Structural Carpentry, *International Journal of Architectural Heritage*, (2018), ISSN: 1558-3058
- [16] M. Piazza i dr., Behaviour of refurbished timber floors characterized by different in-plane stiffness, *Structural Analysis of Historic Construction: Preserving Safety and Significance, 1.st edition*, (2008), str. 843-850.