

1. Lepljen les

Lepljen les za uporabo v gradbeništvu lahko razdelimo na:

- les za konstrukcije – nosilni elementi,
- les za nenosilne elemente, kot je na primer stavbno pohištvo.

Osnovni pogoj za uporabo lepljenega lesa v konstrukcijah so ustrezne mehanske lastnosti, kot so upogibna, tlačna, natezna, strižna trdnost, ... Ker pa nimajo vsi lesovi ustreznih lastnosti oziroma izkazujejo nekatere pomankljivosti z vidika uporabe, poskušamo s sodobnimi tehnološkimi postopki tak les ustrezno predelati ali modificirati v proizvode oziroma lesne kompozite s prirojenimi lastnostmi za predvideni namen uporabe. Lesu lahko izboljšamo mehanske lastnosti tako, da zmanjšamo število nezaželenih napak ali pa te napake povsem izločimo, ato pa krajše kose zlepimo v daljše. Hkrati lahko z uporabo osnovnih inženirskih principov prilagodimo strukturo, presek in obliko lepljenega lesa predvideni nosilni konstrukciji. Trdnostne lastnosti lepljenega lesa lahko v osnovi modificiramo s spreminjanjem gostote lesa, količine in vrste lepila ter z usmerjanjem njegovih osnovnih gradnikov.

1.1 Lamelirani lepljeni les

Lamelirani lepljeni les (glued laminated timber = glulam) dobimo z medsebojnim lepljenjem manjših kosov lesa oziroma lamel v celoto.

Lepljen lameliran les se uporablja za izdelavo linijskih nosilnih elementov, kjer dolžina elementa prevladuje nad merami prečnega prereza. Usmeritev vlaken pri vseh lamelah poteka vzdolž elementa. Elementi, ki jih dobimo z lepljenjem, so lahko že celotni nosilni sistemi, kot so na primer upogibni nosilci in lokovi, lahko pa predstavljajo sestavne dele zahtevnejših konstrukcijskih sistemov, kot stebri in grede okvirjev ter elementi paličij in lokov.

Preboj lameliranih lepljenih konstrukcij kot jih izdelujejo v današnjem času se je začel s patentom, ki ga je leta 1906 pridobil Otto Hetzer. Zgodnja primera uporabe lepljenega lameliranega lesa za izdelavo nosilnih konstrukcij predstavljata strešni konstrukciji železniških postaj v švedskih mestih Malmö, zgrajena leta 1922, in Stockholm (slika 52), zgrajena leta 1925, ki še služita svojemu namenu.

1.1.1 Prednosti lameliranega lepljenega lesa

Konstrukcijski elementi iz lameliranega lepljenega lesa imajo vse prednosti elementov iz masivnega gradbenega lesa.

Poleg tega omogočajo svobodno oblikovanje geometrije, tako prečnih prerezov, kot tudi vzdolžnega poteka elementov. Višina elementa se lahko vzdolž svoje osi spreminja. Omejena je le s tehnološkim postopkom lepljenja, odprtim časom lepila, možnostim transporta in montaže. Elemente z ukrivljeno osjo se izdeluje z lepljenjem predhodno ukrivljenih lamel. Izdelati je mogoče elemente z ukrivljeno osjo, ki imajo ob enem tudi spremenljivo višino.

Izboljšane so lastnosti glede trdnosti in togosti.

Pri lepljenju lamel je možno na bolj obremenjenih mestih konstrukcije uporabiti kvalitetnejši les.

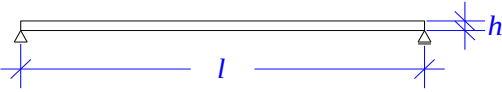
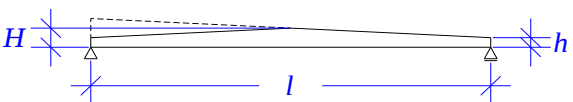
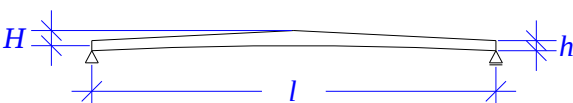
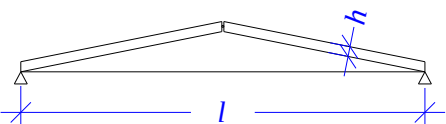
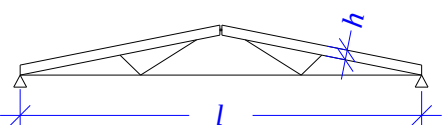
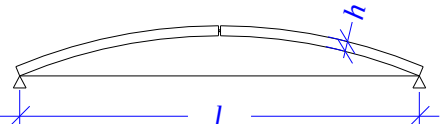
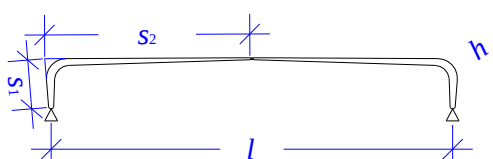
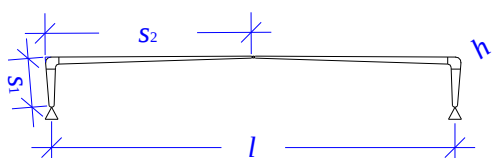
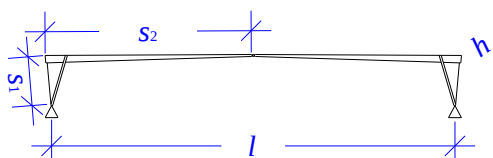
Omogočena je večja natančnost izdelave elementa.

Odstopanja geometrije v času uporabe elementa so manjša zaradi večje stabilnosti mer prečnih prereзов pri spremembah vlažnosti. Delovanje lameliranega lesa je manjše kot pri masivnem.

Izgled konstrukcij iz lameliranega lesa je lep, dober.

Z elementi iz lepljenega lameliranega lesa lahko, zaradi izdelave večjih prečnih prereзов, izboljšanih trdnostnih lastnosti in togosti, možno premoščati velike razpone, kar je predvsem uporabno pri izvedbi strešnih konstrukcij. Z lameliranimi strešnimi nosilci je možno premoščati razpone do 100 m.

Za nosilne konstrukcije strešnih konstrukcij je razvitih več nosilnih sistemov. Najpogostejši ravninski statični sistemi streh s priporočili možnih razponov in izbire mer so prikazani na sliki 71. S prostorskimi paličji in okvirji, katerih elementi so iz lameliranega lepljenega lesa, je mogoče premoščati tudi razpone večje kot 150 m.

sistem	opis	razpon [m]	višina prečnega prereza
	raven prostoležeči nosilec, z enakomernim prečnim prerezom (straight beam)	< 30	$h \approx l / 17$
	stožčasti prostoležeči nosilec, z linearno spremenljivim prečnim prerezom (tapered beam)	10 – 30	$h \approx l / 30$ $H \approx l / 16$
	nagnjen ukrivljen prostoležeči nosilec (pitched cambered beam)	10 – 20	$h \approx l / 30$ $H \approx l / 16$
	tročlenski lok z vezjo / vezno palico (three-hinged truss with tie-rod)	15 – 50	$h \approx l / 30$
	tročlenski lok z vezjo in ločnimi nosilci (three-hinged truss with tie-rod and trussed beams)	20 – 100	$h \approx l / 40$
	tročlenski lok (three-hinged arch)	20 – 100	$h \approx l / 50$
	tročlenski ukrivljen okvir (three-hinged curved frame)	15 – 50	$h \approx (s_1 + s_2) / 15$
	tročlenski ukrivljen okvir z zobčasto spojenim kolonom (three-hinged frame with finger-jointed knee)	10 – 35	$h \approx (s_1 + s_2) / 13$
	tročlenski ukrivljen okvir z oporo v kolenu (three-hinged frame with trussed knee)	10 – 35	$h \approx (s_1 + s_2) / 15$

Slika 1 Najpogostejši ravninski statični sistemi streh, možni razponi in višine prečnih prerezov.

1.1.1 Slabosti lameliranega lepljenega lesa

Slabosti lameliranega lepljenega lesa izvirajo predvsem iz kemičnih snovi, ki jih v elemente vnesemo zaradi zaščite pred zunanjimi vplivi in insekti ter zaradi postopka izdelave.

Fungicidna in insekticidna zaščitna sredstva ter sintetična lepila so zdravju škodljiva.

Zaključni premazi ščitijo les pred izmenjavo vlage z okolico. Služijo lahko tudi za protipožarno zaščito, pri čemer so učinkovitejši neprosojni, barvni premazi, ki pa znatno poslabšajo končni izgled lesenih elementov.

Za izdelavo lameliranega lepljenega lesa se večinoma uporabljajo sintetična lepila na podlagi fenol-rezocinskih in melaminskih smol. Pri lepilih, ki so dvokomponentna, se v trdilcu, kot sredstvo za sintezo smol, uporablja formaldehid, ki se v procesu nanašanja, strjevanja in v manjši meri tudi kasneje v času uporabe sprošča v obliki brezbarvnega plina ostrega vonja. Sproščeni formaldehid obremenjuje okolje, draži kožo in sluznico ter otežuje dihanje živih bitij. Znanstvene raziskave potrjujejo škodljivost tega plina, ki je v naravi in urbanem okolju precej pogosto prisoten. Formaldehid je rakotvoren.

Mehanske lastnosti lepljenega lesa so močno odvisne od lastnosti in obnašanja lepila. Lepilo mora v času normalne uporabe konstrukcije zagotavljati odpornost tudi v težkih klimatskih pogojih pri velikih spremembah temperature in vlažnosti, v prisotnosti kemikalij in mikroorganizmov ter mora biti časovno obstojno. Med požarom, ko se temperatura poviša, mora lepilo ohraniti trdnost in strukturo.

1.1.1 Mehanske lastnosti lameliranega lepljenega lesa

Standard Evrokod 5 lameliran lepljen les razvršča v štiri trdnostne razrede GL 24, GL 28, GL 32 in GL 36. Ker je dopustno lepiti lamele iz lesa dveh različnih kvalit, ločimo osem trdnostnih razredov lameliranega lepljenega lesa. Trdnostni razredi lameliranega lepljenega lesa iz lesa ene same kvalitete so dodatno označeni s črko h – homogen lepljen les: GL 24h, GL 28h, GL 32h, GL 36h; pri uporabi dveh vrst lesa pa s črko c – kombiniran lepljen les: GL 24c, GL 28c, GL 32c, GL 36c. Pri sestavljanju dveh vrst lesa sta pasova ob tlačenem in nateznem robu elementa iz lesa boljše kvalitete, pri čemer debelina posameznega zunanega oziroma robnega pasu znaša vsaj šestino višine prečnega prereza ali vsaj dve debelini lamele:

$$h_{l,\min} = \max\left(\frac{h}{6}, 2t\right). \quad (1)$$

Pri lameliranem lepljenem lesu se v standardu Evrokod 5 pojavi nekaj novih indeksov, ki imajo naslednji pomen g se nanaša na lastnost lepljenega lameliranega lesa, l na lastnost lesa lamele, j pa na lastnost zobčastega spoja za podaljševanje lamel.

Karakteristične vrednosti trdnosti, deformacijskih lastnosti in gostote homogenega oziroma kombiniranega lameliranega lepljenega lesa za analizo konstrukcij in dimenzioniranje, povzete po EN 1194:1999, so podane v preglednicah Preglednica 1 in Preglednica 2.

Preglednica 1 Karakteristične vrednosti trdnosti, deformacijskih lastnosti in gostote homogenega lameliranega lepljenega lesa.

		homogen lepljeni les			
trdnostni razred		GL 24h	GL 28h	GL 32h	GL 36h
upogibna trdnost	$f_{m,g,k}$	24,0 MPa	28,0 MPa	32,0 MPa	36,0 MPa
natezna trdnost	$f_{t,0,g,k}$	16,5 MPa	19,5 MPa	22,5 MPa	26,0 MPa
	$f_{t,90,g,k}$	0,40 MPa	0,45 MPa	0,50 MPa	0,60 MPa
tlačna trdnost	$f_{c,0,g,k}$	24,0 MPa	26,5 MPa	29,0 MPa	31,0 MPa
	$f_{c,90,g,k}$	2,7 MPa	3,0 MPa	3,3 MPa	3,6 MPa
strižna trdnost	$f_{v,g,k}$	2,7 MPa	3,2 MPa	3,8 MPa	4,3 MPa
modul elastičnosti	$E_{0,g,mean}$	11600 MPa	12600 MPa	13700 MPa	14700 MPa
	$E_{0,g,05}$	9400 MPa	10200 MPa	11100 MPa	11900 MPa
	$E_{90,g,mean}$	390 MPa	420 MPa	460 MPa	490 MPa
strižni modul	$G_{g,mean}$	720 MPa	780 MPa	850 MPa	910 MPa
gostota	$\rho_{g,k}$	380 kg/m ³	410 kg/m ³	430 kg/m ³	450 kg/m ³

Preglednica 2 Karakteristične vrednosti trdnosti, deformacijskih lastnosti in gostote kombiniranega lameliranega lepljenega lesa.

		kombinirani lepljeni les			
trdnostni razred		GL 24c	GL 28c	GL 32c	GL 36c
upogibna trdnost	$f_{m,g,k}$	24,0 MPa	28,0 MPa	32,0 MPa	36,0 MPa
natezna trdnost	$f_{t,0,g,k}$	14,0 MPa	16,5 MPa	19,5 MPa	22,5 MPa
	$f_{t,90,g,k}$	0,35 MPa	0,40 MPa	0,45 MPa	0,50 MPa
tlačna trdnost	$f_{c,0,g,k}$	21,0 MPa	24,0 MPa	26,5 MPa	29,0 MPa
	$f_{c,90,g,k}$	2,4 MPa	2,7 MPa	3,0 MPa	3,3 MPa
strižna trdnost	$f_{v,g,k}$	2,2 MPa	2,7 MPa	3,2 MPa	3,8 MPa
modul elastičnosti	$E_{0,g,mean}$	11600 MPa	12600 MPa	13700 MPa	14700 MPa
	$E_{0,g,05}$	9400 MPa	10200 MPa	11100 MPa	11900 MPa
	$E_{90,g,mean}$	320 MPa	390 MPa	420 MPa	460 MPa
strižni modul	$G_{g,mean}$	590 MPa	720 MPa	780 MPa	850 MPa
gostota	$\rho_{g,k}$	350 kg/m ³	380 kg/m ³	410 kg/m ³	430 kg/m ³

Po standardu Evrokod 5 razvrščamo lameliran lepljen les v trdnostne razrede, za katere veljajo predpisane mehanske in fizikalne lastnosti, na dva načina.

Trdnostni razred lameliranega lepljenega lesa se določa na podlagi rezultatov eksperimentalnih preiskav, ki se izvajajo na preizkušancih iz lepljenega lesa po standardih EN 408 in EN 1193. Predvidoma imajo upogibni preizkušanci prečni prerez z merami $b/h = 150 \text{ mm} / 600 \text{ mm}$, natezni preizkušanci pa $b/h = 600 \text{ mm} / 150 \text{ mm}$. Pri manjših merah je potrebno dobljene rezultate preiskav ustrezno popraviti. Pri upogibnem preizkušancu mora biti v lameli z največjo natezno napetostjo vsaj en zobčast spoj. Lastnosti za razvrščanje lesa v trdnostni razred sta upogibna trdnost in modul elastičnosti, ki sta določena na upogibnih preizkušancih. Na podlagi eksperimentalno dobljenih vrednosti upogibne trdnosti in modula elastičnosti se v preglednicah Preglednica 1 oziroma 0 določi trdnostni razred lameliranega lepljenega lesa.

Trdnostni razred lameliranega lepljenega lesa se določa na podlagi rezultatov eksperimentalnih preiskav, ki se izvajajo na preizkušancih v obliki posameznih lamel.

Predvidoma je širina preizkušancev $b = 150$ mm, dolžina pa $l = 2000$ mm. Pri manjših merah je potrebno dobljene rezultate preiskav ustrezno popraviti. Lastnosti za razvrščanje lesa v trdnostni razred sta karakteristična natezna trdnost $f_{t,0,l,k}$ in povprečni modul elastičnosti $E_{0,l,mean}$ pri nateznem preizkusu. Na podlagi eksperimentalno dobljenih vrednosti karakteristične natezne trdnosti in povprečnega modula elastičnosti, ki se vnese v izraze podane v preglednici Preglednica 3, se izračuna karakteristične vrednosti lastnosti lameliranega lepljenega lesa. Na podlagi izračunanih vrednosti upogibne trdnosti in modula elastičnosti se v preglednicah Preglednica 1 oziroma Preglednica 2 določi trdnostni razred lameliranega lepljenega lesa.

Preglednica 3 Izrazi za račun mehanskih lastnosti lameliranega lepljenega lesa na podlagi lastnosti lamel. Vse trdnosti in deformacijske lastnosti so podane v MPa. Za kombinirani les je podan merodajni sloj pri določanju posamezne lastnosti.

lastnost		izraz	merodajen sloj pri kombiniranem lesu
upogibna trdnost	$f_{m,g,k}$	$= 7 + 1,15 f_{t,0,l,k}$	zunanji
natezna trdnost	$f_{t,0,g,k}$	$= 5 + 0,80 f_{t,0,l,k}$	notranji
	$f_{t,90,g,k}$	$= 0,2 + 0,015 f_{t,0,l,k}$	notranji
tlačna trdnost	$f_{c,0,g,k}$	$= 7,2 f_{t,0,l,k}^{0,45}$	notranji
	$f_{c,90,g,k}$	$= 0,7 f_{t,0,l,k}^{0,5}$	notranji
strižna trdnost	$f_{v,g,k}$	$= 0,32 f_{t,0,l,k}^{0,8}$	notranji
modul elastičnosti	$E_{0,g,mean}$	$= 1,05 E_{0,l,mean}$	zunanji
	$E_{0,g,05}$	$= 0,85 E_{0,l,mean}$	zunanji
	$E_{90,g,mean}$	$= 0,035 E_{0,l,mean}$	notranji
strižni modul	$G_{g,mean}$	$= 0,065 E_{0,l,mean}$	notranji
gostota	$\rho_{g,k}$	$= 1,1 \rho_{l,k}$	notranji

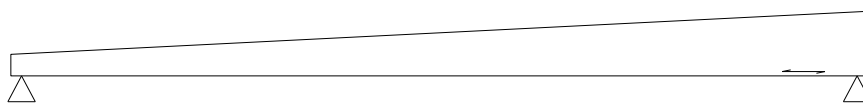
1.1.1 Dimenzioniranje lameliranih lepljenih lesenih elementov konstrukcij

Lamelirane lepljene lesene elemente lahko, kljub temu da so zlepljeni iz večjega števila lamel in stikovani z zobčastimi spoji, izpolnjujejo pa zahteve za uporabo in najmanjše zahteve za izdelavo iz standarda EN 386, pri dimenzioniranju obravnavamo enako kot elemente iz masivnega lesa. Prečne prereze, v katerih so posamezne lamele stikovane z zobčenjem, lahko tudi upoštevamo kot polno nosilne.

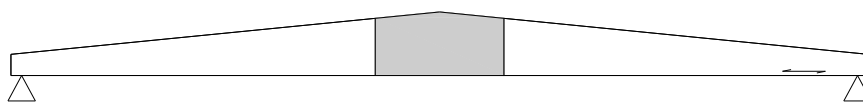
Pri dokazih mejnih stanj nosilnosti glede strižnih napetosti ob podporah, kontaktnih napetosti v podporah in pri stikovanju elementov ter stabilnosti elementov postopamo enako kot pri dimenzioniranju nosilnih elementov iz masivnega lesa. Pozorni moramo biti na pravilno izbiro vrednosti posameznih parametrov, ki so odvisni od vrste materiala. Vrednost materialnega faktorja γ_M je pri lameliranem lepljenem lesu 1,25, pri masivnem pa 1,30.

Nadalje se razlikujeta vrednosti koeficienta β_c , ki nastopa v izrazih za določitev uklonskega koeficienta k_c , ...

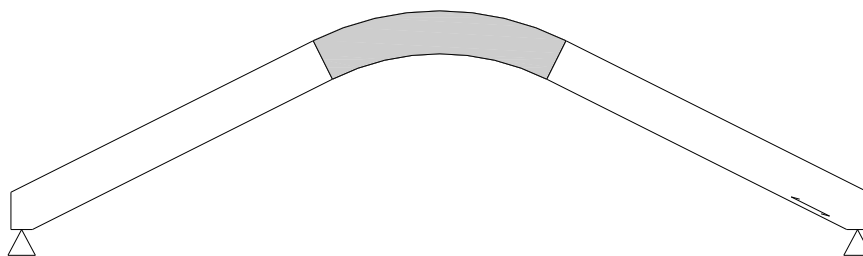
Pri lameliranih lepljenih lesenih elementih smo kot izrazito prednost izpostavili svobodno oblikovanje geometrije elementov, kar v praksi pomeni, da imamo pogosto opravka z elementi s spremenljivo višino, z ukrivljeno osjo ali pa s kombinacijo obojega (slika Slika 2). V teh elementih so območja z nelinearno razporeditvijo vzdolžnih normalnih napetosti σ_0 po prečnih prerezih. Pri ravnih elementih konstantne višine je razporeditev vzdolžnih normalnih napetosti σ_0 po prečnih prerezih linearna. V elementih z neenakomerno višino prečnih prerezov po vzdolžni osi oziroma elementih z ukrivljeno vzdolžno osjo se pojavijo prečne normalne napetosti σ_{90} v smeri pravokotno na vlakna, ki so, v določenih primerih geometrije in obremenitve elementa, natezne, kar povzroča težave pri zagotavljanju nosilnosti, zaradi majhne natezne trdnosti lesa pravokotno na vlakna. Pri nosilcih spremenljive višine dobimo v bližini nagnjenega roba razmeroma velike strižne napetosti τ .



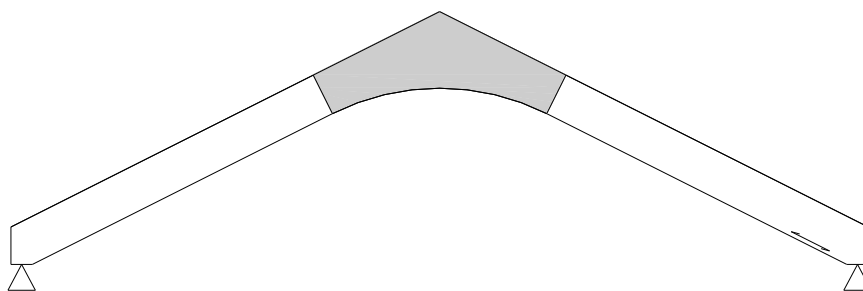
a) Nosilec spremenljive višine – enokapni



b) Nosilec spremenljive višine – dvokapni



c) Nosilec z ukrivljeno osjo



d) Nosilec z ukrivljeno osjo in spremenljivo višino.

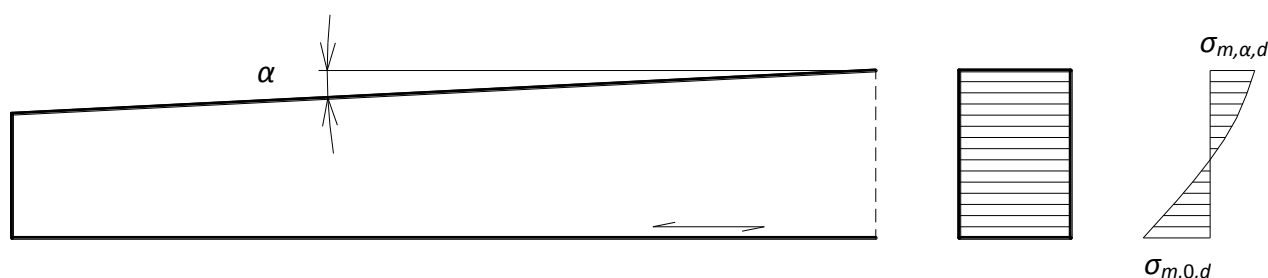


Slika 2 Tipične oblike nosilcev iz lameliranega lepljenega lesa.

V nadaljevanju se omejimo na elemente s prečnim prerezom pravokotne oblike, ki se najpogosteje uporabljajo za lamelirane lepljene nosilce. Tudi v standardu Evrokod 5 veljajo podani izrazi le za nosilce s pravokotnim prečnim prerezom. Pri vseh kontrolah napetosti navedenih v nadaljevanju, podobno kot v Evrokod 5, je izpuščen indeks g , ki označuje lepljen les.

1.1.1.1 Enokapni nosilci s spremenljivo višino

Podani izrazi veljajo tudi za elemente spremenljive višine iz masivnega lesa.



Slika 3 Enokapni nosilec s spremenljivo višino.

V območju spremenljive višine nosilca lahko po predlogu Riberholta določimo normalne napetosti $\sigma_{m,0,d}$ ob robu vzporednem z vlakni oziroma normalne napetosti $\sigma_{m,\alpha,d}$ ob robu nagnjenem za kot α glede na smer vlaken

$$\sigma_{m,\alpha,d} = (1 - 4,4 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha) \cdot \frac{6 \cdot M_d}{b \cdot h^2}, \quad (2)$$

$$\sigma_{m,0,d} = (1 + 3,7 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha) \cdot \frac{6 \cdot M_d}{b \cdot h^2}. \quad (3)$$

V evropskem predstandardu za lesene konstrukcije ENV 1995-1-1 sta bila na podlagi predloga Riberholta podana približna izraza za račun normalnih napetosti pri nagibih nižjih od 10°

$$\sigma_{m,\alpha,d} = (1 - 4 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha) \cdot \frac{6 \cdot M_d}{b \cdot h^2}, \quad (4)$$

$$\sigma_{m,0,d} = (1 + 4 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha) \cdot \frac{6 \cdot M_d}{b \cdot h^2}. \quad (5)$$

V končni verziji standarda EN 1995-1-1:2004 je navedeno, da se vpliv spreminjanja višine upošteva pri računu normalnih napetosti enokapnih nosilcev spremenljive višine. Dana pa je tudi možnost, da se napetosti lahko ob zgornji in spodnji površini nosilca ocenijo

$$\sigma_{m,\alpha,d} = \sigma_{m,0,d} = \frac{6 \cdot M_d}{b \cdot h^2}, \quad (6)$$

Po navodilih standarda Evrokod 5 je varnost proti porušitvi dokazana, če ob nagnjeni površini ni prekoračen kombinirani porušni pogoj, ki upošteva vpliv večsotnega napetostnega stanja,

$$\sigma_{m,\alpha,d} \leq k_{m,\alpha} \cdot f_{m,d}, \quad (7)$$

pri čemer se redukcijski koeficient $k_{m,\alpha}$ določi v odvisnosti od smeri napetosti in karakteristik materiala

$$k_{m,\alpha} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{m,d}}{1,5 \cdot f_{v,d}} \cdot \operatorname{tg} \alpha \right)^2 + \left(\frac{f_{m,d}}{f_{c,90,d}} \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \right)^2}} & \sigma_{m,\alpha,d} < 0 \text{ (tlak)} \\ \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{m,d}}{0,75 \cdot f_{v,d}} \cdot \operatorname{tg} \alpha \right)^2 + \left(\frac{f_{m,d}}{f_{c,90,d}} \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \right)^2}} & \sigma_{m,\alpha,d} > 0 \text{ (nateg)}. \end{cases} \quad (8)$$

Če smo vzdolžne normalne napetosti ocenili z izrazom (6) smo v primerjavi z izrazoma (2) oziroma (4) na varni strani. Ker je $k_{m,\alpha} \leq 1$, je zaradi poenostavitve (6), ob izpolnjenem pogoju (7), vedno izpolnjen tudi pogoj

$$\sigma_{m,0,d} \leq f_{m,d}, \quad (9)$$

ki pa ga je treba preveriti takrat, kadar napetosti določamo po točnejših izrazih (2) in (3) oziroma (4) in (5).

V primeru lepljenih lameliranih nosilcev z višino h manjšo od 600 mm lahko upogibno trdnost $f_{m,d}$ povečamo s faktorjem k_h , ki je določen z izrazom

$$k_h = \min \left(\left(\frac{600}{h} \right)^{0,1}; 1,10 \right). \quad (10)$$

1.1.1.2 Dvokapni nosilci s spremenljivo višino, ukrivljeni nosilci in ukrivljeni nosilci s spremenljivo višino

Pri dvostransko prirezanih dvokapnih nosilcih s spremenljivo višino (slika Slika 2b), ukrivljenih nosilcih s konstantno višino (slika Slika 2c) in ukrivljenih zašiljenih nosilcih s spremenljivo višino (slika Slika 2d) je potrebno posebej obravnavati temenska območja. To so šrafirana območja na sliki **Error! Reference source not found.**, kjer so podane tudi ustrezne oznake. Pri ukrivljenih nosilcih je temensko območje celotno ukrivljeno območje.

Po standardu Evrokod 5 je predvideno, da so dvokapni nosilci s spremenljivo višino, ukrivljeni nosilci s konstantno višino in ukrivljeni nosilci s spremenljivo višino izdelani iz lepljenega lameliranega lesa.

V temenskem območju moramo preveriti vzdolžne normalne napetosti in prečne normalne napetosti, kadar zaradi geometrije in obtežbe elementa v prečni smeri dobimo natezne napetosti.

Za vse tri oblike nosilcev veljajo skupni izrazi za enostavno določitev napetosti in kontrole letih. Pri dvokapnem nosilcu in ukrivljenem nosilcu s konstantno višino se izrazi poenostavijo in so podani na koncu razdelka.

V temenskem območju morajo vzdolžne upogibne napetosti zadoščati pogoju

$$\sigma_{m,d} \leq k_r \cdot f_{m,d}, \quad (11)$$

pri čemer je $\sigma_{m,d}$ upogibna napetost v temenskem območju

$$\sigma_{m,d} = k_l \cdot \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2}, \quad (12)$$

$$k_l = k_1 + k_2 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r} \right) + k_3 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r} \right)^2 + k_4 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r} \right)^3, \quad (13)$$

$$k_1 = 1 + 1,4 \cdot \operatorname{tg} \alpha_{ap} + 5,4 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha_{ap}, \quad (14)$$

$$k_2 = 0,35 - 8 \cdot \operatorname{tg} \alpha_{ap}, \quad (15)$$

$$k_3 = 0,6 + 8,3 \cdot \operatorname{tg} \alpha_{ap} - 7,8 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha_{ap}, \quad (16)$$

$$k_4 = 6 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha_{ap}, \quad (17)$$

$$r = r_{in} + 0,5 \cdot h_{ap}, \quad (18)$$

$M_{ap,d}$ projektni upogibni moment v temenu,

h_{ap} višina nosilca v temenu (slika **Error! Reference source not found.**),

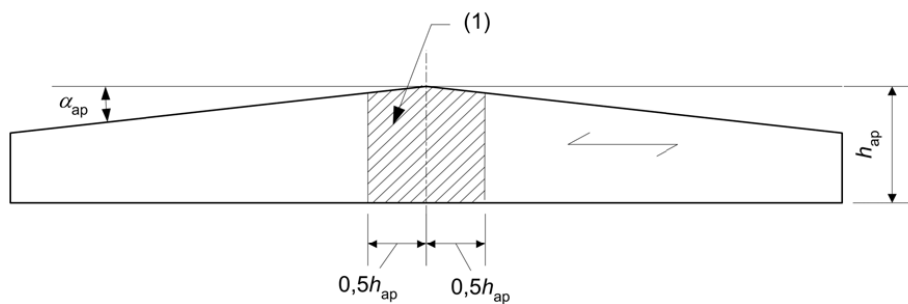
b širina nosilca,

r_{in} notranji radij ukrivljenega področja (slika **Error! Reference source not found.**),

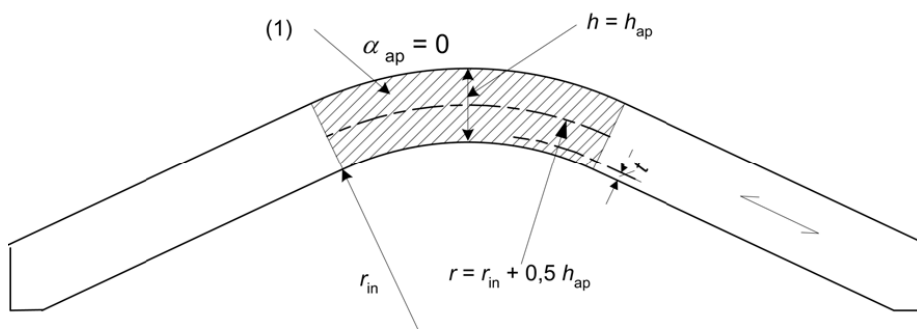
k_r pa koeficient, s katerim zajamemo vpliv predhodnih napetosti zaradi krivljenja lamel v postopku oblikovanja nosilca na globalno upogibno trdnost lameliranega elementa in znaša $k_r=1$ pri dvokapnem nosilcu ($r \rightarrow \infty$), pri ukrivljenih nosilcih s konstantno ali spremenljivo višino pa

$$k_r = \min \begin{cases} 1 & \frac{r_{in}}{t} \geq 240 \\ 0,76 + 0,001 \cdot \frac{r_{in}}{t} & \frac{r_{in}}{t} < 240 \end{cases} \quad (19)$$

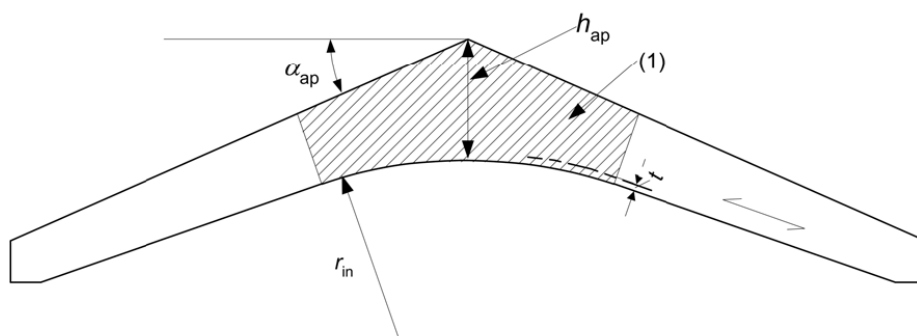
in t debelina lamele.



(a)



(b)



(c)

(1) – temensko območje

Slika 4 Dvokapni nosilci s spremenljivo višino (a), ukrivljeni nosilci s konstantno višino (b) in ukrivljeni nosilci s spremenljivo višino (c).

V primeru lameliranih lepljenih nosilcev z višino h manjšo od 600 mm lahko trdnost $f_{m,d}$ povečamo s faktorjem k_h , ki je določen z izrazom (10).

Kadar imamo v temenskem območju v prečni smeri natezne napetosti je potrebno izpolniti tudi naslednji pogoj

$$\sigma_{t,90,d} \leq k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d} \quad (20)$$

pri čemer je $\sigma_{t,90,d}$ največja prečna natezna napetost v temenskem območju zaradi upogibnega momenta $M_{ap,d}$, ki jo izračunamo po priporočilu

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \cdot \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2} \quad (21)$$

ali alternativno z izrazom

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \cdot \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2} - 0,6 \frac{p_d}{b}, \quad (22)$$

$$k_p = k_5 + k_6 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r} \right) + k_7 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r} \right)^2, \quad (23)$$

$$k_5 = 0,2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_{ap}, \quad (24)$$

$$k_6 = 0,25 - 1,5 \cdot \operatorname{tg} \alpha_{ap} + 2,6 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha_{ap}, \quad (25)$$

$$k_7 = 2,1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_{ap} - 4 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha_{ap}, \quad (26)$$

p_d projektna vrednost na zgornjem robu nad temenom delujoče zvezne obtežbe nosilca,

k_{dis} koeficient, ki zajame vpliv razporeditve napetosti v temenskem območju, in je določen kot

$$k_{dis} = \begin{cases} 1,4 & \text{pri dvokapnih nosilcih in ukrivljenih nosilcih s konstantno višino,} \\ 1,7 & \text{pri nosilcih s spremenljivo višino,} \end{cases} \quad (27)$$

ter k_{vol} koeficient prostornine, ki je določen z izrazom

$$k_{vol} = \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0,2}, \quad (28)$$

pri čemer je $V_0 = 0,01 \text{ m}^3$ referenčna prostornina, V pa obremenjena prostornina temenskega območja v m^3 , vendar ne več kot $2/3 V_b$, pri čemer je V_b prostornina celotnega nosilca.

Če pri dvokapnem nosilcu upoštevamo, da ni ukrivljenosti, torej je radij ukrivljenosti r neskončen, velja $k_r = k_1$, $k_p = k_5$ in $k_r = 1$. Izraza (11) in (20) se poenostavita

$$\sigma_{m,d} = \left(1 + 1,4 \cdot \operatorname{tg} \alpha_{ap} + 5,4 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha_{ap} \right) \cdot \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2} \leq f_{m,d}, \quad (29)$$

$$\sigma_{t,90,d} = 0,2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_{ap} \cdot \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2} \leq 1,4 \cdot \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0,2} \cdot f_{t,90,d}. \quad (30)$$

Podobno se pri ukrivljenem nosilcu s konstantno višino izraza (11) in (20) poenostavita, ker je $\alpha = 0^\circ$ in je $\operatorname{tg} \alpha = 0$,

$$\sigma_{m,d} = \left[1 + 0,35 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r} \right) + 0,6 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r} \right)^2 \right] \cdot \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2} \leq k_r \cdot f_{m,d}, \quad (31)$$

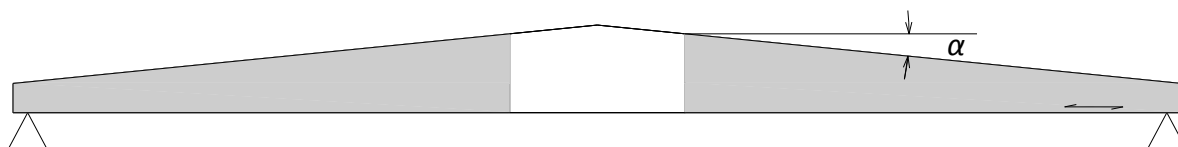
$$\sigma_{t,90,d} = 0,25 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r} \right) \cdot \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2} \leq 1,4 \cdot \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0,2} \cdot f_{t,90,d}. \quad (32)$$

V območjih, kjer se pojavi kombinacija strižnih napetosti in nateznih napetosti prečno na vlakna mora biti izpolnjen še dodatni pogoj

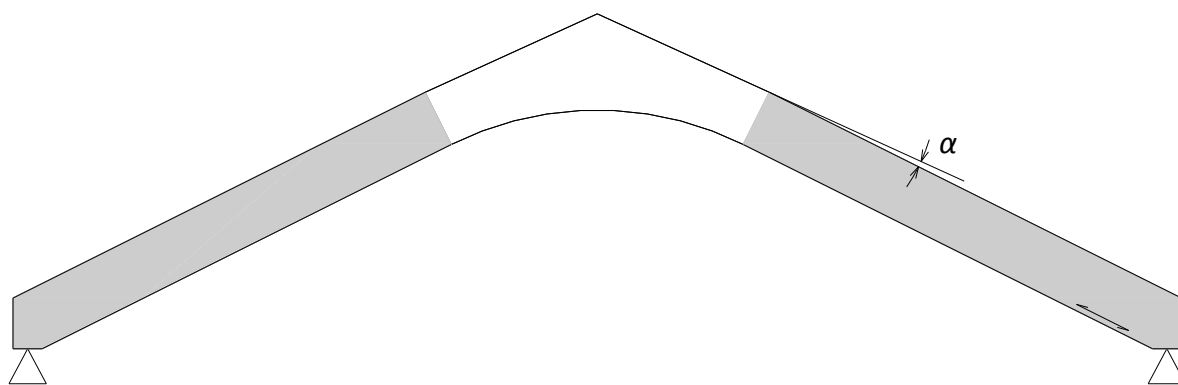
$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} + \frac{\sigma_{t,90,d}}{k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d}} \leq 1. \quad (33)$$

Pri dvokapnem nosilcu s konstantno višino in ukrivljenem nosilcu s spremenljivo višino področja s spremenljivo višino izven temenskega območja obravnavamo na enak način kot pri enokapnem nosilcu s spremenljivo višino, pri čemer se kot α upošteva, kot je prikazano na sliki **Error! Reference source not found..**

Običajno so merodajne kontrole napetosti v teh območjih.



a) Nosilec spremenljive višine – dvokapni



b) Nosilec z ukrivljeno osjo in spremenljivo višino.



Območja dvokapnih in ukrivljenih nosilcev, ki jih obravnavamo na enak način kot pri enokapnih nosilcih