

UDK: 630\*815.1

Strokovni članek

# Rastne napetosti v drevesu in lesu

*Growth stresses in trees and wood*

N. Torelli

## Izvleček:

Opisan je nastanek rastnih napetosti, njihov škodljiv vpliv v stoječem drevju in lesu. Razpravlja se o gozdnogojitvenih vidikih nastanka rastnih napetosti. Podane so podrobnosti o nastanku rež, srlnih in krožnih razpok in krhkega srca. Naštete so možnosti preprečevanja pokanja in veženja zaradi sproščanja rastnih napetosti.

**Ključne besede:** rastne napetosti, izvor, škodljivi učinki, gozdnogojitveni vidiki

## Abstract:

*A description is given of the origin of growth stresses, adverse effects in standing trees and wood. Silvicultural aspects are discussed. Details are given of the ethiology of end splits, heart and ring checks and brittle heart. Possibilities to prevent checking and warping due to the growth stresses relaxation are listed.*

**Key words:** *growth stresses, origin, adverse effects, silvicultural aspects*

Rastne napetosti nastajajo v kambiji coni in se vgrajujejo v les med rastjo. Manj izrazite so pri iglavcih (Jacobs 1945). Zaradi njih pomeni drevesno deblo prednapet nosilec. Deformacije, ki nastanejo zaradi sproščanja rastnih napetosti, so zelo majhne in jih izražamo v  $\mu\text{m}/\text{m}$  ( $10^{-6}$  m/m).

Kljub temu pa utegnejo biti učinki sproščanja rastnih napetosti zelo dramatični. Tako se pri razžaganju hloda s tračnim žagalnim strojem peri-

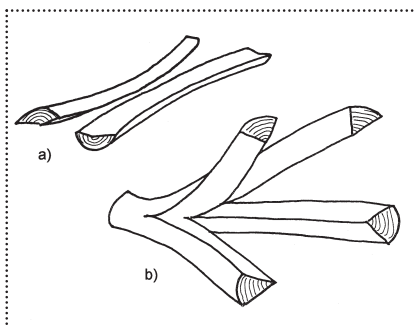
ferne deske sločijo navzven. Včasih se korenovec bukovega hloda razcepi kot bet pri gobi (angl. "mushrooming", slika 1 a, b, c).

Posledica rastnih napetosti so tudi čelne in srčne razpoke, vsaj delno pa tudi kolesivost oz. krožne razpoke. Radialne deske se lahko deformirajo v obliki sablje, tangencialne pa v obliki loka (kot doge, slika 2).

Večinoma pripisujejo te deformacije higroskopskemu krčenju in prečni krčitveni anizotropiji. Vendar pa krčenje nastopi šele, ko lesna vlažnost pade pod točko nasičenja celičnih sten (TNCS, FSP,  $U \approx 30\%$ ), deformacije zaradi sproščanja rastnih napetosti pa se pojavijo v svežem lesu, takoj po poseku in kasneje med razžaganjem (vzpostavitev novega ravnotežnega stanja).

Rastne napetosti nastanejo v kambiji coni v zadnji fazi diferenciacije vlaken. Tedaj se skušajo zreleča vlakna vzdolžno skrčiti in bočno razširiti. Starejšo, že diferencirano togo tkivo preprečuje vzdolžno krčenje novih diferencirajočih se celic, zato se v njih razvijejo vzdolžne natezne napetosti. Hkrati sosednje celice preprečujejo bočno razširitev celic, zato v novih celicah hkrati nastanejo še v tangencialni smeri delujoče tlačne napetosti. V novih celicah se uveljavijo napetosti šele tedaj, ko postanejo dovolj toge in elastične.

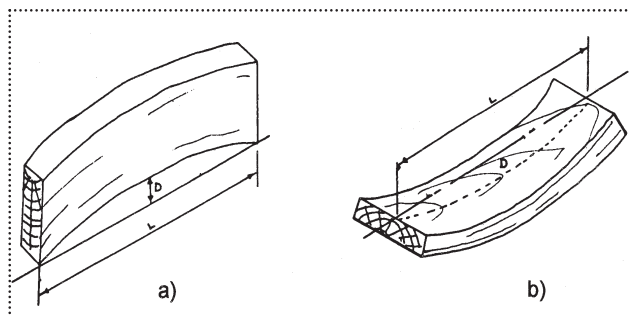
Glede mehanizma, ki povzroči vzdolžno krčenje vlaken in nastanek vzdolžne natezne napetosti, so mnenja deljena in izoblikovalo se je več hipotez.



Slika 1. (a) Navzven usločeni polovici vzdolžno prežaganega hloda (po Giordanu in Curru 1972 iz Kublerja 1987, str.75). (b) Močno razcepljeno deblo bukve (po Mayer-Wegelinu in Mammnu 1954 iz Kublerja 1987, str. 88).



Slika 1(c). Razklano bukovo deblo



Slika 2. Veženje zaradi rasti napetosti v obliki (a) "sablje" in (b) "loka"

### (a) Ligninska nabrekovalna hipoteza

Münch, ki je že pred drugo svetovno vojno preučeval tenzijski les, je menil, a odlaganje lignina med celulozne mikrofibrole povzroči prečno razširitev tenzijskih (želatinskih) vlaken. Zaradi spiralnega poteka fibril (Boyd 1985), naj bi prečna razširitev povzročila vzdolžno kontrakcijo. Iz istega vzroka se skrči vira vrv iz naravnih vlaken, če jo zmočimo. Hipoteza skuša pojasniti hkraten nastanek vzdolžne natezne in v tangencialni smeri delujoče tlačne napetosti v enem samem procesu. Hipoteza se zdi prepričljiva. Obodne (periferne) raste deformacije so zares odvisne od mikrofibrilarnega kota. Lignifikacija povzroči skrajšanje normalnih lesnih celic z majhnimi mikrofibrilarnimi koti, medtem ko se kompresijske traheide z velikimi mikrofibrilarnimi koti podaljšajo.

Za določitev deformacij se je Boyd poslužil Barber/Meylanovega modela (1964) za izračun krčitvenih razmerij celične stene v glavnih anatomskih smereh zaradi medsebojnega vpliva (interakcije) stenskega matriksa in v njem vključenih mikrofibril, odvisno od mikrofibrilarnega kota.

Dejanski skrček celične stene je odvisen od elastičnostnega modula oz. togosti mikrofibril in strižnega modula matriksa. Pri tem si je Boyd predstavljal, da ima z vidika deformacij lignifikacija obraten učinek kot oddajanje vezane vode pri higroskopskem krčenju. Z uporabo Barber/Meylanovega modela za anizotropno krčenje celične stene in ob domeni, da je razmerje med elastičnostnim modulom mikrofibril in strižnim modulom stenskega matriksa v normalnem lesu 50,

zaviralnega učinka celulozних mikrofibril. Deformacijsko razmerje v vzdolžni smeri je bilo pri mikrofibrilarnih kotih med 100 - 400 negativno (zmanjšanje dimenzij), pri večjih kotih pa pozitivno (povečanje dimenzij).

### (b) Hipoteza intruzivne rasti in vodnega stresa

Okuyama in Kikata (1981), ki sta merila sezonsko spreminjanje rasti napetosti, sta prišla do sklepa, da vzdolžne natezne napetosti niso posledica tangencialnega nabrekanja zaradi lignifikacije. Ugotovila sta, da sezonsko spreminjanje napetosti v vzdolžni in tangencialni smeri ne sovpadata. Menita, da je vzrok za vzdolžne natezne napetosti predvsem rast celičnih sten (rast celulozних mikrofibril) in ne sprememba prečne oblike celice. Tangencialno delujoče raste napetosti naj bi bile v zvezi z intruzivno rastjo celic in skrčkom debela zaradi tanjšanja vodnih stolpcev v času suše (Worrall 1966).

To posredno potrjuje tudi Malan (1979), ki je opazil, da pri evkaliptu (*E. grandis*) nastajajo čelne razpoke zlasti pri sečnji v času suše, ko se tla močno izsušijo. Če naj bi imela vodna tenzija pomembno vlogo pri vgraditvi rasti napetosti v les, potem lahko pričakujemo, da bodo raste napetosti večje pri tistem lesu, ki je nastajal v času izrazitih suš! Pri poseku drevja se vodna tenzija hipoma sprosti in lesno tkivo se razširi, seveda v skladu s svojo anizotropno naravo. Intruzivna rast je postkambialna rast vlaken. Vlakna po delitvi rastejo v dolžino in se pri tem vrivajo (vrivanje ali intruzija) druga med drugo.

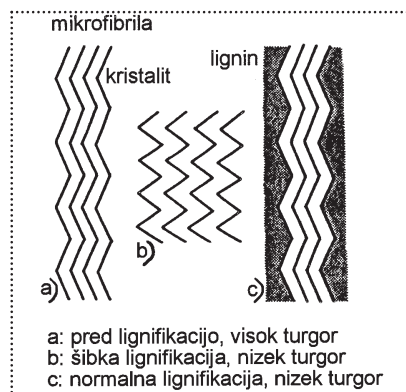
je Boyd izračunal "deformacijska razmerja" v vzdolžni in prečni smeri in v smeri debeline celične stene. Deformacijsko razmerje predstavlja delež deformacije, ki bi ga lahko pričakovali v matriksu v naštetih smereh, če ne bi bilo

Pri evlucijsko naprednejših vrstah znaša postkambialna rast vlaken tudi do 600 %. Pri iglavcih znaša postkambialna rast le do 15 %.

Morda so prav zaradi skromne postkambialne rasti raste napetosti pri iglavcih precej manjše kot pri listavcih.

### (c) Celulozna tenzijska hipoteza

Barber (1978, 1987) meni, da se celuloza v celični steni obnaša kot vzmet. Celulozne mikrofibrole naj bi se med razvojem celične stene raztegnile, verjetno zaradi turgorja, ki omogoča daljšanje vlaken. V celičnih stenah se tedaj razvijajo natezne napetosti. Krčenje raztegnjenih celulozних mikrofibril nadzoruje oz. zavira odlaganje lignina v celično steno. Skrček bo tem večji, čim manj lignina se vgradi v celično steno in obratno. Ekstremni primer so tenzijska vlakna. Že dlje časa je znano, da je elastičnost celic obratno sorazmerna s stopnjo njihove lignifikacije. Hipoteza je uporabna tudi za interpretacijo rasti napetosti pri zelnatih rastlinah.



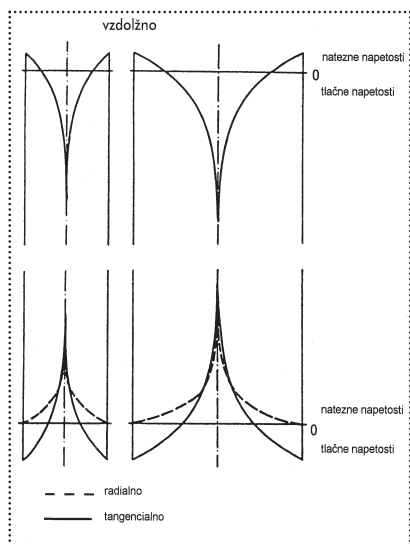
Slika 3. Model nastanka rasti napetosti v celični steni zaradi kontrakcije celuloze. (a) Visok turgor v razvijajoči se celici preprečuje kontrakcijo celuloze. (b) Šibka lignifikacija in padanje turgorja omogočita kontrakcijo celuloze. (c) Kljub padcu turgorja, odloženi lignin preprečuje kontrakcijo celuloze (Po Barberju 1987)

"Ligninska" in "celulozna" hipoteza se izključujeta, kar je med avtorjema sprožilo ognjevitvo razpravljanje.

### (č) Hipoteza medsebojnega vpliva vzdolžnih natezних napetosti v mikrofibriilah in prečnih tlačnih napetosti zaradi lignifikacije.

Okuyama, Yamamoto, Yoshida, Hat-

tori in Archer (1994) so ugotovili, da nastopijo močne natezne napetosti na zgornji strani nagnjenih debel listavcev, kjer je presek želatinskih slojev v tenzijskih vlaknih velik. Zaključili so, da tenzijska (želatinska) vlakna generirajo velike natezne napetosti. Nastale napetosti so tem večje, čim manjši je mikrofibrilarni kot, večja je vsebnost alfa-celuloze in čim večji je delež kristalizirane celuloze. Prav tako so ugotovili, da ni korelacije med nateznimi rastnimi napetostmi in lignifikacijo, oz. da je celo šibko negativna. Rezultati kažejo, da so velike vzdolžne natezne napetosti predvsem posledica nateznih napetosti celuloznih mikrofibril.

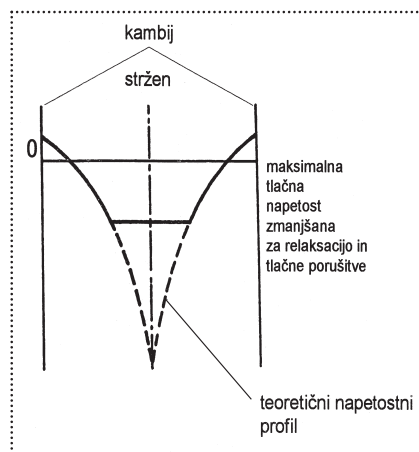


Slika 4. Razporeditev izračunanih vzdolžnih, tangencialnih in radialnih napetosti v tankem in debelem deblu (po Kublerju 1987, str. 74)

Lz razlogov, kot jih navajajo hipoteze, je periferija debela v vzdolžni smeri obremenjena na nateg, sredica pa na tlak, ki je tem večji, čim debelejša je deblo. Vsaka nova plast celic, ki jih tvori kambij, namreč poveča tlak v sredici debela. Napetostni gradient pri drobnejših deblih je mnogo večji kot pri debelejših (slika 4). Zato je veženje žaganic pri razžagovanju tanjših debel zelo močno.

Slika 5 prikazuje sproščanje napetosti po vzdolžnem razžagovanju radialne deske po Jacobsu (1945).

Pri debelih deblih utegnejo vzdolžne tlačne napetosti prekoračiti mejo proporcionalnosti (elastičnosti), pri čemer se celice deformirajo. Zaradi visokoe-



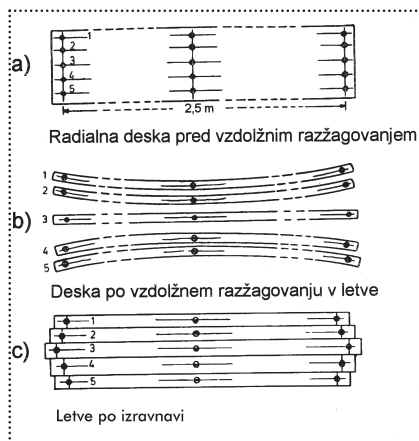
Slika 6. V debelem deblu so vzdolžne tlačne napetosti zaradi leženja in tlačnih porušitev precej manjše od izračunanih (po Boydu 1950 b)

lastične narave lesa, ki je v vlažnem lesu še posebej izrazita, se napetosti v sredici debela sčasoma zmanjšajo. Izmerjene napetosti so zato manjše od izračunanih (slika 6).

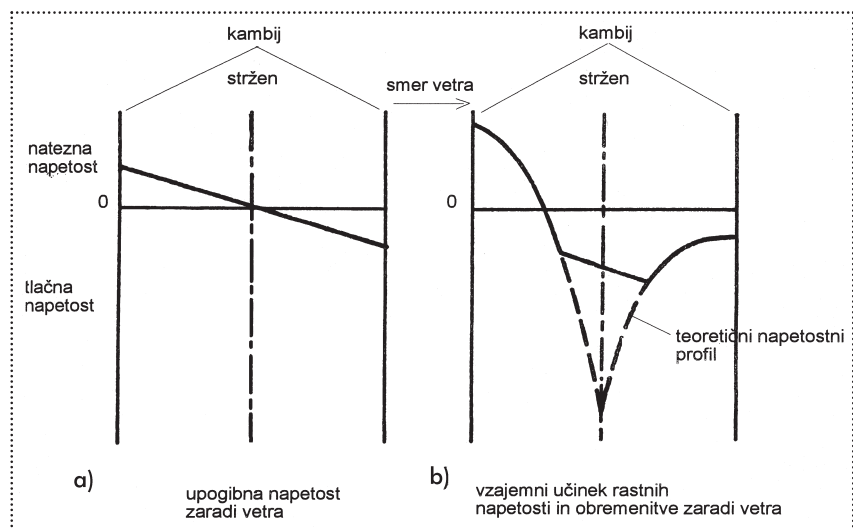
Slika 7 prikazuje vzajemni učinek rastnih napetosti in upogibnih napetosti zaradi vetra. Superimpozicija obeh napetosti povzroči povečanje nateznih napetosti na vetrni strani in tlačnih napetosti na odvetni strani.

V praksi ne merimo rastnih napetosti neposredno. Lažje je hlod razžagati in izmeriti deformacijo  $e$  in elastičnosti modul  $E$  ter ob predpostavki "enostavne" elastičnosti teorije izračunati napetost  $s$ , torej  $s = E \times e$ . Tehniko meritev sta razvila Boyd (1950a) in Nicholson (1971). Na hlodu ali drevesu odstranimo skorjo in v les zabijemo dve znački oz. žeblička (markerja), nato se natančno izmeri razdalja med njima. Z rezi v njuni bližini se sprostijo napetosti, nakar se ponovno izmeri razdalja med njima. Iz zmanjšanja ali povečanja razdalje lahko sklepamo na predznak vraslih rastnih napetosti. Napetosti lahko izračunamo tudi v laboratoriju, če povzročimo enako deformacijo in izmerimo napetost, ki je bila zanjo potrebna. Tako izračunane vzdolžne napetosti so bile pri listavcih med 7 in 14 MPa (Wilson & White 1986, str. 164).

V posebno hudih primerih je vzdolžna deformacija na periferiji debela reda 0,1 %. Seveda pa je deforma-



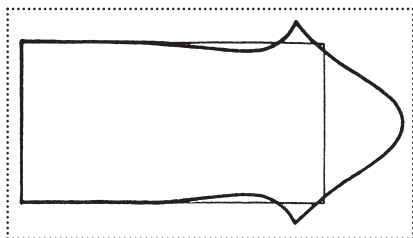
Slika 5. Deformacije letve zaradi sproščanja vzdolžnih nateznih tlačnih napetosti. (a) Načrt vzdolžnega razžaganja radialne deske. (b) Po razžagovanju so periferne letve skrčile in usločile navzven, notranje pa podaljšale. (c) Dolžine letve po izravnavi (po Jacobsu 1945)



Slika 7. Vzajemni učinek rastnih napetosti in napetosti zaradi učinka vetra

cija v debelni sredici zaradi lezenja manjša.

Na splošno so prečne rastne napetosti v povprečju 10 krat manjše od aksialnih. Ker pa je les v prečni smeri precej manj trden, so prečne deformacije precej večje od vzdolžnih (Kubler 1987, str. 76). Pri prežagovanju se periferni del debla nekoliko uskoči in zaradi Poissonovega učinka poveča površina preseka. Hkrati se podaljša debelna sredica. Prerez debla se konveksno izboči (slika 8).



Slika 8. prikazuje 400-kratno nadvišano deformacijo prečnega preseka hloda zaradi sproščanja vzdolžnih rastnih napetosti; prim. slika 4 (po Wilhelmyju in Kublerju 1973)

Sproščanje rastnih napetosti v prerezu se kaže zlasti v obliki srčnih razpok. Na periferiji je deblo v tangencialni smeri obremenjeno na tlak in v sredici na nateg. Nastajajo le v sredici debla, ki je v tangencialni smeri obremenjena na nateg. Pojavijo se vselej na lokaciji strženskih trakov (šibka mesta). Ker je periferija debla v tangencialni smeri obremenjena na tlak, srčne razpoke praviloma ne segajo do kambija.

Posledica rastnih napetosti so tudi deformacije tangencialnih desk v obliki loka in radialnih desk v obliki sablje navzven (slika 2) (koritavost tangencialnih desk je posledica anizotropnega higroskopskega krčenja). Kolesivost naj bi bila posledica sproščanja radialnih natezних napetosti, omogočilo pa naj bi jih šibko mesto, npr. parenhimska barierna cona v smislu Shigovega modelnega koncepta CO-DIT. Verjetna se zdi tudi hipoteza, da lahko krošne razpoke povzročijo vzajemni učinek radialnih prečnih napetosti in vzdolžnih strižnih napetosti, ki nastanejo v deblu, ki ga je upognil veter ali sneg (Panshin & de Zeeuw 1980, str. 296). Po tej logiki bi morale nastajati razpoke le v bližini strže-

na, kjer so radialne natezne napetosti največje, vendar to vselej ne drži. Tlačne sledi (angl. compression failure, nem. Stauchbruch ali Faserstauchung) so mikroskopske strižne porušitve prečno na celične osi, ki jih povzročajo dolgotrajne vzdolžne tlačne napetosti v debelih deblih. Te drobne drsne ravnine leže pod kotom 30 - 45 ° glede na osi in se širijo skozi stene sosednjih celic. Tvorijo linijo izrazite natezne šibkosti. "Sledi" so premajhne, da bi jih lahko opazili z navadnim svetlobnim mikroskopom, dobro pa se vidijo v polarizirani svetlobi.

Pri nekaterih listavcih so tlačne sledi tako številne, da nastane pojav, imenovan krhko srce (angl. brittle heart). Znano je krhko srce pri sambi (*Triplachiton scleroxylon* K. Schum) in pri okumeju (*Aucoumea klaineana* Pierre.). Vsekakor pa je krhko srce bolj razširjeno, kot smo doslej mislili. Panshin ga omenja tudi pri bukvi! (Finflay 1967).

Rastne napetosti so močnje izražene pri listavcih. Še posebej velike so pri rodovih *Eucalyptus*, *Fagus* in *Shorea*. Poseben primer je Gvajanska wapa (*Eperua* spp.), "Gvajanski eksplozivni les" (O.V. 1984). Pri podiranju sicer ravna debla te vrste hitro pokajo.

Nekaj podobnega sem opazoval tudi sam pri mehiškem chechem blancu (*Sebastiania* sp.), katerega deblo je takoj po poseku dobesečno razpadlo. Pri afriškem sipaju (*Entandrophragma utile*) so se pri zelo debelem hlotu hipoma sprostile aksialne tlačne napetosti. Tedaj se je sredica debla s premerom 20-30 cm hipoma podaljšala za 2-3 cm. Harzman (1988, str. 41) poroča, da so morali pri neki burmanski vrsti (*Dipterocarpus* sp.) prekiniti proces luščenja furnirja, ko je bil ostanek hloda debel med 40 in 60 ali celo 80 cm. Tedaj so začeli vpeti valji zaradi notranjih napetosti močno pokati.

Mariaux in Vitalis-Brun (cit. iz Harzman 1988, str. 41) sta pri wapi ugotovila tesno zvezo med številom tenzijskih želatinskih vlaken (tenzijski reakcijski les) in rastnimi napetostmi.

Kako preprečiti pokanje in veženje lesa? Načelno vsako razžagovanje pomeni sproščanje napetosti, ki ga lahko sledimo vse do mikroskopskega nivoja. K pokanju so manj nagnjene drevesne vrste z izmenično zavito rastjo. Škodljivo pokanje hlotov lahko preprečimo ali omejimo tudi tako, da na vsaki strani nameravanega prečnega reza uporabimo jeklene trakove. S kuhanjem in parjenjem je mogoče pospešeno relaksirati napetosti in tako zmanjšati veženje in pokanje med nadaljno predelavo. Nicholson (1973) poroča, da je mogoče z nekajmesečnim skladiščenjem hlotov v vodi ali s škropljenjem prav tako znatno zmanjšati napetosti.

Moderna gozdarska praksa skuša zmanjšati vgrajevanje rastnih napetosti med rastjo. Za bukev in evkalipte so ugotovili, da je z redčenjem mogoče zmanjšati rastne napetosti (Polge 1981, Malan 1979). Obstaja signifikantna negativna korelacija med dolžino krošnje in pojavom čelnih razpok pri hlotih. Dodajmo še, da je tudi verjetnost nastanka nezaželenega "rdečega srca" pri bukvah z daljšo krošnjo manjša.

Nicholson (1973) je za evkalipt ugotovil, da je mogoče zmanjšati rastne napetosti v stoječem (živem) drevju z omejevanjem rasti leto pred posekom. Opravljeni so bili poskusi z obročkanjem, zastrupljanjem in kemičnimi defoliantni. Izostanek dodatnih rastnih napetosti v sezoni pred posekom omogoča relaksacijo napetosti v drevesu za dve tretjini. Takšni postopki pa žal povečujejo možnost glivne infekcije in napada insektov.

Kot so rastne napetosti neprijetne za predelavo in rabo lesa, pa so za drevo z vidika preživetja zelo koristne. Deblo je trdnije, saj v bistvu pomeni prednapet nosilec. Drogovi iz celih debel, četudi mnogokrat zelo neugledno krivi, so zaradi vraslih napetosti praviloma bolj trdni od žaganih. Vzdolžne razpoke, ki nastanejo zaradi strele ali mraza, se kalusno lažje preraščajo ("mrazna rebra"), saj jih tlačne napetosti v tangencialni smeri stiskajo in ožijo. Tudi kirurg s šivanjem približa robova rane, da se hitreje zaceli.

Je že tako, da, kar je dobro za drevo, je mnogokrat slabo za lesarja...

Kogar tema bolj zanima, priporočam zlasti Archerjevo knjigo (1987) in zelo obširen Kublerjev pregled (1987).

## LITERATURA

Archer, R.R. 1987. Growth stresses and strains in trees. Springer Verlag, Berlin etc.

Bamber, R.K. 1978. Origin of growth stresses. *Forpride Digest* 8(1):75-90.

Bamber, R.K. 1987. The origin of growth stresses: a rebuttal.

Barber, N.F. & B.A. Meylan 1964. The anisotropic shrinkage of wood. *Holzforschung* 33:145-156.

Boyd, J.D. 1950a. Tree growth stresses I: Growth stress evaluation. *Australian Journal of Scientific Research, B (Biological Sciences)* 3(3):270-293.

Boyd, J.D. 1950b. Tree growth stresses II: The development of shakes and other visual failures in timber. *Australian Journal of Applied Science* 1:296-312.

Boyd, J.D. 1972. Tree growth stresses V: Evidence of an origin in differentiation and lignification. *Wood Science and Technology* 6(4):251-262.

Boyd, J.D. 1985. The key factor in growth stress generation in trees - lignification or crystallisation. *IAWA Bulletin* 6(2):139-150.

Findlay, W.P.K. 1967. Timber pests and diseases. Pergamon Press, New York.

Harzmann, L.J. Kurzer 1988. *Grundriß der allgemeinen Tropenholzkunde*. S. Hirzel Verlag; Leipzig.

Jacobs, M.R. 1945. The growth stresses of woody stems. *Commonw. For. Bur. Aust. Bull.* 28.

Kubler, H. 1987. Growth stresses in trees and related wood properties. *Forest Products Abstracts* 10 (3):61-119.

Malan, F.S. 1979. The control of end splitting in sawlogs: a short literature review. *South African Forestry Journal* 109:14-18.

Nicholson, J.E. 1971. A rapid method for estimating longitudinal stresses in logs. *Wood Science and Technology* 5:40-48.

Nicholson, J.E. 1973. Effect of storage on growth stresses in mountain ash logs and trees. *Australian Forestry* 36(2):114-124.

Okuyama, T. & Y. Kikata 1981. The generative process of the growth stress and residual stress. XVII IUFRO World Congress, Kyoto. Voluntary paper.

Okuyama, T., Yamamoto, H., Yoshida, M. Hattori, Y. & R.R. Acher 1994. *Annales des Sciences Forestieres* 51 (3):291-300.

Polge, H. 1982. Growth stresses in forest trees. *Comptes Rendus des Seances de l'Academie d'Agriculture de France* 68(17):1307-1316.

Wilhelmy, V. & H. Kubler 1973. Stresses and checks in log ends from relieved growth stresses. *Wood Science* 6(2):136-

Wilson, K. & D.J.B. White 1986. The anatomy of wood. Stobart & Son Ltd., London.

## ALI STE *vedeli*?

### Nelson in les

Vikont Horatio Nelson, baron Nilski, vojvoda Brontejski (1758-1805), britanski admiral, je padel smrtno zadet v znameniti pomorski bitki pri Trafalgarju 21. oktobra leta 1805. Tedaj je premagal francosko-špansko mornarico in zagotovil Veliki Britaniji gospodstvo na svetovnih morjih (649). Že zaradi zmage nad francoskim ladjevjem pri Abukirju (1. 8. 1798) je Nelson zelo zaslovel, zmaga nad Španci in Francozi pa mu je prinesla neverjetno popularnost in nesmrtno slavo. Če ste bili v Londonu, ste si prav gotovo ogledali eno največjih umetniških zbirk na svetu, Narodno galerijo (National Gallery) na Trafalgarskem trgu, kjer v sredini na zelo visokem granitnem stebru dominira Nelsonov spomenik. Ob stebru so štirje broneni levi, ki so jih vlili - kajpada - iz zaplenjenih francoskih kanonov.

Kaj pa les? V začetku 19. stol. (obdobje regentstva) sta umetniška mizarja Thomas Hope in George Smith oživila neoklasične in egiptovske stile. Priljubljen motiv so bili egiptovska sfiga, krilati lev, kosmata taca. Namesto rjavega mahagonija so se uveljavili palisander, satinski les in pozlata. Nelsonova smrt je Angleže močno prizadela. Vsa dežela se je zavila v črno. V znak žalovanja so izdelovali pohištvo obrobjeno s črno ebenovino, ki je predstavljala samosvoj žalni trak plemstva in bogatašev.

N. T.

