

1 LASTNOSTI LESA

Les je naraven material, ki ga pridobivamo iz dreves. Ima številne lastnosti, ki ga naredijo zelo uporabnega v številnih industrijah, vključno z gradbeništvom, pohištvom, papirjem in drugimi.

Fizikalne lastnosti lesa vključujejo:

1. Gostota: Gostota lesa se razlikuje glede na vrsto drevesa. Gostota vpliva na težo lesa ter na njegovo trdnost in trpežnost.
2. Vlažnost: Les vsebuje vlago, ki vpliva na njegove lastnosti. Prekomerna vlažnost lahko privede do deformacij in gnilobe.
3. Toplotna prevodnost: Les je slab toplotni prevodnik, kar pomeni, da je dober izolator.
4. Akustične lastnosti: Les je znan po svojih odličnih akustičnih lastnostih, zaradi česar je priljubljen material za izdelavo glasbenih instrumentov.
5. Optične lastnosti: Les ima edinstveno teksturo in barvo, ki jo določa vrsta drevesa. To daje lesu estetsko vrednost.
6. Biološka odpornost: Les se razlikuje po svoji odpornosti na glive, žuželke in druge biološke dejavnike. Nekatere vrste lesa so naravno odporne, druge pa je potrebno zaščititi.
7. Higroskopnost: Les je higroskopen material, kar pomeni, da absorbira in sprošča vlago iz okolja, kar lahko vpliva na njegovo velikost in obliko.

Mehanske lastnosti lesa vključujejo:

1. Trdnost: Les je material, ki lahko prenese velike obremenitve. Trdnost lesa se lahko razlikuje glede na vrsto drevesa iz katerega je bil pridobljen.
2. Elastičnost: Les je elastičen material, kar pomeni, da se lahko upogne, ne da bi se zlomil. Elastičnost lesa je koristna lastnost pri izdelavi pohištva ali drugega oblikovanja.
3. Togost: Les se upira spremembam oblike, ko je podvržen obremenitvi. Togost lesa je pomembna pri gradnji stavb in drugih struktur.
4. Odpornost proti obrabi: Les je odporen na obrabo, kar pomeni, da se ne obrabi ali poškoduje enostavno.

1.1 FIZIKALNE LASTNOSTI LESA

- močno odvisne od same vrste
- nihanja pri isti vrsti

- napake v lesu
- gostota (delež kasnega lesa -> trdota, trdnost)
- vlažnost lesa (bolj suh boljša trdnost) temperatura (plastične deformacije lignina -> namjša trdnost)

1.1.1 VLAŽNOST LESA

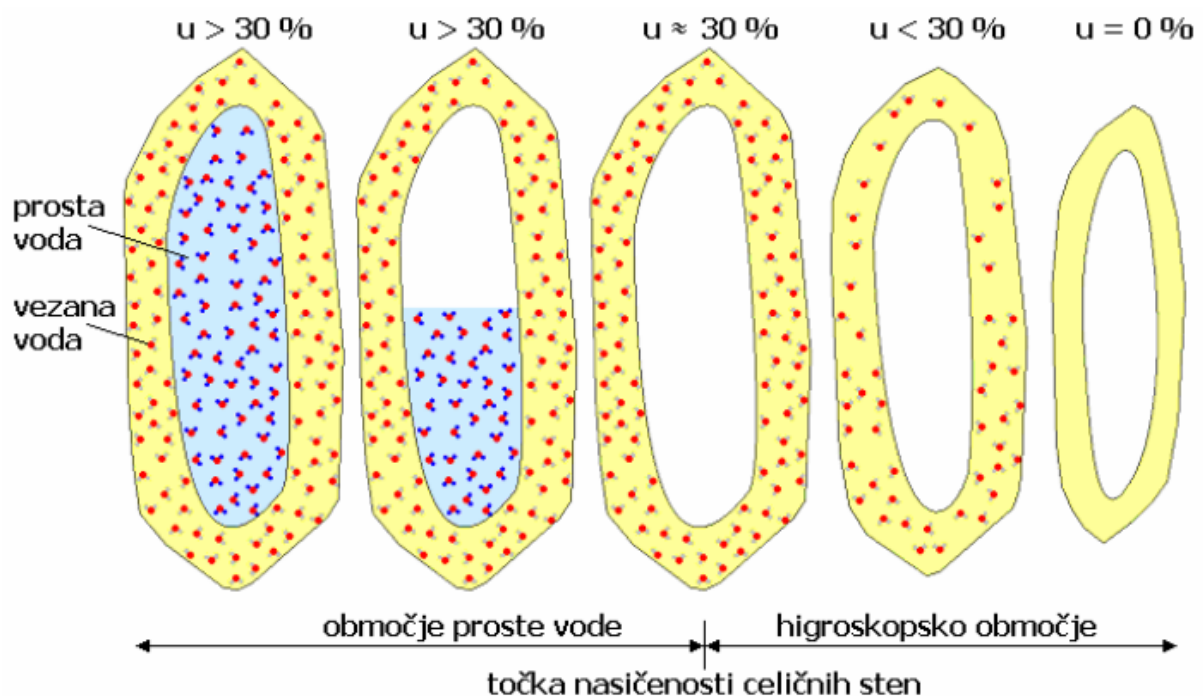
Vlažnost lesa izračunamo:

$$U = \frac{m_v}{m_0} \quad (1)$$

kjer je:

- u = vlažnost lesa v [%]
- m_v = masa vode
- m_0 = masa abs. suhega lesa

Podatek $u = 15\%$ pomeni, da 100 g absolutno suhega lesa vsebuje 15 g vode.



Slika 1: Prosta in vezana voda.

1.1.1.1 Prosta in vezana voda

- vezana voda je v celičnih stenah
- prosta voda je v celičnih lumnih
- ko v lumnih ni vode:
 - TNCS: točka nasičenosti celičnih sten
 - VPLIV na krčenje lesa!

1.1.1.2 Krčenje lesa

- le kadar se spremeni % vode v celičnih stenah
- krčenje je odvisna od smeri krčenja,
- maksimalni skrčki glede na smer so:
 - vzdolž vlaken $\beta_l = 0.3 \dots 0.6\%$
 - v radialni smeri $\beta_r = 3 \dots 6\%$
 - v tangencialni smeri $\beta_t = 6 \dots 12\%$

Lesna vrsta	Maksimalni skrčki lesa (pri sušenju od TNCS do 0% vlažnosti) [%]			
	v vzdolžni smeri β_l	v radialni smeri β_r	v tangencialni smeri β_t	prostorninsko β_v
borovina	0,2 – 0,4	3,3 – 4,5	7,5 – 8,7	11,2 – 12,4
jelovina	0,1	2,9 – 3,8	7,2 – 7,6	10,2 – 1,5
macesnovina	0,3	3,3 – 4,3	7,8 – 10,4	11,4 – 15,0
smrekovina	0,3	3,5 – 3,7	7,8 – 8,0	11,6 – 12,0
brestovina	0,3	4,6 – 4,8	6,9 – 8,3	11,8 – 13,8
brezovina	0,6	5,3	7,8	13,7 – 14,2
bukovina	0,3	5,8	11,8	14,0 – 17,9 – 21,0
gabrovina	0,5	5,2 – 6,8	11,5	18,8
hrastovina	0,4	4,0 – 4,6	7,8 – 10,0	12,6 – 15,6
javorovina	0,5	3,0	8,0	11,5 – 11,8
jelševina	0,5	4,4 – 4,8	7,7 – 9,3	12,6 – 14,2
jesenovina	0,2	4,6 – 5,0	8,0 – 8,4	12,8 – 13,6
kostanjevina	0,6	3,4 – 4,3	6,4 – 6,7	11,3 – 11,6
lipovina	0,2 – 0,3	5,5 – 6,6	9,1 – 10,7	14,4 – 14,9
orehovina	0,5	5,4	7,5	13,4 – 14,0
topolovina	0,3	3,3 – 5,2	7,1 – 9,8	10,7 – 14,3

Slika 2: Maksimalni skrčki lesa.

Kos lesa bi se skrčil za maksimalno dolžino ΔL_{max} , če bi se posušil iz lesne vlažnosti $u = 30\%$ na absolutno suh les $u = 0\%$.

- MAKSIMALNI SKRČEK:

$$\Delta L_{max} = \beta L_{u30} \quad (2)$$

Ker se lesni izdelki ne posušijo do absolutno suhega lesa, vendar le do neke ravnovesne vlažnosti, moramo izračunati delni odstotek krčenja $\beta_{\Delta u}$.

- DELNI ODSOTOK KRČENJA

$$\beta_{\Delta u} = \frac{\beta \Delta u}{30\%} \quad (3)$$

kjer je:

- $\beta_{\Delta u}$ = delni odstotek krčenja
- Δu = razlika vlažnosti (le v območju 30%)

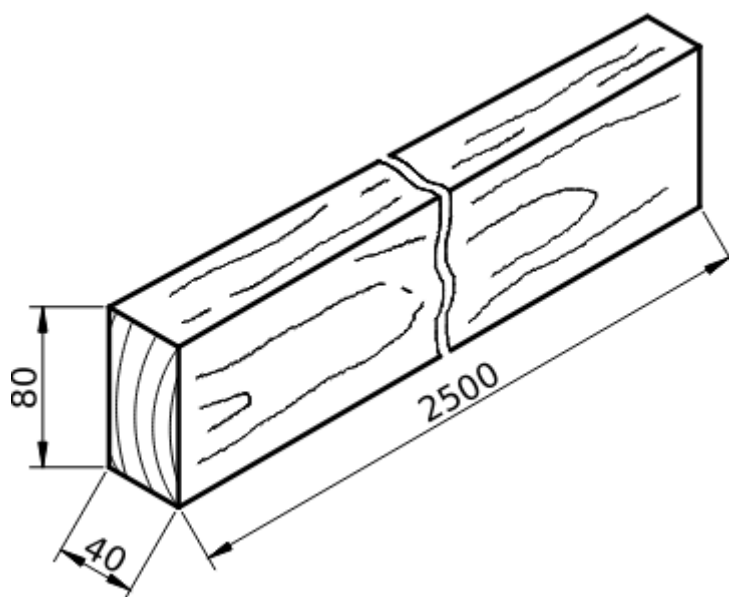
Tako lahko izračunamo dejansko dolžino krčenja, ki je odvisna od same vrste lesa (različni maksimalni skrčki β), od smeri krčenja ($\beta_r, \beta_t, \beta_l$), od spremenjene lesne vlažnosti Δu in od dolžine izdelka L .

- DEJANSKI SKRČEK

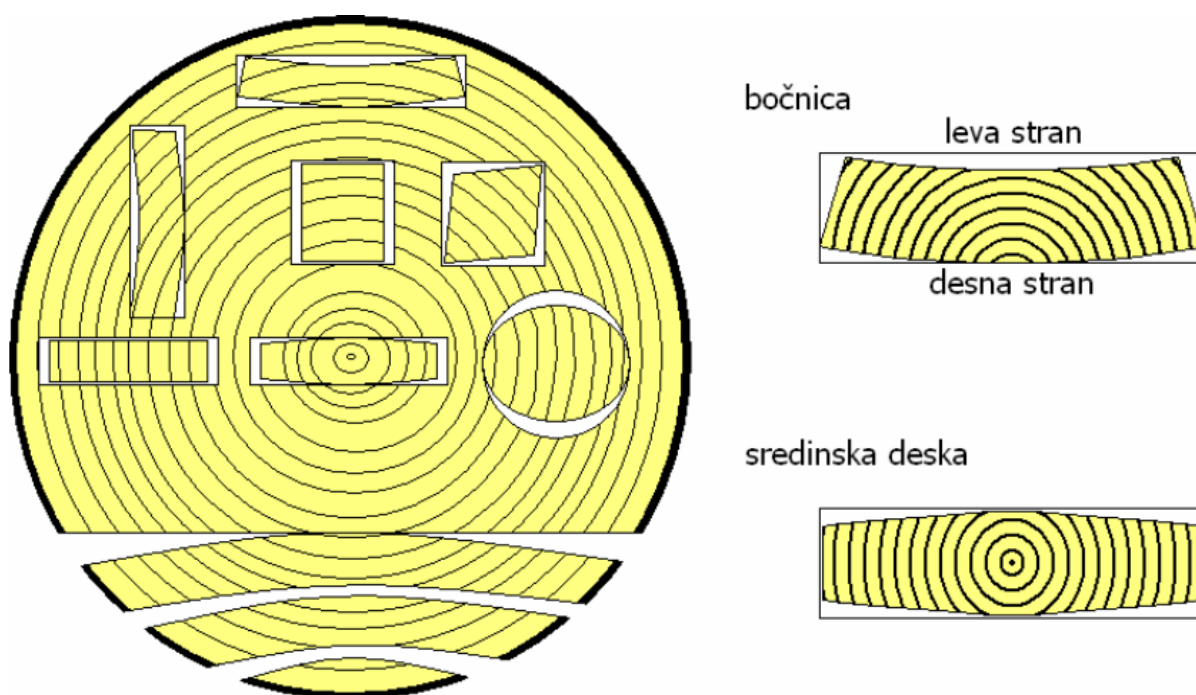
$$\Delta L_{\Delta u} = \beta_{\Delta u} L \quad (4)$$

1.1.2 NALOGA: Izračunaj končne dimenzije izdelka po sušenju

Bukova gredica $\bar{s} = 80.0$ mm, $d = 40.0$ mm, $l = 2.500$ m, z vlažnostjo 40%, posušimo na 10%.
Izračunaj dimenzije po sušenju. (73.7 mm × 38.5 mm × 2495 mm)



Slika 3: Skica gredice z dimenzijami



Slika 4: Nepravilnosti pri sušenju lesa.

1.1.2.1 Nepravilnosti zaradi krčenja

- stržen se precej manj krči kot oddaljen tangencialni les

- bočnica se ukrivi na način, da se bolj tangencialni les skrči bolj
- kvadravtni presek (letnice diagonalno) se posuši v rombasto obliko preseka

1.1.2.2 Ukrepi za zmanjševanje posledic krčenja

- ustrezna vrsta lesa
- ustrezna osušenost lesa pri obdelavi

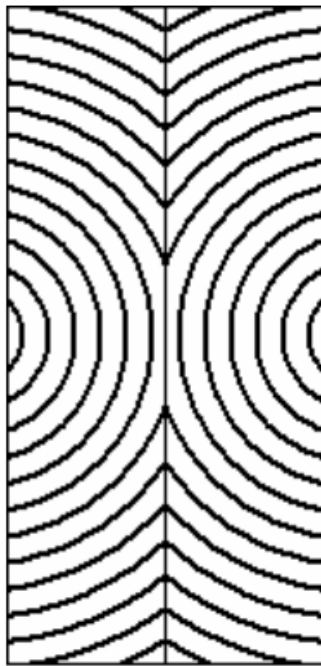
Vrsta izdelka	Območje ravnovesne vlažnosti lesa [%]
gradbeni les, les za balkonske ograje, strešne konstrukcije, palete	13 – 17
okna, zunanja vrata	12 – 16
pohištvo, podi, notranja vrata, stenske obloge, v prostorih s centralnim ogrevanjem	8 – 10
pohištvo, podi, notranja vrata, stenske obloge, v prostorih, kjer ogrevamo s klasičnimi pečmi	10 – 12
stropne obloge v prostorih s centralnim ogrevanjem	6 – 8
stropne obloge v prostorih, kjer ogrevamo s klasičnimi pečmi	8 – 10
glasbila v prostorih, ki jih ogrevamo s pečmi	8 – 11
glasbila v prostorih s centralnim ogrevanjem	5 – 8

Slika 5: Primerna vlažnost lesa.

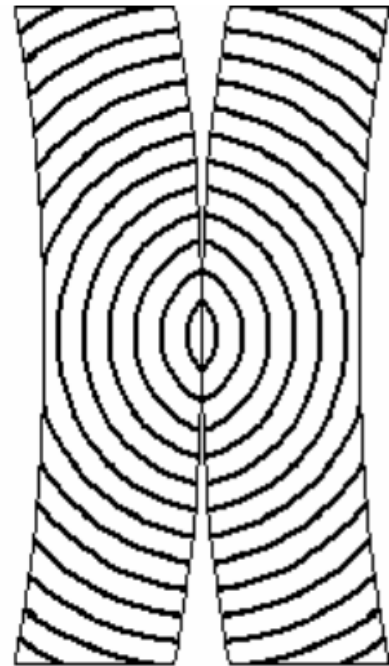
- premazi zavirajo prehajanje vode
- konstrukcijske vezi namesto lepljenih spojev
- pravilno širinsko spajamo



Slika 6: Primerno širinsko spajanje.



pravilno



napačno

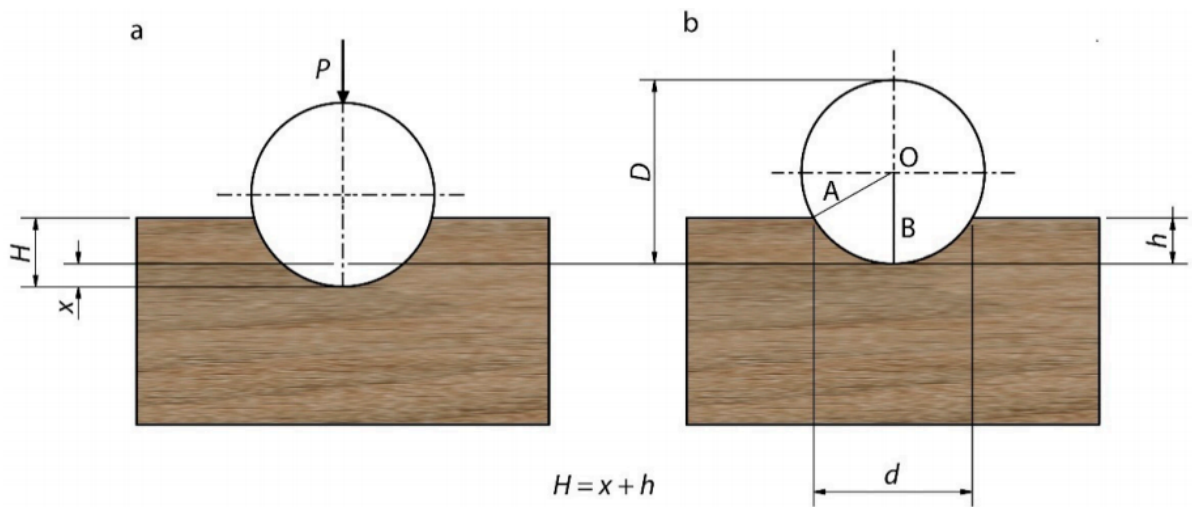
Slika 7: Primerno debelinsko spajanje.

1.2 MEHANSKE LASTNOSTI LESA

1.2.1 TRDOTA LESA

Trdota je odpor, s katerim se les upira prodiranju tujega telesa vanj.

- zabijanje žeblja v les
- odrezovanje



Slika 8: Princip merjenja trdote lesa.

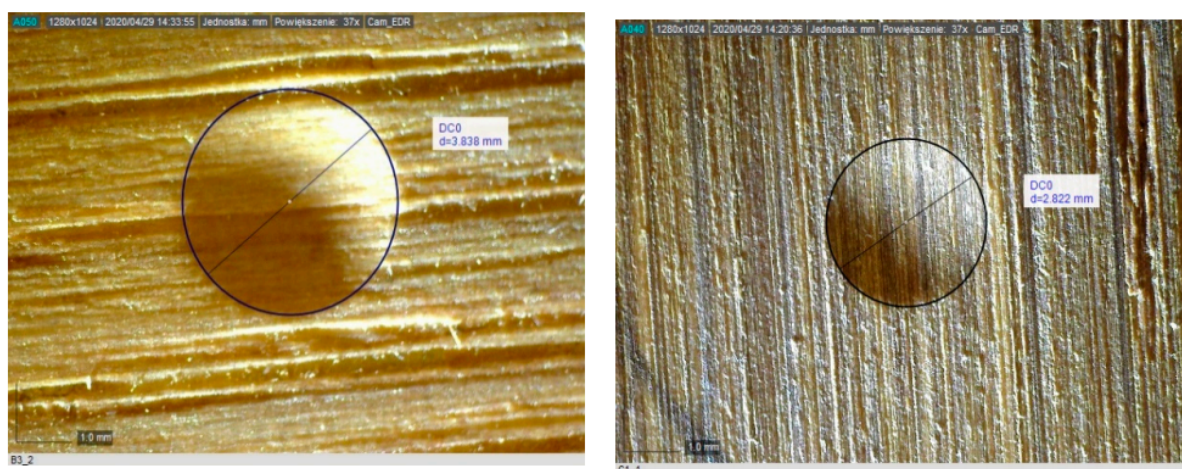
- po Brinellu (oznaka HB)

Jekleno kroglico z določenim premerom in določeno silo potisnemo v les. Trdota je razmerje med uporabljenno silo in vtisnjeno površino. Naprimer pri HBW(10,3000) se uporablja kroglica s premerom 10mm, potisna sila pa ustreza masi 3000 kg uteži.

$$HBW = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2}} \quad (5)$$

kjer je:

- W - se pogosto pripiše glede na material iz katerega je kroglica (W - wolfram, S - steel)
- F - sile pritiska
- D - premer kroglice
- d - premer odtisa



Slika 9: Primer meritve trdote lesa po Brinellu HBW(10,3000) na primeru beljave pecljatega hrasta in javorja.

(file:///home/david/Downloads/forests-11-00878-v2.pdf)

Tabela 1: Trdota različnih lesnih vrst po Brinellu HBW(10, 3000).

Lesna vrsta	Trdota po Brinellu - HBW [GPa]
Bor	2,2
Brest	3,9
Breza	2,7
Bukev parjena	4,0
Češnja	2,9
Hrast	3,7
Hruška	2,4
Javor evropski	3,7
Javor kanadski	4,2
Jelša	2,1
Jesen	3,8
Kostanj	2,3
Macesen	2,5

Lesna vrsta	Trdota po Brinellu - HBW [GPa]
Oreh	3,5
Smreka	1,3

p.s.: V lesarstvu se pogosto uporablja termin trdote v povezavi z orodji. Naj le omenimo, da se trdota jekla pogosto meri z Rockwell-ovo lestvico - HRC, kjer se vtisne diamantni stožec, za mehkejša jekla pa se uporablja HRB - kjer se vtisne jeklena kroglica.

1.2.2 TRDNOST LESA

Trdnost materiala (lesa) je sposobnost, da se upira spremembi oblike in poružitvi zaradi delovanja zunanjih sil. Kadar trdno telo obremenimo z zunanjo silo, se upira spremembi tako, da v telesu nastanejo napetosti.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (6)$$

Kjer je :

- σ - natezna, tlačna, ... napetost [MPa = N/mm²]
- F - sila, ki deluje pri obremenitvi [N]
- A - površina, na kateri se ustvarja napetost

Pri obremenjevanju izdelkov lahko zaznamo deformacije izdelka v določenih smereh. Spremembe dimenzij Δl pogosto predstavimo v relativni obliki s specifičnim raztezkom:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (7)$$

Kjer je:

- ϵ - specifični (ali relativni) raztezek
- Δl - raztezek
- l_0 - prvotna dimenzija

Obremenilna napetost in raztezek sta premosorazmerna in jih povezuje elastični modul E .

$$\sigma = E \epsilon = E \frac{\Delta l}{l_0} \quad (8)$$

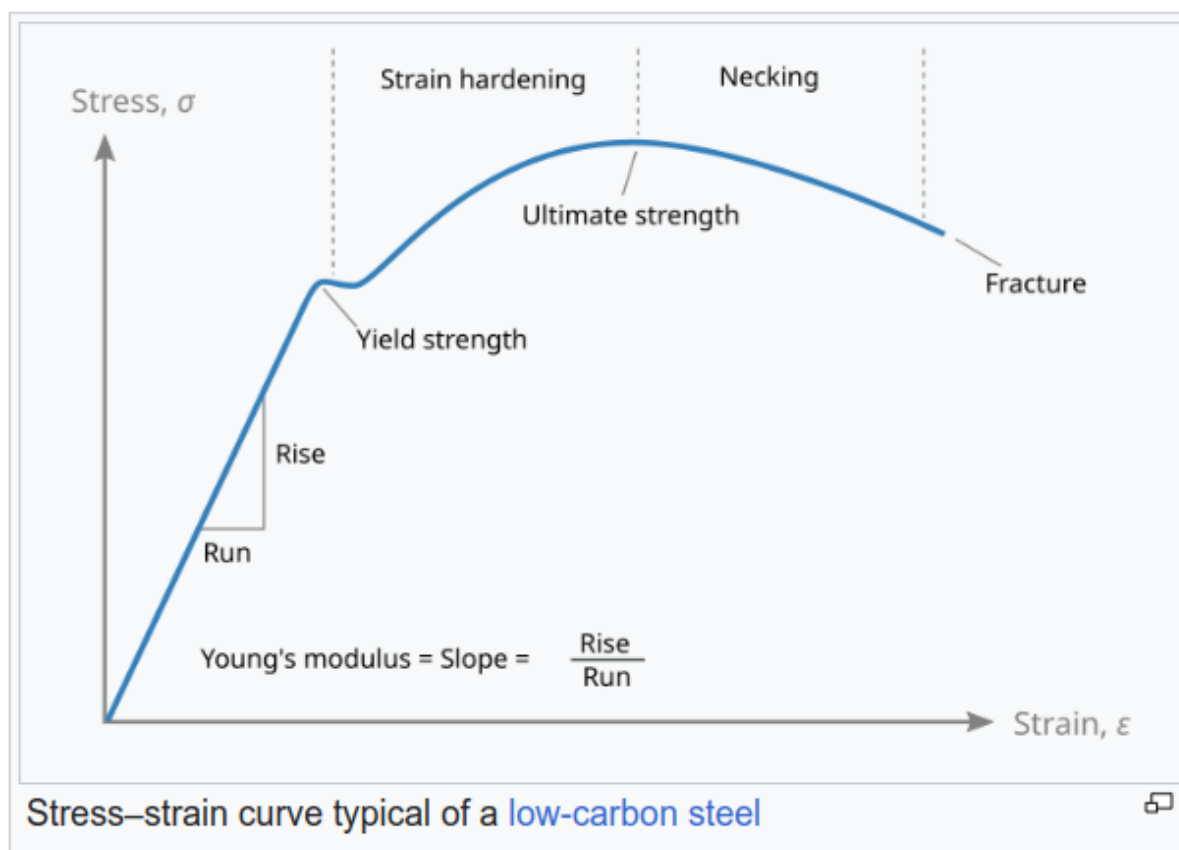
Vrste obremenitev:

- Tlačna
- Natezna
- Strižna
- Upogibna
- Torzijska
- Uklonska

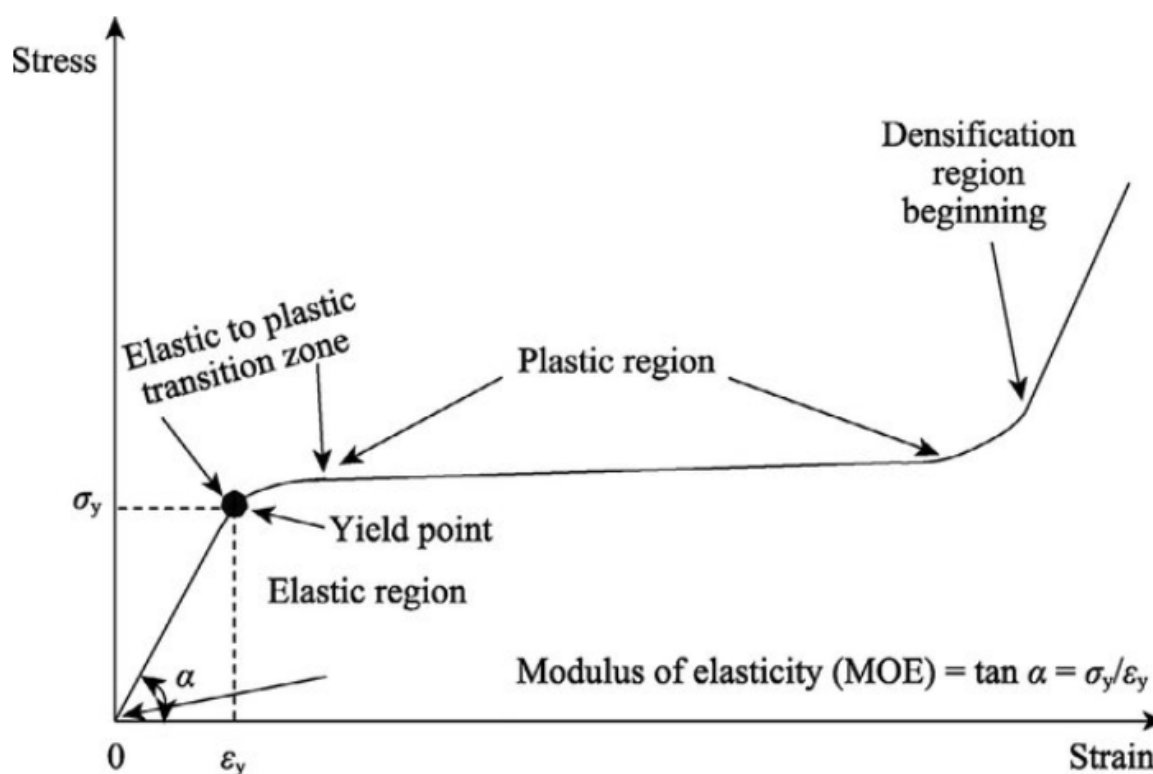
1.2.2.1 Napetostno-deformacijska krivulja Napetostno-deformacijska krivulja prikazuje odnos med napetostjo in deformacijo materiala, ko nanj delujemo z obremenitvijo. Na začetku krivulje je del, kjer napetost narašča premo sorazmerno z deformacijo. To območje imenujemo **elastično območje**, saj se material po odstranitvi obremenitve vrne v prvotno obliko.

Ko napetost preseže to mejo plastičnosti (ang.: yield strength), material vstopi v **plastično območje**. V tem delu krivulje deformacije postanejo trajne, kar pomeni, da material ne povrne več svoje prvotne oblike. Krivulja doseže najvišjo točko, ki označuje maksimalno napetost, ali t. i. natezno trdnost, kjer material prenese največjo možno obremenitev.

Po presežku maksimalne napetosti krivulja začne padati, kar kaže na slabitev materiala, dokler ne doseže točke zloma, kjer se material popolnoma pretrga. Ta analiza je ključna za razumevanje obnašanja materialov pod različnimi obremenitvami.



Slika 10: Napetostno-deformacijska krivulja, značilna za nizkoogljčno jeklo.



Slika 11: Napetostno-deformacijska krivulja za les pri radialni obremenitvi

1.2.2.2 DOPUSTNA NAPETOST Materialov ne smemo obremeniti do njihove maksimalne napetosti, obremenimo jih le do dopustne napetosti, ki se vedno nahaja v območju elastičnih deformacij. Tako izkoristimo le del njihove trdnosti. Dopustno napetost določajo predpisi in standardi. Izračunamo jo s pomočjo varnostnega količnika. Varnostni količnik je razmerje med največjo napetostjo v materialu (σ_{max}) in dopustno napetostjo (σ_{dop}). Pri lesnih konstrukcijah lahko znaša varnostni količnik (varnostno število) od 2 do 15, odvisno od namena konstrukcije, vrste obremenitve in drugih vplivov. (Leban, 2004)

$$\sigma_{dop} = \frac{\sigma_{max}}{k_v} \quad (9)$$

Tabela 2: Dopustne napetosti za nekatere vrste lesa v MPa, pri zračno suhem lesu ($u = 18\%$).

les	smer	Nateg[MPa]	Tlak[MPa]	Upogib[MPa]	Strig[MPa]	Mod. Ealst.[MPa]
Smreka, Jelka,Bor	ll	10	11	13	0.9	12000
	T	-	2	-	0.9	460
Hrast,Bukev	ll	11	12	14	1.2	13000
	T	-	3	-	1.2	1000

Ta tabela¹ prikazuje mehanske lastnosti lesa za različne vrste obremenitev, pri čemer je pomembna smer obremenitve glede na lesna vlakna.

Smer obremenitve:

“ll”: Obremenitve vzporedno z lesnimi vlakni (longitudinalna smer). “T”: Obremenitve pravokotno na vlakna (transverzalna smer).

Lastnosti materiala:

- Nateg: Največja napetost, ki jo les prenese pri nategovanju.
- Tlak: Največja napetost, ki jo les prenese pri stisku.
- Upogib: Največja napetost pri upogibanju.
- Strig: Napetost, ki jo les prenese pri strižni obremenitvi.
- Modul elastičnosti (E): Mera togosti lesa, ki kaže, kako se les upira deformacijam pod obremenitvijo.

Les ima višje vrednosti za nateg, tlak in upogib, ko je obremenjen vzporedno z vlakni (smer “ll”), kar pomeni, da je v tej smeri močnejši. Pravokotno na vlakna (smer “T”) so vrednosti za tlak in strig bistveno nižje, kar kaže na manjšo odpornost lesa v tej smeri. Podatki niso najbolj točni za strižne obremenitve, saj pri obremenitvah vzporedno z vlakni pride do cepljenja (porušitev lignina). Hrast in bukev imata nekoliko višje mehanske lastnosti v primerjavi s smreko, jelko in borom, kar pomeni, da imajo večjo trdnost.

1.2.2.3 NATEZNA IN TLAČNA TRDNOST LESA raztezek:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (10)$$

¹Trdnost za srednje šole, Hadalin, J. in Hvasti, K., 2010

- ϵ - specifični raztezek
- Δl - dejanski raztezek
- l_1 - nova dolžina
- l_0 - prvotna dolžina

Ob tej deformaciji se ustvari napetost:

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l_0} \quad (11)$$

- σ - napetost
- E - modul elastičnosti
- ϵ - specifični raztezek
- Δl - raztezek
- l_0 - prvotna dolžina

Primer: smrekovina 8cm x 8cm, dolžine 1,8m ; natezna sila 45 kN.

- Kolikšna je dejanska napetost?
- Ali presežemo dopustno napetost obremenitve?
- Kolikšen je raztezek?

(Odgovor: $\sigma = 7.03 MPa$; $N_e, \sigma_{dop} = 10 MPa$; $\Delta l = 1.05 mm$)

1.2.2.4 STRIŽNA TRDNOST Strižna trdnost je odpor lesa proti strigu lesnih plasti s silo, ki deluje v ravnini lesnih vlaken ali redko, prečno na lesna vlakna.

- prečno na vlakna : čepna vez
- vzdolž vlaken : poševnik v legi nadstreška
- strižna napetost

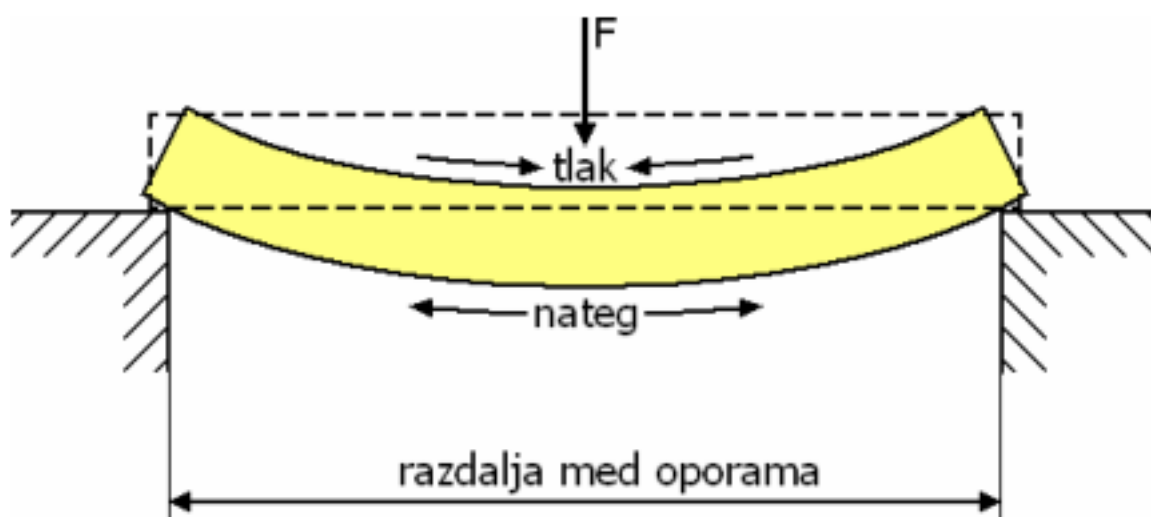
$$\tau = \frac{F}{A} \quad (12)$$

Enojna zarezna čepna vez iz smrekovega lesa je obremenjena s silo 1 500 N. Čep je visok 80 mm. Določite najmanjšo dopustno širino čepa. (R: $\tau_{dop} = 90 N/cm^2$, $A = 16,7 cm^2$, $b = 21 mm$)

Naložena polica tehta 70 kg. Mozničili smo jo z bukovimi mozniki premera 8 mm. Izračunajte

koliko moznikov smo uporabili pri izdelavi konstrukcije. ($R: \tau_{dop} = 120 \text{ N/cm}^2$, $S1 = 50,265 \text{ mm}^2$, $k = 1$, $A = 5,83 \text{ cm}^2$, $N = 12$)

1.2.2.5 UPOGIBNA TRDNOST Upogibna trdnost je odpor lesnega nosilca med oporama proti maksimalni sili, ki deluje pravokotno na os nosilca.



Slika 12: Upogibna trdnost.

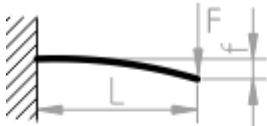
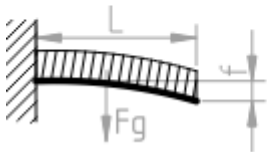
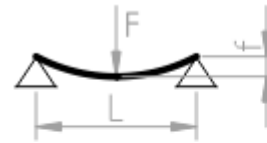
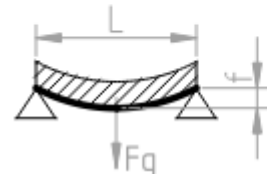
Pri dimenzioniranju na upogib upoštevamo samo največji, maksimalni upogibni moment, saj tam nastopijo največje napetosti.

$$\sigma_U = \frac{M_{max}}{W_x} \quad (13)$$

- σ_U - mehanska napetost v nosilcu
- M_{max} - največji navor, ki ga povzroča mehanska obremenitev na nosilec
- W_x - odpornostni moment nosilca (odvisen od oblike prereza nosilca)

Tabela 3: Vztrajnostni in odpornostni momenti za različne prereze nosilcev. Kjer je: a - dolžina stranice kvadratnega, b - širina in h - višina pravokotnega ter d - premer okroglega prereza.

Prerez nosilca	Vztrajnostni moment	Odpornostni moment
kvadratni	$I_x = \frac{a^4}{12}$	$W_x = \frac{a^3}{6}$
pravokotni	$I_x = \frac{b h^3}{12}$	$W_x = \frac{b h^2}{6}$

Prerez nosilca	Vztrajnostni moment	Odpornostni moment
okrogli	$I_x = \frac{\pi d^4}{64}$	$W_x = \frac{\pi d^3}{32}$
	$f = \frac{F L^3}{3 E I_x}$	$\sigma_u = \frac{F L}{W_x} \quad M_{MAX} = F L$
	$f = \frac{F_g L^3}{8 E I_x}$	$\sigma_u = \frac{F_g L}{2 W_x} \quad M_{MAX} = \frac{F L}{2}$
	$f = \frac{F L^3}{48 E I_x}$	$\sigma_u = \frac{F L}{4 W_x} \quad M_{MAX} = \frac{F L}{4}$
	$f = \frac{5 F_g L^3}{384 E I_x}$	$\sigma_u = \frac{F_g L}{8 W_x} \quad M_{MAX} = \frac{F L}{8}$

Slika 13: Poves in napetosti v nosilcu pri različnih obremenitvah.

- f - poves
- F - sila obremenitve
- L - dolžina nosilca
- E - elastični modul
- I_X - vztrajnostni moment v vodoravni smeri
- σ_U - upogibna napetost v nosilcu

Izračunajte s kakšno silo lahko obremenite prostoležeči nosilec iz smrekovega lesa 1 kategorije. Dolžina nosilca je 4 m, širina je 16 cm, višina je 20 cm. Sila deluje na nosilec v sredini. ($R: \sigma = 1300 \text{ N/cm}^2$, $W_x = 1\,066,66 \text{ cm}^3$, $M_{max} = 13\,866,66 \text{ Nm}$, $F = 13,8 \text{ kN}$)

Dimenzionirajte pravokotni prerez hrastovega trama dolžine 4 m. To je prostoležeči nosilec, ki je po celi dolžini obremenjen z zvezno obremenitvijo 1800 N/m . Stranici b in h sta v razmerju 7:5.

Dopustna upogibna napetost je 1400 N/mm^2 , elastični modul pa je $12\,500 \text{ MPa}$. Izračunajte tudi povprečno hrastovega nosilca. (R: $M_{\max} = 3600 \text{ Nm}$, $W_x = 257\,142,8 \text{ mm}^3$, $b = 92,3 \text{ mm} = 93 \text{ mm}$, $h = 129,26 \text{ mm} = 130 \text{ mm}$, $I_x = 17\,026\,750 \text{ mm}^4$, $f = 28,2 \text{ mm}$)

Kakšno je najugodnejše razmerje stranic nosilca, ki je obremenjen na upogibi in ga moramo izrezati iz debla z okroglim presekom? V praksi se pogosto uporablja razmerje 5:7, ali lahko potrdiš, da je to res najučinkoviteje. (R: Podatek je resničen za primer, ko nosilec izrežemo iz okroglega preseka.)

1.2.2.6 UKLONSKA TRDNOST Vitkost:

$$\lambda = \frac{l_0}{i}$$

- l_0 prosta uklonska dolžina (tbl. 4)
- i - vztrajnostni polmer, ki ga izračunamo iz vztrajnostnega momenta in prereza na katerega sila deluje:

$$i = \sqrt{\frac{I_{\min}}{A}}$$

Večja ko je vitkost, večja je nevarnost uklona. Uklonsko kritično napetost določamo po treh različnih postopkih, v odvisnosti od vitkosti.

1. $\lambda \leq 60$ dimenzioniranje na čisti tlak
2. ... kombinacija obremenitve na tlak in uklon
3. $\lambda \geq 100$ - dimenzioniranje po Eulerjevem postopku

1.2.2.6.1 Eulerjev postopek uklonska sila (kritična sila)

$$F_k = \frac{\pi^2 E I_{\min}}{l_0^2}$$

uklonska napetost

$$\sigma_k = \frac{F_k}{A}$$

dopustna sila

$$F_{dop} = \frac{F_k}{k_v}$$

- $k_v = 10(les)$

Način vpetja

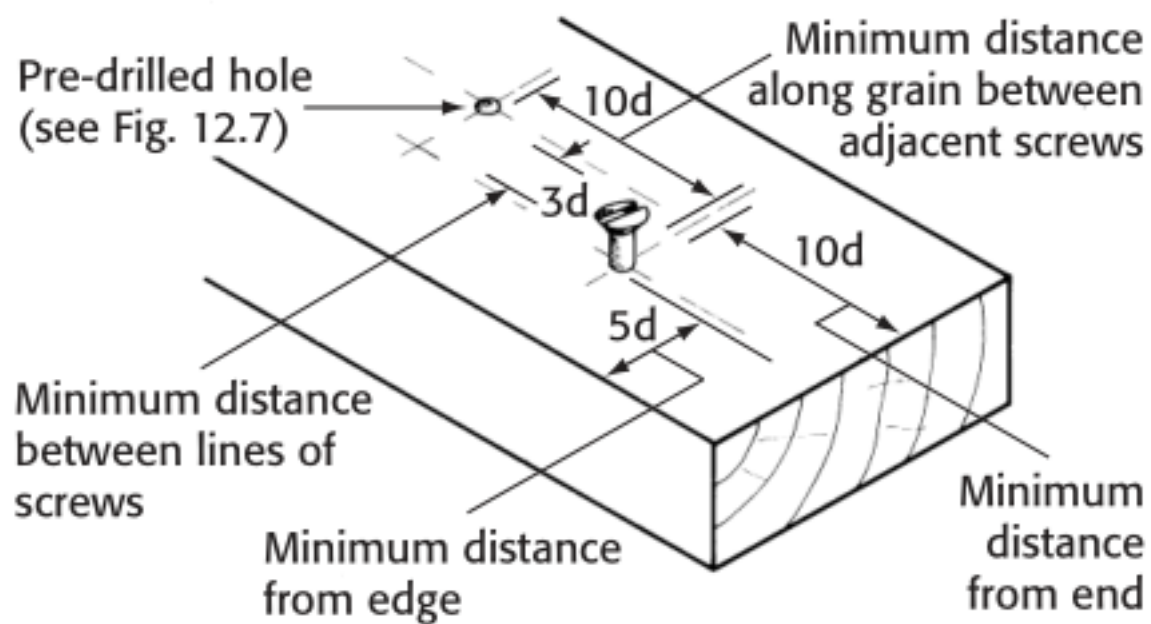
Tabela 4: Tabela z izračuni proste uklonske dolžine l_0 glede na način vpetja lesenega vitkega stebra z dolžino l .

konec A	konec B	prosta uklonska dolžina - l_0
togo vpet	prosti konec	$2l$
togo	togo vpetje	$0.65l$
togo vpetje	členasto vpetje	$0.8l$
členasto vpetje	členasto vpetje	l

Smrekov steber pravokotnega prereza je na eni strani vpet členkasto na drugi pa trdo. Dolžina stebra je 5 m. Obremenjen je s silo 45 kN.

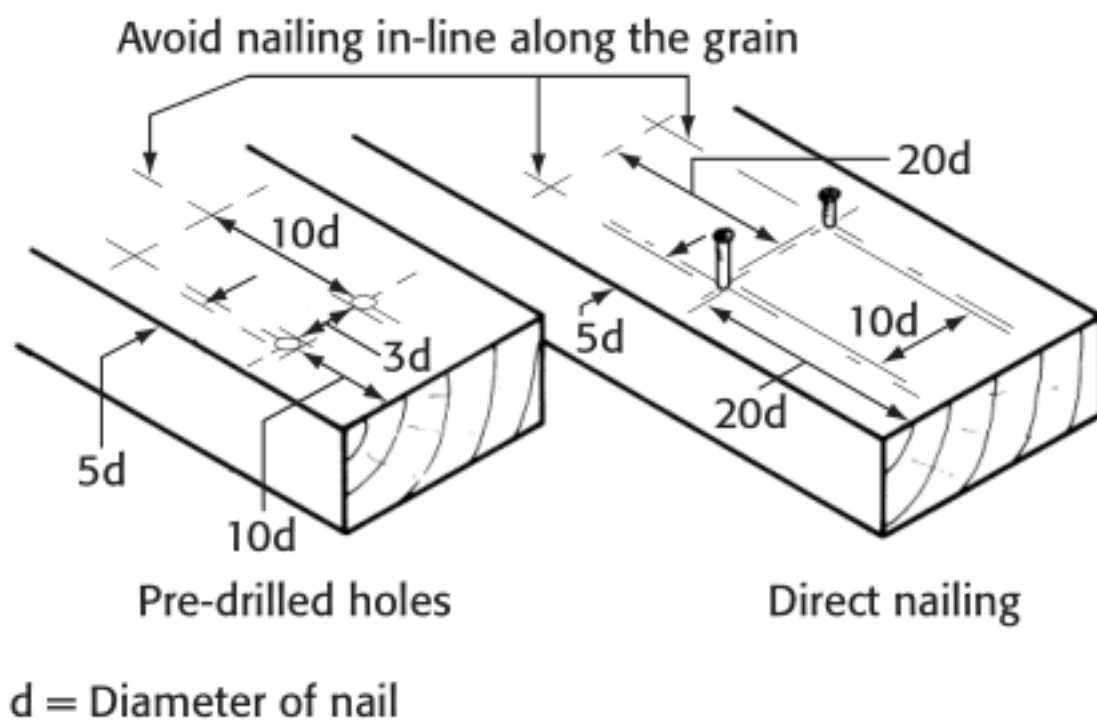
Izračunajte dimenziji stranic pravokotnika, če sta v razmerju 2 :3. Varnostni faktor je 10. (R: $l_0 = 4000$ mm, $I_{min} = 72\,951\,252$ mm⁴, $b = 155,4$ mm, $h = 233,14$ mm, $i = 44,87$ mm, $\lambda = 111,4$ zato lahko dimenzioniramo po Eulerju.)

1.2.2.7 CEPILNA TRDNOST Cepljivost je lastnost lesa, da se cepi ali razdvaja vzdolžno (v smeri lesnih vlaken). Les navadno cepimo z orodjem v obliki



d = Diameter of wood screw shank

Slika 14: Izogibanje cepilnosti pri vijačenju.



Slika 15: Izogibanje cepilnosti pri žebljanju.