

DIMENZIONIRANJE LESENEGA MOSTU ZA PEŠČE IN KOLESARJE

DIMENSIONING OF A TIMBER BRIDGE FOR PEDESTRIANS AND CYCLISTS

Mitja Papinutti, dipl. gosp. inž.
prof. dr. Miroslav Premrov, univ. dipl. inž. grad.
asist. Matjaž Tajnik, univ. dipl. inž. grad.

Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo,
Smetanova 17, 2000 Maribor
mitja.papinutti@gmail.com
miroslav.premrov@uni-mb.si
matjaz.tajnik@uni-mb.si

Strokovni članek
UDK: 693.22:699.86

Povzetek | Članek obravnava statično analizo in dimenzioniranje mostu za pešce in kolesarje. Posebnost mostu je v stropu in tleh, sestavljenih iz KLP (križno lepljenih plošč), in štirih lepljenih nosilcev, ki so bili projektirani po standardih ÖNORM B 4002. Obstoječi most smo hoteli prilagoditi slovenskim standardom SIST EN 1995-1 in s tem narediti primerne za gradnjo v Sloveniji. Pri tem uporabimo različne statične modele, ki dajejo različne rezultate. Most ima razpon 35 m in visi na dveh vrveh z detajli, ki so posebnost oblikovanja takšnih mostov.

Summary | The subject of this paper is the constructional analysis and dimensioning of a bridge for pedestrians and cyclists. The special feature of the bridge is its ceiling and floor consisting of a CLT (Cross Laminated Timber) panel and four glued beams, designed according to ÖNORM B 4002 standards. In order to make the bridge appropriate for construction in Slovenia, it was necessary to adjust an existing bridge so that it would suit the Slovenian SIST EN 1995-1 standards. Using different static analysis gives us different results. The bridge has a span of 35 m and is suspended on two steel ties with the details that make the modelling of such bridges special.

1 • UVOD

Les doživlja zadnjih nekaj let v gradbeništvo svoj preporod zaradi ekoloških prednosti pred drugimi gradbenimi materiali. V Sloveniji je kar 66 % površine pokrite z gozdovi, kar uvršča Slovenijo na tretje mesto v Evropi, prednost lesa je tudi nizki energetska vložek v primarno in sekundarno fazo obdelave lesa, vse to pa govori v korist gradnji lesenih mostov. Končni energijski vložek v lesno proizvodnjo je bistveno manjši kot pri jeklu in betonu. Les kot naravni material je uporaben kot gorivo in kot gradbeni material. Les je v posameznih primerih predvsem iz pokrajinskih in estetskih vidikov primernejši za vgraditev v prostor,

kar povečuje trend graditve z lesom. Zaradi zavedanja teh prednosti v kombinaciji z naraščajočo ozaveščenostjo ljudi o izrabljanju naravnih materialov bo les po vsej verjetnosti v prihodnosti večkrat uporabljen za gradnjo mostov. Les pa ima svoje mehanske lastnosti, ki nas omejujejo pri gradnji mostov z daljšimi razponi. Največje materialne omejitve so: modul elastičnosti E , nizki strižni modul G in še nižja natezna trdnost pravokotno glede na vlakna lesa. Z uporabo različnih materialov v kombinaciji z lesom lahko bistveno povečamo razpon mostu in njegovo vitkost. Materiale kombiniramo tako, da kar najbolje izkoristimo

trdnosti in specifične lastnosti posameznih materialov. Zaradi kompleksne fiziološke in biološke sestave je les zahteven za projektiranje.

Namen članka je prikazati rešitev sovprežnega mostu v Sloveniji tako, kakor so premostitev rešili v sosednji Avstriji. Enak most je treba prilagoditi našim trenutnim standardom in obtežbam. Za analizo uporabimo 2D- in natančnejši 3D-prostorski model, ki daje različne rezultate. Posebnost mostu sta streha in tla, sestavljena iz križno lepljenih plošč (v nadaljevanju KLP) in štirih lepljenih nosilcev, ki delujejo kot T-nosilec. Za podrobno analizo T-nosilca je bilo treba modelirati linijski element v interakciji s KLP. Prikazan je zanimiv primer uporabe plošč na lesenem mostu s streho in primer izračuna interakcije in nosil-

nosti. Ker v Evropi za dimenzioniranje KLP še ne obstajajo veljavni standardi, veljajo pa priporočila in nacionalni standardi, je bilo treba izpeljati porušne mehanizme za KLP. Zaradi kompleksnega obnašanja in porušnih metod KLP ni dovolj, da razpolagamo samo s podatki proizvajalca o lastnostih plošč, temveč je treba detajlno razumevanje, na podlagi katerega lahko izračunamo nosilnost KLP za poljubno napetostno stanje prereza. Zanimiv in kompleksen del mostu so deli jeklenih vrvi in jeklenih podpor, kjer so tudi prikazane delne rešitve z dimenzioniranjem, ki so zanimive za inženirsko prakso.

Tip objekta	pokriti most za pešce in kolesarje
Nosilni sistem	sovprežni most, podprt z vrvema in razponom 35 m ter dvema dovoznima rampama iz KLP (2 x 3 m)
Lokacija postavljenega mostu	Avstrija/Štajerska/Feldbach
Most ponovno računamo za lokacijo	Slovenija/Celje
Material (za nosilne dele)	armirani beton C30/37
– oporniki in stebri	KLP – križno lepljene asimetrične plošče, lepljeni nosilci (GL36c) delujejo kot T-nosilec
– tla in streha	lepljenec iz macesna GL24h
– stebri	jeklo S355
– natezne vešalke in jekleni detajli	jeklo S235
– jeklena vrv	liti asfalt.
– pohodna površina	

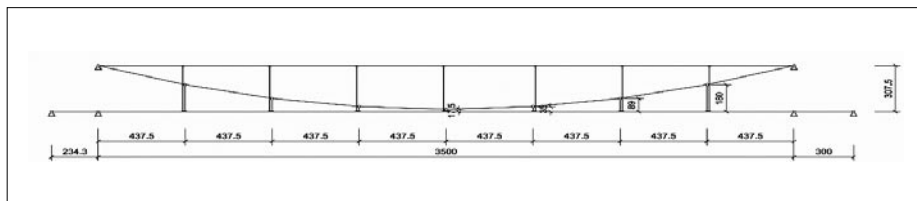
Razpredelnica 1 • Osnovni podatki o mostu

2 • RAČUNSKI MODEL MOSTU

Most modeliramo v 3D-okolju in v celoti izračunavamo z računalniškim paketom SAP2000. Primerjava je bila narejena z računalniškim paketom AxisVM 3D, kjer je bil narejen poenostavljeni 2D-računski model, tako da je bila narejena samo vzdolžna polovica mostu, ki je bila v celoti sestavljena iz linijskih elementov stropa, tal, stebrov, vrvi in vešalk.

3D-statični izračun (slika 2) je prav tako modeliran z linijskimi elementi stebrov, vrvi in vešalk, stropa in tal. T-nosilca stropa in tal sta sestavljena iz linijskih elementov GL36c v interakciji z ekscentrično priključeno KLP, modelirano z lupinskimi elementi, ki prevzemajo obremenitve v ravnini in pravokotno nanjo. Upoštevati je treba strižne deformacije zaradi majhnega razmerja L/d (slika 11).

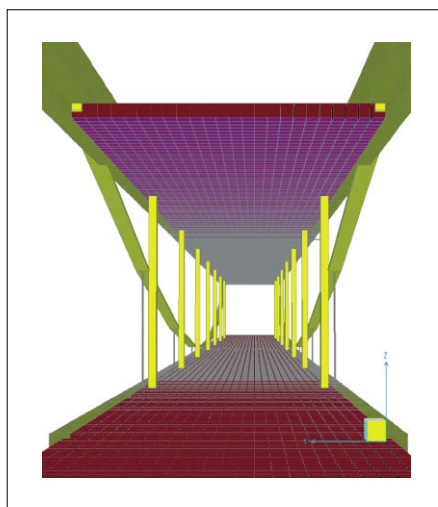
Dimenzioniramo samo dele konstrukcije, ki so najbolj obremenjeni glede na dobljene notranje statične veličine. Tla so sestavljena iz ortotropne plošče, moduli elastičnosti se razlikujejo v vzdolžni in prečni smeri zaradi nesimetrične KLP. Plošča je nato na vsaki strani podprta z linijskim elementom, sestavljenim iz dveh lepljenih nosilcev, 20 x 48 cm in 20 x 35 cm (slika 2). KLP je ekscentrično togo pritrjena (prilepljena) na nosilec, medtem ko nosilca, dvojčka, med seboj nista vertikalno lepljena, ampak sta povezana z vijaki. KLP v interakciji z linijskimi nosilci GL36c delujejo kot T-nosilec, zato ga lahko tako tudi računamo v poenostavljenem 2D-modelu (slika 1). Vijačna zveza omogoča elementoma enake upogibne deformacije, hkrati pa



Slika 1 • Dimenzije mostu poenostavljenega 2D-statičnega modela

zmanjša torzijsko togost (deljenega prereza) in tako elementa prevzemata manjše torzijske obremenitve. Primernejša je izbira vertikalno

deljenega nosilca (slika 4b) zaradi manjših strižnih napetosti (za 45 %) in manjše togosti (slika 4).

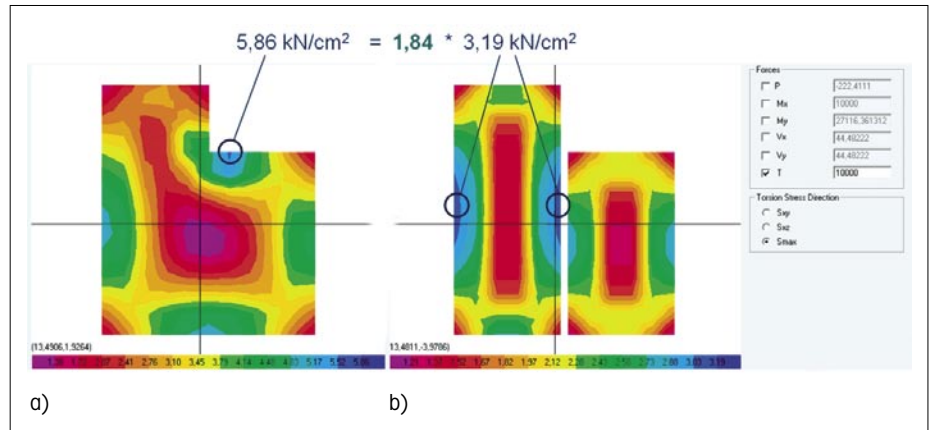


Slika 2 • 3D-računski model v program SAP 2000



Slika 3 • Slika mostu s sprednje strani

Nad vse pomembno je tudi upoštevanje strižnih deformacij KLP pri izračun notranjih statičnih veličin, saj te povzročijo večjo torzijsko obremenitev lepljenih nosilcev. V obeh modelih se upošteva tudi začetno prednapetje zaradi ekscentričnosti naleganja nosilcev na jeklene podpore, kjer se vnaša horizontalna sila vrvi v stebre.



Slika 4 • Napetosti ob torzijski obremenitvi $M_x = 1000 \text{ kN/cm}$ v nosilcih v primeru vertikalno zlepljenega (a) in deljenega nosilca (b) (kN/cm^2)

3 • RAZLIKE MED 3D- IN 2D-POENOSTAVLJENIM STATIČNIM MODELOM MOSTU

S prostorskim modelom dobimo notranje statične veličine v nosilcih (M_x in $M_z \rightarrow$ ni enak kot pri 2D) in v KLP (M_x, M_y, V_{zx}, V_{zy}), pomembne za dimenzioniranje posameznih prerezov elementov.

Posebnost KLP je v strižnih deformacijah, ki so zaradi prečnih desk desetkrat večje kot strižne deformacije lepljenega lesa. Zaradi nizkega strižnega modula lepljenega lesa $G_{GL} = E/16 = 750 \text{ N/mm}^2$ in še nižjega strižnega modula

plošč $G_{KLP} \approx G_{GL}/10 \approx 75 \text{ N/mm}^2$ morajo biti strižne deformacije upoštewane. Nekateri proizvajalci navajajo povprečni strižni modul kot $G_{KLP} = 50 \text{ N/mm}^2$, potreben za dimenzioniranje (Blaß, 2003).

Razlika med modeloma je tudi v osni deformabilnosti stropne plošče, če T-nosilca stropa obremenimo s horizontalno osno silo. Večja osna podajnost 3D- proti 2D-modelu je posledica manjše aktivacijske površine na-

leganja stropa na podpore. Deformacije so povečane ob samem detajlu podpore, kjer pride do vnosa horizontalne sile v strop. Zaradi večjih horizontalnih pomikov natezne vrvi v podporah se povečajo tudi povesi. Povečanje povosov vrvi posledično nudi manjšo upogibno oporo stebrov na stropni T-nosilec (slika 1). Povečani povesi (3D proti 2D) pomenijo večje upogibne obremenitve tal in s tem za 19,8 % večje normalne napetosti. Povišanje upogibnih napetosti zaradi večje podajnosti vrvi delno odpravimo z nadvišanjem mostu v fazi po postavitvi mostu, ki ga v računskem modelu največkrat upoštevamo kot nelinearno temperaturno obremenitev večalk.

4 • MODELIRANJE IN DIMENZIONIRANJE JEKLENIH DETAJLOV

4.1 Vešalke

Posebnost vešalk je v naleganju na natezno vrv. Zaradi možnosti preboja vešalk vstavimo polne valje, v katere privijačimo vešalke (slika 5), ki osno silo vešalk enakomerno raznesejo po celotni površini natezne vrvi oziroma ploščatega jekla in preprečijo preboj, kjer so koncentrirane napetosti (slika 6) že tako povečane zaradi luknje na sredini vrvi.

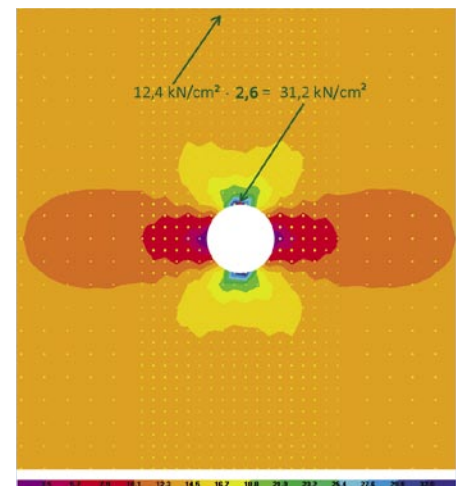


Slika 5 • Detajl stika vrvi in vešalke

4.2 Natezna vrv

Izkaže se, da ima vrv največji vpliv na togost konstrukcije in na lastno frekvenco, ki se ujema z meritvami na mostu v Feldbachu. Dimenzije vrvi so bile določene v času opti-

mizacije med nosilnostjo in lastno frekvenco mostu. Nesmiselno bi bilo zmanjševati prerez vrvi in mase z višanjem kakovosti jekla, saj bi tako povečali dinamične učinke.



Slika 6 • Povečanje glavnih napetosti vrvi okoli luknje za faktor 2,6, kjer so pritrjene vešalke $d = 25 \text{ mm}$

4.3 Jeklana podpora

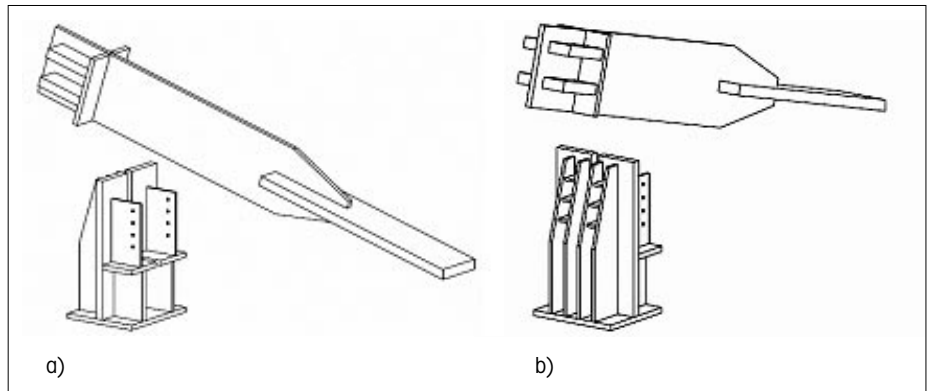
Zanimiv konstrukcijski detajl predstavlja jeklana podpora, ki prenaša vertikalno reakcijo vrvi v armiranobetonske stebre in horizontalno v strop T-nosilca (slika 7). Prostorski model FEM-solid jeklene podpore je narejen iz elementov $V = 1 \text{ cm}^3$ in modeliran v programu SAP2000. Pritrditev vrvi na jeklano podporo delimo v dva računsko ločena modela za dimenzioniranje zvarov (slika 8).



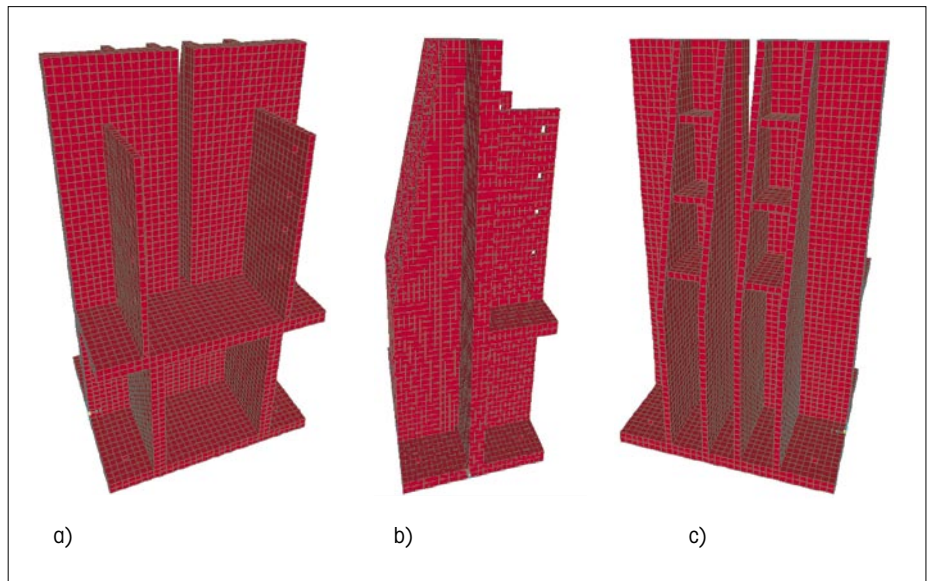
Slika 7 • Naleganje nosilca GL36c na jeklano podporo

Za dimenzioniranje zvarov na vrvi upoštevamo osne sile in ekscentričnosti naleganja vrvi na podporo (slika 8a, zgoraj). Za spodnji del jeklene podpore (slika 8a, spodaj), kjer ne moremo analitično določiti sile v posameznih prerezih, naredimo ustrezeni model za izračun napetosti (slika 9). Zanemarimo deformacije zvarov in modeliramo kot monolitni element, na katerega prenesemo vse akcije T-nosilca in jeklene vrvi. Jeklano podporo je treba ustrezno privijačiti na armirano betonski stebriščni temelj, da ti prevzamejo strižno in natezno silo v primeru horizontalnih nezgodnih obremenitev.

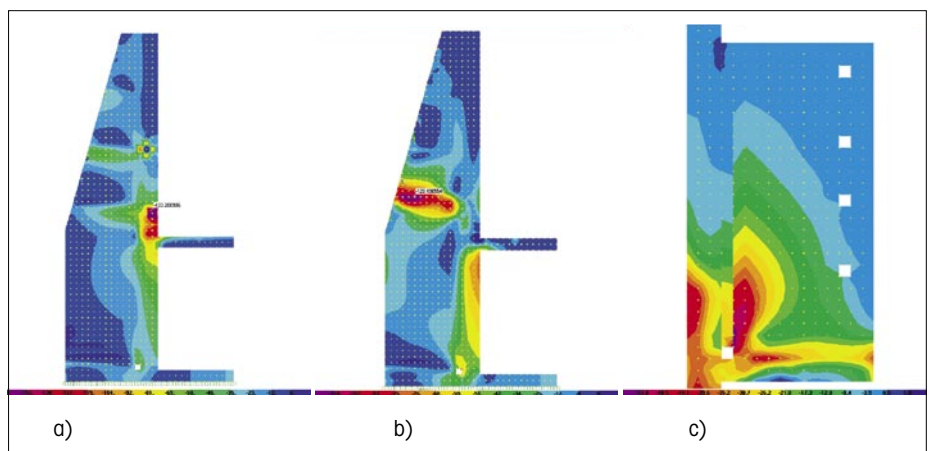
Posamezne dele podpore dimenzioniramo glede na izračunane napetosti (slika 110), pri tem upoštevamo višino korena zvarov a , ki mora biti večja od debeline pločevine, da velja predpostavka monolitnega modela solid.



Slika 8 • Detajli priključitve natezne vrvi na jeklano podporo (razcepljena podpora)



Slika 9 • 3D-solid model jeklene podpore, pogled iz perspektiv



Slika 10 • Glavne napetosti v prečnem prerezu zadnjih dveh reber (levo, sredina) in glavne napetosti, kjer je pritrjen leseni T-nosilec (N/mm^2)

5 • KRIŽNO LEPLJENE PLOŠČE

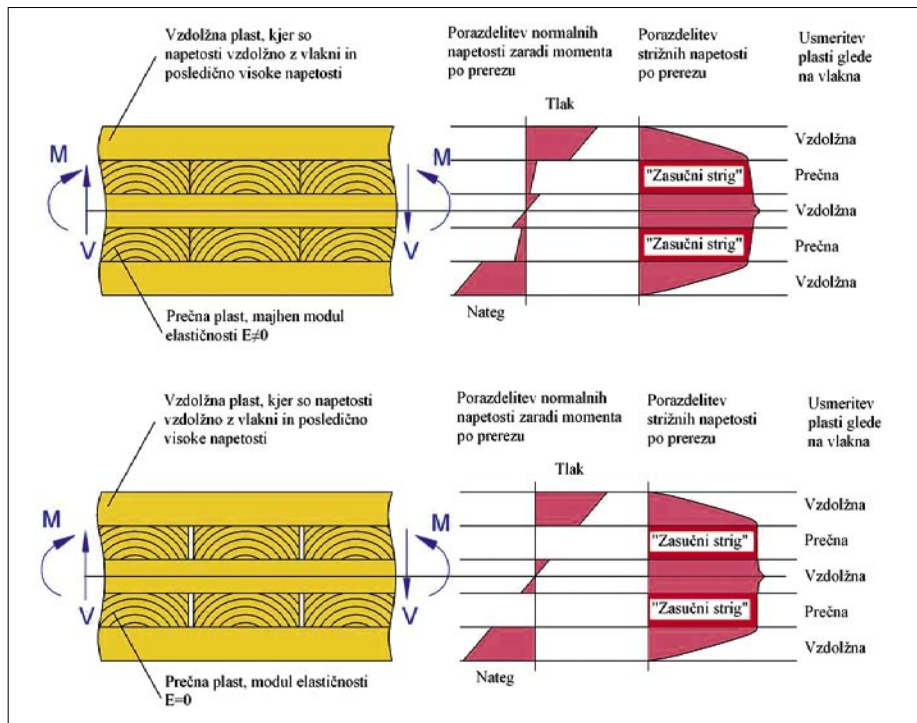
Križno lepljene plošče (KLP) so inženirski leseni proizvodi, ki so sestavljene iz žaganega lesa, zlepljenega skupaj, v posebnih primerih vezanega z mehanskimi veznimi sredstvi. Lastnosti plošč so inženirski oblikovane tako, da najbolj ustrezajo posameznim zahtevam po nosilnosti. Enostavna sestava plošč nam omogoča proizvodnjo večjih dimenzij in kot taka je uporabna tako v gradnji stavb kot za druge inženirske proizvode. KLP lahko uporabljamo kot nosilne plošče v dveh smereh ali kot strižne zidove, oboje pa uporabimo v našem 3D-modelu. KLP in vzdolžne nosilce GL36c zlepiamo skupaj in lahko upoštevamo razporeditev napetosti po teoriji T-nosilca. Tu je treba upoštevati efektivno togost in predvsem strižne deformacije KLP, ki bistveno vplivajo na raznos napetosti med KLP in GL36c. Poleg modeliranja plošč se moramo zavedati tudi nekaterih posebnosti pri raznosu normalnih napetosti in strižnih napetosti v KLP. V nadaljevanju sta omenjena povečana normalna napetost in posebno napetostno stanje prečnih desk zaradi zasučnega striga.

Bistvo nadaljnje predstavitve mehanskih in porušnih lastnosti kompozitnih KLP je prikaz delovanja in modeliranja KLP. Podatki proizvajalcev, katerih karakteristike prereзов KLP so podane za homogeni prerez zaradi lažjega izračuna, nam ne dajejo dovolj podatkov, predvsem v primeru obremenitve plošč z dvema upogibnima momentoma in dvema osnima silama. Kako se napetosti porazdelijo po prerezu, je odvisno od sestave plošče, in jih delimo v glavnem v dve skupini vertikalno lepljenih in vertikalno nezlepljenih desk (sliki 11a in 11b).

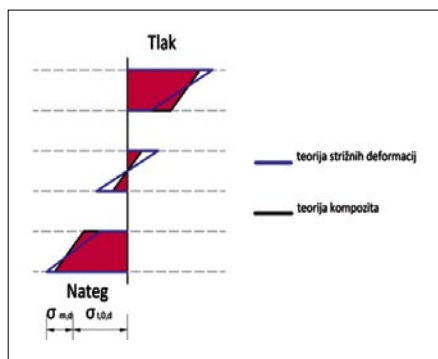
Napetosti v prerezu KLP se porazdelijo v razmerju togosti posameznih plasti. Za dimenzioniranje prereзов je treba izračunati efektivne vztrajnostne moment I_{ef} in površine A_{ef} . Za hitrejši izračun lahko uporabimo I_{ef} vertikalno nezlepljenih desk, kjer ne upoštevamo prečnih desk in smo na varni strani. Če imamo podatke proizvajalca, so materialne karakteristike že transformirane glede na homogeni prerez KLP, za katerega računamo deformacije ali napetosti.

5.1 Normalne napetosti

Normalne napetosti se razdelijo v razmerju togosti desk glede na kot obremenitev in na smer vlaken. Razmerje povečanja normalnih napetosti po teoriji kompozitnih nosil-



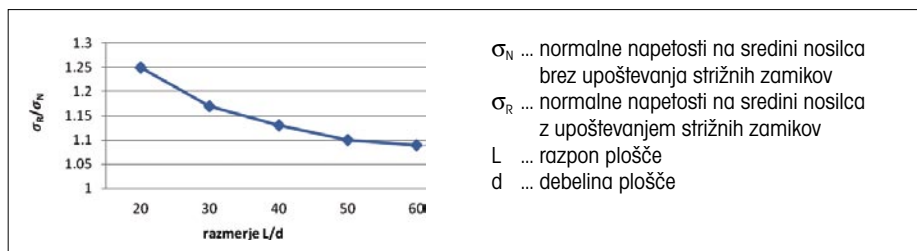
Slika 11 • Porazdelitev napetosti v KLP v primeru vertikalno lepljenih desk (a) in v primeru, ko te niso vertikalno lepljene (b)



Slika 12 • Porazdelitev normalnih napetosti zaradi momenta na sredini plošče, obremenjene s koncentrirano silo ($E_{90} = 0$)

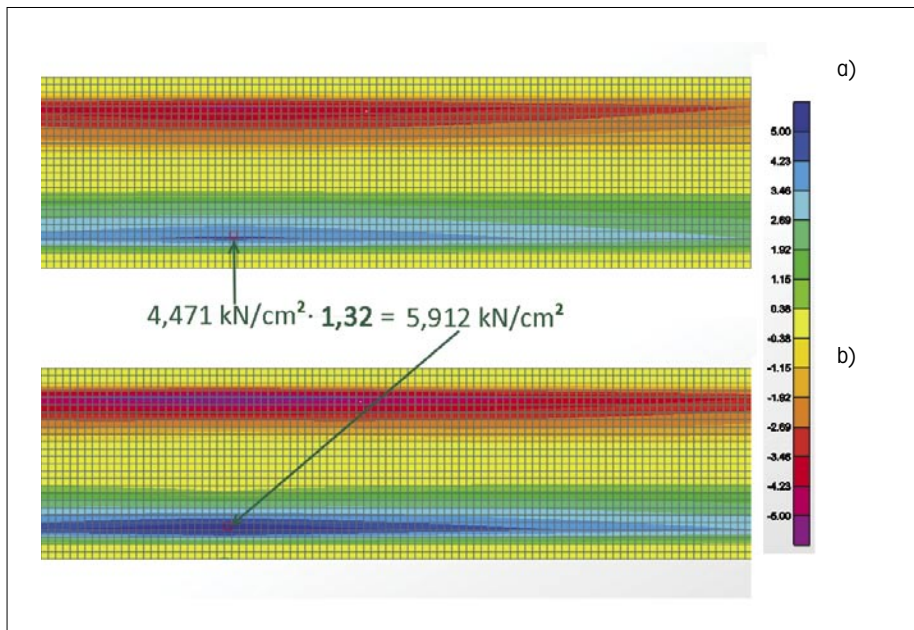
cev σ_R/σ_N je posledica strižnih deformacij prečnih desk (slika 12). Za koliko se poveča normalna napetost na sredini razpona, je odvisno od geometrije, podpiranja in načina obremenitve.

S strižnimi deformacijami se povečajo tudi normalne napetosti na sredini razpona. To povečanje napetosti je predvsem pomembno pri ploščah, ki so obremenjene s koncentrirano silo na sredini razpona. Povečane napetosti so odvisne predvsem od razmerja dolžine proti višini KLP in v primeru kratkih plošč, kjer so večji prispevki strižnih deformacij in pride do povečanja normalnih napetosti za faktor 1,25 (slika 13).



Slika 13 • Razmerje med povečanimi normalnimi napetostmi zaradi strižnih zamikov in normalnimi napetostmi, izračunanimi po teoriji nosilca za simetrični kompozit KLP plošče iz petih slojev debeline $d = 20$ cm (Mestek, 2009)

- σ_N ... normalne napetosti na sredini nosilca brez upoštevanja strižnih zamikov
- σ_R ... normalne napetosti na sredini nosilca z upoštevanjem strižnih zamikov
- L ... razpon plošče
- d ... debelina plošče



Slika 14 • Povečanje normalnih napetosti za faktor $\chi_r = \sigma_R / \sigma_N \approx 1,3$ na sredini razpona KLP zaradi strižnih zamikov KLP (spodaj)

Napetost v vzdolžnih deskah mora zadostiti pogoju (1):

$$\frac{\sigma_{c,0,d} / (\sigma_{t,0,d}) \pm \sigma_{m,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,d} / (f_{t,0,d})} \pm \frac{\sigma_{m,0,d}}{f_{m,d}} = \frac{\left(\frac{N}{A_{ef}} \right) \pm \left(\frac{M_i \cdot \chi_{r,i}}{W_{i,ef}} \right)}{k_c \cdot f_{c,0,d} / (f_{t,0,d})} \pm \frac{\sigma_{m,0,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (1)$$

Napetost v prečnih deskah mora zadostiti pogoju (2):

$$\frac{\sigma_{c,90,d} / (\sigma_{t,90,d}) \pm \sigma_{m,90,d}}{k_c \cdot f_{c,90,d} / (f_{t,90,d})} \pm \frac{\sigma_{m,90,d}}{f_{m,d}} = \frac{\alpha_e \cdot \left(\frac{N}{A_{ef}} \right) \pm \left(\frac{M_i \cdot \chi_{r,i} \cdot \alpha_e}{W_{i,ef}} \right)}{k_c \cdot f_{c,90,d} / (f_{t,90,d})} \pm \frac{\sigma_{m,90,d}}{f_{m,90,d}} \leq 1 \quad (2)$$

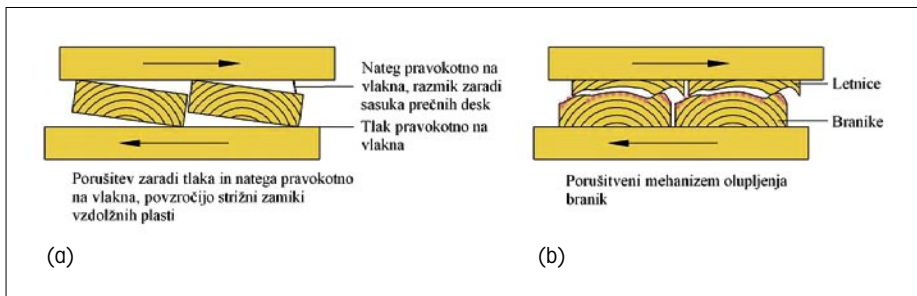
- N ...osna sila
- M_i ... moment okoli osi- i v prerezu KLP
- $W_{i,ef}$... elastični odpornostni moment okoli osi- i glede na opazovano vlakno
- $A_{i,ef}$... efektivna površina
- $\sigma_{c,0,d} / (\sigma_{t,0,d})$... projektna natezna ali tlačna napetost v smeri vlaken
- $\sigma_{c,90,d} / (\sigma_{t,90,d})$... projektna tlačna ali natezna napetost pravokotno na smer vlaken
- $\sigma_{m,d}$... projektna upogibna napetost v smeri vlaken
- $\sigma_{m,90,d}$... projektna upogibna napetost pravokotno na smer vlaken
- $f_{c,0,d} / (f_{t,0,d})$... projektna natezna ali tlačna odpornost v smeri vlaken
- $f_{c,90,d} / (f_{t,90,d})$... projektna natezna ali tlačna odpornost pravokotno na smer vlaken
- $f_{m,d}$... projektna upogibna odpornost v smeri vlaken
- $f_{m,90,d} \equiv f_{t,90,d}$... projektna upogibna odpornost pravokotno na smer vlaken
- k_c ... redukcijski faktor za uklon tlačnega elementa
- $\alpha_e = \frac{E_{90}}{E_0} \equiv \frac{1}{16}$... razmerje modulov elastičnosti
- $\chi_{r,i} = \left(\frac{\sigma_R}{\sigma_N} \right)$... povečanje normalnih napetosti na sredini razpona (poglavje 5.1)

Za bolj splošne analize povečanja normalnih napetosti je v nadaljevanju prikazan primer KLP iz petih slojev desk. Model je narejen z lupinastimi elementi iz petih plasti (slika 14a, 14b). Nesimetrična KLP, ki jo sestavljajo plasti desk višine 1,7 + 3,2 + 3,2 + 3,2 + 1,7 cm in dolžine $L = 300$ cm, se zaradi učinka zasučnega striga in povečanih strižnih deformacij prečnih desk povečajo napetosti na sredini razpona. Vsaki plasti desk je predpisan modul elastičnosti E in strižni modul G v smeri vlaken in pravokotno glede na smer vlaken. Za strižne deformacije prečnih desk modeliramo s strižnim modulom $G_{GL} = E/16 = 750$ N/mm² (slika 14a). V spodnjem modelu je zmanjšan strižni modul prečnih desk na vrednost $G_{KLP} \approx G_{GL}/10 \approx 75$ N/mm², strižni modul vzdolžnih desk pa ostaja isti $G_{GL} = E/16 = 750$ N/mm² (slika 13b). Zgornji del slike (slika 14a) predstavlja normalne napetosti brez povečanih strižnih deformacij prečnih desk, spodnji del slike (slika 14b) pa upošteva povečane strižne deformacije prečnih desk. Povečanje napetosti ni upoštevano v trdnostih, ki jih podaja proizvajalec, so pa pomemben podatek za projektanta.

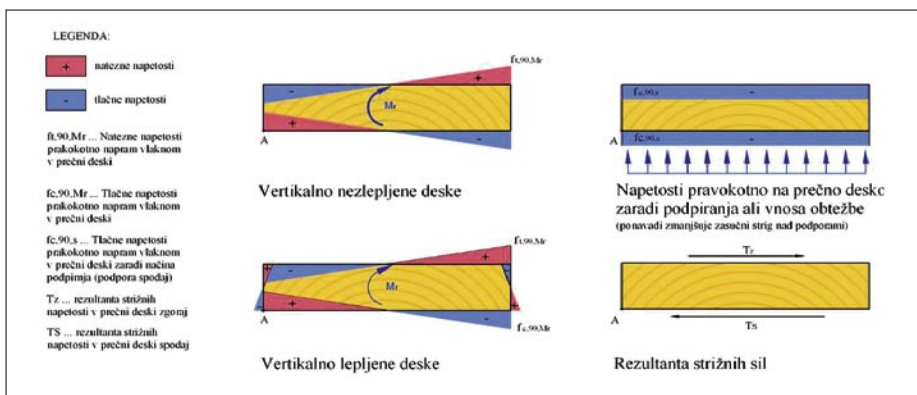
Križno lepljeno ploščo dimenzioniramo na upogibno in osno obremenitev, kjer je treba preverjati napetosti v vsaki deski z upoštevanjem uklona in povečanjem normalnih napetosti na sredini razpona zaradi strižnih zamikov. Enačbi 1, 2 veljata za kombinacijo enoosnega upogiba in tlaka z uklonom. V primeru dvosnega napetostnega stanja je treba preverjati rezultante glavne napetosti v posameznih deskah, kar je zelo zamuden proces. Dovolj je, če preverimo normalne napetosti v obeh smereh plošč ločeno in se zavedamo, da ne smemo polno izkoristiti obeh prerezov. S to poenostavitvijo se izognemo izračunu glavnih napetosti v KLP in lahko tako preverjamo izkoriščenost za vsak prerez posebej. Napetost moramo preveriti v obeh najbolj obremenjenih krajnih deskah (en. 1). Če so deske vertikalno lepljene, je treba preverjati tudi izkoriščenost pravokotno glede na smer vlaken (en. 2).

5.2 Zasučni strig

Zaradi prečnih desk dobimo togost KLP v obeh smereh, kar izboljša slabo nosilnost lesa pravokotno glede na smer vlaken. Dobro je poznati porušne mehanizme, ki tvorijo porušitve KLP, na podlagi katerih lahko izračunamo porušitev poljubnega prereza. Prečne deske se porušijo zaradi strižnih in natezanih napetosti med spomladanskim in jesenskim lesom, kjer je trdnost najmanjša.



Slika 15 • Porušni mehanizem prečnih desk, kjer lahko pride do zasuka (a) ali zdrsa slojev prečnih desk (b) med spomladanskim in jesenskim lesom



Slika 16 • Delovanje sil na prečne deske in rezultirajoče natezne (rdeče) in tlačne (modro) normalne napetosti vertikalno lepljenih in nezlepljenih desk, ki so posledica momenta M, nastalega zaradi strižnih napetosti

Model	Opis	Sile, ki delujejo na prečno desko
1 Enostavni model	Upoštevamo samo normalne napetosti pravokotno na desko	Normalne napetosti
2 Poenostavljeni model	Upoštevamo normalne, strižne napetosti ter pogoje vpenjanja, ki vplivajo na napetosti na prečno desko	Normalne in strižne napetosti (en. 3)
3 Modeliranje z lupinskimi elementi	Modeliramo lupinske elemente z različnimi moduli elastičnosti E in strižnimi moduli G v obeh smereh	Vse napetosti

*model uporaben tudi za določevanje povečanih normalnih napetosti na sredini prereza

Razpredelnica 2 • Opis porušnih modelov KLP plošč zaradi zasučnega striga

$$\frac{\sigma_{t,90,d} \pm \tau_{R,d}}{f_{t,90,d} \pm f_{v,d}} \leq 1 \tag{3}$$

$\sigma_{t,90,d}$... projektna natezna napetost pravokotno na smer vlaken zaradi momenta M,

$f_{t,90,d}$... projektna natezna odpornost pravokotno na smer vlaken

$\tau_{R,d}$... projektna strižna napetost v KLP glede na opazovano desko

$f_{v,d}$... projektna strižna odpornost lesa

Strižne napetosti so merodajne v prečnih deskah. Posebnost KLP je v strižnih zamiki vrsto anomalij, ki so značilne za te vrste plošč. Najpomembnejši dejavnik, ki ga moramo upoštevati pri projektiranju teh plošč, so povečane strižne deformacije in posebno napetostno stanje prečnih desk (slika 14). Prečne deske so izpostavljene tako strigu τ_z , ki je posledica strižnih napetosti v prerezu, kakor tudi nateznim oziroma tlačnim napetostim pravokotno na vlakna $\sigma_{t,90}/\sigma_{c,90}$, ki so posledica uravnoteženja zasučnega momenta M_r. Prečne sile poskušajo desko zavrteti, ki pa jo uravnotežimo z normalnimi napetostmi pravokotno na vlakna.

Način obravnavanja zasukov prečnih desk je odvisen od natančnosti porušnega modela. Za običajno inženirsko prakso je primeren poenostavljeni model, kjer deske niso vertikalno lepljene. V primeru, da so deske lepljene vertikalno med seboj, se strižna nosilnost plošč poveča za 15 % (Papinutti, 2010). Po enačbi 3 moramo preveriti napetosti v prečni deski s kombinacijo natega pravokotno na vlakna $\sigma_{t,90,d}$ in striga $\tau_{R,d}$ prečnih desk. S tem izračunom dobimo realnejšo oceno nosilnosti 2. poenostavljenega modela.

Pri modeliranju KLP moramo upoštevati plošče, ki upoštevajo strižne zamike (shell-thick), ki bistveno vplivajo na razporeditev normalnih napetosti (poglavje 5.1). Na parameter zasučnega striga lahko vplivamo z različnimi dejavniki, ker nosilnost ni toliko odvisna od kakovosti lesa, ampak so predvsem geometrijske karakteristike prečnih desk tiste, ki povečujejo strižno nosilnost desk (Mestek, 2009).

- višina prečnih desk,
- širina prečne deske,
- vertikalno stikovanje desk,
- napetosti ob izdelavi plošč,
- zareze v prečnih deskah,
- vrsta obtežbe,
- način podpiranja,
- razmerje višine in dolžine KLP.

6 • PRIMERJAVA REZULTATOV 2D- in 3D-MODELA

Notranje statične veličine, ki jih pridobimo iz 3D-statičnega modela, se razlikujejo od 2D-statične poenostavitve v tem, da imamo:

- 19,8 % večje normalne napetosti na sredini razpona T-nosilca,
- manjše osne sile v natezni vrvi,
- podatek o poteku normalnih in strižnih napetosti v KLP,

- podatek o torziji v lepljenih nosilcih,
- večje povese,
- natančnejši odziv v primeru dinamičnih obtežb (glavni sta potres, obtežba s pešci in kolesarji).

Obravnavani primer je izračunan za primer obtežb, upoštevanih za mesto Celje po sedanjih standardih SIST EN 1991, v primerjavi z

obtežbami, upoštevanimi za mesto Feldbach po predpisih ÖNORM B 4002, veljavnih leta 2000. Če bi hoteli enak most postaviti v Sloveniji, moramo pri že obstoječem mostu v Feldbachu za **6 cm** povišati glavne dvojne nosilce GL36c v primeru 3D-modela in **3,5 cm** v primeru računanja s poenostavljenim 2D-modelom (Papinutti, 2010). Drugačne dimenzije prerezov glavnih konstrukcijskih elementov so posledica različnih standardov. Razlika med povišanjem 3,5 in 6 cm pa je posledica drugačnega načina izračuna med 2D- in 3D-modelom.

7 • SKLEP

S korektno izbiro poenostavljenih statičnih modelov si lahko prihranimo ogromno časa za modeliranje in sam izračun konstrukcije, vendar pa se moramo zavedati določenih napak in poenostavitev, ki nam jih takšni modeli prinašajo, in sicer precej neznanih veličin, ki jih ne upoštevamo pri samem dimenzioniranju. Deloma obstajajo za pokrivanje nenatančnosti modelov faktorji varnosti v posameznih pred-

pisih. Seveda pa je od primera odvisno, ali so takšne poenostavitve dopustne ali ne. Za obravnavani primer mostu smo ugotovili, da razlike med statičnimi modeli obstajajo. Pri tovrstnih unikatnih inženirskih konstrukcijah je primerneje prepustiti izbiro modela in natančnost izračuna projektantu in mu s tem naložiti del odgovornosti, ki mu v vsakem primeru pripada. Jasno je, da je nemogoče vse

oblikovati v »standarde« in tako po eni strani ukalupiti oziroma onemogočiti dobremu projektantu inovativne pristope (state of the art).

Obravnavani most je z manjšimi korekcijami v dimenzijah glavnih nosilcev primeren za izgradnjo tudi v Sloveniji. Uporaba KLP v gradnji lesenih mostov se izkaže kot zanimiv pristop, kako lahko bolje izkoristimo les. Sodobna arhitektura mostov se nagiba k večji vitkosti in atraktivnemu videzu mostov, zato smo primorani, da uporabimo natančnejše računske modele in s tem večjo izkoriščenost materialov.

8 • LITERATURA

- Beg, D., Pogačnik, A., urednika, Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po standardih Evrokod, Inženirska Zbornica Slovenije 2009.
- Blaß, H. J., Görlacher, R., Holzbaukalender, Brettsperholz – Berechnungsgrundlagen, pp. 580–59; Bruderverlag, Karlsruhe, 2003.
- DIN 1052:2008-12: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken, Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau.
- European Committee for Standardization, SIST EN 1194: Timber structures – Glued laminated timber – Strength classes and determination of characteristic values, Brussels, 1999.
- International Federation for Structural Concrete, Guidelines for the design of the footbridges, nov. 2005.
- Kreuzinger, H., Platten, Scheiben und Schalen, 1999.
- Leonardo da Vinci Pilot Project, HANDBOOK 1, 2007.
- Mestek, P., Kreuzinger, H., Winter, S., Design of Cross Laminated Timber (CLT), 2009.
- Papinutti, M., Dimenzioniranje mostu za pešce in kolesarje, Maribor, 2010.
- Premrov, M., Dobrila, P., Lesene konstrukcije, Maribor 2008.
- Serrano, E., Compression strength perpendicular to grain in cross laminated timber (CLT), WCTE 2010.
- SIST EN 1992-1-1, Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij, 1-1. del, Splošna pravila in pravila za stavbe, 2005.
- SIST EN 1993-1-1, Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij, 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe, 2005.
- SIST EN 1995-2, Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij, 2. del Mostovi, 2004.