

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, pohištvo, 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 topotni 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

1.1.1 Gostota

- neposredni vpliv na fizikalne lastnosti lesa

- boljša trdota
- boljša upogibna trdnost

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u} \quad (1)$$

pri čemer je:

- ρ_u = gostota lesa pri določeni vlažnosti [kg/m³]
- m_u = masa lesa pri določeni vlažnosti [kg]
- V_u = prostornina lesa pri določeni vlažnosti [m³]

ocena gostote	vrsta lesa	gostota zračno suhega lesa, ρ_{12-15} [kg/m ³] min. – srednja – maks.
izjemno nizka	balsa	70 – 260
nizka	topolovina, črna jelovina smrekovina	410 – 450 – 560 350 – 450 – 750 330 – 470 – 680
srednja	borovina, rdeča lipovina jelševina macesnovina kostanjevina češnjevina javorovina brezovina	330 – 510 – 890 350 – 530 – 600 490 – 550 – 640 440 – 590 – 850 590 – 620 – 660 600 – 630 – 690 530 – 630 – 790 510 – 650 – 830
visoka	brestovina orehovina jesenovina hrastovina bukovina hruškovina	480 – 680 – 850 570 – 680 – 810 450 – 690 – 860 430 – 690 – 960 540 – 720 – 910 690 – 740 – 800
zelo visoka	gabrovina, bela	540 – 830 – 860

Slika 1: Gostota lesa

Premisli:

- iglavci vs raztreseno porozni listavci vs venčasto porozni listavci

1.1.1.1 Širina branike

- delež kasnega lesa !
- Iglavci:

- širina kasnega lesa = enaka (ni odvisna od vremenskih razmer spomladi in poleti)
 - široka branika - nižja gostota
- Venčasto porozni
 - širina ranega lesa = enaka,
 - široka branika - večja gostota
- Raztreseno porozni
 - neodvisno od širine branike
- 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)

1.1.2 Vlažnost lesa

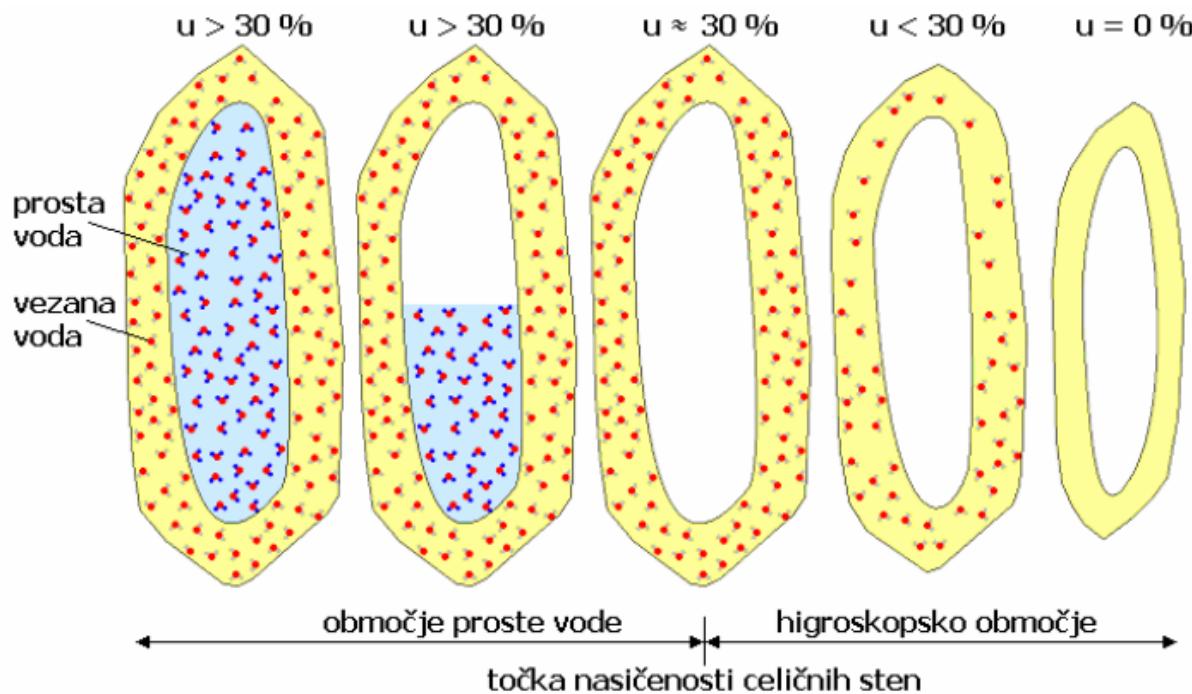
Vlažnost lesa izračunamo:

$$u = \frac{m_v}{m_0} \quad (2)$$

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 2: Prosta in vezana voda.

1.1.2.1 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!

1.1.2.2 Krčenje lesa

- le kadar se spremeni % vode v celičnih stenah
- krčenj 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 tangen- cialni smeri β_t	prostorninsko smeri 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 3: 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:

$$\Delta L_{max} = \beta L_{u30} \quad (3)$$

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 ODSТОTEK KRČENJA

$$\beta_{\Delta u} = \frac{\beta \Delta u}{30\%} \quad (4)$$

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 .

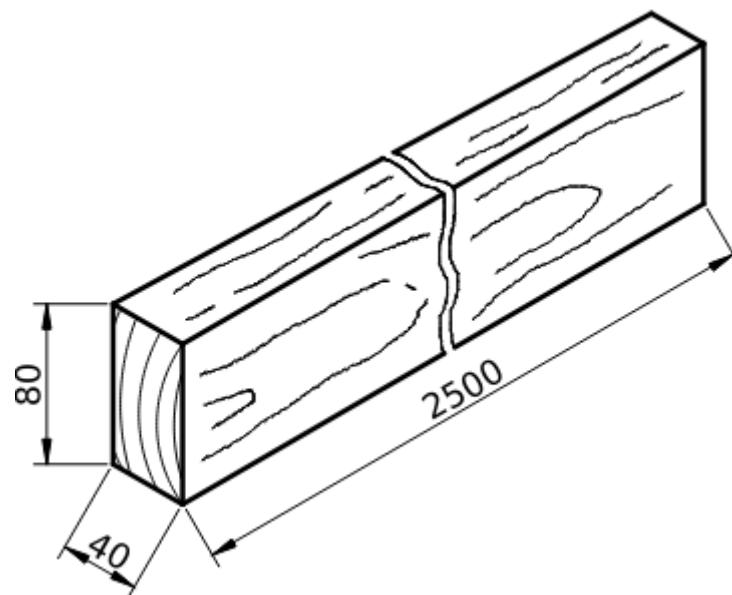
- DEJANSKI SKRČEK

$$\Delta L_{\Delta u} = \beta_{\Delta u} L \quad (5)$$

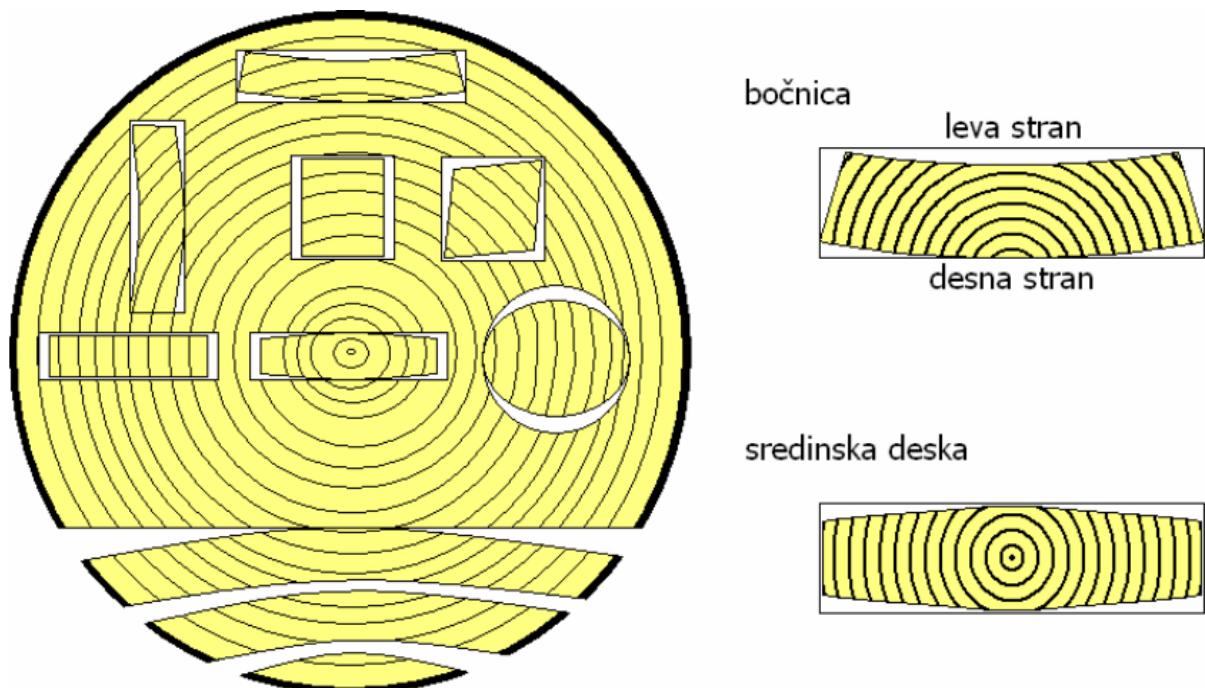
1.1.3 NALOGA: Izračunaj končne dimenzije izdelka po sušenju

Bukova gredica $\check{s} = 80.0$ mm, $d = 40.0$ mm, $l = 2.500$ m, z vlažnostjo 40%, posušimo na 10%.

Izračunaj dimenzije po sušenju. (73.7 mm \times 38.5 mm \times 2495 mm)



Slika 4: Skica gredice z dimenzijami



Slika 5: Nepravilnosti pri sušenju lesa.

1.1.3.1 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

1.1.3.2 Ukrepi za zmanjševanje posledic krčenja

- ustrezna vrsta lesa
- ustrezna osušenost lesa pri obdelavi

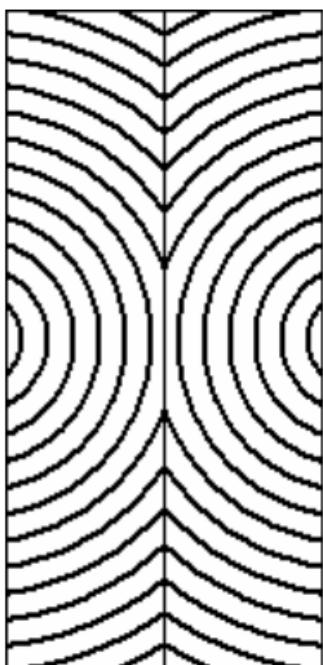
Vrsta izdelka	Območje ravnovesne vlažnosti lesa [%]
gradbeni les, les za balkonske ograje, strešne konstrukcije, palete	13 – 17
okna, zunanja vrata	12 – 16
pohištvo, podi, notranja vrata, stenske obloge, v prostorih s centralnim ogrevanjem	8 – 10
pohištvo, podi, notranja vrata, stenske obloge, v prostorih, 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 6: Primerna vlažnost lesa.

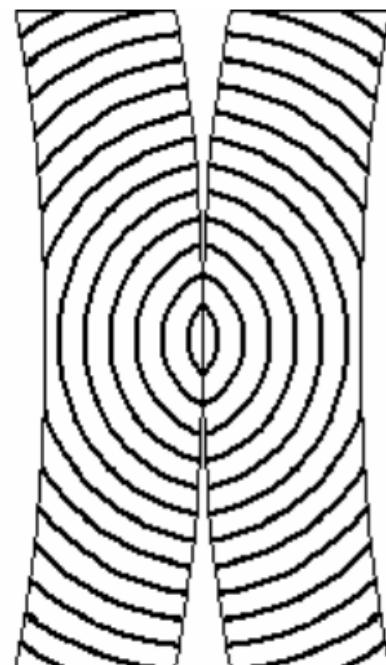
- premazi zavirajo prehajanje vode
- konstrukcijske vezi namesto lepljenih spojev
- pravilno širinsko spajamo



Slika 7: Primerno širinsko spajanje.



pravilno



napačno

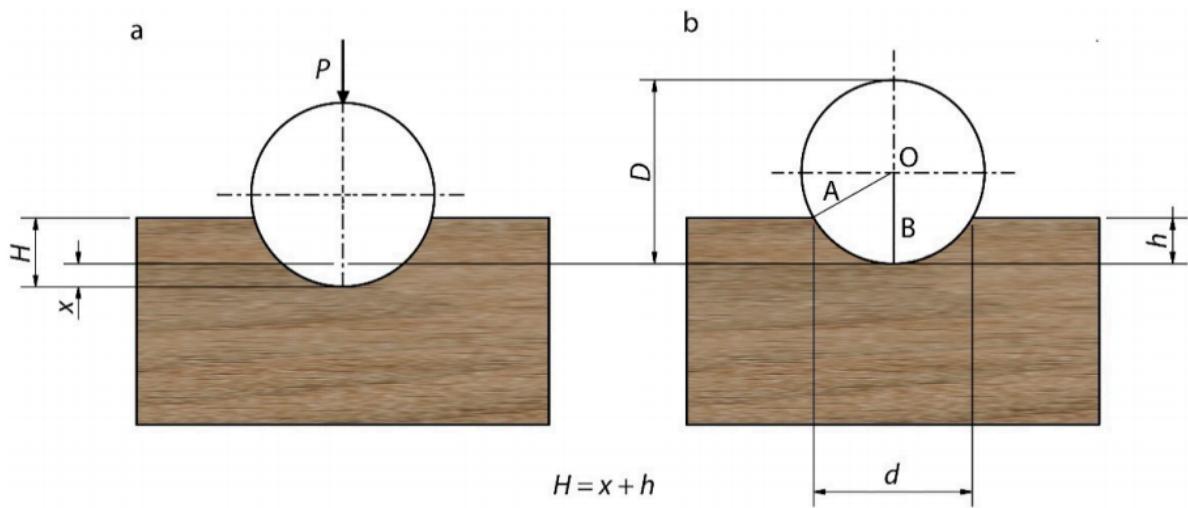
Slika 8: Primerno debelinsko spajanje.

1.2 MEHANSKE LASTNOSTI LESA

1.2.1 Trdota lesa

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

- zabijanje žebbla v les
- odrezovanje



Slika 9: Princip merjenja trdote lesa.

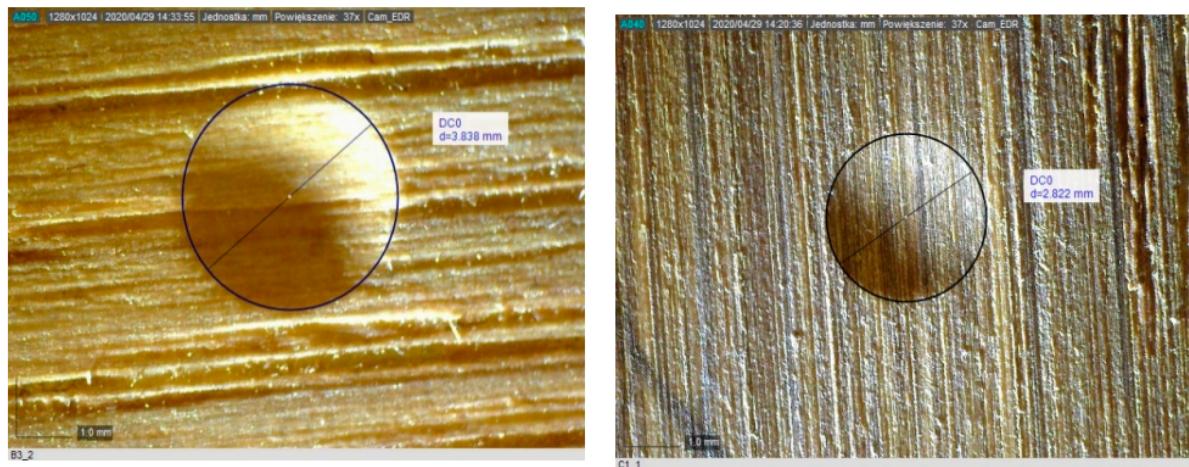
- po Brinellu (oznaka HB)

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

$$HBW = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2}} \quad (6)$$

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 10: 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]
Smreka	1,3
Jelša	2,1
Bor	2,2
Kostanj	2,3
Hruška	2,4
Macesen	2,5
Breza	2,7
Češnja	2,9
Oreh	3,5
Hrast	3,7
Javor evropski	3,7
Jesen	3,8

Lesna vrsta	Trdota po Brinellu - HBW [GPa]
Brest	3,9
Bukev parjena	4,0
Javor kanadski	4,2

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 vtrisne diamantni stožec, za mehkejša jekla pa se uporablja HRB - kjer se vtrisne jeklena kroglica.

1.2.2 Trdnost lesa

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

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (7)$$

Kjer je :

- σ - natezna, tlačna, ... napetost [$\text{MPa} = \text{N/mm}^2$]
- 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:

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

Kjer je:

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

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

$$\sigma = E \epsilon = E \frac{\Delta l}{l_0} \quad (9)$$

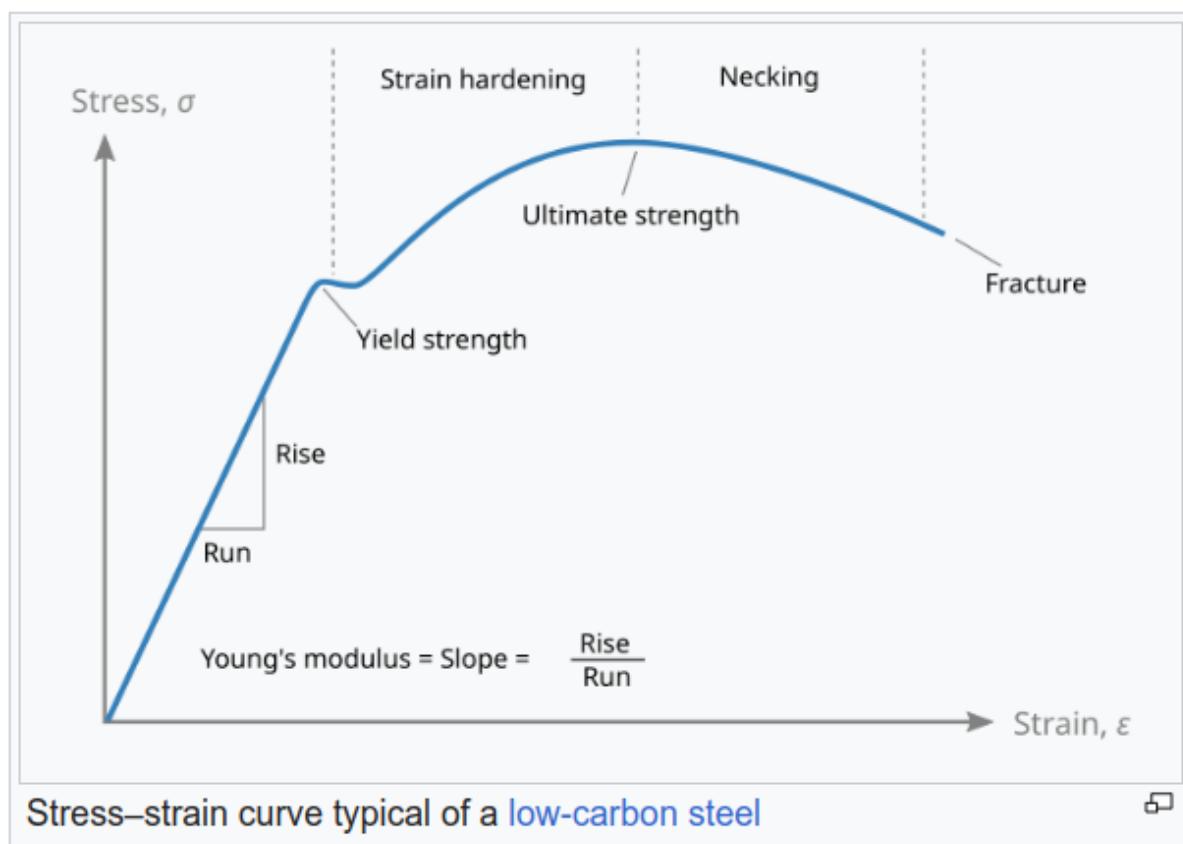
Vrste obremenitev:

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

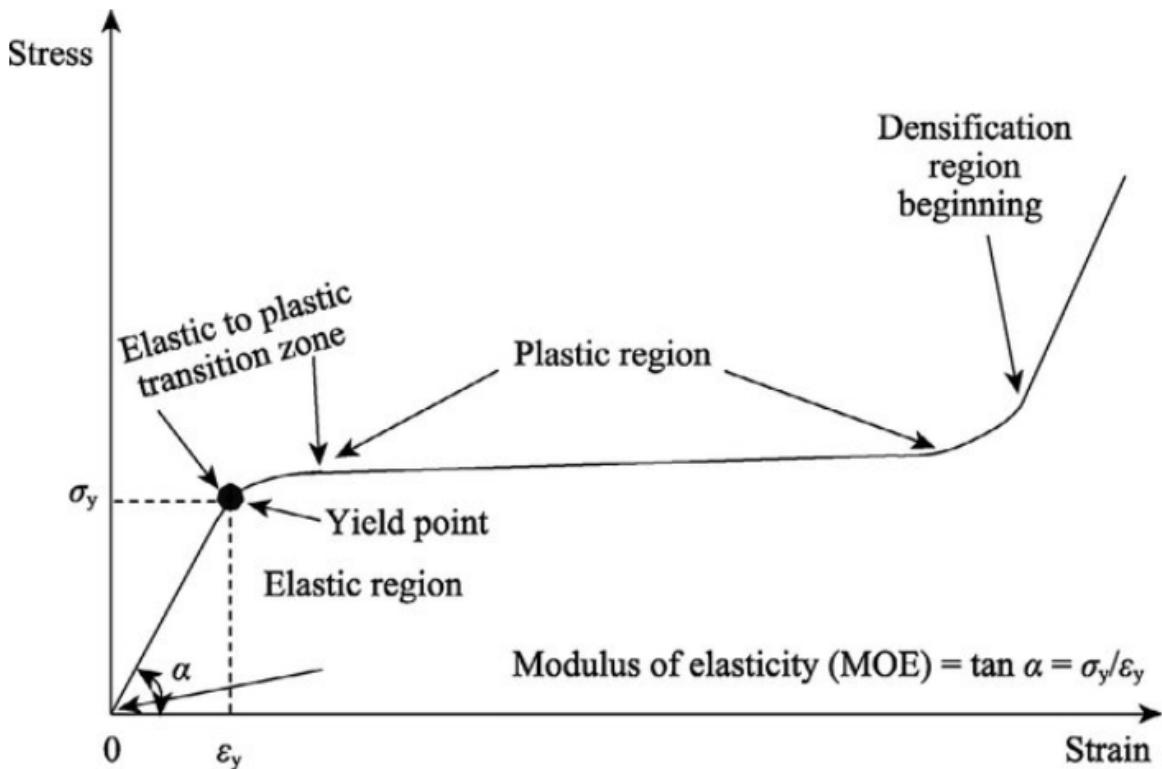
1.2.2.1 Napetostno-deformacijska krivulja Napetostno-deformacijska krivulja prikazuje odnos med napetostjo in deformacijo materiala, ko nanj delujemo z obremenitvijo. Na začetku krivulje je del, kjer napetost narašča premo sorazmerno z deformacijo. To območje imenujemo **elastično območje**, saj se material 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 dosegne točke zloma, kjer se material popolnoma pretrga. Ta analiza je ključna za razumevanje obnašanja materialov pod različnimi obremenitvami.



Slika 11: Napetostno-deformacijska krivulja, značilna za nizkooglično jeklo.



Slika 12: 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)

$$\sigma_{dop} = \frac{\sigma_{max}}{k_v} \quad (10)$$

Tabela 2: Dopustne napetosti za nekatere vrste lesa v MPa, pri zračno suhem lesu ($u = 18\%$). Za lažje pretvarjanje naj omenimo, da je 1 MPa enako $1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$.

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

||: Obremenitve vzporedno z lesnimi vlakni (longitudinalna smer).

⊥: 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 "||"), 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 sta ključni mehanski lastnosti, ki sta močno odvisni od orientacije vlaken. Zaradi te orientacijske odvisnosti so vrednosti trdnosti za različne smeri in vrste

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

lesa značilno različne, zato se pri načrtovanju uporabljo standardizirani testi in zapisi iz specializirane literature (Forest Products Laboratory 2010).

raztezek:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (11)$$

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

Ob tej deformaciji se ustvarijo napetosti:

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l_0} \quad (12)$$

- 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: $\sigma = 7.03 MPa$; $\text{Ne}, \sigma_{dop} = 10 MPa; \Delta l = 1.05 mm$)

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

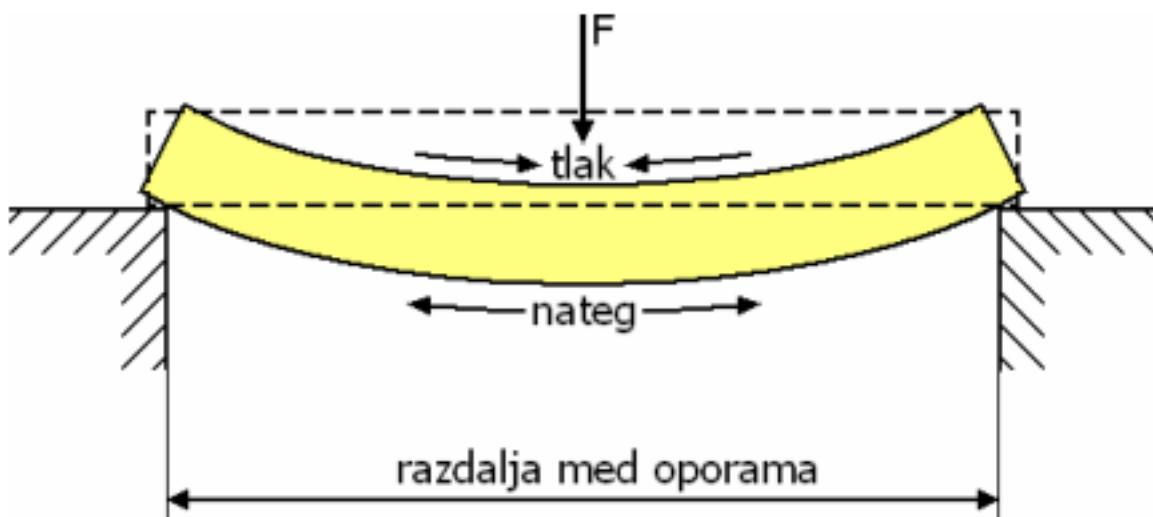
- prečno na vlakna : čepna vez
- vzdolž vlaken : poševnik v legi nadstreška
- strižna napetost

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (13)$$

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

Naložena polica tehta 70 kg. Mozničili smo jo z bukovimi mozniki premera 8 mm. Izračunajte koliko moznikov smo uporabili pri izdelavi konstrukcije. ($R: \tau_{dop} = 120 \text{ N/cm}^2$, $S_1 = 50,265 \text{ mm}^2$, $k = 1$, $A = 5,83 \text{ cm}^2$, $N = 12$)

1.2.2.5 UPOGIBNA TRDNOST je odpornost lesa na upogib v smeri prečno na vlakna. Zaradi anizotropije so vrednosti odvisne od vrste lesa in orientacije vlaken, zato so pri načrtovanju uporabljenе standardizirane metode preizkusov in ustrezna literatura (Forest Products Laboratory 2010).



Slika 13: Upogibna trdnost.

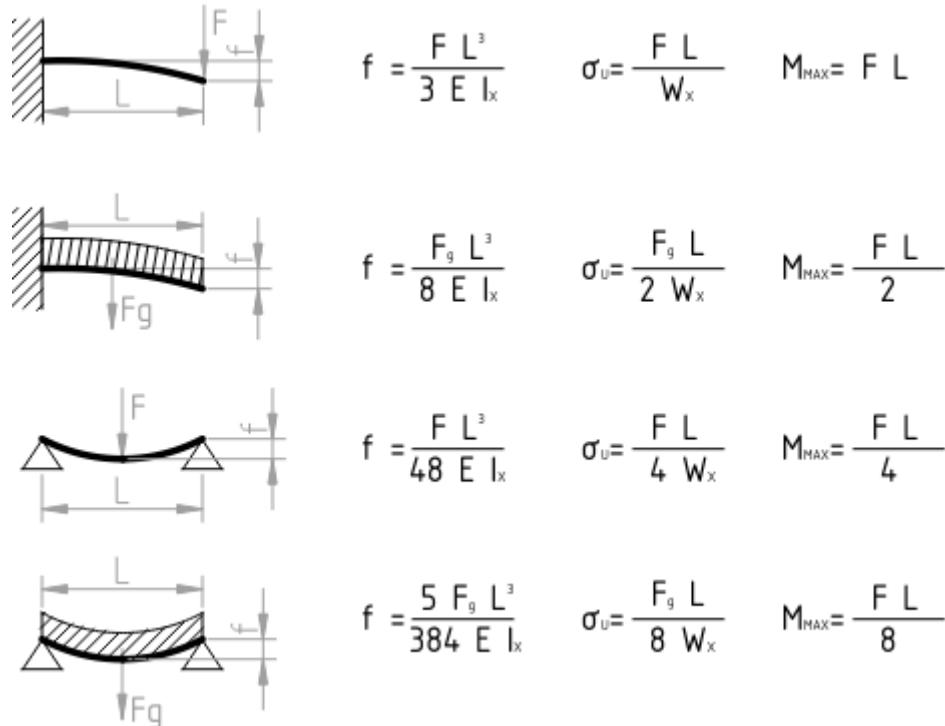
Pri dimenzioniranju na upogib upoštevamo samo največji, maksimalni upogibni moment, saj tam nastopijo največje napetosti.

$$\sigma_U = \frac{M_{max}}{W_x} \quad (14)$$

- 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 preseka; b - širina in h - višina pravokotnega preseka ter d - premer okroglega preseka nosilca.

Prerez nosilca	Vztrajnostni moment	Odpornostni moment
kvadratni	$I_x = \frac{a^4}{12}$	$W_x = \frac{a^3}{6}$
pravokotni	$I_x = \frac{b h^3}{12}$	$W_x = \frac{b h^2}{6}$
okrogli	$I_x = \frac{\pi d^4}{64}$	$W_x = \frac{\pi d^3}{32}$



Slika 14: 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: $\sigma = 1$ 300 N/cm², Wx = 1 066,66 cm³, Mmax = 13 866,66 Nm, F = 13,8 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/mm², elastični modul pa je 12 500 MPa. Izračunajte tudi poves hrastovega nosilca. (R: Mmax = 3600 Nm, Wx = 257 142,8 mm³, b = 92,3 mm = 93 mm, h = 129,26 mm = 130 mm, IX = 17 026 750 mm⁴, f = 28,2 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 lesa je odvisna od faktorja vitkosti, ki jo določimo z razmerjem λ glede na dolžino in presek nosilca. Zaradi anizotropije lesa se lastnosti (modul Younga E , vztrajnostni momentu I) razlikujejo glede na orientacijo vlaken, zato so trdnostne lastnosti različnih vrst in usmeritev vlaken različne (Forest Products Laboratory 2010). Ko je $\lambda > 100$, uklonsko trdnost računamo po Eulerjevem postopku.

Vitkost:

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

- l_0 prosta uklonska dolžina, glej tbl. 4 glede na način vpetja nosilca,
- i - vztrajnostni polmer, ki ga izračunamo iz vztrajnostnega momenta in prereza na katerega sila deluje:

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

Način vpetja

Tabela 4: Tabela z izračuni proste uklonske dolžine l_0 glede na način vpetja lesenega vitkega stebra z dolžino l . Konec A je spodnja stran nosilca, na B pa deluje sila F . Predvideni so trije načini vpetja: 1) togo vpetje - fiksiran tako, da ne omogoča rotacije in translacije v vodoravni smeri, 2) členasto vpetje - možna je rotacija nostilca, ne pa tudi translacija in 3) prosto vpetje - možni sta tako rotacija, kot translacija v vodoravni smeri.

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

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 izvedemo takrat, ko je izpolnjen pogoj, da je koeficient vitkosti $\lambda > 100$. Silo pri kateri se bo nosilec uklonil lahko izračunamo po en. 15:

$$F_k = \frac{\pi^2 EI}{(l_0)^2} \quad (15)$$

in jo imenujemo **kritična sila uklona**.

Pri teh pogojih se ustvarijo podobni pogoji kot pri upogibni obremenitvi in nastanejo notranje napetosti:

$$\sigma_k = \frac{F_k}{A} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}.$$

Pri načrtovanju nosilcev vedno upoštevamo dopustne napetosti, ki so bistveno manjše od teh mejnih, kritičnih vrednosti. Zato pri načrtovanju nosilcev upoštevamo dopustne napetosti in laho zapišemo

$$\sigma_{dop} = \frac{F_{dop}}{A} = \frac{\pi^2 E}{\lambda_{max}^2}, \quad (16)$$

kjer je:

$$\lambda_{max} = \frac{l_0}{i_{min}}; i_{min} = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}} \quad (17)$$

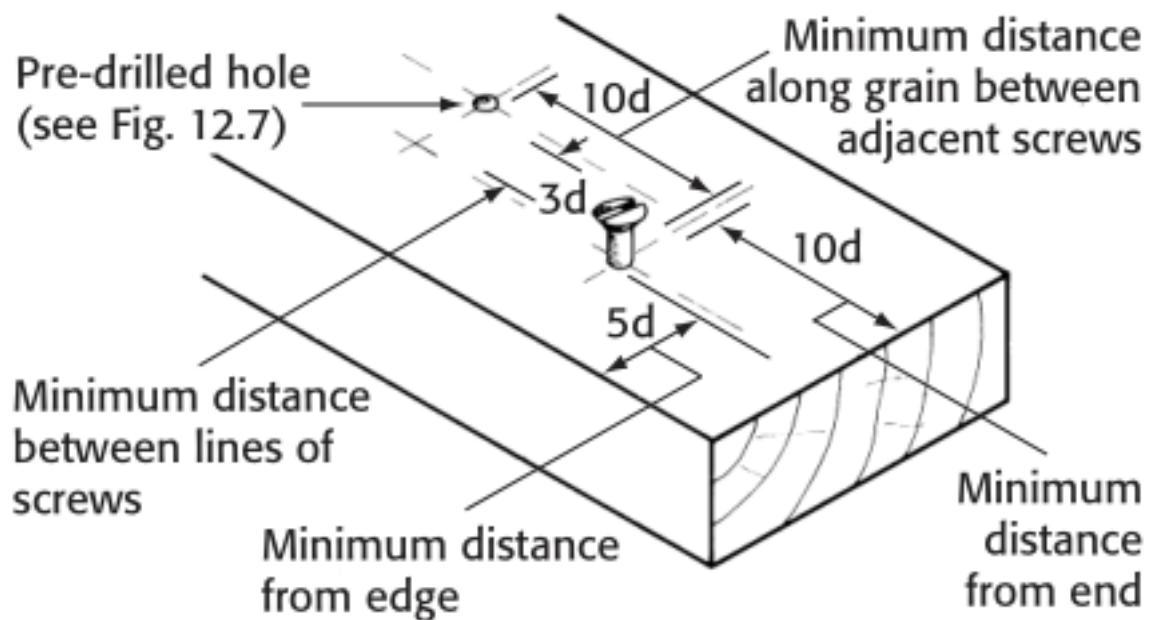
od koder sledi da je dopustna sila definirana z en. 18:

$$F_{dop} = \frac{\pi^2 EI_{min}}{(l_0)^2} \quad (18)$$

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

Izračunajte dimenzijsi stranic pravokotnika, če sta v razmerju 2 :3. Varnostni faktor je 10. (R: l₀ = 4 000 mm, I_{min} = 72 951 252 mm⁴, b = 155,4 mm, h = 233,14 mm, i = 44,87 mm, λ = 111,4 zato lahko dimenzioniramo po Eulerju.)

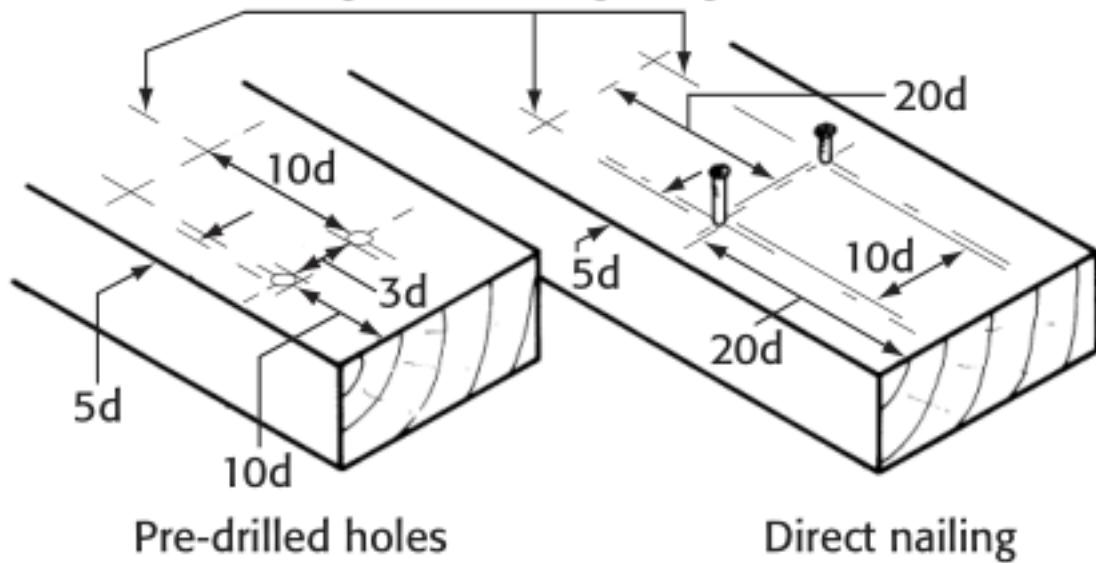
1.2.2.7 CEPILNA TRDNOST Cepljivost je lastnost lesa, da se cepi ali razdvaja vzdolžno (v smeri lesnih vlaken). Les navadno cepimo z orodjem v obliki



d = Diameter of wood screw shank

Slika 15: Izogibanje cepilnosti pri vijačenju.

Avoid nailing in-line along the grain



Slika 16: Izogibanje cepilnosti pri žeblijanju.

Forest Products Laboratory. 2010. *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. Forest Products Laboratory, U.S. Department of Agriculture, Forest Service. https://www.fpl.fs.usda.gov/documents/fplgtr/fpl_gtr190.pdf.