

UDK: 630.812

Les kot viskoelastičen material

Wood as a viscoelastic material

avtor **Niko TORELLI**, Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, 1000 Ljubljana

izvleček/Abstract

Predstavljen je oris viskoelastičnega lezenja in mehanosorptivnega obnašanja lesa. Podani so detajli modeliranja stacionarnega lezenja in deformacije v pogojih spremenljive vlažnosti.

An outline is presented of the viscoelastic creep and mechanosorptive behaviour in wood. Details are given of the modelling of steady-state creep and deformation under variable moisture content.

Ključne besede: les, viskoelastično lezenje, stacionarno lezenje, deformacije, mehanosorptivno obnašanje lesa

Keywords: wood, viscoelastic creep, steady-state creep, deformations, mechanosorptive behaviour of wood

Pojav

V prejšnjem prispevku (Torelli, N. 2002 Les 54:364-369) smo obravnavali les kot ortotropen linearno elastičen material. V praksi predstavlja časovna deformacija večinoma le neznaten del celotne deformacije in jo zato lahko zanemarimo. Tedaj je linearni elastični model povsem ustrezen. V resnici pa les poleg elastičnosti izkazuje še viskoznost in sodi skupaj z bitumnom, betonom in termoplastičnimi snovmi v skupino viskoelastičnih materialov (prim. npr. Dinwoodie 1994, 2000). Lastnost viskoelastičnosti nakazuje časovno odvisnost in se manifestira kot *lezenje, relaksacija (= popuščenje napetosti), dušenje in kot odvisnost trdnosti od časa obremenitve*.

Obremenimo les ali lesni kompozit s konstantno upogibno silo in opazujemo deformacijo kot funkcijo časa (slika 1)! V trenutku obremenitve se les deformira: elastična (ϵ_{el}). Ne da bi obremenitev oz. napetost stopnjevali, se deformacija s časom povečuje: *lezenje*. Pri nizkih napetostih lezenje pojema in deformacija po 2-3 letih doseže navidezno ravnovesje. Ob razbremenitvi se deformacija zmanjša približno za toliko, kolikor je znašala elastična deformacija v trenutku obremenitve. Lezna deformacija sestoji iz dveh delov: reverzibilnega v obliki *zadržane elastične deformacije* (ϵ_{zad}) in ireverzibil-

nega v obliki linearno naraščajoče *viskozne deformacije* (ϵ_{vis}). /Opomba: pri visokih napetostih se po določenem času lezna hitrost poveča (infleksija na lezni krivulji), čemur sledi neizogibna porušitev (prim. slika 9)!/

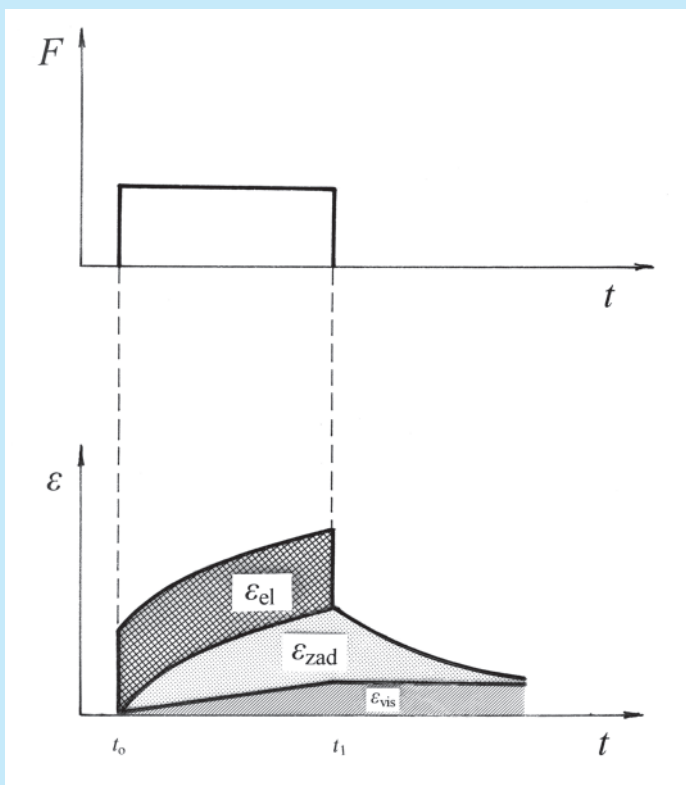
Poskus lahko zasnujemo tudi obratno (slika 2): hipoma obremenimo les in merimo silo oz. napetost, ki je potrebna za vzdrževanje konstantne deformacije. Potrebna sila in z njo napetost se s časom zmanjšuje: *popuščenje napetosti* ali *relaksacija*. Proces kvantificiramo kot relaksacijski modul:

$$M(t) = \frac{\text{napetost (var.)}}{\text{deformacija (konst.)}}$$

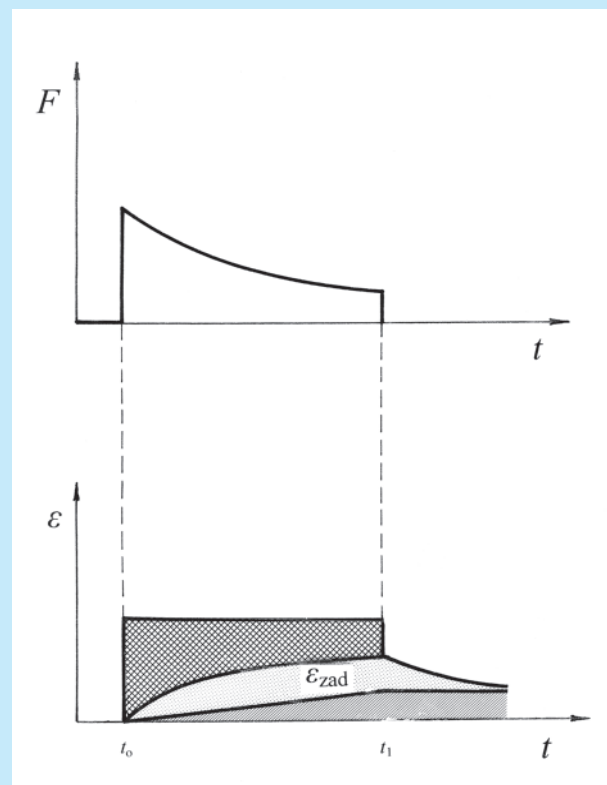
V času $t = 0$ sta relaksacijski modul in lezna podajnost v recipročnem razmerju.

Pri viskoelastičnih materialih teoretično določa prehod iz elastičnega v viskozno stanje *temperatura steklastega prehoda* T_g (angl. *glass transition temperature*). Steklast prehod je prehod iz viskoznega/plastičnega oz. gumskega stanja (angl. *rubbery state*) v steklasto ali krhko stanje (angl. *glassy state*). Značilen je za posamezne lesne sestavine in za les kot celoto.

V suhem stanju je temperatura steklastega prehoda T_g celuloze približno 230 °C, lignina 180 °C in polioz 200



□ Slika 1. Lezenje: komponente deformacije



□ Slika 2. Relaksacija: komponente deformacije

°C. Pri sobni temperaturi je les izrazito v steklastem (krhkem) stanju. Adsorbirana vlaga deluje kot mehčalec (plastifikator) in znižuje T_g . Ker je lignin manj higroskopen, vlaga nanj vpliva manj kot na celulozo in polioze. Pri vlažnosti točke nasičenja celičnih sten (U_{TNCS}) T_g celuloze in polioz pade pod sobno temperaturo, tako, da ima vlažen les nekaj sestavin, ki so v gumskem oz. plastičnem/viskozem stanju (slike 3, 4, 5, 6).

Deformacije, ki jih povzročata dinamično (časovno spremenljivo) obremenjevanje, so dušene. Pri vsiljenem nihanju se to manifestira kot fazni zamik med napetostjo in odzivom, pri lastnem nihanju pa kot eksponentno zmanjševanje amplitude odziva.

Lezenje

Lezenje lahko izrazimo z (a) *lezno podajnostjo* (angl. *creep compliance*) imenovano tudi *specifično lezenje*:

$$c_c(t) = \frac{\text{deformacija (var.)}}{\text{napetost (konst.)}}$$

ali (b) z *relativnim lezenjem* (c_r), imenovanim tudi *lezno število* (φ), t.j. kot delež začetne elastične deformacije (ϵ_0 , ϵ_{el}):

$$c_r(t) = \frac{\epsilon_t}{\epsilon_0} \text{ ali } \frac{\epsilon_t - \epsilon_0}{\epsilon_0} \text{ oz. } \varphi = \frac{\epsilon_e}{\epsilon_0}$$

Na splošno velja, da lahko relativno lezenje v pri zmerni obremenitvi v daljšem obdobju doseže vrednost 1,0, t.j. vrednost začetne elastične deformacije. Lezenje je anizotropno in je pravilom večje v prečni smeri in večje pri tlaku kot pri nategu.

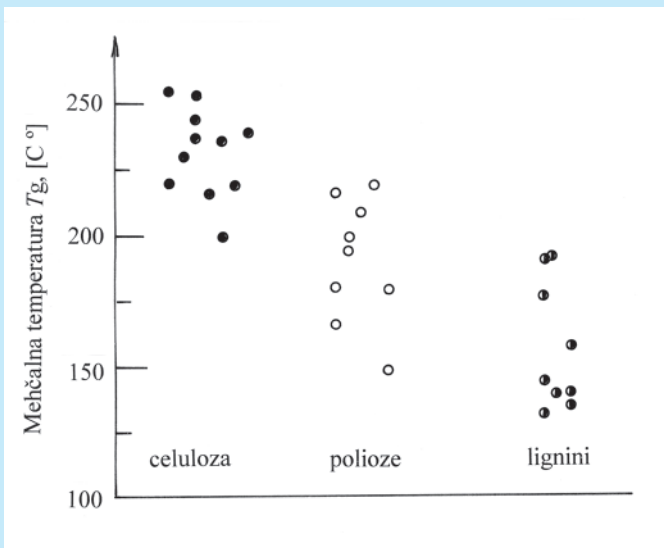
Relativno lezenje se lahko definira tudi kot sprememba podajnosti med testom glede na prvotno podajnost.

Princip superpozicije

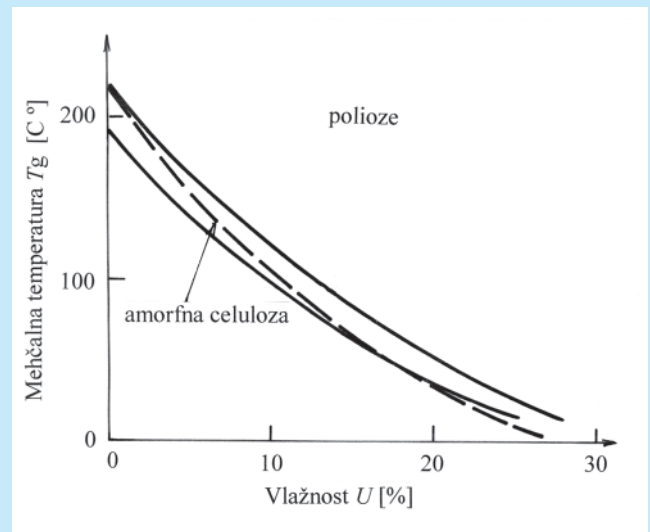
V določenih mejah lahko les obravnavamo kot linearno viskoelastičen material. Meja linearnosti zveze med lezenjem in napetostjo je odvisna od

vlačnosti, temperature in načina obremenjevanja. Pri osnem nategu (in konstantni vlažnosti ter temperaturi) se les obnaša kot linearen viskoelastičen material do pribl. 75 % natezne trdnosti (po nekaterih avtorjih v mejah 36-84 %), pri osnem tlaku do pribl. 70 % tlačne trdnosti, pri upogibu pa se linearnost konča med 56 in 60 % upogibne trdnosti (slika 8). Pri tlaku in upogibu je odklon od linearnosti navadno večji kot pri nategu. Velik del povečane deformacije pomeni ireverzibilno lezno komponento, ki jo spremljajo napredujoče zgradbene spremembe z začetkom porušitve. K zgodnejši nelinearnosti lahko bistveno prispeva še vlažnost in v manjši meri tudi temperatura.

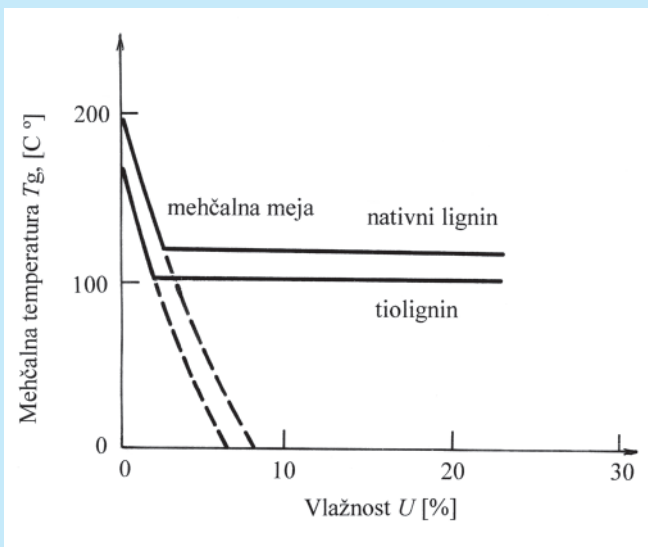
Ker se les v pogojih normalne temperature in vlažnosti ter nizke do zmerne napetosti obnaša kot linearno viskoelastičen material, je mogoče pri napovedi odziva lesa na kompleksna in podaljšana obremenitvena zaporedja



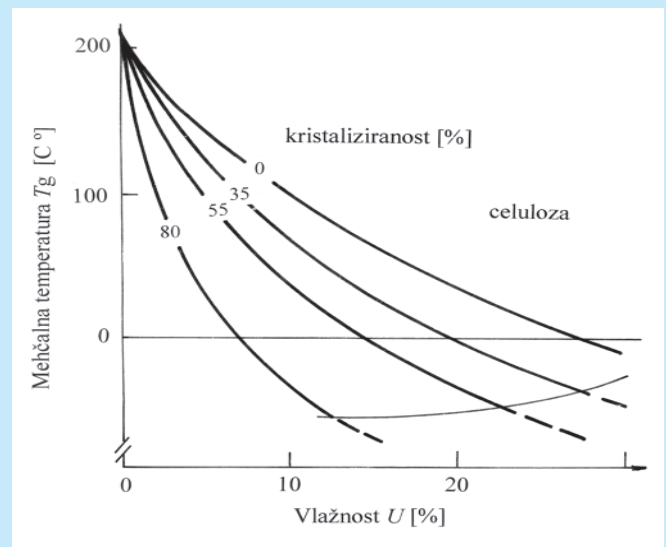
□ Slika 3. Temperatura steklastega prehoda T_g lesnih sestavin v absolutno suhem stanju (risba po Backu in Salménu 1982)



□ Slika 4. Vpliv vode na temperaturo steklastega prehoda T_g polioz. Primerjava s povsem amorfno celulozo (risba po Backu in Salménu 1982)



□ Slika 5. Vpliv vode na temperaturo steklastega prehoda T_g nativnega lignina in tiorignina (risba po Backu in Salménu 1982)



□ Slika 6. Vpliv vode na temperaturo steklastega prehoda T_g različno kristalizirane celuloze (risba po Backu in Salménu 1982)

uporabiti *Boltzmanov princip superpozicije*.

Lezenje, ki nastane v zaporedju napestostnih prirastkov, je mogoče interpretirati kot vsoto odzivov na posamezne prirastke (prim. npr. Dinwoodie 1994, 2000):

$$\epsilon_c(t) = \sum_{i=1}^n \Delta C_i C_{ci}$$

kjer je n število obremenitvenih prirastkov ...

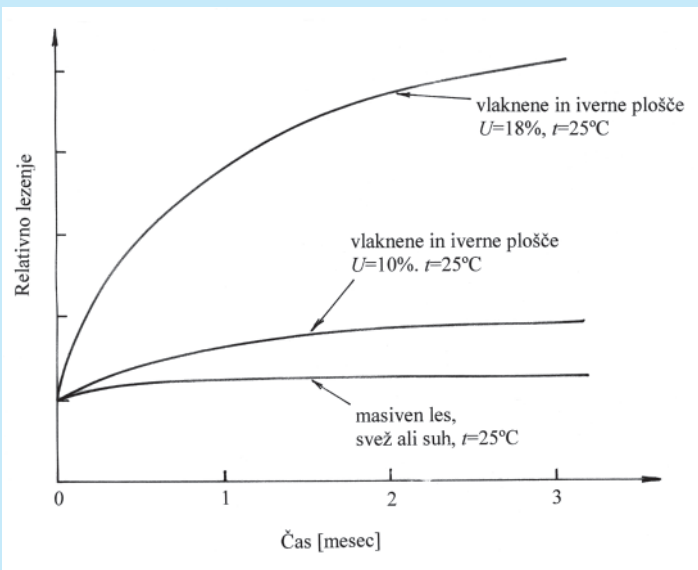
$$\epsilon_c(t) = \int_{\tau_1}^t C_c(t-\tau) \frac{d\sigma}{d\tau}(\tau) d\tau$$

Konstitutivne enačbe za lezenje

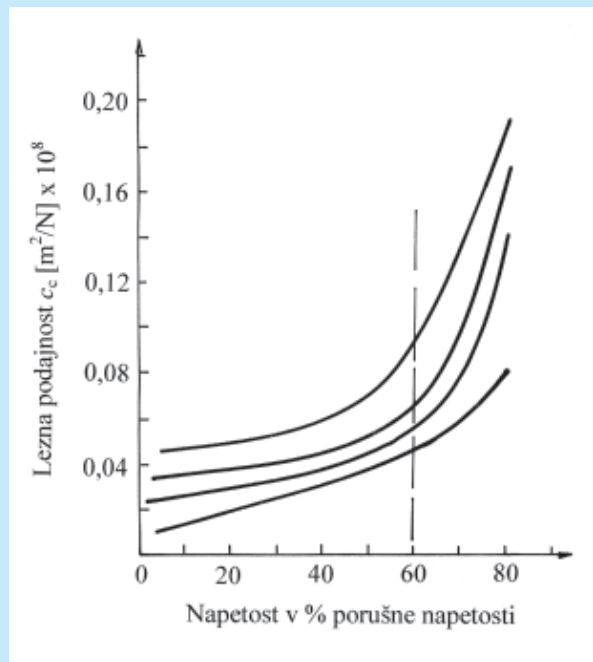
Konstitutivno enačbo za linearen anizotropen viskoelastičen material lahko

napišemo v obliki lezne podajnosti.

Podobno kot pri obravnavanju lesa kot elastične trdnine, je treba tudi tukaj krožno simetrijo razumeti kot ortotropno. To zmanjša 81 podajnosti v splošnem primeru na 36. Termodinamski razlogi omogočajo nadaljnjo redukcijo na 21 podajnostnih modulov in koincidenca med referenčnimi osmi



□ Slika 7. Relativno lezenje masivnega lesa, vlaknenih in ivernih plošč pri različnih vlažnosti (risba po Armstrongu 1985)



□ Slika 8. Zveza med celotno lezno podajnostjo in napetostjo, izraženo kot procent porušne napetosti za štiri avstralske lesne vrste (risba po Kingstonu in in Budgenu 1972)

in simetrijskimi osmi do končnih 9. Te je mogoče določiti eksperimentalno. Konstitutivna enačba v matrični obliki:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}(t) & S_{12}(t) & S_{13}(t) & 0 & 0 & 0 \\ S_{21}(t) & S_{22}(t) & S_{23}(t) & 0 & 0 & 0 \\ S_{31}(t) & S_{32}(t) & S_{33}(t) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44}(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55}(t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66}(t) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}$$

Za primer ravninskih napetostnih sistemov, ko se navadno zanemari zelo majhna deformacijska komponenta normalno na ravnino, velja:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1(t) \\ \varepsilon_2(t) \\ \varepsilon_{12}(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}(t) & S_{12}(t) & 0 \\ S_{21}(t) & S_{22}(t) & 0 \\ 0 & 0 & S_{66}(t) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}$$

Modeliranje viskoelastičnega lezenja

Lezenje v pogojih konstantne vlažnosti je mogoče izraziti matematično z najrazličnejšimi enačbami. Takšna izravnava je povsem empirična in nima nikakršne teoretične oz. stvarne osno-

ve. Primernost posamezne enačbe je odvisna od možnosti določitve konstant in ujemanja z eksperimentalnimi podatki.

Lezenje tipa "a" (slika 9) je za potrebe pohištvene statike mogoče zadovoljivo modelirati z eksponencialno funkcijo (Langendorf 1970, Langendorf et al. 1990):

$$\varphi_t = \varphi(1 - e^{-kt})$$

kjer je φ dodatna časovna deformacija, φ in k pa materialna parametra, ki ju je treba določiti eksperimentalno (preglednica 1). Z uvedbo φ se je mogoče navezati na Hookeov zakon:

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\varphi \sigma}{E_0}$$

Celoten upogib znaša (slika 9):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\varphi \sigma}{E_0} = \frac{\sigma}{E_0}(1 + \varphi)$$

V starejših publikacijah najdemo izraz lezna mera $\alpha_k = \varphi/E$ (v cm^2/kp).

Če označimo elastični modul v trenutku obremenitve $t=0$ z E_0 in po končanem lezenju z E_φ , potem velja

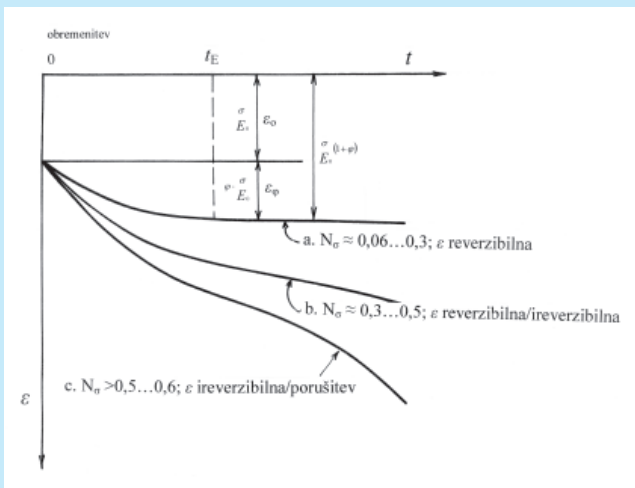
$$E_\varphi = \frac{E_0}{1 + \varphi}$$

in

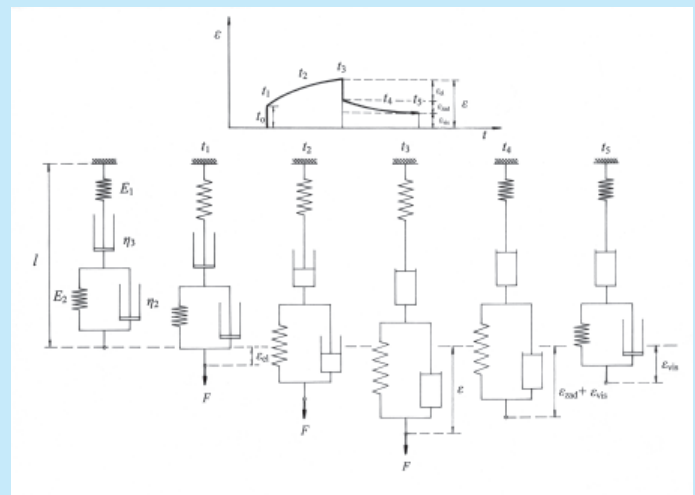
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_\varphi}$$

Reološka interpretacija viskoelastičnega lezenja

Tako kot pri drugih viskopolimernih snoveh, je mogoče tudi reološko obnašanje lesa in lesnih tvoriv interpretirati z mehanskimi oz. reološkimi telesi (npr. Muršič 1973), Prelog 1973). Hookeovo telo (H) v obliki cilindrične vijačne vzmeti, se obnaša idealno elastično. Newtonovo telo (N) v obliki dušilnika predstavlja tekočnost (fluidnost). (c) V Kelvinovem (Voigtovem) telesu (reološka enačba $\mathbf{K}=\mathbf{H}|\mathbf{N}$) sta vzporedno vezana Hoo-



□ Slika 9. Pojavne oblike upogibnega lezenja za različna razmerja med upogibno in porušno upogibno napetostjo ($N_{\sigma} = \sigma_b / \sigma_{bb}$) z elementi izračuna lezenja za tip (a; $N_{\sigma} \approx 0,06 \dots 0,3$) (spremenjeno po Langendorfu et al. 1990)



□ Slika 10. Lezenje ponazorjeno z Burgersovim telesom. Vzmeti (Hookeova telesa) simulirajo elastično deformacijo, dušilniki (Newtonova telesa) pa viskozno tečenje

keovo in Newtonovo telo. V njem se odvijajo enako velike elastične in viskozne deformacije. Ponazarja zadržano elastičnost. Maxwellovo telo (tekočina) ($M=H \cdot N$) sestoji iz zaporedno vezanega Hookeovega in Newtonovega telesa.

Najenostavnejši linearni model, ki zadovoljivo simulira časovno obnašanje lesa pri konstantni vlažnosti in temperaturi ter kratkotrajni obremenitvi, je štiri-parametrski Burgersov model viskoelastične tekočine s časovno odvisno deformacijo (slika 10). Predstavlja zaporedno vezan Maxwellov model viskoelastične tekočine in Kelvinov (Voigtov) model viskoelastičnega telesa. Deformacija v času t in konstantni obremenitvi je podana z enačbo:

$$\epsilon(t) \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{t E_2}{\eta_1}} \right) + \frac{\sigma t}{\eta_3}$$

kjer je $\epsilon(t)$ deformacija v času t , E_1 elastičnostni modul vzmeti 1, E_2 elastičnostni modul vzmeti 2, η_3 viskoznost dušilca 3 in $\tau_2 = \eta_2 / E_2 =$ viskoz-

nost dušilca 2/elastičnostni modul vzmeti 2. Prvi izraz pomeni elastično deformacijo, drugi časovno odvisno deformacijo in tretji viskozno deformacijo.

Reološki modeli so smiselni le tedaj, če obstaja zadovoljivo ujemanje. Večinoma pa nudijo empirično izvedeni približki enostavnejše rešitve.

Reverzibilna in ireverzibilna komponenta lezenja

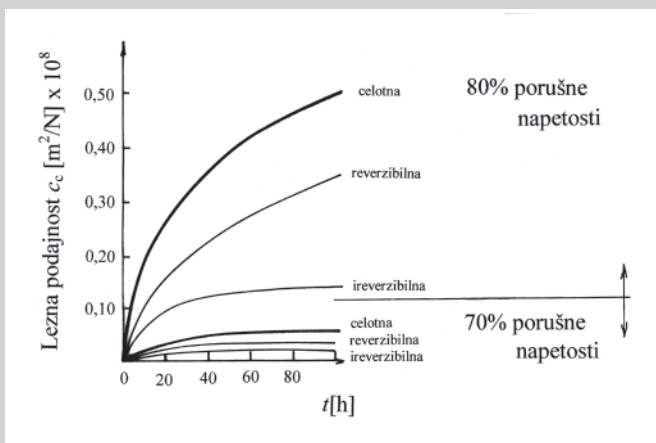
Lezenje je mogoče razdeliti v reverzibilno in ireverzibilno komponento (prim. sliko 1). Slika 11 prikazuje deleže reverzibilne in ireverzibilne lezne podajnosti borovine. Pri napeto-

sti velikosti 70 % porušne napetosti predstavlja ireverzibilna lezna podajnost po daljšem času 45 % celotne lezne podajnosti, pri 80 % pa kar 70 %. Povišana vlažnost in temperatura prav tako povečata delež ireverzibilne lezne podajnosti. Reverzibilno lezenje označujemo kot primarno lezenje, ireverzibilnega pa kot sekundarnega.

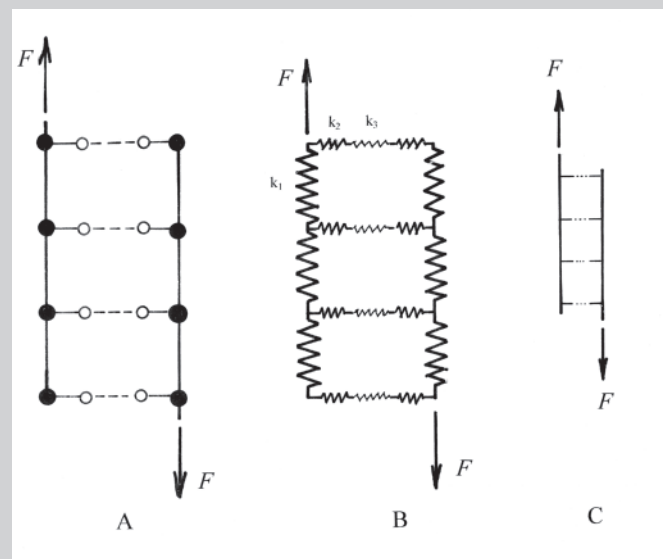
Začetno trenutno elastično deformacijo ter reverzibilno primarno in ireverzibilno sekundarno lezenje je mogoče načelno pojasniti s posebnostmi molekulske zgradbe lesa. Zelo poenostavljeno si lahko supermolekularni delec celične stene predstavljamo v obliki

□ Preglednica 1. Viskoelastične značnice lesa in lesnih tvoriv (Langendorf 1970, Langendorf et al. 1990)

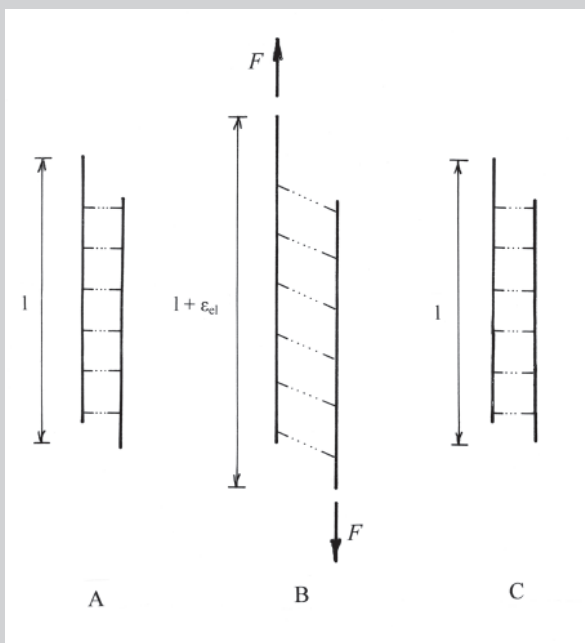
Les/lesno tvorivo	E_0 (GPa)	Lezni čas t (teden)	ϕ	k	E_{ϕ} (GPa)
Masivni les iglavcev	9,5	4...6	0,45	0,7	6,55
Mizarska plošča, furnirana	5,0	6...8	0,50	0,5	3,30
Iverna plošča, furnirana	4,5	11...13	0,53	0,3	2,90
Iverna plošča s folijo	2,8	11...13	0,55	0,3	1,80
Iverna plošča, surova	2,4	11...13	0,64	0,3	1,45
MDF, furnirana	3,6	13...16	0,53	0,28	2,35
MDF s folijo	2,3	13...16	0,58	0,28	1,45
MDF, surova	2,0	13...16	0,67	0,28	1,20



□ Slika 11. Delež reverzibilnih in nereverzibilnih leznih podajnosti pri napetosti velikosti 70 % oz. 80 % porušne napetosti pri boru (risba po Kingstonu in Budgenu 1972)



□ Slika 12. Dvodimenzionalni molekularni model celične stene: (A) shematski prikaz, (B) model z vezi, (C) poenostavljen diagram



□ Slika 13. Shematski prikaz deformacije elastičnih vezi: (A) neobremenjeno stanje, (B) elastična deformacija, (C) stanje po razbremenitvi

dvodimenzionalne molekularne mreže (slika 12). Polni krogi predstavljajo monomere, prazni, stranske verige in prekinjene linije sekundarne vezi (pretežno vodikova vez). Elastične deformacije ni težko pojasniti. Zaradi elastične narave vezi je mogoče strukturo modelirati z vzmetmi različnih prožnostnih konstant (k) (slika 12/A). V

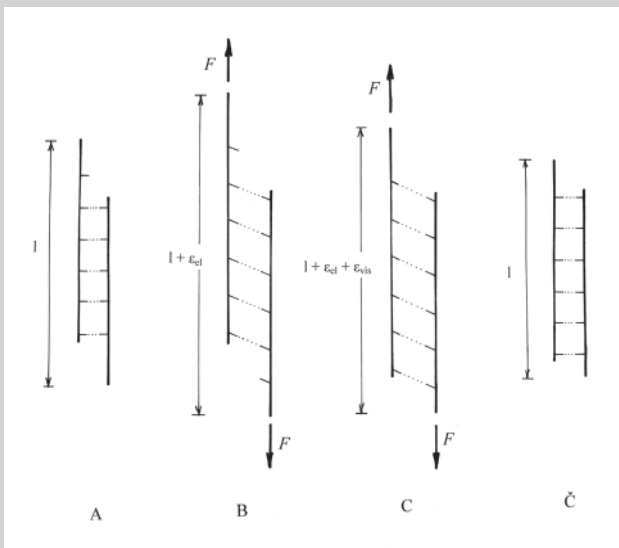
neobremenjenem stanju je dolžina stenskega elementa l in v obremenjenem stanju $l + \epsilon_{el}$. Zaradi elastičnosti kemičnih vezi sistem po razbremenitvi zavzame prvotno dolžino (slika 13).

Viskozno ali sekundarno lezenje pripisujejo bodisi časovnim spremembam aktivnega števila vodikovih vezi ali pa prekinjanju in ponovnem vzpostavljanju sekundarnih vezi med difuzijo

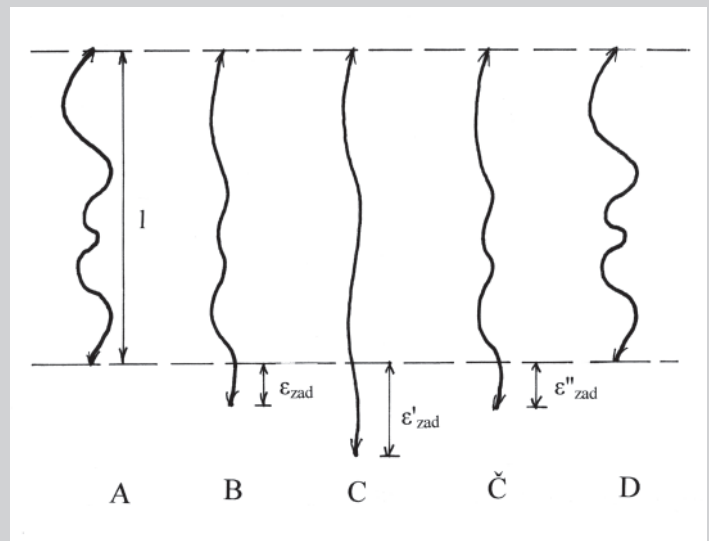
vlage (Gibson 1965, slika 14). Difuzija utegne biti neposredna posledica nastalih napetosti v lesu. Že Barkas (1945, 1949) je ugotovil, da hidrostatski tlak pri danem parnem tlaku ravnovesno vlažnost znižuje, medtem ko jo natezna napetost zvišuje. Difuzijsko gibanje vode bi tako utegnilo potekati postopo-

ma od enega adsorpcijskega mesta k drugemu ob hkratnem prekinjanju in ponovnem vzpostavljanju vodikove vezi. Zaradi “zdrsov” molekul se zmanjša trdnost lesa. Čeprav se zdi hipoteza molekularnih “zdrsov” zelo vabljiva, je lahko viskozno lezenje tudi posledica nastanka drsnih ravnin v celični steni, kot jih pri tlačni in upogibni obremenitvi predpostavljata Hoffmeyer in Davidson (1989, slika 23!). Boyd (1982) pojasnjuje viskozno lezenje v skladu s svojo predstavo o zgradbi celične stene iz mikrofibril z lečastimi vključki lignina in matriksnega materiala med njimi (prim. slika 19, glej dalje!). Odvisno od vrste obremenitve se mikrofibrilne zanke razširijo (tlak) ali zožijo (nateg) in povzročijo viskozno tečenje matriksnega materiala med njimi (slika 20, glej dalje!).

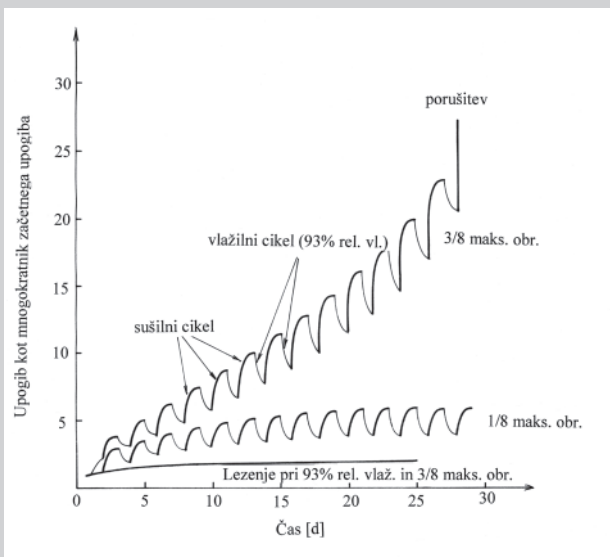
Časovno odvisna deformacija je bolj skrivnostna in naj bi bila po najenostavnejši interpretaciji posledica razvijanja in ponovnega zvijanja prvotno “nakodranih” molekul (slika 15). V neobremenjenem stanju polimeri zavzamejo obliko, ki “maksimira slučajnostni



□ Slika 14. Shematski prikaz viskoznega tečenja: (A) neobremenjeno stanje, (B) elastična deformacija, (C) trganje vezi, (D) novo nastale vezi



□ Slika 15. Shematski prikaz časovno odvisne deformacije polimerne verige: (A) neobremenjeno stanje, (B) zgodnja faza deformiranja, (C) maksimalna raztegnitev, (Č) zgodnja faza po razbremenitvi, (D) vzpostavitev prvotnega stanja oz. oblike (slike 10, 11, 12, 13 risbe po Bodigu in Jayneu 1982)



□ Slika 16. Upogib kot mnogokratnik začetnega upogiba za bukove nosilce 2x2x60 mm. Spodaj viskoelastično lezenje pri konstantni rel. zračni vlažnosti $f = 93\%$ in obremenitvi velikosti $3/8$ porušne obremenitve. V sredini in zgoraj mehanosorptivno lezenje v oscilirajoči zračni vlažnosti in pri obremenitvah velikosti $1/8$ in $3/8$ porušne obremenitve (slika po Hearmonu in Patonu 1964)

razpored in minimizira njihovo prosto energijo”(Bodig & Jayne 1982). Dolžina obremenjenega polimera se poveča na $l + u_{zad}$.

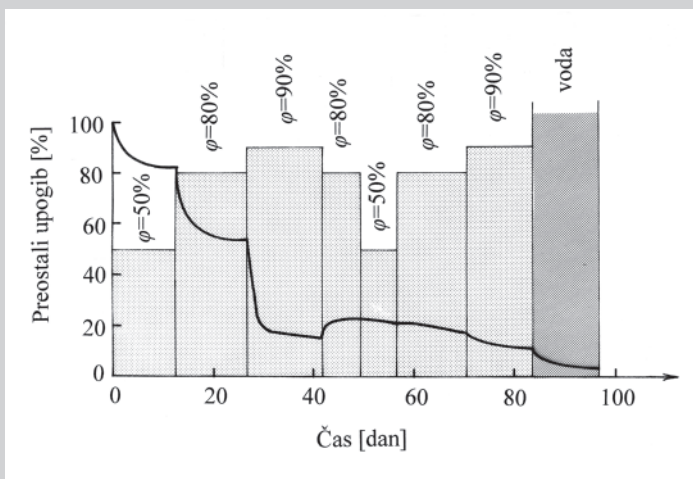
Zaradi tesne vzdolžne povezave molekul različnih sestavin v amorfnih regijah, si je težko predstavljati, da bi “raz-

Spremembo dolžine spremlja modifikacija molekularnih sil F' . Med raztegovanjem postanejo molekule bolj toge in časovno odvisna deformacija postaja vse manjša. Po razbremenitvi se polimer povrne v slučajnostno nizko energijsko stanje, pri čemer je vračanje zaradi pravkar nastalih sekundarnih vezi in prepletanja z drugimi molekulami zadržano oz. zapoznelo.

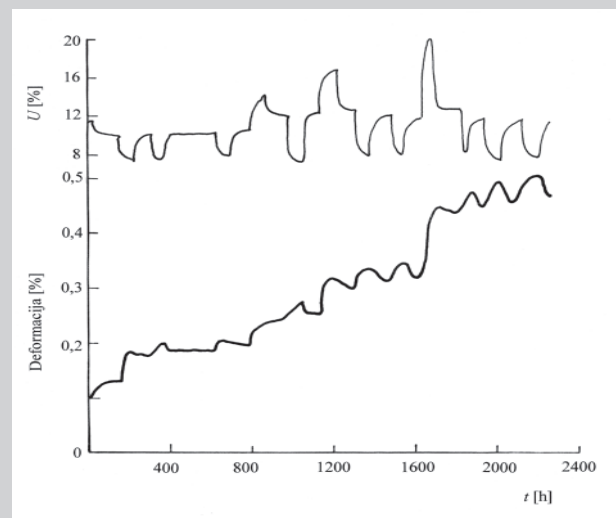
motavanje” polimerov bistveno prispevalo k časovni odvisni deformaciji (Dinwoodie 2000).

Chow (1973), ki je opazoval časovna molekulska gibanja s tehniko infrardeče polarizacije, je skušal pojasniti reverzibilno lezenje s časovnim dvostopenjskim molekulskim gibanjem celuloze, polioz in lignina. Način molekulskega gibanja vsake komponente je odvisen od gibanja ostalih. Izkazalo se je, da razlika v gibanju lignina in neligninskih molekul v določeni smeri povzroči znatno molekulsko interferenco, tako da se lahko med obremenitvijo nastale napetosti prenesejo z ene komponente (lezni matriks) na drugo (pripojena struktura, ki pa ne leze). Lignin utegne pri tem imeti vlogo energijskega ponora, ki zadržuje in nadzoruje kopičenje energije pridobljene med obremenjevanjem.

Lezenje v pogojih spremenljive vlažnosti - mehanosorptivna deformacija



□ Slika 17. Lezni upogib bukavih vzorcev obremenjenih na nateg pri menjavajoči se lesni vlažnosti. Glej različni odziv na povišano vlažnost! (Risba po Huntu 1982)



□ Slika 18. Reverzibilnost viskoelastične in mehanosorptivne lezne deformacije, nastalih med obremenitvijo po zaporedju vlažnostnih sprememb (risba po Arimi in Grossmanu 1978)

Lezenje, ki ga spremlja sorpcija lahko doseže nekajkrat večje vrednosti od lezenja pri konstantni vlažnosti. To se dogaja pri sušenju obremenjenega vlažnega (svežega) nosilca. Lezenje je zlasti intenzivno v pogojih ciklične (oscilirajoče) vlažnosti (slika 16). Primer na sliki velja za zelo drobne nosilce s presekom 2 x 2 mm, pri katerih poteka sorpcija po celotni globini. Pri debelejših nosilcih nihanje relativne zračne vlažnosti vpliva le na vlaženje in sušenje površinskih slojev, zato ni kritično. Pojav sta prva opisala Armstrong in Kingston (1960). Kasneje ga je Grossman (1976) poimenoval "mehanosorptivno lezenje".

Velikokrat sem si ogledoval ohranjene črnjavske čikozapotejeve preklade (*Manilkara zapota*) nad portali majevskih svetišč. Čeprav z goro kamenja nad njimi, so praktično brez povosov (Maji niso poznali pravega oboka!). Očitno so jih vgrajevali zračno suhe in dovolj debele, da so preprečili večje lezenje in mehanosorptivno deformacijo.

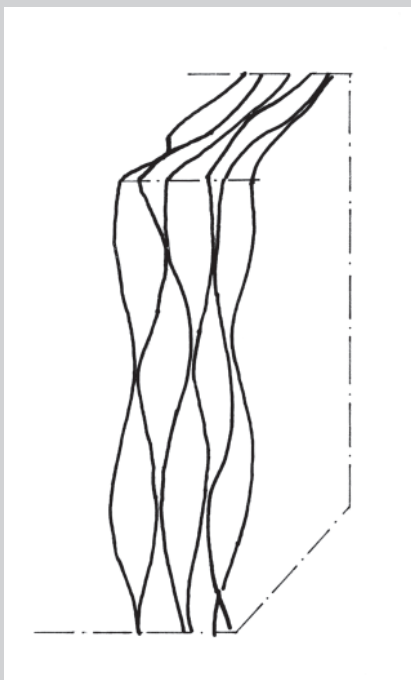
Lezenje v pogojih spreminjanja vlažnosti je nenavadno. Kot je razvidno iz

slike 16, se lezenje, razen na začetku, med sušilnim ciklom poveča in zmanjša med vlažilnim. Doslej še niso pojasnili zmanjšanja upogiba med procesom adsorpcije, čeprav potrebna energija najverjetneje izvira iz adsorpcijske toplote. Neto sprememba ob koncu cikla vlaženja in sušenja naj bi bila posledica prerazdelitve vodikove vezi, ki se kaže v povečanju deformacije obremenjenega vzorca (Gibson 1965).

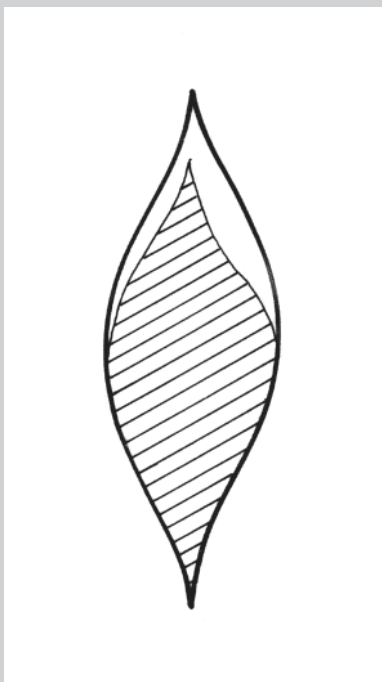
Zanimivo je, da na velikost lezenja vpliva velikost in hitrost spremembe vlažnosti, prav malo pa trajanje spremembe in ali je bila sprememba realizirana v enem ali več "korakih" (Armstrong & Kingston 1962). Kasneje se je izkazalo, da je zveza med lezenjem v pogojih spreminjajoče se klime še bolj kompleksna kot je sprva kazalo (Hunt 1982) (slika 17). Pokazalo se je, da se ob začetni spremembi vlažnosti lezenje vselej poveča, najsi gre za adsorpcijo ali desorpcijo. Prav tako se poveča lezenje pri vsakem povečanju lesne vlažnosti, ki presega najvišjo predhodno vrednost (značilni trije piki na sliki!).

Že prej se je izkazalo (Arima & Grossman 1978), da je deformacija skoraj povsem reverzibilna. Avtorja sta upogibno obremenila sveže borove vzorce z napetostjo velikosti 25 % porušne napetosti. V upognjenem stanju z oporo, so se vzorci sušili 15 dni. Nato sta odstranila oporo in izmerila začetno zmanjšanje deformacije. Sproščene sušene vzorce sta nato izpostavila zaporedju relativnih zračnih vlažnosti in jih slednjič potopila v vodo (slika 18). Pri tem je prišlo skoraj do skoraj popolnega izničenja deformacije!

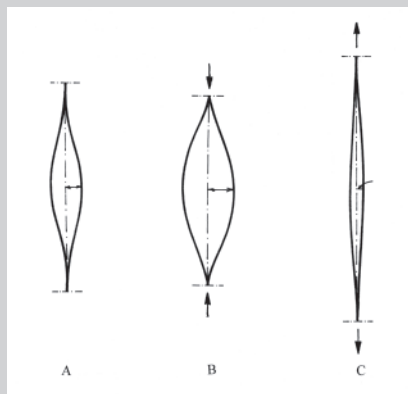
S preučevanjem mehanosorptivnega odziva upogibno obremenjenih vzorcev (10 x 5 x 200 mm), izdelanih iz juvenilnega, kompresijskega in adultnega lesa smrekovine, sta se ukvarjala tudi Houška in Bučar (1995, 1996). Njun pristop k proučevanju mehanosorptivnega obnašanja oziroma odziva orientiranega lesnega tkiva je nedvomno zelo originalen. Rezultati, ki jih navajata, so zelo zanimivi in v marsičem tudi presenetljivi, saj kažejo na to, da je splošno znano oziroma "tipično" mehanosorptivno obnašanje značilno



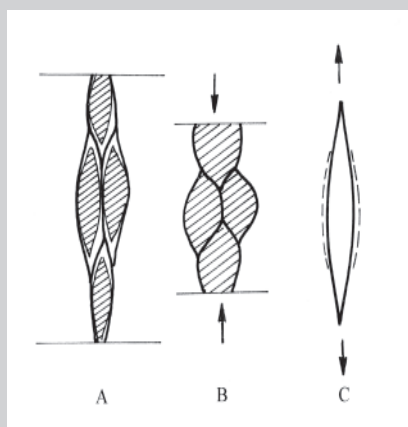
□ Slika 19. Razpored mikrofibril v celični steni z lečastimi ligninskimi in matriksnimi vključki med njimi po Scallanu (1974) in Boydu in Fosterju (1975) (zelo poenostavljena risba po navedenih avtorjih)



□ Slika 21. Učinek izsušitve matriksnega materiala med mikrofibrilama (risba po Boydu 1982)



□ Slika 20. Učinek osne napetosti na konfiguracijo mikrofibril med veznimi pozicijami: (A) neobremenjeno stanje, (B) razmik zaradi tlaka, (C) zoženje zaradi natega (risba po Boydu 1982)



□ Slika 22. Vzajemen učinek spremembe vlažnosti in tlaka oz. natega na konfiguracijo mikrofibril. (A) učinek zaradi izgube vlažnosti v neobremenjenem stanju, (B) izsušitev, ki je sledi tlačna obremenitev in ponovno vlaženje, (C) učinek izsušitve in natezne obremenitve (risba po Boydu 1982)

zgoj za adulten les. Mehanosorptivni odziv vzorcev izdelanih iz kompresijskega lesa je bil namreč popolnoma nasproten. Gre za prvo tovrstno raziskavo, v kateri sta avtorja poskusila razložiti mehanosorptivni fenomen na osnovi signifikantno različnega odziva vzorcev izdelanih iz anatomsko in tehnološko različnega orientiranega lesnega tkiva. Raziskave so še vedno v teku, zadnji rezultati pa kažejo na to, da je mehanosorptivni efekt najverjetneje posledica prečnega nabrekovalnega učinka, ki generira dodatne natezne napetosti v aksialni smeri mehansko obremenjenega tkiva (Bučar 2003).

Dejstvo, da je mehanosorptivna deformacija pogojena prvenstveno z velikostjo vlažnostne spremembe in da je reverzibilna, daje misliti, da ne gre za pravo lezenje. Zato je treba ločiti viskoelastično lezenje od mehanosorptivne deformacije, ki pa običajno nastopata sočasno (izraz "mekhanosorptivno" je uvedel Grossman (1976)). Spremembo vlažnosti spremlja tudi krčenje oz. nabrekanje. Celotna deformacija je potemtakem

$$\epsilon_m = \epsilon_{vc} + \epsilon_{ms} + \epsilon_s \text{ in } \epsilon_{ms} = \epsilon_m - (\epsilon_{vc} + \epsilon_s)$$

kjer je ϵ_{ms} mehanosorptivna deformacija in ϵ_s nabrek ali skrček ter ϵ_{vc} viskoelastično lezenje.

Modeliranje mehanosorptivne deformacije

Boyd (1982) je skušal pojasniti mehanosorptivno obnašanje s posebnostmi zgradbe celične stene z valovitim razporedom mikrofibril in lečastimi matriksnimi vključki med njimi, kot sta ga pred tem na osnovi Scallanove predstave (1974) opisala s Fosterjem (Boyd & Foster 1975).

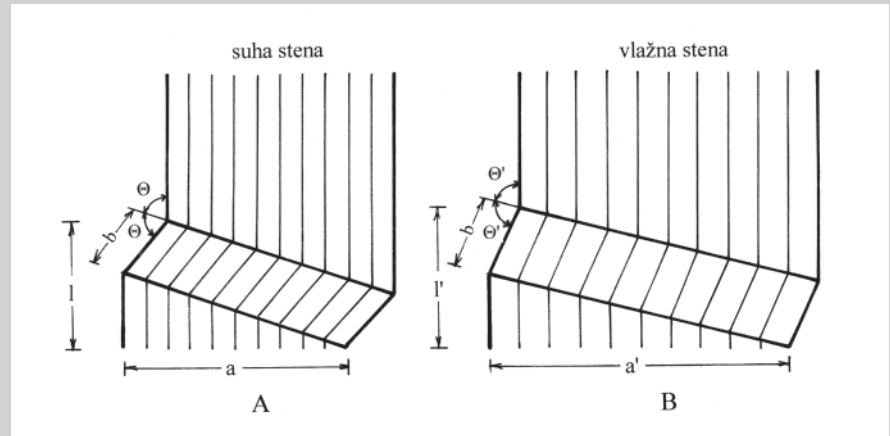
Boyd (1982) pojasnjuje mehanosorptivno lezenje s fizičnimi interakcijami med mikrofibrilami in matriksom.

Slika 19 prikazuje Boydovo in Fosterjevo (1975) predstavo zgradbe celične stene, ki je zelo podobna Scallanovi (1974). Med lokasto usločenimi mikrofibrilami so lečasti vključki matriksa z lastnostmi hidrofilnega gela.

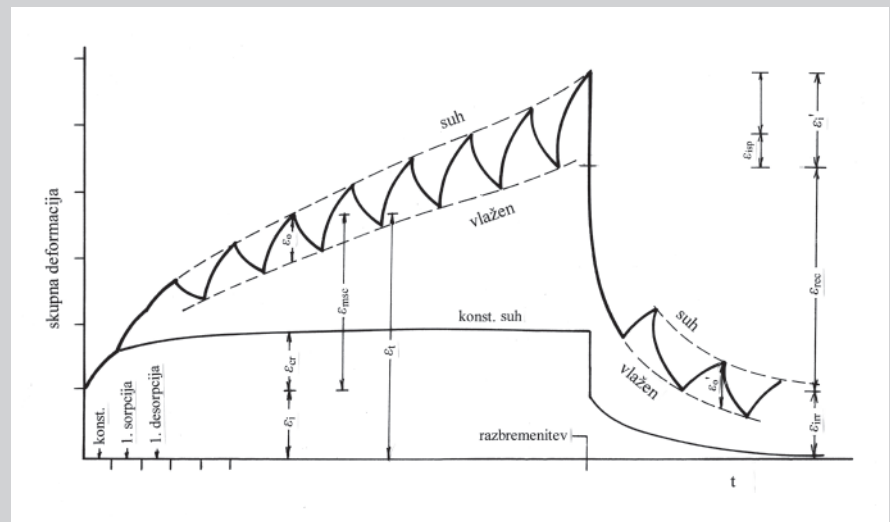
Pri sušenju celične stene se matriksni vključek skrči (slika 21). Obremenjene mikrofibrile sledijo krčočemu se matriksu, se pri tem močno deformirajo in pritiskajo nanj. To povzroči viskoelastično lezjenje matriksa, ki se vselej pojavi med mehanosorptivnim lezjenjem. Ne glede na vrsto obremenitve, sušenje pod obremenitvijo povzroči zmanjšanje dimenzij (prim. sliko 20). Z vlaženjem matriks nabrekne. Nabrekovalni tlak matriksa potisne mikrofibrile v prvotni položaj.

Hoffmeyer in Davidson (1989) sta predlagala model, s katerim sta skušala pojasniti mehanosorptivno obnašanje lesa zmerno ali močno obremenjenega na tlak in upogib aksialno. Njuna razlaga temelji na tvorbi *drsni ravni* (angl. *slip planes*) v celični steni. Drсне ravnine naj bi nastale zaradi prekinjanja vodikove vezi med spremembo vlažnosti. Število drsni ravni je sorazmerno z velikostjo spremembe vlažnosti. Aksialni skrček in nabrek je sorazmeren številu drsni ravni. "Dramatična" sprememba orientacije mikrofibril v coni drsne ravni poveča vzdolžno krčenje/nabrekanje in zmanjša elastični modul. Drsne ravnine je mogoče videti tudi na elektronskih posnetkih tlačno obremenjenega lesa.

Slika 23 prikazuje model drsne ravni v srednjem sloju sekundarne stene v suhem in vlažnem stanju. Avtorja sta predpostavila, da se zaradi vlaženja povečajo le dimenzije pravokotno na potek mikrofibril. Zaradi nabrekanja srednjega sloja sekundarne stene (S2) ($a \rightarrow a'$), se spremeni naklonski kot drsne ravni ($\Theta \rightarrow \Theta'$), pri čemer se poveča dolžina območja drsne ravni



□ Slika 23. Model drsne ravni v srednjem sloju suhe in vlažne sekundarne stene (S2) v vzdolžnem prerezu (risba po Hoffmeyerju in Davidsonu 1989)



□ Slika 24. Tipična mehanosorptivna lezna krivulja tlačno ali upogibno obremenjenega lesa (risba po Hoffmeyerju in Davidsonu 1989)

($L \rightarrow L'$). Sledi

$$\tan \Theta' = (a'/a) \tan \Theta$$

$$\Delta L = L' - L = b(\cos 2\Theta - \cos 2\Theta') \text{ in}$$

$$L = a \cot \Theta - b \cos 2\Theta$$

Primer: kot $\Theta = 60^\circ$, $a' = 1,003 a$ za spremembo vlažnosti za 1 % in $b = 0,2 a$. /Opomba: nabrek celične stene enak kot pri masivnem lesu, b ocenjen na elektronskih posnetkih./ Z uporabo navedenih treh enačb lahko določimo vzdolžno nabrekovalno deformacijo območja drsne ravni, ki je 0,06 %/

% spremembe vlažnosti. Približno tolikšno je tudi vzdolžno nabrekanje lesa z veliko drsni ravni. Vzdolžni nabrek masivnega lesa je pribl. 0,01 %!

Na sliki 24 je idealiziran diagram mehanosorptivnega lezjenja tlačno ali upogibno obremenjenega lesa. Pri konstantni nizki vlažnosti deformacija narašča. Drsne ravnine nastajajo počasi v odvisnosti od napetosti, vlažnosti in časa. Med 1. sorpcijo deformacija narašča. Zaradi spremembe vlažnosti in visoke vlažnosti, drsne ravnine nastajajo hitro. Nabrekanje malega števila drsni

ravnin nastalih v začetni fazi konstantne nizke vlažnosti je neznatno v primerjavi s hitrim naraščanjem deformacije med 1. sorpcijo. Med vsemi naslednjimi desorpcijskimi fazami zaradi vzdolžnega krčenja že nastalih drsnih ravnin, deformacija praviloma narašča. Nastajajo nove drsne ravnine, katerih število je v sorazmerju z velikostjo spremembe vlažnosti. Deformacija se še poveča. Med 2. in naslednjimi sorpcijami se deformacija praviloma zmanjša, saj je dodatna deformacija zaradi nastanka novih drsnih ravnin manjša od vzdolžnega krčenja že nastalih drsnih ravnin. Amplituda mehanosorptivne krivulje (ϵ_0) je mera za spremembo lastnosti vzdolžnega krčenja in nabrekanja, ki jih povzroči obremenitev. Ponazarja število drsnih ravnin in je proporcionalna mehanosorptivnemu lezenju. ϵ_1 je elastično zmanjšanje deformacije po razbremenitvi in je približno enako začetni elastični deformaciji ϵ_1 , plus dodatna elastična deformacija ϵ_{isp} vsebovane (vskladščene) v drsnih ravninah. Zadržano zmanjšanje deformacije (ϵ_{rec}) je posledica sušenja pod obremenitvijo, ko so bile drsne ravnine "zaprte" v stisnjem stanju. Razbremenitev povzroči tenzijo v conah drsnih ravnin in preostalo kompresijo v sosednjem neporušenem tkivu. Sorpcija, ki sledi, povzroči da drsne ravnine popustijo pod nateznimi napestmi. Deformacija se zmanjša. Med naslednjimi vlažnostnimi cikli nastopi nadaljnja relaksacija drsnih ravnin in dodatno zmanjšanje deformacije. Amplituda ϵ_0 oscilacije po razbremenitvi je mera za spremenjeno vzdolžno krčenje in nabrekanje neobremenjenega lesa z drsnimi ravninami. Razlika med ϵ_0 in ϵ_0' je domnevno, vsaj delno, posledica različnega mikrofibrilarnega kota drsnih ravnin obremenjenega in neobremenjenega lesa.

Zanimivo je, da les po acetiliranju in zamreženju s formaldehidom, komajda še izkazuje mehanosorptivno obna-

šanje. To vsekakor govori v prid podmeni, da pojav povezan z razklepanjem in ponovnim vzpostavljanjem vodikove vezi.

Obstajajo pa še povsem matematični modeli. Temeljijo na konceptu, da celotna deformacija sestoji iz elastične deformacije, časovne viskoelastične deformacije, deformacije zaradi krčenja in nabrekanja ter mehanosorptivne deformacije. Tako je Ranta-Maunus (1973) predlagal teorijo hidroviskoelastičnosti, ki opisuje funkcijsko odvisnost med deformacijo in napetostjo, časom, temperaturo in vlažnostjo, pri čemer predpostavlja, da imajo nekatere sestavine v lesu glede na omenjene štiri spremenljivke "spominsko" vlogo. Kasneje (1989) je objavil enačbo, iz katere se vidi, da je mehanosorptivna deformacija v linearni zvezi s spre-

membo vlažnosti. Vsebuje koeficiente, katerih vrednost je odvisna od tipa spremembe vlažnosti.

Nekateri matematični modeli upoštevajo lesno zgradbo. Mukudai in Yata (1987 iz Dinwoodie 2000) sta obrazložila mehanosorptivno obnašanje z drsenjem zunanega in srednjega sloja sekundarne stene. Hanhijärvri (1995) je predlagal novo konstitutivno enačbo, ki pojasnjuje mehanosorptivno obnašanje z nelinearno zvezo med higroekspanzijo (krčenje, nabrekanje) in viskoelastičnim lezenjem.

Danes se krepi prepričanje, da sta viskoelastično lezenje in mehanosorptivno obnašanje le dve različni pojavi obliki istega osnovnega pojava (prim Dinwoodie 2000). □

literatura

1. Arima, T., Grossman, P.U.A. 1978. Recovery of wood after mechano-sorptive deformation. *J. Inst. Wood. Sci.* 8(2):47-52.
2. Armstrong, L.D. 1985. Mechanical properties of wood. V: Introduction to wood and timber engineering:57-98.UNIDO/IO.606.
3. Armstrong, L.D., Kingston, R.S.T. 1960. Effect of moisture changes on creep in wood. *Nature* 185(4716):862-863.
4. Back, E.L., Salmén, N.L. 1982. Glass transitions of wood components hold implications for molding and pulping processes. *Tappi* 65(7):107-110.
5. Barkas, W.W. 1945. Swelling stresses in gels. *Dept. Sci. Ind. Res. For. Prod. Res. G.B., Special report no. 6*, London.
6. Barkas, W.W. 1949. The swelling of wood under stress. *Dept. Sci. Ind. Res. For. Prod. Res. G.B., London*.
7. Boyd, J.D. 1982. An anatomical explanation for visco-elastic and mechano-sorptive creep in wood, and effects of loading rate on strength. V: P. Baas (izd.), *New perspectives in wood anatomy:171-222*. Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers, The Hague, Boston, London.
8. Boyd, J.D., Foster, R.C. 1975. Microfibrils in primary and secondary wall growth develop trellis configuration. *Can. J. Bot.* 53:2687-2701.
9. Bučar, B. 2003. Osebna komunikacija
10. Dinwoodie, J.M. 1994. *Timber. V: J.M. Illston (izd), Construction materials - their nature and behaviour: 405-508*. E.&F.N. Spon/Chapman & Hall, London.
11. Dinwoodie, J.K. 2000. *Timber: its nature and behaviour*, 2. Izd. E.&F.H. Spon, London, New York.
12. Gibson, E. 1965. Creep of wood: role of water and effect of a changing moisture content. *Nature* 206:213-215.
13. Grossman, P.U.A. 1976. Requirements for a model that exhibits mechano-sorptive behaviour. *Wood Sci. Technol.* 10:163-168.
14. Hanhijärvi, A. 1995. Modelling of creep deformation mechanisms in wood. *Publ. No. 231*. Technical research centre of Finland.
15. Hearnes, R.F.S., Paton, J.M. 1964. Moisture content changes and creep in wood. *For. Prod. J.* 14:357-359.
16. Hoffmeyer, P., Davidson, R.W. 1989. Mechano-sorptive creep mechanism of wood in compression and bending. *Wood Sci. Technol.* 23:215-227.
17. Houška, M., Bučar, B. 1995. Mechano-sorptive behaviour of the different categories of spruce wood. *Proceedings, 1st International Conference on Mechanics of Time Dependent Materials*, September 11-13, Ljubljana, Slovenia pp 173-178
18. Houška, M., Bučar, B. 1996. Mechano-sorptive creep in adult, juvenile and reaction wood. *Proceedings, Interantional COST 508 Wood Mechanics Conference, May 14-16, Stuttgart, Germany*, pp 47-61
19. Hunt, D.G. 1982. Limited mechano-sorptive creep of beech wood. *J. Inst. Wood. Sci.* 9: 136-138.
20. Kingston, R.S.T. & Budgen, B. 1972. Some aspects of the rheological behaviour of wood. 4. del: Non-linear behaviour at high stresses in bending and compression. *Wood Sci. Technol.* 6:230-238.
21. Langendorf, G. 1970. Zu aktuellen Problemen der Möbelstatik. *Holztechnologie* 11:4-xxx
22. Langendorf, G., Schuster, E., Wagenführ, R. 1990. *Rohholz VEB Fachbuchverlag, Leipzig*.
23. Muršič, M. 1973. *Uvod v reologijo*. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo.
24. Prelog, E. 1973. *Elasto in plastomehanika*. Univerza v Ljubljani. Fakulteta za strojništvo.
25. Ranta-Maunus, A. 1973. A theory for the creep of wood with application to birch and spruce plywood. *Publ. No. 4 Technical Research centre of Finland*.
26. Ranta-Maunus, A. 1989. Analysis of drying stresses in timber. *Paperi ja Puu* 71:11 20-1122.
27. Scallan, A.M. 1974. The structure of the cell wall of wood - a consequence of anisoreopic intermicrofibrillar bonding? *Wood Sci.* 6:266-271.
28. Schniewind, A.P. 1989. Deformation under load. V: A.P. Schniewind, R.W. Chan, M.B. Bever (izd), *Concise encyclopedia of wood & wood-based materials*. Pergamon Press, Oxford. itd.