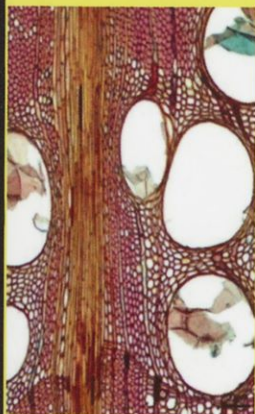


LES

ZGRADBA IN LASTNOSTI

njegova variabilnost in
heterogenost



Željko GORIŠEK

Slika na naslovnici

Hrast dob (*Quercus robur* L.): makroskopski in mikroskopski prečni, radialni ter tangencialni prerez. (Mikro foto: M. Zupančič)

1612

LES ZGRADBA IN LASTNOSTI

njegova variabilnost in heterogenost

ZGRADBA IN LASTNOSTI
njegova variabilnost in heterogenost

Željko GORIŠEK

Univerza v Ljubljani
Biotehniška fakulteta
Ljubljana, 2012



Ljubljana, 2012

LES

ZGRADBA IN LASTNOSTI

njegova variabilnost in heterogenost

Željko GORIŠEK



Univerza v *Ljubljani*
Biotehniška fakulteta
Oddelek za lesarstvo



Ljubljana 2009

7UG75

© Željko Gorišek

Izdal in založil:

Oddelek za lesarstvo
Rožna dolina, Cesta VIII/34, Ljubljana
Biotehniška fakulteta
Univerza v Ljubljani

Univerzitetni učbenik *LES - ZGRADBA IN LASTNOSTI njegova variabilnost in heterogenost* avtorja izr. prof. dr. Željka Goriška se uporablja kot študijsko gradivo pri predavanjih in vajah iz predmetov Tehnologija lesa (UNI študij 1. stopnje Lesarstvo) ter Fizika lesa (VS študij 1. stopnje Tehnologije lesa in vlaknatih kompozitov).

Izdaja se na podlagi sklepa dekana Biotehniške fakultete prof. dr. Franca Štanparja št. D-966/09 z dne 2. 6. 2009.

CIP – Kataložni zapis o publikaciji

Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

674.03(075.8)

GORIŠEK, Željko

LES : zgradba in lastnosti : njegova variabilnost in heterogenost / Željko Gorišek. – Ljubljana: Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, 2009

ISBN 978-961-6144-28-5

246000640



Avtor:
Željko GORIŠEK

200916378

Recenzenta:
Prof. dr. Primož Oven,
Prof. dr. Katarina Čufar

Odgovorni in tehnični urednik:
Željko GORIŠEK

Lektorica:
Darja Vranjek

Tisk:
Tiskarna Pleško, d.o.o.
Barletova cesta 4
1215 Medvode

Q

VSEBINA

SIMBOLI	7
UVOD	11
ZGRADBA LESA	13
Makroskopska zgradba lesa	16
Mikroskopska zgradba lesa	17
Submikroskopska zgradba lesa	20
Makromolekularna zgradba lesa	25
VARIABILNOST IN HETEROGENOST ZGRADBE LESA	33
Orientacija in potek vlaken – spiralnost	33
Juvenilni (mladostni) les	36
Reakcijski les	40
Notranje ali rastne napetosti	43
Grče	45
GOSTOTA IN POROZNOST	47
Gostota lesa	47
Vlažnost in poroznost lesa	53
VODA V LESU	59
Radialna porazdelitev vode v svežem lesu	59
Sorpcijske lastnosti lesa – sorpcijske izoterme in histereza	63
Termodinamika sorpcije	67
Modeli sorpcije	72
Ravnovesna vlažnost lesa u_r	80
Točka nasičenja celjčnih sten (TNCS) - metode določanja in pomen	83
KRČENJE, NABREKANJE IN KRČITVENA ANIZOTROPIJA	87
Krčenje in nabrekanje v longitudinalni smeri	92
Krčenje in nabrekanje v tangencialni in radialni smeri - prečna krčitvena anizotropija	93
DIMENZIJSKO DELOVANJE LESA	99

ZGRADBA IN LASTNOSTI LESA

Postopki za zagotavljanje dimenzijske obstojnosti lesa	107
TOPLOTNE LASTNOSTI LESA	117
ELASTIČNOST LESA	121
Elastične deformacije	122
Ortotropnost lesa	124
Vplivni dejavniki na elastične lastnosti lesa	135
VISKOELASTIČNE LASTNOSTI LESA	139
Mehanosorptivno lezenje	148
TRDNOST LESA	153
Vplivni dejavniki na trdnost lesa	154
Določanje trdnosti lesa	159
VIRI	171

SIMBOLI

S_1	zunanjí sloj sekundarne stene	
S_2	srednji sloj sekundarne stene	
S_3	notranji sloj sekundarne stene	
W	bradavičasti sloj	
P	primarni sloj	
AL	amorfni sloj	
CL	celulozni sloj	
G	želatinozni sloj	
$TNCS$	točka nasičenja celičnih sten	
A	površina	[m ²]
$An = \beta_T/\beta_R = \alpha_T/\alpha_R$	prečna krčitvena anizotropija	[-]
ASE	protikrčitvena učinkovitost	[%]
b_i	značilne konstante sorpcijskega modela	
$C_c(t)$	lezna podajnost (specifično lezenje)	
$C_r(t)$	relativno lezenje (lezno število)	
C	konstanta BTE sorpcijskega modela	
c	specifična toplota	[J/kg K]
c_u	specifična toplota lesa pri vlažnosti U	[J/kg K]
c_0	prostorninski delež suhega lesa brez por	
c_{vl}	delež vlažnega lesa	
d_0	debelina sloja vode	[m]
d_u	relativna gostota	[-]
$D_{C, L, H}$	togostna matrika celuloze, lignina in hemiceluloz	
$E(t)$	relativna sprememba mase, vlažnosti	[-]
E	modul elastičnosti, prožnostni modul, E-modul ali Youngov modul	[Pa]
G	prosta (Gibbsova) energija	[J/mol]
G	strižni modul	[Pa]
H	entalpija	[J/mol]

$H_v, H_s,$	entalpija vode in vezane vode	[J/mol]
ΔH_s	diferencialna sorpcijska toplota	[J/mol]
$HB $	trdota merjena vzporedno z vlakni	[Pa]
$HB\perp$	trdota na radialni površini	[Pa]
h_R, h_T	koeficient nabrekanja v radialni oz. tangencialni smeri	[%/%]
$h = a_w =$	aktivnost vodne pare	[-]
p_{vp}/p_0		
K, K_1, K_2	konstante HH sorpcijskega modela	
l_{vb}, l_0	dimenzije v svežem in v absolutno suhem stanju	[m]
m_0	masa absolutno suhega lesa,	[kg]
m_U	masa vlažnega lesa z vlažnostjo U ,	[kg]
m_{vl}	masa vlažnega lesa	[kg]
m_{p0}	masa suhe celične stene,	[kg]
m_{pu}	masa vlažne celične stene,	[kg]
m_{vode}	masa vode v lesu,	[kg]
$M_c(t)$	relaksacijski modul	
MEE	vodoodbojnost	[%]
n	delež por v absolutno suhem lesu	
p_{vp}	tlak vodne pare	[Pa]
p_0	tlak nasičenja vodne pare	[Pa]
P_{vl}	volumenski delež por v vlažnem lesu	
Q_s	diferencialna sorpcijska toplota	[J/kg]
q_R, q_T	diferencialni nabrek v radialni oz. tangencialni smeri	[%/%]
R	osnovna gostota	[kg/m ³]
R	splošna plinska konstanta	[J/mol K]
R_U	nominalna gostota pri vlažnosti U	[kg/m ³]
r	polmer	[m]
S	entropija	[J/mol K]
S_v, S_s	entropija vode in vezane vode	[J/mol K]
s	sorpcijski kvocient	[%/%]
s_{ij}	podajnost	[1/Pa]
T	temperatura	[°C, K]
T_g	temperatura steklastega prehoda	[°C, K]

U	notranja energija	[J/mol]
u, U	lesna vlažnost	[kg/kg], [%]
u_r, U_r	ravnovesna vlažnost lesa,	[kg/kg], [%]
u_{rA}/u_{rD}	ravnovesna vlažnost adsorpcije/desorpcije	[%]
u_{TNCS}	vlažnost točke nasičenja celičnih sten	[kg/kg], [%]
u_H, u_N, u_M, u_K	deformacije reoloških modelov	[-]
v_a	poroznost lesa	
u_{vez}	prostorninski delež v celične stene vrinjene vezane vode	
V_0	volumen lesa v absolutno suhem stanju	[m ³]
V_U	volumen lesa z vlažnostjo U	[m ³]
$V_{vi} V_{maks}$	volumen vlažnega lesa, navadno z vlažnostjo nad TNCS	[m ³]
$V_{\rho 0}$	volumen suhe celične stene,	[m ³]
$V_{\rho u}$	volumen vlažne celične stene,	[m ³]
W	vlažilna toplota	[J/kg]
W_0	skupna ali totalna vlažilna toplota	[J/kg]
x	absolutna vlažnost lesa	[kg/kg]
α_V	volumenski nabrekovalni koeficient.	[- ; %/%]
$\alpha_{V,L,R,T}$	nabrek (volumenski, vzdolžni radialni ali tangencialni)	[m ³ /m ³], [m/m], [%]
$\beta_{V,L,R,T}$	skrček (volumenski, vzdolžni radialni ali tangencialni)	[m ³ /m ³], [m/m], [%]
$\beta_{suš,V,L,R,T}$	sušilnični skrček (volumenski, vzdolžni radialni ali tangencialni)	[m ³ /m ³], [m/m], [%]
ε	specifična deformacija	[-]
μ	kemični potencial	
ρ	gostota	[kg/m ³]
ρ_0	gostota lesa v absolutno suhem stanju.	[kg/m ³]
ρ_u	gostota lesa pri vlažnosti U	[kg/m ³]
ρ_D, ρ_{les}	gostota celične stene	[kg/m ³]
$\rho_{\rho u}$	gostota vlažne celične stene,	[kg/m ³]
ρ_{vv}	srednja gostota v celičnih stenah zgoščene vezane vode	[kg/m ³]
φ	relativna zračna vlažnost	[%]
λ	toplotna prevodnost	[W/mK]
σ	površinska napetost tekočine	[N/m]

σ	napetost	[Pa]
$\sigma_{b//}$	upogibna trdnost	[Pa]
$\sigma_{c//}$	tlačna trdnost vzporedno z vlakni	[Pa]
$\sigma_{c\perp}$	tlačna trdnost prečno na vlakna	[Pa]
$\sigma_{t//}$	natezna trdnost vzporedno z vlakni	[Pa]
$\sigma_{t\perp}$	natezna trdnost prečno na vlakna	[Pa]
ψ	kot omočitve	[rad, °]
ν	Poissonovo število	[-]

UVOD

Pred drugimi inženirskimi materiali ima les vrsto prednosti, ki ga uvrščajo med najperspektivnejše materiale prihodnosti. Kot naraven biološki material je obnovljiv in nastaja ob blagodejnih učinkih na okolje, v postopkih predelave in obdelave lesa so energijske zahteve mnogo manjše kot pri uporabi nekaterih drugih materialov (cement, kovine ...), proizvodnja je okolju prijazna tako z vidika energijske porabe kot onesnaženja. Les je biološko razgradljiv material, mogoče ga je reciklirati, hkrati gozdovi zmanjšujejo učinek "tople grede" (vezava ogljika). Uporabnost lesa se kaže tudi v zelo ugodnem razmerju med trdnostjo in gostoto, zaradi prijetnega videza in »topline« pa ga uvrščamo med sodobne in aktualne materiale.

Zaradi širokega spektra fizikalnih in mehanskih karakteristik različnih lesnih vrst ima les zelo raznoliko uporabnost. Izbira najprimernejšega lesa za določen končni izdelek zahteva vsestransko poznavanje in vrednotenje materiala. Pred končno odločitvijo je za uporabo potrebno proučiti več kriterijev hkrati. Med najpomembnejše sodijo: mesto vgraditve (predvsem zaradi ustrezne trajnosti ali trdnosti lesne vrste), namembnost izdelka, tehnološke lastnosti lesne vrste (obdelavnost, odpornost proti obrabi, trdota, trdnosti), fizikalne lastnosti (dimenzijska stabilnost, toplotna in zvočna izolativnost, elektrostatičnost) in estetske lastnosti (dekorativnost, barva, tekstura).

Les je nehomogen, anizotropen in higroskopen material; zaradi svojega biološkega izvora je tudi izredno variabilen ter se v postopkih predelave in obdelave odziva specifično, kar narekuje dobro poznavanje njegovih lastnosti. Izkoriščanje drevja z vse manjšimi premeri, splošna onesnaženost okolja, naraščanje poškodovanja drevja zaradi gozdarske mehaniziranosti in naravnih ujm vpliva tudi na vse slabšo kakovost vhodne surovine v predelavi lesa, zato je poznavanje lesa še toliko pomembnejše.

Zelo kompleksna struktura lesa še dandanes ni toliko raziskana, da bi omogočila razvoj nadomestnih materialov, ki bi nudili enako široke možnosti uporabe. Celo najnovejši materiali skušajo slediti specifični strukturi in zgradbi lesa ter tako dosegati boljše lastnosti. Razvijajo se novi polimerni materiali, tudi v kombinaciji z lesom, in tako skušajo pridobiti bistvene prednosti lesa, vendar se hkrati izogniti nezaželenim.

1	UVOD	1
2	1.1. VARNOST	2
3	1.2. KVALITETA	3
4	1.3. OKOLNA OKOLIŠNA	4
5	1.4. EKONOMIJA	5
6	1.5. KULTURA	6
7	1.6. ZDRAVJE	7
8	1.7. SOCIALNA	8
9	1.8. ESTETIKA	9
10	1.9. VEŠTINSKI	10
11	1.10. ZNANJE	11
12	1.11. SPOSOBNOSTI	12
13	1.12. VEŠTINE	13
14	1.13. VEŠTINSKI	14
15	1.14. VEŠTINSKI	15
16	1.15. VEŠTINSKI	16
17	1.16. VEŠTINSKI	17
18	1.17. VEŠTINSKI	18
19	1.18. VEŠTINSKI	19
20	1.19. VEŠTINSKI	20
21	1.20. VEŠTINSKI	21
22	1.21. VEŠTINSKI	22
23	1.22. VEŠTINSKI	23
24	1.23. VEŠTINSKI	24
25	1.24. VEŠTINSKI	25
26	1.25. VEŠTINSKI	26
27	1.26. VEŠTINSKI	27
28	1.27. VEŠTINSKI	28
29	1.28. VEŠTINSKI	29
30	1.29. VEŠTINSKI	30
31	1.30. VEŠTINSKI	31
32	1.31. VEŠTINSKI	32
33	1.32. VEŠTINSKI	33
34	1.33. VEŠTINSKI	34
35	1.34. VEŠTINSKI	35
36	1.35. VEŠTINSKI	36
37	1.36. VEŠTINSKI	37
38	1.37. VEŠTINSKI	38
39	1.38. VEŠTINSKI	39
40	1.39. VEŠTINSKI	40
41	1.40. VEŠTINSKI	41
42	1.41. VEŠTINSKI	42
43	1.42. VEŠTINSKI	43
44	1.43. VEŠTINSKI	44
45	1.44. VEŠTINSKI	45
46	1.45. VEŠTINSKI	46
47	1.46. VEŠTINSKI	47
48	1.47. VEŠTINSKI	48
49	1.48. VEŠTINSKI	49
50	1.49. VEŠTINSKI	50
51	1.50. VEŠTINSKI	51
52	1.51. VEŠTINSKI	52
53	1.52. VEŠTINSKI	53
54	1.53. VEŠTINSKI	54
55	1.54. VEŠTINSKI	55
56	1.55. VEŠTINSKI	56
57	1.56. VEŠTINSKI	57
58	1.57. VEŠTINSKI	58
59	1.58. VEŠTINSKI	59
60	1.59. VEŠTINSKI	60
61	1.60. VEŠTINSKI	61
62	1.61. VEŠTINSKI	62
63	1.62. VEŠTINSKI	63
64	1.63. VEŠTINSKI	64
65	1.64. VEŠTINSKI	65
66	1.65. VEŠTINSKI	66
67	1.66. VEŠTINSKI	67
68	1.67. VEŠTINSKI	68
69	1.68. VEŠTINSKI	69
70	1.69. VEŠTINSKI	70
71	1.70. VEŠTINSKI	71
72	1.71. VEŠTINSKI	72
73	1.72. VEŠTINSKI	73
74	1.73. VEŠTINSKI	74
75	1.74. VEŠTINSKI	75
76	1.75. VEŠTINSKI	76
77	1.76. VEŠTINSKI	77
78	1.77. VEŠTINSKI	78
79	1.78. VEŠTINSKI	79
80	1.79. VEŠTINSKI	80
81	1.80. VEŠTINSKI	81
82	1.81. VEŠTINSKI	82
83	1.82. VEŠTINSKI	83
84	1.83. VEŠTINSKI	84
85	1.84. VEŠTINSKI	85
86	1.85. VEŠTINSKI	86
87	1.86. VEŠTINSKI	87
88	1.87. VEŠTINSKI	88
89	1.88. VEŠTINSKI	89
90	1.89. VEŠTINSKI	90
91	1.90. VEŠTINSKI	91
92	1.91. VEŠTINSKI	92
93	1.92. VEŠTINSKI	93
94	1.93. VEŠTINSKI	94
95	1.94. VEŠTINSKI	95
96	1.95. VEŠTINSKI	96
97	1.96. VEŠTINSKI	97
98	1.97. VEŠTINSKI	98
99	1.98. VEŠTINSKI	99
100	1.99. VEŠTINSKI	100
101	1.100. VEŠTINSKI	101

ZGRADBA LESA

Les je olesenelo vlaknasto bolj ali manj trajno tkivo rastlin (dreves in grmov), ki nastaja v času sekundarne rasti z delitvijo celic v kambiju. Premer debel, vej in korenin se tako od stržena navzven povečuje. V sekundarni rasti lesnih rastlin nastajajo v kambiju z delitvijo navzven tudi celice skorje. Kambij običajno proizvede več celic lesa kot skorje.

Lesno tkivo sestavljajo različne vrste celic, ki imajo v živem drevesu prevajalno, mehansko in skladiščno funkcijo, razlikujejo pa se tudi po obliki in velikosti.

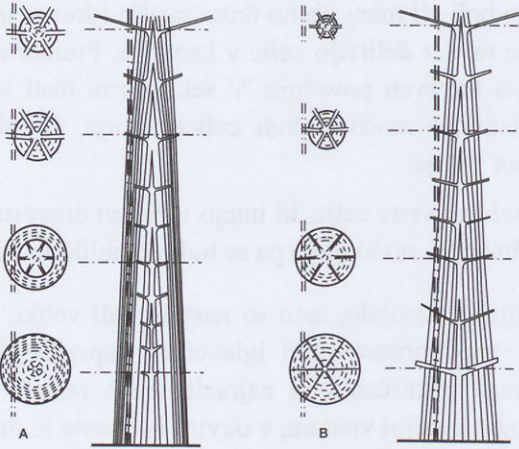
Lesno tkivo se je evolucijsko razvijalo, zato so nastale tudi velike razlike med drevesnimi vrstami: npr. med primitivnimi iglavci in naprednejšimi listavci. Zaradi značilnega plastnega priraščanja in najrazličnejših rastnih pogojev so znatne razlike v zgradbi med lesnimi vrstami, v okviru iste vrste in tudi v drevesu (Čufar, 2006, Koch, 1985, Zobel in van Buijtenen, 1989):

- a/ v radialni smeri od stržena proti kambiju,
- b/ znotraj letne prirastne plasti (branike) in
- c/ vzdolž debla oziroma po višini drevesa.

Lastnosti lesa in možnosti njegove obdelave, predelave in končne uporabe so odraz strukturnih in gradbenih posebnosti, ki se izoblikujejo med rastjo. Drevo v borbi za svetlobo z listno površino smotrno zapolni razpoložljiv prostor in tako oblikuje deblo. Ob prevladujočem vodilnem poganjku in podrejenih stranskih poganjkih nastane ravno deblo. Takšna rast je izrazita pri iglavcih in nekoliko manj izrazita pri javorju, jesenu, jelši in hrastu. Pri prenehanju rasti glavnega poganjka (npr. v primeru zakrnelosti terminalnega poganjka ali njegovega poškodovanja) rastejo stranski poganjki hitreje in nadomestijo glavnega. Pri bukvi, hrastu, lipi in vrbi prevzame glavno vlogo en stranski poganjek, pri bezgu pa dva.

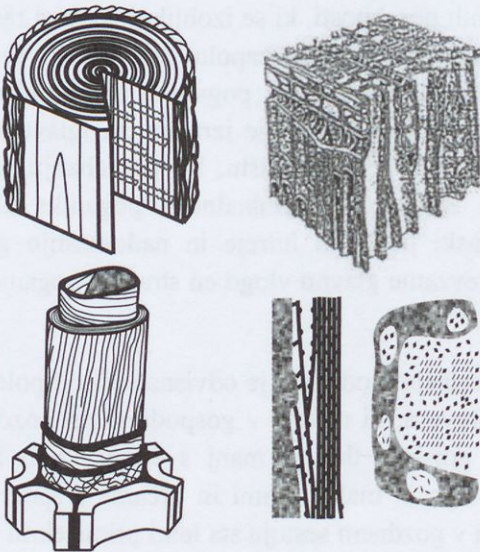
Oblika drevesa – debla in kasneje hlodovine je odvisna tudi od položaja drevesa v sestoju (sl. 1). Odrasla drevesa, ki rastejo v gospodarskem gozdnem sestoju, imajo omejen prostor, na gozdnih tleh je manj svetlobe, zato imajo visoka valjasta debla s kratko krošnjo in malo vejami in grčami v spodnjem delu. V zahtevnejših rastnih pogojih v gozdnem sestoju sta letni prirastek in delež beljave manjša. Prosto rastoča drevesa (npr. z gozdnega roba, mešanega nižinskega gozda ali travniška drevesa) imajo krošnjo do tal, deblo je stožčasto, veje in grče

so prisotne po vsej višini debla, večji je delež mladostnega (juvenilnega) lesa, praviloma je več beljave.



Slika 1 Oblika in značilnosti (A) polnolesnega in (B) malolesnega debla.

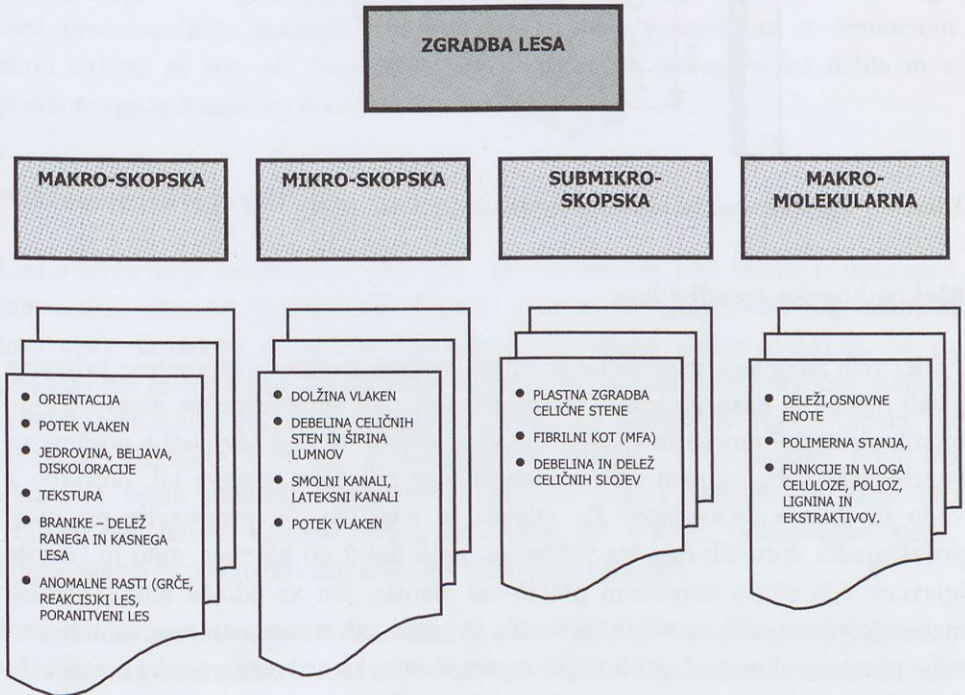
Za les je tako značilna plastna oziroma kompozitna zgradba, ki se zrcali na makroskopskem, mikroskopskem, submikroskopskem in makromolekularnem nivoju (pregl. 1 in sl. 2 in 3).

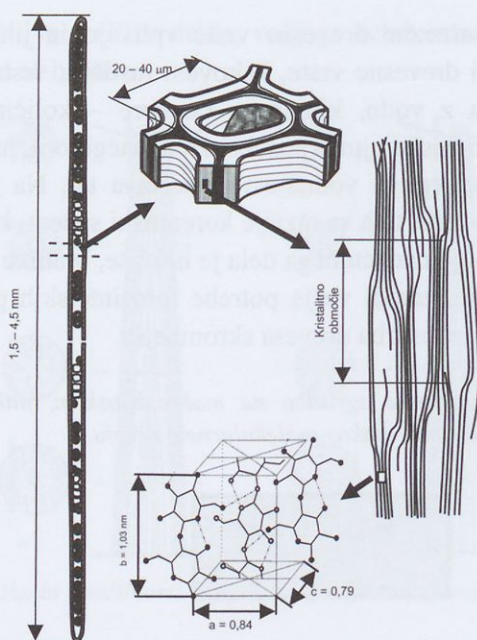


Slika 2 Značilna kompozitna zgradba lesa na (A) makroskopskem, (B) mikroskopskem, (C) sub-mikroskopskem in (D) makro-molekularnem nivoju.

Na prirastne značilnosti posamezne drevesne vrste vplivajo in jih narekujejo pogoji rasti, vrojene lastnosti drevesne vrste, kakovost rastišča, vrsta in sestava tal, socialni status, preskrba z vodo, klimatske razmere – količina padavin, temperatura, osončenost, vremenske ujme (pozeba, žled, snegolom, mraz ...). Na hitrost priraščanja pomembno vpliva vodnatost in sestava tal. Na globokih, z vodo in hranilnimi snovmi bogatih tleh se razvije koreninski sistem, ki zagotavlja dobro oskrbo rastlin. Priraščanje nadzemnega dela je hitrejše, branike so širše kot na plitvih skalnih tleh, kjer je, zaradi večje potrebe fotosintetskih produktov v izgradnjo koreninskega sistema, oskrba drevesa skromnejša.

Preglednica 1 Posebnosti anatomske zgradbe na makroskopskem, mikroskopskem, submikroskopskem in makro-molekularnem nivoju.





Slika 3 Zgradba lesa od vlakna do celuloze (po Siau, 1971).

Makroskopska zgradba lesa

Pri lesovih zmernega pasu so na prečnem prerezu značilno razporejene prirastne plasti ranega in kasnega lesa, ki tvorijo branike ali letne prirastne plašče. Širine branik ter deleži ranega in kasnega lesa so odvisni od pogojev rasti v posamezni vegetacijski dobi, starosti drevesa, socialnega položaja, sestave tal, preskrbe z vodo in drugih dejavnikov. Za iglavce je značilno, da predstavlja pri hitro priraščajočih drevesih rani les večinoma večji delež od kasnega, zato je gostota iglavcev s širokimi branikami praviloma manjša, kar se odraža tudi v slabših mehanskih lastnostih in nižjih trdnostih. Pri listavcih z venčasto poroznim lesom velja obratna zakonitost; pri hitrejšem priraščanju, ko se tvorijo široke branike, je delež kasnega lesa večji, zato je tudi gostota večja.

S priraščanjem drevesa v debelino prevzemajo vlogo prevajanja vode mlajše celice zunanjih novo nastalih plasti - beljava, osrednji del debla pa se izsušuje in pri mnogih vrstah ojedri. Na meji med beljavo in jedrovino se pojavi sušina, v kateri potekajo ojedritveni procesi, ki vplivajo na lastnosti jedrovine (Torelli, 1974). Pri nekaterih vrstah ob ojedritvi pride do očitnih barvnih sprememb (npr. macesen, bor, hrast, brest, robinija, domači kostanj, oreh, češnja in drugi), takrat

jedrovino imenujemo črnjava. Za smreko in jelko je značilna neobarvana jedrovina z drugačnimi fizikalnimi lastnostmi kot jih ima beljava. Jedrovina se razširja stožčasto oz. elipsoidno po deblu. Zelo pomemben učinek jedrovinskih snovi se kaže na biološki odpornosti oz. trajnosti, manjši higroskopski in nekoliko manjšem krčenju jedrovine v primerjavi z beljavo. Pri nekaterih vrstah se tvorijo v osrednjem delu debla obarvanja – diskoloracije (npr. rdeče srce pri bukvi, rjavo srce pri jesenu in topolu ipd.), z manj razlikami v fizikalnih lastnostih od beljave kot jedrovina (Torelli, 1974, 1984).

Juvenilni (mladostni) les nastaja z delovanjem mladega kambija in je po zgradbi podoben lesu iz območja krošnje. Ta les ostane preraščen v osrednjem delu debla. Juvenilni les se anatomsko razlikuje od zrelega – adultnega lesa, kar vpliva tudi na njegove - v glavnem slabše - fizikalne in mehanske lastnosti, zato se ga med predelovalnimi postopki izogibamo. Območje juvenilnosti z območjem okoli stržena se bolj ali manj cilindrično razteza po celotni višini debla in v praksi sovпада z izrazom »srce«.

Mikroskopska zgradba lesa

Lesno tkivo se je evolucionjsko razvijalo, zato so nastale tudi velike razlike med drevesnimi vrstami (grobno npr. ločimo primitivne iglavce od naprednejših listavcev). Osnovno tkivo lesa izgrajujejo vlaknaste celice (vlakna), to so podolgovate celice z različno debelino stene in širino lumnov ter različno stopnjo redukcije obokanih pikenj, po katerih jih glede na evolucionjski razvoj ločimo na traheide, vlaknaste traheide in libriformska vlakna. V osnovnem tkivu so vključeni ostali elementi: trakovni in aksialni (osni) parenhim, traheje idr. Traheje in vlakna zgubijo protoplast takoj po razvoju sekundarne stene, izjemoma so za nekatere vrste značilna tudi »živa vlakna«.

Pri iglavcih je osnovnega tkiva iz traheid do 96 % lesa. Te potekajo bolj ali manj vzdolžno, t.j. vzporedno z drevesno osjo – ravna rast. Na trakovno tkivo odpade največ 12 % delež, medtem ko je aksialnega parenhim praviloma malo (le nekaj odstotkov) (sl. 4 in pregl. 2 - 4) (Grosser, 1977).

Osnovno tkivo listavcev izgrajujejo vlakna z različnimi stopnjami razvoja. Vlakna običajno predstavljajo 35 % do 75 % vseh tkiv. Delež trahej variira med 4 % in 39 %, medtem ko je parenhimskega tkiva od 7 % do 29 % (izjemoma pri balzi do 74 %). Na splošno je parenhimskega tkiva pri listavcih bistveno več kot pri iglavcih (sl. 5 in pregl. 5) (Grosser, 1977).

Preglednica 2 Volumenski deleži osnovnih tipov celic pri iglavcih in listavcih.

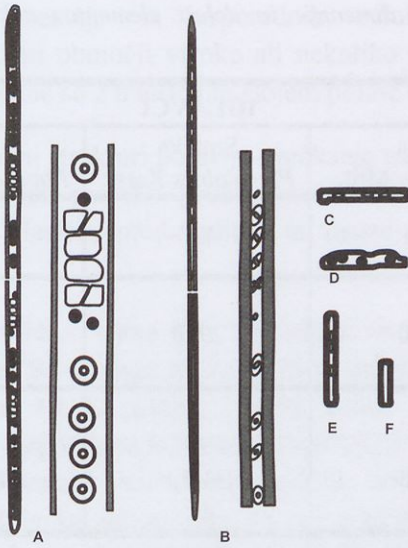
	IGLAVCI [%] (min. – povpr. - maks.)	LISTAVCI [%] (min. – povpr. - maks.)
Traheje	-	4 – 25 - 39
Traheide	87 – 93 – 96	do 12
Libriformska vlakna	0 – 1 – 2	35 – 12 - 75
Trakovno tkivo	4 – 7 – 12	2 – 15 - 29
Smolni kanali	0,4 – 1,1	

Preglednica 3 Osnovna vloga lesnih celic.

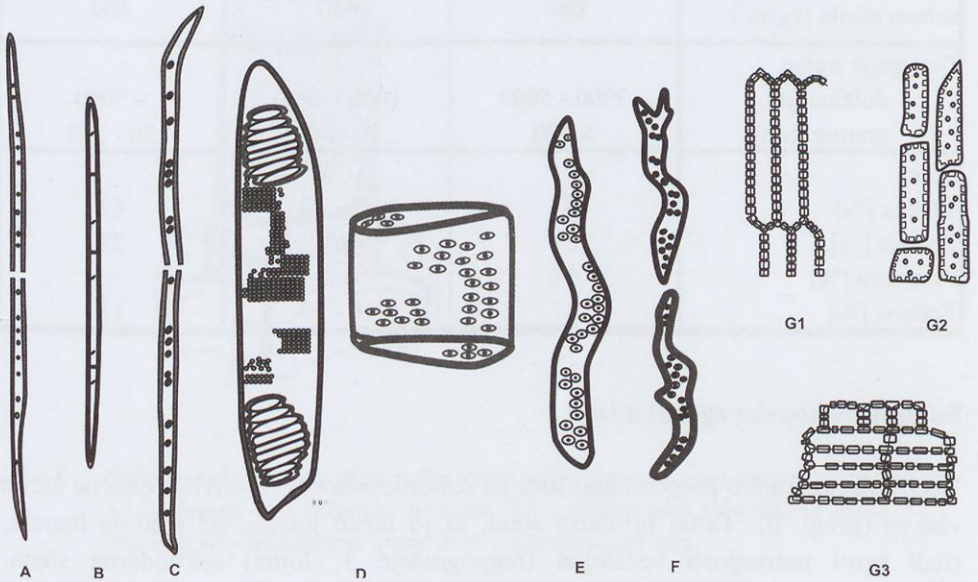
Vloga	Iglavci	Listvaci
Mehanska	Traheide	Vlakna
Transportna (voda in asimilati)	Traheide Trakovne traheide Trakovni parenhim	Traheje Trakovni parenhim
Skladiščna	Aksialni parenhim Trakovni parenhim	Aksialni parenhim Trakovni parenhim
Izločalna	Epitelne celice	Epitelne celice

Preglednica 4 Orientacijske velikosti lesnih celic.

Vrsta celic	Premer lumnov [μ m]	Debelina celičnih sten [μ m]	Dolžina [mm]
Traheje	10 – 500	1,6 – 10,0	0,1 – 2,0
Traheide	4 – 80	2,0 – 12,0	0,7 – 11,0
Libriformska vlakna	5 – 50	2,0 – 7,0	0,1 – 7,0
Parenhim	5 – 100	2,0 – 5,0	0,02 – 0,2



Slika 4 Celični elementi iglavcev: A – traheida ranega lesa; B – traheida kasnega lesa, C – trakovna parenhimska celica; D – trakovna traheida; E – aksialna parenhimska celica; F – epitelna celica (po Grosser, 1977).



Slika 5 Značilni celični elementi listavcev: A – libriformsko vlakno; B – septirano vlakno; C – vlaknasta traheida; D – trahejni člen; E – vaskularne traheide; F – vazicentrične traheide; G1 – vzdolžni parenhim; G2 – fuziformni parenhim; G3 – trakovni parenhim (po Grosser, 1977).

Preglednica 5 Gostota, povprečne dimenzije in deleži elementov nekaterih naših iglavcev in listavcev.

	IGLAVCI		
	Jelka <i>Abies alba</i> Mill.	Smreka <i>Picea abies</i> Karst.	Bor <i>Pinus sylvestris</i> L.
Gostota v absolutno suhem stanju [kg/m ³]	410	430	490
<i>Dimenzije traheid</i>			
dolžina [μm]	4300	2900	3100
premer [μm]	50	30	30
<i>Delež</i>			
Traheide [%]	90	95	93
Vzdolžni parenhim [%]	sledi	1.4-5.8	1.4-5.8
Trakovi [%]	9.6	4.7	5.5
	LISTAVCI		
	Bukev <i>Fagus silvatica</i> L.	Hrast <i>Quercus robur</i> L.	Topol <i>Populus spp.</i>
Gostota v absolutno suhem stanju [kg/m ³]	680	650	400
<i>Dimenzije trahej</i>			
dolžina [μm]	3000 - 5000	1000 - 4000	~ 5000
premer [μm]	5-100	10 - 400	20 - 150
<i>Delež</i>			
Vlakna [%]	37	43 - 58	62
Traheje [%]	31	40	27
Parenhim [%]	4.6	4.9	-
Trakovi [%]	27	16 - 29	11

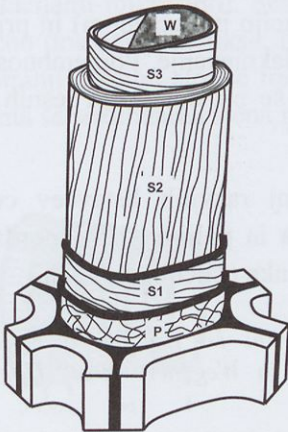
Submikroskopska zgradba lesa

Večplastno zgradbo prepoznamo tudi na submikroskopskem nivoju celične stene vlaken (pregl. 6). Tanki primarni steni, ki jo težko ločimo od srednje lamele, sledi proti notranjosti večslojna (najpogosteje 3 slojna) sekundarna stena, medtem ko notranja terciarna stena in/ali bradavičasti sloj velikokrat tudi izostaneta. Struktura posameznih slojev variira od prečno vezanih polimerov brez fibril (npr. srednja lamela) do blizu skupaj potekajočih plasti s spiralno usmerjenimi fibrilami z različnimi odstopanji od vzdolžne orientiranosti.

Mikrofibrile sestojе iz vzporednih celulozних molekul z zaporedno izmenjavajočimi območji visoke ali nekoliko nižje kristaliničnosti in amorfних področij. Obdane so z matričnim slojem polioz in lignina. (sl. 6)

Če se v osnovni strukturi pojavijo prečkanje trakov, pknje, plastne neskladnosti, prazni medcelični prostori, produkti sekundarnih dogajanj, predhodne razpoke v slabotnejših plasteh, predstavljajo ta mesta možnost koncentracije notranjih napetosti.

Primarna celična stena (P) kot edina obdaja celično vsebino na začetku diferenciacije. Sestavljajo jo pribl. 25 % celuloze v neurejenih in razmaknjenih mikrofibrilah, 40 % pektina, 25 % polioz in 10 % beljakovin. Celulozne molekule so razporejene tako, da omogočajo predvsem močno izraženo vzdolžno rast celice. Primarni steni dveh sosednjih celic in izotropna, plastična pretežno ligninsko-pektinska srednja lamela, se optično zelo težko ločijo, zato vse tri skupaj imenujemo združena srednja lamela. Skupno dosežejo sloji debelino do 1 μm .



Slika 6 Submikroskopski nivoji zgradbe tipičnega vlakna: P – primarna celična stena, S1 – zunanji sloj sekundarne stene, S2 – srednji sloj sekundarne stene, S3 – notranji sloj sekundarne stene in W – bradavičasti sloj.

V notranjost lumna (t.j. v centripetalni smeri) se po zaključeni rasti celice naložijo še sloji **sekundarne stene (S)**. Tik ob primarni steni se odloži 0,2 μm do 0,5 μm (v kasnem lesu tudi do 1,0 μm) debel zunanji sloj (S1), ki ga z izmenjavajočim Z in S heliksom pod kotom 60° do 80° glede na os vlakna

izgrajuje več (2 do 4) lamel. Po prehodnem sloju (S12) sledi najdebelejši srednji sloj sekundarne stene (S2). V ranem lesu je njegova debelina 1 μm do 2 μm , v kasnem lesu pa 3 μm do 8 μm , tako da predstavlja 60 % do 80 % celotne celične stene. Mikrofibrilni kot je v adultnem lesu do 10°, v juvenilnem pa do 30°. Še večji kot je značilen za kompresijski les (tudi nad 45°). V vseh kategorijah lesa se fibrile ovijajo desnosučno (»Z« heliks) z nekoliko večjimi odstopanji v radialni steni. S2 izgrajuje 30 do 150 lamel. Najbližji lumnu je notranji sloj sekundarne stene (S3), debeline 0,1 μm do 0,2 μm , mikrofirile potekajo v »S« heliksu skoraj prečno na vzdolžno celično os. Debelina S3 je največja na ogliščih ter najmanjša na pikenjskih obokih. Zgradba in debelina notranjega sloja sta pomembni z vidika stabilnosti in fiziološke funkcije v še stoječem drevesu. Posebno v visokih drevesih nastane v lumnih velika kapilarna tenzija, ki omogoča transport vode iz koreninskega sistema v krošnjo. S3 sloj z značilno fibrilno orientacijo zmanjšuje vpliv tenzije na S2, ki ima prevladujoč potek mikrofibril vzporedno z osjo celice. Lumni ostanejo tako tudi pri veliki tenziji odprti in dovoljujejo zadosten masni tok proste vode. Notranji sloj sekundarne stene (S3) lahko deluje tudi kot prepreka (bariera) pri biološki razgradnji (mikroorganizmom, encimom med kolonizacijo in razpadom) in pri tehnoloških postopkih kot so zaščita, modifikacija, razvlaknjevanje. Pomembnost S3 sloja se povečuje z njegovo lignifikacijo, posebno še pri določenih lesnih vrstah (npr. *Pinus radiata*).

Pri iglavcih in pri lesu evolucijsko manj razvitih listavcev celično steno zaključuje **bradavičasti sloj** (W) iz lignina in polioz ali pa morda predstavlja med tonoplast in plazmalemo vključene ostanke celičnih organelov.

Preglednica 6 Relativna debelina, mikrofibrilni kot in število slojev v vlaknih (traheidah) iglavcev (Fengel in Wegener, 1984, Hon, in Shiraishi, 2001).

Celična stena	Relativna debelina [%]	Mikrofibrilni kot MFA [°]	Število slojev
M + P	5	slučajno	ni
S1	10	50 – 70	4 – 6
S2	75	10 – 30	30 – 150
S3	10	60 – 90	0 - 6

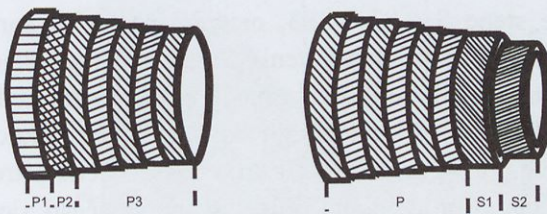
Celična stena **trahejnih členov** je zgrajena nekoliko drugače; primarna stena je zgrajena lamelno, kjer je zunanji sloj s prečno orientacijo, srednji s slučajno razporeditvijo in notranji s prečno večlamelno strukturo. Za sekundarno steno je značilnih več gradbenih tipov:

- tip 1. tipična triplastna struktura z debelejšima S1 in S3 slojema,
- tip 2. neplastna struktura s položnim heliksom in
- tip 3. večplastna struktura s spreminjajočim se heliksom.

V strukturi celičnih sten **parenhimskega tkiva** iglavcev se pojavlja več značilnih tipov, med katerimi sta dva prevladujoča (sl.7).

- Pri prvem prevladujočem tipu je primarna stena večslojna. V zunanjem sloju (P1) so mikrofibrile vzporedne z osjo celice; sledi srednji sloj z mrežasto strukturo in prepletenimi mikrofibrilami, tretji sloj (P3) pa je večlamelni z izmenjavajočim potekom mikrofibril pod kotom 30° do 50°. Primarni steni sledi še zaščitni sloj s slučajnim prepletom mikrofibril.
- Tudi pri drugem tipu je primarna stena večslojna z različnimi orientacijami mikrofibril. Sekundarno steno sestavljata debelejša sloja z različno orientacijo heliksa. Na lumen meji zaščitni sloj. Primarna stena in notranji zaščitni sloj se formirata v beljavi, na meji z jedrovino pa se naložita še sekundarna stena in notranji zaščitni sloj.

➤



Slika 7 Dva prevladujoča tipa zgradbe celične stene parenhimskega tkiva iglavcev. A - P1 – mikrofibrile vzporedne z osjo celice, P2 – mrežasta prepletenost mikrofibril in P3 večlamelna zgradba z izmenjavajočim potekom fibril. B - P - večslojna primarna stena z različno orientacijo mikrofibril, S – odebeljena sloja sekundarne stene z nasprotnima heliksoma. (po Hon & Shiraishi, 2001)

Pri listavcih je za stene **trakovnih parenhimskih celic** značilna večplastna zgradba iz izotropnega in zaščitnega sloja. Stene imajo visoko vsebnost hemiceluloz, pektina in celuloznih mikrofibril ter postanejo bogate z ligninom, ko se odloži notranja sekundarna stena. Zgradba sten celic vzdolžnega parenhima

je dvokomponentna iz lignificiranega celuloznega sloja (CL) in amorfne sloja (AL), s prevladujočimi tremi tipi organizacije (sl. 8):

- (3CL),
- (3CL + AL) in
- (3CL + AL + iCL).



Slika 8 Značilna dvokomponentna zgradba celičnih sten parenhima listavcev (CL – celulozni sloj; AL – amorfni sloj).

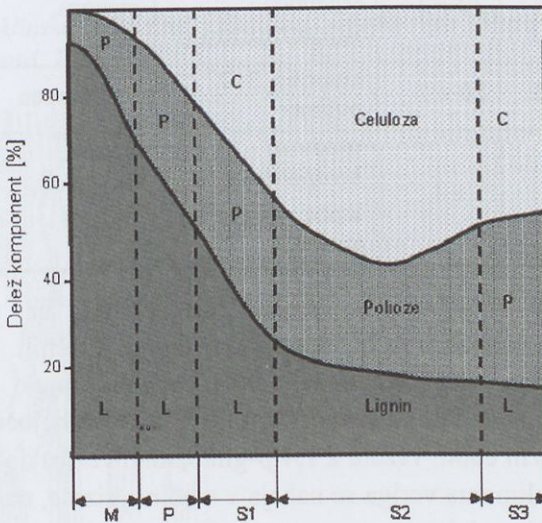
Drugi tip je značilen za paratrahealni parenhim z veliko piknjami s trahejnim omrežjem.

Značilna kompozitna zgradba celičnih sten se formira že v času diferenciacije celic. Po nastanku novih celic v kambijeви coni se nadaljuje njihova rast v radialni smeri, ki povzroči tudi stanjšanje radialnih sten in povečanje mikrofibrilnega kota. Poleg primarne stene se navznoter začne odlagati sekundarna stena. V drugem delu se aktivno odlagajo celulozne mikrofibrile v vseh slojih sekundarne stene S1, S2 in S3, medtem pa se na zunanjih delih celične stene (srednji lameli in primarni steni) že začne lignifikacija, ki ima pomembno vlogo pri stabilizaciji velikosti in medsebojnem razporedu sosednjih diferencirajočih celic. Polioze se sintetizirajo za nastankom celuloznih fibril. Sledi lignifikacija sekundarne stene. Z lignifikacijo doseže stena ustrezno togost. V zaključnem delu se lahko proti lumnu odloži še bradavičasti sloj, helikalne odebelitve ipd. Na koncu diferenciacije citoplazma avtolitsko razpade, celica pa je sposobna začeti izvajati naloge v zrelem sekundarnem ksilemu. Diferenciacija po oceni traja približno tri tedne.

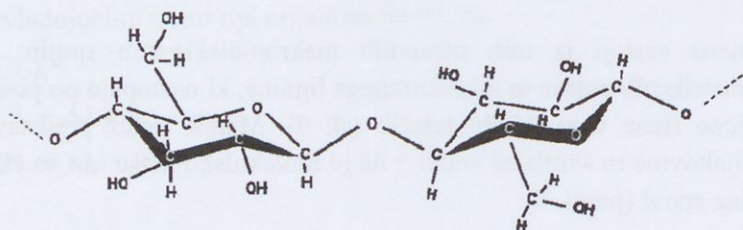
Makromolekularna zgradba lesa

Celična stena sestoji iz treh osnovnih makromolekularnih spojin: ogrodne celuloze, matriksnih polioz in inkrustiranega lignina, ki nastopajo po posameznih slojih celične stene v različnih deležih (sl. 9). Manjši delež predstavljajo še pektin, beljakovine in škrob ter snovi z nižjo molekulsko maso kot so ekstraktivi in mineralne snovi (pregl. 7).

Osnovna ogrodna sestavina celične stene je **celuloza** ($C_6H_{10}O_5$)_n, ki se pojavlja pri iglavcih in listavcih v približno enakem deležu. Celulozne molekule sestavljajo β-D-glukozne enote, medsebojno vezane z 1,4-β-glikozidnimi vezmi, ki omogočajo formiranje dolgih linearnih molekul (sl. 10). Število glukoznih enot v celulozni verigi (stopnja polimerizacije – DP degree of polymerisation) je v primarni steni med 2000 in 4000, v sekundarni steni pa do 10000, kar pomeni, da lahko molekula doseže dolžino do 5 μm (sl. 11). Vsaka glukozna molekula ima tri proste polarne hidroksilne skupine (eno primarno in dve sekundarni), ki omogočajo vzpostavljanje šibkejših Van der Waalsovih ali nekoliko močnejših vodikovih vezi (sl. 12). V plazmalemi, ki je sestavljena iz več polipeptidnih podenot, nastaja istočasno več molekulskih verig, tako da kristalizacija poteka spontano z agregiranjem.



Slika 9 Deleži celuloze, polioz (hemiceluloz) in lignina v posameznih slojih celične stene (M – srednja lamela, P – primarna stena, S1, S2 in S3 – sloji sekundarne stene). (po Panshin & de Zeeuw, 1980)



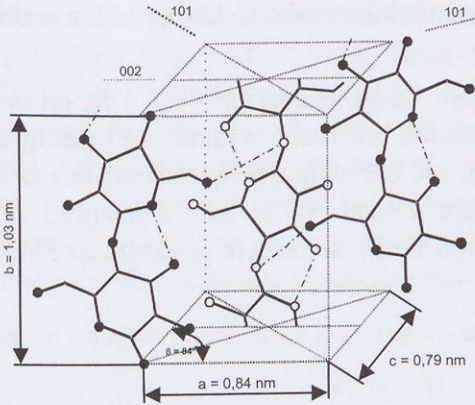
Slika 10 Celulozno verigo tvorijo glukoze enote, povezane medsebojno z 1-4 β glikozidno vezjo.

Preglednica 7 Deleži, stanje, osnovne enote in vloga osnovnih makromolekularnih komponent lesa (Dinwoodie, 2000).

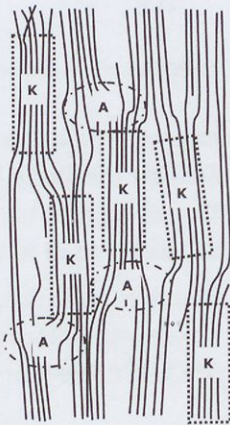
Komponenta	Delež [%]		Polimerno stanje	Osnovna enota	Vloga
	Iglavci	Listavci			
Celuloza	42 \pm 2	45 \pm 2	Kristalizacija; dolge orientirane, linearne molekule	glukoza	vlakno
Polioze	27 \pm 2	30 \pm 2	kristalizacija – izjemno; manjše molekule	galaktoza, manoza, ksiloza	matriks
Lignin	28 \pm 2	20 \pm 2	amorfen, 3-D polimer	fenilpropan	
Ekstraktivi	3 \pm 2	5 \pm 4	osnovne komponente topne v organskih topilih	terpeni, polifenoli, stilbeni	raznolikost

Vzporedne celulozne molekule se prečno medsebojno ne povezujejo s kovalentnimi vezmi, ampak tvorijo kompleks dokaj močnih vodikovih in nekoliko šibkejših van der Waalsovih vezi ter izkazujejo monoklinsko kristalizacijo. V kristalnem delu je celuloza zgrajena iz ponavljajočih se osnovnih enot celobioze (glukoze enoti, vezani z 1,4- β -glikozidno vezjo) dolžine 1,03 nm. Osnovna celulozna polimerna veriga se nahaja v sredini prizme, na ogljikih pa se nahajajo še štiri. Vsaka glukoza enota tvori dve notranji (intra) molekularni vodikovi vezi (med OH-3₍₁₎ in O-5₍₂₎ ter OH-6₍₁₎ in OH-2₍₂₎) in eno med- (inter) molekularno, ki je približno pravokotna na vzdolžno os (med OH-6 in OH-3). Velikost **kristalitov** je 5 nm do 10 nm x 3 nm do 4 nm x 30 nm do 60 nm.

Stopnja kristaliničnosti celuloze je približno 60 %, tako da se kristalna območja menjavajo z amorfnimi, v katerih so prečne vezi med celuloznimi molekulami šibke. Usmerjena kristalna območja različnih dolžin in širine pribl. 100 nm imenujemo **mikrofibrile**. Ena molekula celuloze prehaja preko več kristalnih in amorfnih področij (sl. 12). Vlanknasta in plastna struktura ter močne vodikove vezi dajejo celulozi v vzdolžni smeri veliko natezno trdnost in slabo topnost v topilih.



Slika 11 Monoklinska kristalna celulozna rešetka (po Mayer in Misch, 1937 iz Bosshard, 1974).

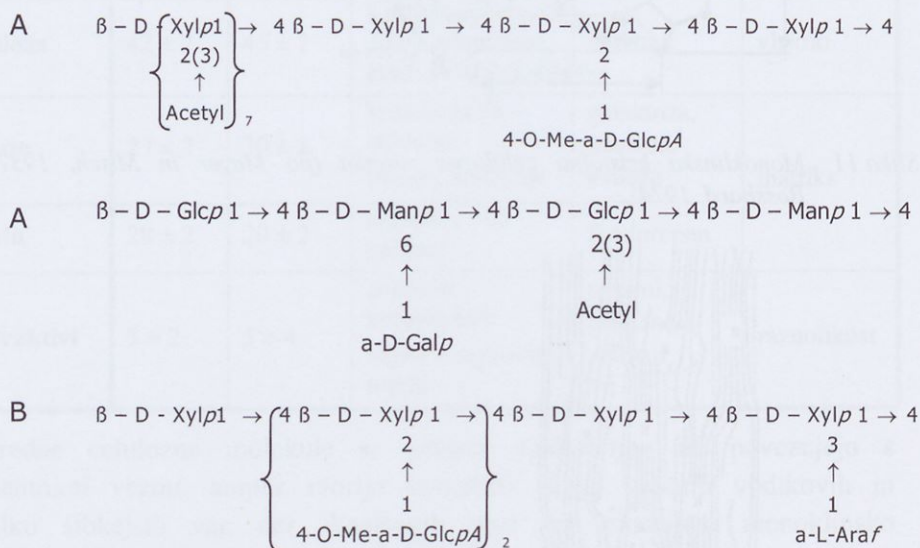


Slika 12 Molekula celuloze prehaja preko več »urejenih« kristalnih (K) in »neurejenih« amorfnih (A) področij.

Polioze ali hemiceluloze so nizkomolekularni polisaharidi (iz 50 do 400 pentoznih in/ali heksoznih sladkornih enot). V primerjavi s celulozo so molekule precej krajše z nizko stopnjo kristalizacije in vejnato strukturo. Razlikujejo se tudi v sestavi, so iz različnih sladkornih enot. Celuloza in polioze so medsebojno vezane z vodikovimi in van der Waalsovimi vezmi, močnejše kemične (kovalentne) vezi pa nastajajo med ligninom in poliozami (preko vej arabinoze, ksiloze in galaktoze).

Pri iglavcih (sl. 13A) zasledimo z največjim deležem galaktoglukomanan (15 % do 20 %) in ksilan (do 10 %) z metilglukuronsko kislino (1 : 5) in arabinozo (1 : 7).

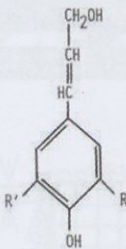
Pri listavcih (sl. 13B) prevladujejo verige ksilana (25 % ± 5 %, pri brezi do 35 %), na katere so v neenakomernih intervalih vezane 4-O-metilglukuronska kislina (pribl. v razmerju 10 : 1), več OH skupin pa je zamenjano z O-acetilnimi skupinami. Stopnja polimerizacije je med 100 in 200. Z manjšim deležem so prisotni še glukomanan (v razmerju 1 : 2), ramnoza in galakturonske kisline.



Slika 13 Zgradba polioz pri A – iglavcih in B – listavcih (Xyl – ksilan, Glc – galaktan, Man – manan) (Siau, 1984)

Lignin je tridimenzionalni aromatični polimerni kompozit iz treh osnovnih fenilpropanolnih enot (a/ R, R' = H – p-kumarilni alkohol; b/ R = OCH₃, R' = H – koniferilni alkohol in c/ R, R' = OCH₃ – sinapilni alkohol) (sl. 14). Je inkrustriran med interfibrilne prostore celične stene, nahaja se še v medceličnih prostorih. Pri iglavcih je vsebnost lignina 23 do 33 % oziroma izjemno visoka pri kompresijskem lesu (od 34 % do 41 %), medtem ko ga je pri listavcih zmernega pasu manj (od 16 % do 25 %), v tropskih lesovih pa več (od 20 % do 32 %).

Lignifikacija se prične v celičnih ogliščih, ko se konča površinska rast celice in pred začetkom nastanka sekundarne stene. V srednji lameli in primarni steni se najprej lignificirajo tangencialne stene, lignifikacija pa se nato nadaljuje v centripetalni smeri. Lignifikacija združene srednje lamele in kasneje tudi sekundarne stene ter diferenciacija slojev sekundarne stene poteka vzporedno. Lignifikacija sekundarne stene se pospeši po nastanku notranjega sloja sekundarne stene. Inkrustacija lignina je zaključena za sintezo celuloze in polioz. Za srednjo lamelo je značilna velika koncentracija lignina; v sekundarni steni je nizka, vendar pa se ga nahaja zaradi debeline stene 70 % prav v njej.



R, R' = H – p-kumarilni alkohol

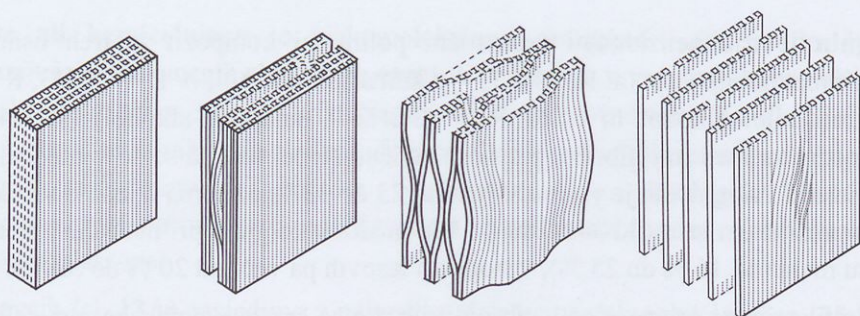
R = OCH₃, R' = H – koniferilni alkohol

R, R' = OCH₃ – sinapilni alkohol

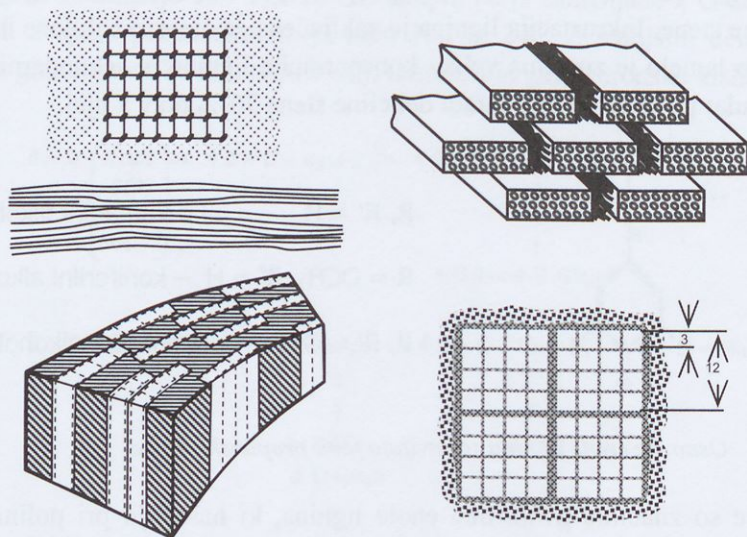
Slika 14 Osnovne enote lignina sestavljajo fenil propanske enote.

Za iglavce so značilne gvajacilne enote lignina, ki nastajajo pri polimerizaciji koniferilnega alkohola, za listavce pa je značilni gvajacilni-siringilni lignin kot kopolimer koniferilnega in siringilnega alkohola. Kompresijski les vsebuje poleg gvajacilnih enot še povečan delež p-hidroksifenila.

Značilnost nastajanja in priraščanja celične stene se zrcali tudi v njeni plastni strukturi ter značilni povezavi osnovnih makromolekularnih komponent celuloze, polioz in lignina (sl. 15 in sl. 16).



Slika 15 Model inkrustacije lignina v plastno strukturo celuloznega skeleta. (Boyd, 1977)



Slika 16 Modeli plastne strukture fibril (po Fengel in Wegener, 1984).

Ekstraktivne snovi se nahajajo v celičnih lumnih in celičnih stenah. Njihov delež je običajno majhen vendar značilno prispevajo k barvi, vonju, biološki odpornosti lesa ipd. Najpomembnejši so polifenoli in terpeni; npr. tanini, flavoantocianini, katehini in lignani (pregl. 8). Med ekstraktivi se pojavljajo še maščobe in njihove kisline, voski in hlapljivi ogljikovodiki. Anorganskih snovi vsebuje les le nekaj desetink odstotka z največjim deležem kalcija, kalija in magnezija. Pogosti so romboidni kristali kalcijevega oksalata, pri tropskih vrstah pa se lahko v večjih količinah pojavlja tudi silicijev dioksid.

Preglednica 8 Osnovni razredi ekstraktivnih snovi (Ressel, 20007).

Komponente	Značilnost	Nahajališče
Hlapljiva olja	Terpeni; monotepeni in seskviterpeni Terpentin - (zmes alfa-pinenov in beta-pinenov s smolo), trupoleni	Pretežno iglavci
Smole	Kislinski diterpeni Smole iglavcev na osnovi visoko molekularnih oljih	Pretežno listavci
Maščobe in voski	Suberin	Majhen delež
Tanini	Hidrolizirajoči tanini, predvsem galotanini (estri galne kisline z glukozo) Kondenzirajoči tanini, osnovani na flavonoidih	Listavci in iglavce
Lignani	Optično aktivni ligninski dimeri	Listavci in iglavce
Ogljikohidrati	Tipične hranljive rezerve	Listavci in iglavce

VARIABILNOST IN HETEROGENOST ZGRADBE LESA

Velika variabilnost in heterogenost zgradbe lesa se kaže na fizikalno-mehanskih karakteristikah in seveda tudi na uporabnosti lesa. Med najvplivnejšimi zgradbenimi posebnostmi so (Zobel in van Buijtenen 1989):

- orientiranost vlaken z zavito (spiralno) ali menjaje zavito oz. izmenično prepleteno rastjo;
- čas nastanka lesa (juvenilni - mladostni in adultni – zreli les);
- reakcijski les – tenzijski pri listavcih in kompresijski pri iglavcih;
- rastne napetosti;
- hitrost priraščanja (širina branik in razmerje med deležem ranega ter kasnega lesa; razmerje med deležem beljave in jedrovine);
- grče in
- biološke anomalije ter mehanske poškodbe.

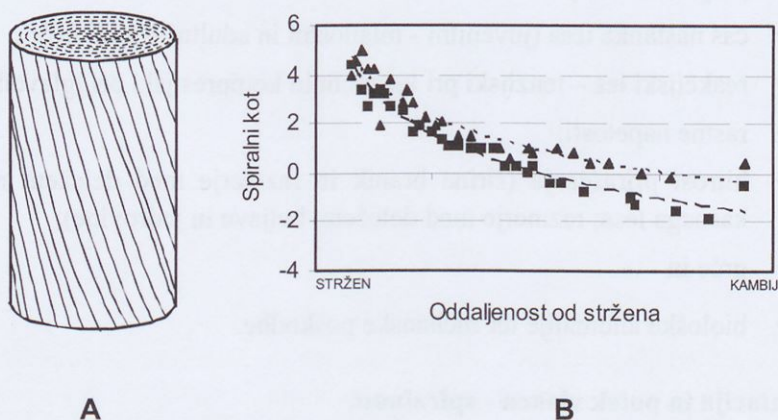
Orientacija in potek vlaken - spiralnost

Orientacijo vlaken zaznamujemo s pojavom, ko potekajo osna vlakna in tudi drugi elementi v drugačni smeri od osi debla, korenin ali vej (Noskovaik, 1963). Opredeljena je s smerjo in velikostjo kota rotacije vlaken v tangencialni ravnini glede na stržen ali vertikalno os debla. Potek aksialnih elementov najpogosteje sledi obliki spirale, nenavadna ni niti zavita in izmenično prepletena rast, saj se v kambiju novo nastali aksialni elementi lahko med diferenciacijo različno odklonijo (sl. 17 in sl. 18). V nobenem drevesu ni potek rasti idealno vzporeden z njegovo osjo, odkloni variirajo od 0° pa do 30° v eno ali drugo smer, v izjemnih primerih tudi skoraj do 90° . Elementi lesa in skorje so podobno orientirani, ker skoraj istočasno nastajajo iz istih fuziformnih kambijevih inicialk. V radialni smeri se elementi med rastjo ne odklanjajo. Odklon vlaken pri žaganih elementih pa nastane zaradi značilnega razžagovanja, ko obdelavnostna ravnina ne sovпада z anatomsko (sl. 19).

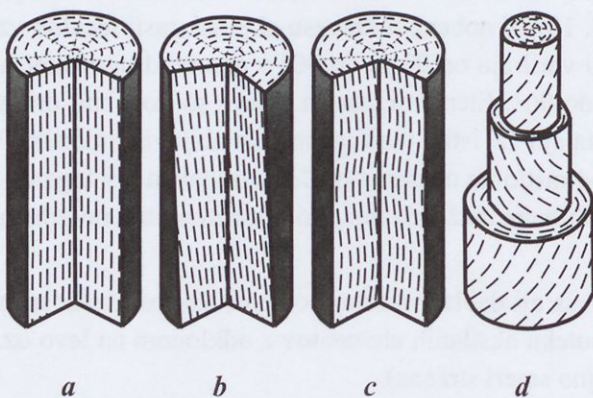
Pri spiralni rasti drevesa ali debla govorimo o levosučni oz. desnосуčni rasti, pri lesu pa govorimo o poteku aksilanih elementov z odklonom na levo oz. desno od referenčne osi (običajno smeri stržena).

Večina iglavcev vsebuje spiralno rast, katere smer in kot variirata s starostjo drevesa in položajem vzdolž debla. V ravnih deblih so lesna vlakna ob strženu

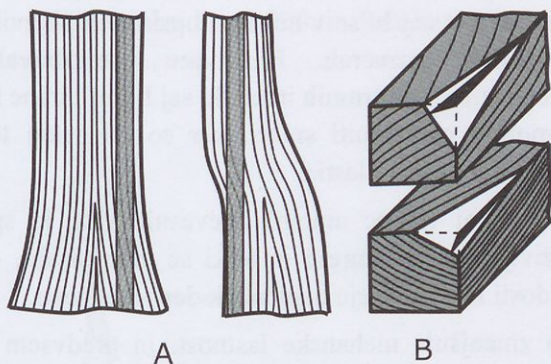
večinoma vzporedna z osjo debla, prve branike ob strženu imajo manjšo spiralno rast, ki je najpogosteje levosučna skozi deblo, nato se levosučna spiralnost navadno še **povečuje** in kulminira v naslednjih deset do dvajset branikah (Tremblay, 1995). Spiralnost se v adultnem obdobju postopoma zmanjšuje in lahko zavzame različne vzorce: ostane pretežno levosučna, lahko postopoma s premerom pada ali pa postane celo desnosučna in v starejših deblih celo prevladuje (Haukal, 1982).



Slika 17 A – Levosučni spiralni potek vlaken na tangencialni ravnini in B - tipični odklon vlaken pri iglavcih z značilno levosučnostjo v juvenilnem obdobju in prehodom celo v desnosučnost v adultnem lesu.



Slika 18 A – Značilni vzorci poteka vlaken kot posledica rasti: a) premi ali ravni potek; b) spiralni potek; c) vzvalovani (valovit) potek; d) izmenično spiralni potek.



Slika 19 Diagonalni potek vlaken zaradi (A) priraščanja ali (B) razžagovanja.

Pri listavcih je variabilnost lesnih lastnosti večja kot pri iglavcih, večja je tudi pestrost v pogledu poteka aksialnih elementov. V nekaj prirastnih plasteh ali celo v krajših periodah se lahko orientacija tudi obrne.

Prevladuje mnenje, da je spiralna rast pri mnogih vrstah podedovana, nekatera opazovanja pa kažejo zanemarljiv vpliv genetskega nadzora nad spiralnostjo. Spiralno rast pripisujemo še vzajemnim vplivom vetra, rotaciji zemlje, poškodbam, električnim in magnetnim poljem, delovanju vzvoda vej, izpostavljenosti delovanja sonca in lune ali pa intruzivni apikalni rasti aksialnih elementov.

Spiralna rast ima pomembno vlogo v preskrbi drevesa z vodo, saj se zaradi nje voda iz katerekoli korenine porazdeli po vsej krošnji. Odklon in smer odklona se lahko menja od ene do druge prirastne plasti, kakor tudi znotraj nje navzgor po drevesu.

Z delitvijo fuziformnih kambijevih inicialk nastajajo centripetalno ksilemske celice in centrifugalno floemske celice. Obe vrsti derivatov obdržita podobno orientacijo, zato je spiralna rast prisotna tudi v skorji in ima podoben rezultat kot v lesu. Fotosintetski produkti iz določene veje se porazdelijo po deblu in dosežejo več korenin. Njihova razporeditev ni tako enakomerna kot je porazdeljena voda iz dveh razlogov: (a) transport hrane je omejen na tanko plast floema, nastalega v zadnjih dveh sezonah in (b) zaradi povečevanja premera debla je spiralnost premalo izrazita. Z vidika preživetja drevesa je neenakomerna distribucija asimilatov neproblematična, saj lahko korenine nadaljujejo življenje s

predhodno skladiščeno zalogo tudi po mesecih ali celo letih, medtem ko brez vode odmro že v nekaj dneh. Spiralna rast uravnoveša neenakomerno preskrbo z vodo in hrano, zato so drevesa v neugodnih razmerah nagnejna k izrazitejši spiralni rasti. Povečana spiralnost naj bi se v nekaterih primerih pojavila tudi pri izrazito ugodnih življenjskih razmerah. Prekinitev preskrbovalnih poti (poškodbe) izzovejo reorientacijo fuziformnih inicialk, saj lignificirane ksilemske in floemske celice ne morejo spremeniti smeri, ker so že nekaj tednov po formiranju trdno vklopljene v sosednje plasti.

Spiralna rast je normalni rastni vzorec mnogih drevesnih vrst, ki spremenijo potek rasti le enkrat v življenju. Pri smreki in jelki se je izkazalo, da rasteta levosučno spiralno v mladosti in se kasneje nagibata k desnosučnosti.

Spiralna rast v glavnem zmanjšuje mehanske lastnosti in predvsem povečuje zvijanje lesa ob spremembah njegove vlažnosti, povzroča pa tudi probleme pri uporabi proizvodov iz sestavljenega lesa. Najmočnejši vpliv spiralne rasti se realizira med postopkom sušenja, ko se pri žaganem lesu s poševnim potekom vlaken tangencialna komponenta krčenja prenaša na vzdolžno smer elementov. Prisotni odkloni rasti ob vejah, grčah, vozlastih nabreklinah in ostalih rastnih posebnostih še povečajo nevarnost zvijanja.

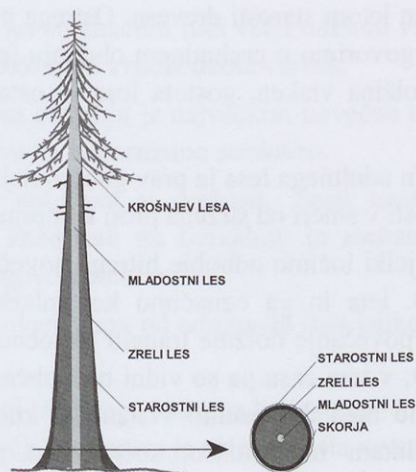
Zaradi plagiotropične lege vej se značilno odstopajoči potek vlaken kaže tudi v grčah, ki prispevajo k splošni deorientaciji osnovnega lesnega tkiva v deblu.

Juvenilni (mladostni) les

Juvenilni les nastaja v mladem drevju ali pri starejšem v območju krošnje. Kambij je takrat mlad in ima ponavadi krajše fuziformne inicialke, razdalja med kambijem in popki oz. listi je majhna, kar omogoča dobro preskrbo z asimilati in rastnimi snovmi (Larson, 1969). Adultni, zreli les nastaja, ko se zaradi rasti drevesa pomakne krošnja navzgor in upade vpliv apikalnih meristemov na kambijevo cono (sl. 20). Adultni les je les z "normalno" zgradbo, t.j. z relativno stabilnimi dimenzijami elementov in stabilnimi lastnostmi. Nasprotno lastnosti lesa znotraj juvenilnega območja niso enotne, so zelo variabilne in se od stržena navzven hitro spreminjajo (Zobel in van Buijtenen, 1989).

V tehničnem smislu traja juvenilno obdobje, dokler vlakna ne dosežejo "normalne" t.j. maksimalne dolžine, po biološki definiciji pa je omejeno juvenilno obdobje s prvim cvetenjem in semenenjem (Kučera 1994; Bensten, 1986; Wasniewski, 1989). Juvenilno obdobje se pri nekaterih lesovih konča dokaj hitro in odrezano, pri drugih je prehod v adultnost postopen. Navadno traja prvih 10 do 20 let kambijeve aktivnosti, lahko pa le 5 ali celo 60 let. Zdi se, da je

starost kambija, pri kateri dosežejo traheide maksimalno dolžino, povezana z življenjsko dobo drevesne vrste. Tako nekatere dolgo živeče drevesne vrste, kot je npr. obalna sekvoja (*Sequoia sempervirens* (D. Don.) Endl.), dosežejo maksimalno dolžino traheid med 200. in 300. letom starosti.



Slika 20 Razporeditev starostnih kategorij lesa v drevesu.

Tvorba juvenilnega lesa in njegov prehod v adultni les sta tudi genetsko pogojena, na njegov nastanek pa vplivajo tudi lega, klimatski pogoji ter gospodarjenje z gozdom. Pri zastrtih drevesih iz gospodarskih sestojev zavzema juvenilni le do 20 % debla, pri prevladujočem pa približno 40 %, kar kaže na vpliv socialnega položaja drevesa na obseg juvenilnosti.

Na daljši čas nastajanja juvenilnega lesa naj bi vplivalo tudi redčenje, gnojenje (predvsem z dušikom), širok razmak med drevesi in drugi gozdarski posegi.

Juvenilno obdobje spremlja dokaj hitra sprememba anatomskih, fizikalnih in kemičnih lastnosti, kar se kaže tudi v uporabnosti juvenilnega lesa.

Trajanje juvenilnega obdobja pri iglavcih lahko ocenjujemo s spreminjanjem dolžine traheid oziroma tudi z drugimi lastnostmi lesa; mehanske lastnosti in gostota lesa dosežejo stabilne vrednosti nekoliko prej (po oceni do 15. leta), medtem ko traheide dolžinsko kulminirajo nekoliko kasneje (do 20. leta), še kasneje se zmanjša nagnjenost vlaken (pribl. do 30. leta). Juvenilnost, izražena z

razlikami med dolžino juvenilnih in adultnih vlaken, je pri iglavcih mnogo bolj poudarjena kot pri listavcih - zlasti pri evolucijsko naprednejših.

Juvenilno obdobje lahko omejimo tudi z letom, ko drevo doseže maksimalni višinski prirastek, takrat začne kambij na bazi drevesa (prsna višina) tvoriti normalen - adultni les. Glede na pogoje rasti kulminira višinski prirastek pri smreki med dvajsetim in tridesetim letom starosti drevesa. Ostrega prehoda med starostnima kategorijama ni, zato govorimo o prehodnem obdobju (pribl. od 20. do 25. branike), ko se ustalijo dolžina vlaken, gostota lesa in ostale fizikalne lastnosti lesa.

S stališča primerjave juvenilnega in adultnega lesa je prav gotovo najzanimivejša obravnava različnosti lesnih lastnosti v smeri od stržena proti kambiju.

Odkloni od starosti pri smreki in jelki ločimo obdobje hitrega povečevanja rasti aksialnih traheid, ki traja do 10. leta in ga označimo kot mlajše juvenilno obdobje. Med 10. in 30. letom je povečanje dolžine traheid razločno, vendar ne tako intenzivno kot prvih deset let; v tem času pa so vidni tudi občasni odkloni. Velike razlike so v dolžini traheid med drevesnimi vrstami in znotraj njih je mogoče pripisati prirastnim razlikam na rastišču, socialnemu položaju in gojilni praksi. Po 30. letu se podaljševanje traheid še nadaljuje, vendar počasneje in z odkloni navzgor ali navzdol. Na osnovi meritev ugotavljamo, da ima v splošnem smreka daljše traheide od jelke.

Pri iglavcih se povečuje debelina sten pri traheidah od stržena proti periferiji. Po podatkih za bore, araukarijo in kriptomerijo naraste debelina celičnih sten v kasnem lesu od 15 % do 70 % že do 30. leta starosti. Porast debeline celičnih sten v ranem lesu je manjša.

Mikrofibrilni kot v stenah traheid je obratno sorazmeren z njihovo dolžino; s porastom dolžine traheid se mikrofibrilni kot zmanjšuje (Panshin in DeZeeuw, 1980).

Za iglavce navadno velja, da od stržena navzven **gostota absolutno suhega lesa** hitro narašča, nato sledi krajše prehodno obdobje, katerega nadomesti bolj ali manj uravnotežena gostota lesa proti periferiji (Zobel in van Buijtenen, 1989). Prav gotovo prispevajo k veliki variabilnosti tudi razlike znotraj prirastnih plasti (rani les - kasni les!) in razlike v širini branik, če drevo ne prirašča enakomerno.

Najpogostejši trend porazdelitve gostote v radialni smeri je pri hitro in počasi rastočih drevesih podoben, tudi povečanje gostote je neodvisno od hitrosti rasti. Osnovna gostota narašča od centra proti periferiji na vseh višinah debla, vendar

močnejše na bazi drevesa kot višje. Navedene zakonitosti veljajo splošno, seveda pa je veliko izjem in posebnosti.

Za smreko in jelko splošno velja, da imata višjo osnovno gostoto ob strženu, ki nato v nekaj branikah pada, čemur sledi bolj ali manj enakomerno in počasno naraščanje proti skorji.

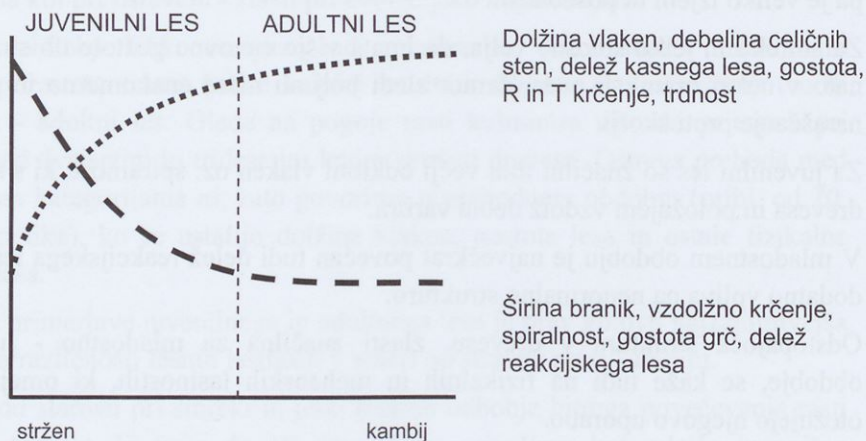
Za juvenilni les so značilni tudi večji odkloni vlaken oz. spiralnost, ki s starostjo drevesa in položajem vzdolž debla variira.

V mladostnem obdobju je največkrat povečan tudi delež reakcijskega lesa, ki še dodatno vpliva na nenormalno strukturo.

Odstopajoča struktura v drevesu, zlasti značilna za mladostno - juvenilno obdobje, se kaže tudi na fizikalnih in mehanskih lastnostih, ki omejujejo in otežujejo njegovo uporabo.

Odstopanja juvenilnega od adultnega lesa lahko strnemo v naslednjih točkah (sl. 21):

- Ker ni izrazitega kasnega lesa, so celične stene tanjše, premeri lumnov pa so večji. Posledica je nižja gostota juvenilnega lesa.
- V juvenilni coni se, zaradi potrebe po intenzivnih reorientacijah osi drevesa, praviloma pojavlja veliko reakcijskega lesa (kompresijskega pri iglavcih in tenzijskega pri listavcih) s slabšimi tehnološkimi lastnostmi.
- Značilen je velik aksialni skrček, ki je vzrok za veženje lesa. Večje krčenje v vzdolžni smeri je posledica večjega mikrofibrilnega kota in spiralnega poteka, ki sta značilna za juvenilni les. Torej, če je deska odrezana tako, da vsebuje juvenilni les, se bo ta del krčil bolj kot drugi, kar bo povzročilo krivljenje in pokanje, tudi ko bo les v uporabi.
- Pri iglavcih so traheide mladostnega lesa krajše od traheid zrelega lesa, zato je bistveno manjša predvsem udarna žilavost pa tudi ostale trdnosti.
- Juvenilni les se razlikuje od zrelega lesa tudi kemijsko; ima več lignina in ksilana ter manj celuloze in galaktoglukomanana. Kemijske razlike imajo na kakovost manjši vpliv kot anatomske.
- Zaradi svoje centralne lege je vlažnost juvenilnega lesa praviloma nižja kot v perifernem adultnem lesu. Razlog je predvsem fiziološki, saj je periferni del udeležen pri prevajanju vode. Če pa je npr. prisotno mokro srce, vlažnost močno naraste.
- Spiralni potek vlaken je v juvenilnem lesu večji, kar zmanjšuje mehanske lastnosti in povečuje zvijanje.



Slika 21 Povečevanje oziroma zmanjševanje nekaterih anatomskih, fizikalnih in mehanskih lastnosti lesa v juvenilnem v adultnem obdobju (po Bendesten, 1978).

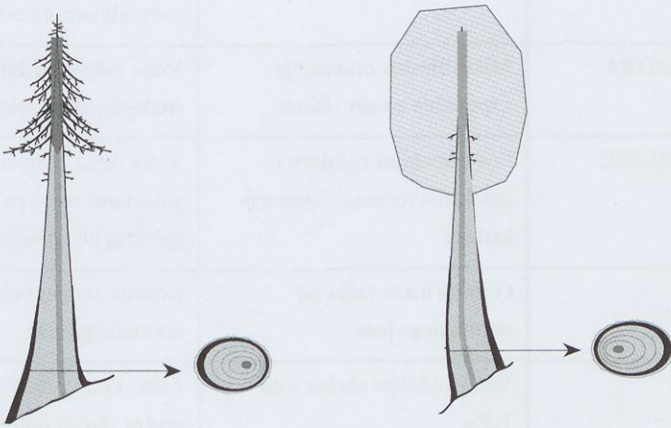
Reakcijski les

Rast rastlin in tudi dreves usmerjajo tudi zunanji dražljaji (tropizem – fototropizem, geotropizem, tigmotropizem, kemotropizem, termotropizem ipd.) med katerimi je za rast rastlin najpomembnejša plagiotropna lega vej, ki omogoča optimalno osvetljevanje listne površine s sončno svetlobo. Kadar je predvidena smer rasti motena, se v času sekundarne (debelitvene) rasti dreves pojavi reakcijski les kot aktivno usmerjevalno tkivo. Reakcijski les se oblikuje kot odgovor na orientacijo debla, ki odstopa od negativne geotropične lege, ki nastane pod vplivom asimetrične oblike krošnje, močnega vetra, snega ali naklona rastišča. Deblo z reakcijskim lesom je ovalno (ekscentrično) z večjim radijem na “reakcijski” strani. Zaradi svoje posebne funkcije v drevesu se zgradba reakcijskega lesa razlikuje od normalnega, drugačne pa so tudi njegove lastnosti, ki se kažejo predvsem negativno pri predelavi in uporabi (Panshin in DeZeeuw, 1981)(pregl. 9).

Reakcijski les večinoma ne nastaja skozi celotno življenjsko obdobje drevesa, ampak se lahko sporadično pojavlja v krajših ali daljših časovnih intervalih. Zelo pogosto ga zasledimo v mladostnem – juvenilnem lesu, ko je drevo še vitko in zunanji dražljaji močneje vplivajo na njegovo odzivnost. Pri iglavcih se

reakcijski les tvori na spodnji strani vej ali ukrivljenih debel in ga imenujemo kompresijski les, medtem ko nastane pri listavcih na zgornji strani vej ali debel in ga imenujemo tenzijski les (sl. 22).

Na prečnem prerezu so traheide **kompresijskega lesa** zaobljene, zato so med njimi večji intercelularni prostori, ki so tem večji čim debelejšje so celične stene (Timell, 1986). Intercelularni prostori so prazni ali bolj ali manj zapolnjeni z ligninom in pektini, debeline celičnih sten so večje kot pri normalnem lesu, zato ima tudi večjo gostoto. Notranji sloj sekundarne stene S3 pri traheidah kompresijskega lesa navadno manjka, za srednji sloj SL pa je značilen velik mikrofibrilni kot in helikalne razpoke. Kompresijski les je rdečkasto rjave barve, ima mrtev videz brez leska, prehod iz ranega v kasni les je manj izrazit. Precej večje vzdolžno krčenje kompresijskega lesa (do 5 %) od normalnega je posledica mikrofibrilnega kota, krčenje pa je znatno manjše v prečnih smereh (pribl. za polovico).



Slika 22 Pojav reakcijskega lesa pri iglavcih in listavcih: A – kompresijski les nastaja pri iglavcih na spodnji strani vej ali ukrivljenih debel; B – tenzijski les pri listavcih nastaja na zgornji strani vej ali ukrivljenih debel.

Ravnovesna vlažnost in točka nasičenja celičnih sten sta pri kompresijskem lesu nekoliko nižji kot pri normalnem lesu, kar je posledica povišane vsebnosti lignina, ki je manj higroskopen. Kompresijski les ima zaradi manjših lumnov in pikenj tudi manjšo permeabilnost, vendar le v vzdolžni smeri. Zaradi večje gostote je difuzivnost tudi v prečnih smereh manjša. Pri sušenju se pojavijo razpoke, distorzije in veženja, ki zmanjšujejo uporabnost kompresijskega lesa.

Kompresijski les je v svežem stanju bolj žilav (nekoliko večja je tudi tlačna trdnost vzporedno z vlakni) od normalnega, vendar se trdnostne lastnosti s sušenjem počasneje povečujejo kot pri normalnem lesu, glede na večjo gostoto pa so slabše kot bi pričakovali. Zlom je navadno kratko vlaknat.

Preglednica 9 Primerjava zgradbe in lastnosti reakcijskega (tenzijskega in kompresijskega) lesa.

LASTNOST	Tenzijski les	Kompresijski les
GEOMETRIJSKA OBLIKA	Ovalno deblo na zgornji strani	Ovalno deblo na spodnji strani
VIDEZ	Osušen les ima svetlejši »svilen« videz, pri nekaterih tropskih vrstah je temnejši	Temneje obarvan, z mrtvim videzom brez leska
ANATOMSKE POSEBNOSTI	Želatinozna vlakna	Zaobljene traheide z intercelularnimi prostori
TIPIČNA ZGRADBA VLAKEN	Mikrofibrilna orientacija vzporedna z osjo vlakna	Velik mikrofibrilni kot v srednjem sloju sekundarne stene
KEMIČNE RAZLIKE	Povečan delež celuloze in galaktana ter manj lignina in ksilana	Velik delež lignina in več galaktana, manj pa celuloze in galaktoglukomanana
GOSTOTA	Gostota malo večja od normalnega lesa	Gostota znatno večja od normalnega lesa
KRČENJE	Večji vzdolžni skrček - do 1,5%	Zelo velik vzdolžni skrček; prečni skrček polovico manjši kot pri normalnem lesu
TRDNOSTI	Manjša tlačna trdnost	Manjša udarna žilavost, natezna trdnost in elastični modul
OBDELAVA	Pri obdelavi je površina volnata	Zaradi krhkosti lahko nastane hrapava površina

Pri listavcih nastaja **tenzijski les** na zgornji strani ukrivljenih debel in vej. Območja tenzijskega lesa niso strnjena, ampak v okviru branike zasledimo večja ali manjša področja z modificiranimi anatomskimi elementi. Anatomske razlike se izkazujejo predvsem na vlaknih, v ranem lesu je delež trahej manjši in so tudi

manjših premerov, medtem ko so ostali tipi celic več ali manj enaki kot pri normalnem lesu. Delež tenzijskih vlaken je večji, njihov prečni prerez je okrogel ali ovalen, premeri pa nekoliko manjši, vendar z debelejšimi stenami. Za stene tenzijskih vlaken je značilen želatinski sloj (G-sloj), sestavljen pretežno iz celuloznih mikrofibril le pod majhnim kotom (do 5°). G-sloj lahko dopolnjuje vse tri sloje sekundarne stene ($S1 + S2 + S3 + G$), zamenjuje notranji sloj ($S1 + S2 + G$) ali pa nadomešča srednji in notranji sloj sekundarne stene ($(S1 + G)$). Povezanost med G-slojem in ostalimi deli celične stene je slabša kot med ostalimi sloji, zato največkrat med sušenjem prihaja do razslojevanja oziroma do odstopanja G sloja. Fizikalne lastnosti tenzijskih vlaken malo odstopajo od normalnih. Gostota tenzijskega lesa je le nekoliko večja od normalnega (do 10 %). Vzdolžni skrčec, ki ga pripisujemo učinku velikega fibrilnega kota v S1 in slabši povezanosti G-sloja, je večji od normalnega lesa (do 1,5 %), ni pa tako ekstremen kot pri kompresijskem lesu. Tlačna trdnost tenzijskega lesa je v vzdolžni in prečni smeri manjša od normalnega, ima pa tenzijski les v suhem stanju večjo natezno trdnost.

Velik aksialni skrčec tako tenzijskega lesa pri listavcih kot kompresijskega lesa pri iglavcih bistveno prispeva k veženju lesa v procesu sušenja. Ta učinek se še stopnjuje v juvenilnem lesu, kjer je pogostost pojavljanja reakcijskega lesa največja. V adultnem lesu se reakcijski les pojavlja sporadično in nepredvidljivo.

Dokaj uspešno je mogoče negativni učinek reakcijskega lesa preprečiti s sušenjem pod obtežbo, zato žagan les ali elementi, ki ga vključujejo, zlagamo v spodnje dele zložajev ali zložaje dodatno obtežimo.

Notranje ali rastne napetosti

Notranje ali rastne napetosti se vgradijo v lesu že v zadnji fazi diferenciacije celic (Kübler, 1987). Takrat se novo nastala vlakna skušajo vzdolžno skrčiti in bočno razširiti, to pa jim preprečujejo toga starejša že zrela vlakna. Periferija debla je v aksialni smeri obremenjen na nateg, sredina debla pa na tlak. V tangencialni smeri je obod debla obremenjena na tlak, v sredini pa se v tej smeri pojavijo natezne napetosti (sl. 23). Sproščanje notranjih napetosti se pri vzdolžnem in prečnem razžagovanju kaže v značilnih veženjih in srčnih razpokah. Posledica ravnih napetosti sta tudi kolesivost in krhko srce.

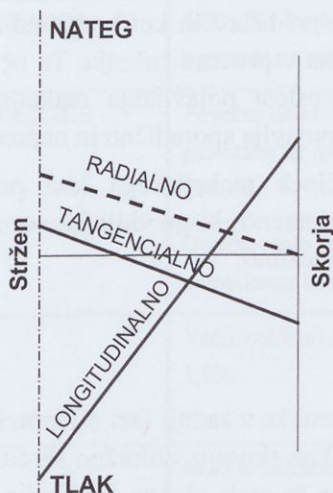
Nastanek notranjih napetosti pojasnjuje več hipotez:

Ligninska nabrekovalna hipoteza: Inkrustacija lignina v celulozni skelet povzroči njegovo prečno razširitev oziroma nabrekanje in zaradi spiralnega poteka

celulozних molekul še vzdolžno krčenje skeleta. Posledica je hkratni nastanek natezних napetosti v vzdolžni smeri in tlačnih v tangencialni smeri. Pri velikem mikrofibrilnem kotu (nad 40° kompresijski les!) je učinek obraten.

Hipoteza intruzivne rasti in vodnega stresa: Zaradi nesovpadanja sezonskega spreminjanja vzdolžnih in tangencialnih napetosti so japonski znanstveniki pripisali nastanek rasti napetosti apikalni intruzivni rasti celic in vodnemu stresu oziroma skrčku debla zaradi tanjših vodnih stolpcev v sušnih obdobjih. Vzdolžne natezne napetosti naj bi nastale že med formiranjem celulozних mikrofibril oziroma med rastjo celice in pred lignifikacijo.

Celulozno tenzijska hipoteza pripisuje velik pomen turgorju, ki omogoča daljšanje celičnih vlaken, kar povzroča med razvojem celične stene tudi raztegovanje celulozних mikrofibril in nastanek natezних napetosti. Krčenje nadzira inkrustacija lignina; čim več lignina se vgradi v skelet, tem manjši je skrček in obratno. Tenzijska vlakna z malo lignina so zato pod velikimi nateznimi napetostmi.



Slika 23 Značilna porazdelitev rasti napetosti v deblu.

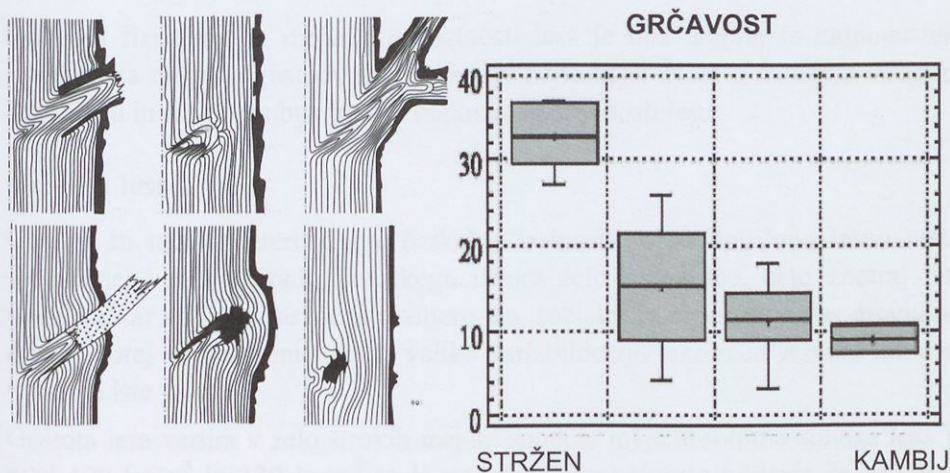
Velike rastne napetosti otežujejo uporabo lesa. Zaradi sproščanja napetosti pri poseku in med razžagovanjem se takoj pojavijo deformacije; tangencialne deske se zvijajo lokasto, radialne pa se usločijo. V sredici debla se zaradi tangencialnih natezних napetosti pojavijo srčne razpoke, kolesivost je posledica radialnih natezних napetosti.

S parjenjem lesa je mogoče napetosti nekoliko sprostiti in s tem zmanjšati njihov negativni vpliv v procesu sušenja.

Grče

Grče so posledica naravnega razvoja oziroma rasti drevesa, vendar jih zaradi njihovega negativnega vpliva na lastnosti lesa štejemo za napake. Grče so del veje, vključene v deblo (sl. 24). Z rastjo drevesa se veje na spodnjem delu debla sušijo in slej ko prej odpadejo, medtem ko ima drevo višje v deblu in v krošnji še žive veje. V živih vejah njihov kambij in prirastne plasti sklenjeno prehajajo v debelni kambij in debelne prirastne plasti, zato so grče zrasle. Ko veje odmro, se povezuje s kambijem prekine, drevo pa prerašča ostanke veje. Suhe veje se pri iglavcih lomijo nekoliko stran od debla in tako ostanejo štrclji, pri listavcih pa se po razkroju veje odlomijo bližje deblu. Zrasle grče živih vej pri iglavcih in zdrave grče živih vej pri listavcih predstavljajo manjšo napako lesa, medtem ko nezrasle grče od suhih vej pri iglavcih in slepice pri listavcih bolj razvrednotijo lesne sortimente. Nezrasle grče in slepice se pojavljajo pretežno v spodnjem, zrasle in zdrave grče pa na zgornjem delu debla. Slepice so lahko že bolj ali manj biološko okužene ali razgrajene in se pojavljajo na sami površini. Njihovo prisotnost prepoznamo po bulah ali pa so popolnoma prerasle in jih na površini debla zaznamo le po sledovih. Grče od epikormskih vej ne segajo globoko v les in jih ne razvrščamo med (večje) napake.

Vpliv grč na kakovost lesa ocenjujemo z njihovo velikostjo in številnostjo.



Slika 24 Značilne grče in njihova gostota v odvisnosti od oddaljenosti od stržena.

GOSTOTA IN POROZNOST LESA

Izbira najprimernejšega lesa za določen izdelek zahteva vrednotenje materiala z več vidikov. Med najpomembnejše sodijo: mesto vgraditve (predvsem zaradi ustrezne trajnosti ali trdnosti lesa), namembnost izdelka, tehnološke lastnosti (odpornost proti obrabi, trdota, trdnost) lesa, fizikalne lastnosti (dimenzijska stabilnost, toplotna in zvočna izolativnost, elektrostatičnost) in estetske lastnosti (dekorativnost, barva, tekstura).

Ob dobrem poznavanju relevantnih (bistvenih) lastnosti posameznih lesnih vrst lahko tudi hitro ocenimo možnost njegove uporabe. Med relevantne lastnosti prištevamo: gostoto, naravno trajnost in možnost impregniranja, potek vzdolžnih elementov, trdnost, dimenzijsko stabilnost, težavnost sušenja in možnost pojava napak, obdelavnost, vijačenje, žebljanje, luščenje ali rezanje furnirja, obdelavo površin, lepljenje, dekorativne posebnosti, obarvanja.

Nekatere relevantne lastnosti vidimo in jih tudi relativno hitro ocenimo: iz oblikovanosti debela sklepamo na potek aksialnih elementov, prisotnost reakcijskega lesa, razpored, število in vrste grč, mehanske poškodbe in obarvanja (diskoloracije). Navkljub dobremu poznavanju lesa pa je za zahtevnejše proizvode treba poleg vizualne ocene poznati tudi fizikalne in mehanske lastnosti.

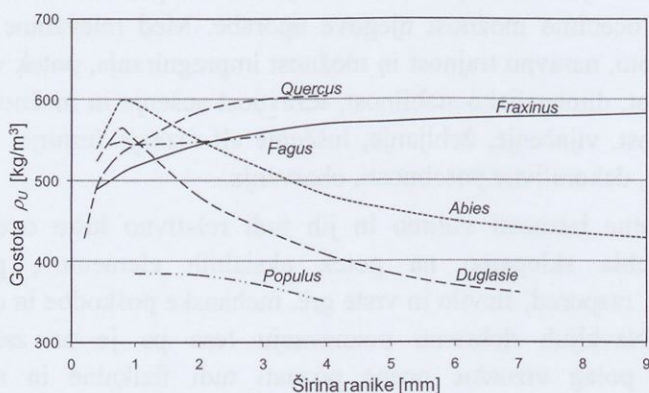
Od vseh fizikalnih in mehanskih lastnosti lesa je bila najprej in najpogosteje proučevana njegova gostota, ki je hkrati v najtesnejši zvezi z mnogimi drugimi lastnostmi in je pomembna tudi za napoved uporabnosti lesa.

Gostota lesa

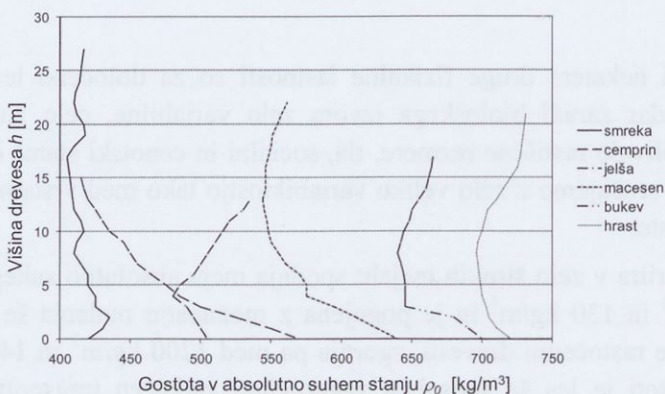
Gostota in tudi nekatere druge fizikalne lastnosti so za določeno lesno vrsto specifične, vendar zaradi biološkega izvora zelo variabilne, celo znotraj iste vrste, na kar vplivajo rastiščne razmere, tla, socialni in cenotski status drevja ter drugo. Torej se srečujemo z zelo veliko variabilnostjo tako med vrstami kot tudi v okviru iste vrste.

Gostota lesa variira v zelo širokih mejah: spodnja meja absolutno suhega lesa je med 100 kg/m^3 in 130 kg/m^3 in je pogojena z možnostjo nujenja še zadostne mehanske opore rastočemu drevesu, zgornja pa med 1200 kg/m^3 in 1400 kg/m^3 (pri takšni gostoti je les še sposoben zagotavljati zadosten transport vode iz koreninskega sistema v krošnjo drevesa). Najlažji les imajo rodovi *Alstonia*, *Ochroma* in *Bombax*, najtežji pa *Guaiacum*, *Dalbergija* in *Piratinera*.

Gostota je v fiziki definirana kot masa na enoto volumna $\rho = dm / dV$ [kg/m³]. Zaradi odvisnosti tako mase kot volumna od lesne vlažnosti ločimo v lesni tehnologiji več načinov izražanja gostote. Gostota pa se spreminja tudi v nihajočih klimatskih razmerah, ko se zaradi higroskopnosti lesa spreminja tudi njegova vlažnost. Poleg vlažnosti na gostoto lesa vplivajo še zgradba lesa (npr. širina ranike (sl. 25), delež kasnega lesa, deleži različnih anatomskih tkiv), vrsta in količina ekstraktivov ter kemijska zgradba. Zaradi variabilnosti zgradbe lesa se spreminja gostota tudi prečno in po višini drevesa (sl. 26).

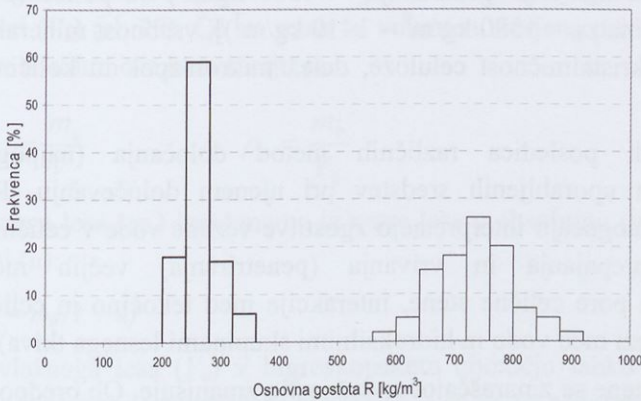


Slika 25 Odvisnost gostote lesa pri vlažnosti 12 % od širine ranik pri iglavcih (jelka, duglazuja), pri listavcih z venčasto porozno strukturo (hrast, jesen) in pri »raztresenoporoznem« topolu. (po Kollmann in Cote, 1968)



Slika 26 Variabilnost gostote nekaterih lesnih vrst po višini debla. (po Kollmann in Cote, 1968)

Velike razlike gostote so tudi v okviru iste branike: pri iglavcih je razmerje gostot ranega in kasnega lesa od 1 : 2,3 pri jelovini, do razmerja 1 : 4,0 pri borovini (sl. 27); pri listavcih z venčastoporoznim lesom je to razmerje približno 1 : 2,5, pri listavcih z difuznoporoznim lesom je precej manjše (npr. pri bukovini 1 : 1,76) (pregl. 10).



Slika 27 Frekvenčna porazdelitev osnovne gostote ranega in kasnega lesa duglazije. (po Bosshard, 1974)

Preglednica 10 Gostota lesa v absolutno suhem stanju ranega in kasnega lesa ter njeno razmerje za nekatere naše najpogostejše lesne vrste. (Šoškič in Popović, 2002)

Lesna vrsta	Gostota v abs. suhem stanju [kg/m ³]		Razmerje
	Rani les	Kasni les	
Macesen	350 do 440	880 do 910	2,8 do 2,1
Smreka	290 do 380	820 do 910	2,8 do 2,4
Jesen	385 do 506	721 do 803	2,03 do 1,55
Hrast	317 do 454	880 do 930	2,8 do 1,96
Bukev	502 do 536	748 do 883	1,76 do 1,34
Javor	500 do 530	668 do 751	1,43 do 1,28

Vpliv gostote moramo upoštevati tudi pri sušenju, saj se pri enakem odstotku zmanjšanja vlažnosti pri različnih vrstah izloči različna masa oziroma količina vode, kar vpliva tudi na krčenje lesa.

Zaradi poroznosti in odvisnosti tako mase kot volumna od lesne vlažnosti, ločimo v lesni tehnologiji več načinov izražanja gostote (glej sl. 29).

Za vse lesove je gostota celične stene ρ_p (imenujemo jo tudi gostota čiste lesne snovi ρ_{les}) skoraj enaka (v absolutno suhem stanju od 1470 kg/m^3 do 1530 kg/m^3). Na gostoto celične stene vplivajo: raznolika kemijska zgradba [npr. celuloza ima nekoliko višjo gostoto ($\rho_C = 1580 \text{ kg/m}^3$) od polioz ($\rho_P = 1500 \text{ kg/m}^3$) in od lignina $\rho_L = 1380 \text{ kg/m}^3 - 1410 \text{ kg/m}^3$], vsebnost mineralnih snovi in ekstraktivov, kristaliničnost celuloze, delež mikrorazpok in količina vezane vode.

Razlike so tudi posledica različnih metod določanja (najpogosteje s piknometrom) in uporabljenih sredstev pri njenem določevanju. Razlike v rezultatih nam omogočajo interpretacijo zgotovitve vezane vode v celičnih stenah, nesposobnosti prepajanja in vrivanja (penetriranja) večjih molekul v submikroskopske pore celične stene, interakcije med tekočino in celično steno (npr. vodikove vezi med vodo in hidrosilnimi skupinami lesnega tkiva) ipd.

Gostota celične stene se z naraščajočo vlažnostjo zmanjšuje. Ob predpostavki, da je vlažnost točke nasičenja celičnih sten 30 %, bi bil volumenski nabrek celične stene 45 %. Tako lahko volumen vlažne celične (V_{vl}) stene zapišemo kot vsoto volumna suhe stene (V_0) in nabreka ($\alpha_V V_0$), če je α_V volumenski nabrekovalni koeficient.

$$V_{vl} = V_0 + \alpha_V \cdot V_0$$

Ob upoštevanju povečanja mase na račun vezane vode (delež je enak volumenskemu nabreku) in njene zgotovitve v celičnih stenah je gostota vlažne celične stene 1385 kg/m^3 .

$$\rho_{\rho u} = \frac{m_{\rho u}}{V_{\rho u}} = \frac{m_{\rho 0} + \alpha_V \cdot \rho_{vv}}{V_{\rho 0} \cdot (1 + \alpha_V)}$$

V zgornjih enačbah je:

$\rho_{\rho u}$	gostota vlažne celične stene,	[kg/m^3]
$m_{\rho u}$	masa vlažne celične stene,	[kg]
$V_{\rho u}$	volumen vlažne celične stene,	[m^3]
$m_{\rho 0}$	masa suhe celične stene,	[kg]
$V_{\rho 0}$	volumen suhe celične stene,	[m^3]
ρ_{vv}	gostota vezane vode,	[kg/m^3]
α_V	volumenski nabrekovalni koeficient.	[- ; %/%)

Velike razlike v gostoti različnih lesov ne izvirajo iz razlik v gostoti celične stene, ampak je vzrok zelo raznolik delež celičnih sten in lumnov, ki določa poroznost lesa. K variabilnosti prispevajo še različni deleži parenhimskega tkiva, trakov, trahej in smolnih kanalov.

Gostota lesa (kot poroznega materiala) pri določeni vlažnosti ρ_u je definirana z razmerjem med maso lesa pri določeni vlažnosti (m_u) in njegovim volumnom pri isti vlažnosti (V_u) (sl. 28). Če sta masa in volumen merjena pri vlažnosti 0 %, je to gostota v absolutno suhem stanju ρ_0 .

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u} \qquad \rho_0 = \frac{m_0}{V_0}$$

Maso vlažnega lesa (m_u) izračunamo iz mase lesa v absolutno suhem stanju (m_0) in vlažnosti (u):

$$m_u = m_0(1 + u)$$

Volumen vlažnega lesa (V_u) v higroskopskem območju lahko izračunamo, če poznamo diferencialni volumenski nabrek (q_V), ki je od absolutno suhega stanja do vlažnosti 25 % konstanten.

$$V_u = V_0(1 + u \cdot q_V)$$

Z upoštevanjem predhodnih enačb sledi:

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u} = \frac{m_0 \cdot (1 + u)}{V_0 \cdot (1 + u \cdot q_V)} = \rho_0 \frac{1 + u}{1 + u \cdot q_V}$$

Če predpostavimo, da je nabrek enak količini v celične stene vrinjene higroskopske vode, ter da je vlažnost točke nasičenja celičnih sten pribl 28 %, lahko za območje od 0 % vlažnosti do vlažnosti 25 % odvisnost gostote od vlažnosti zapišemo:

$$\rho_u = \rho_0 \frac{1 + u}{1 + 0,84 \cdot \rho_0 \cdot u}$$

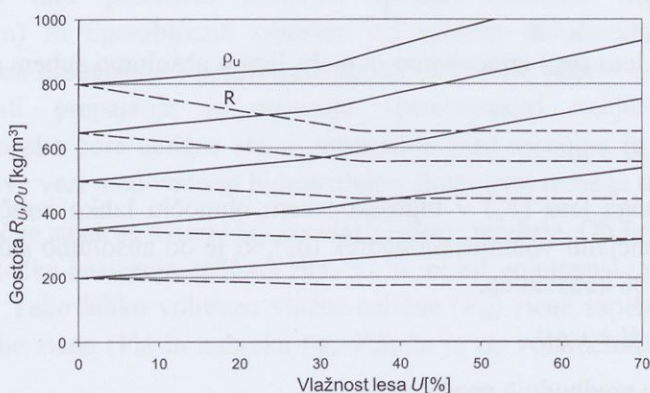
Pri nominalni gostoti R_u določimo maso v absolutno suhem stanju, volumen pa pri poljubni vlažnosti ($R_u = m_0/V_u$). Najpogosteje uporabljena nominalna gostota je izražena z maksimalnim volumnom (V_{maks} ali V_{vl}), to je pri vlažnostih nad točko nasičenja celičnih sten. Imenujemo jo osnovna gostota R .

$$R = \frac{m_0}{V_{maks}}$$

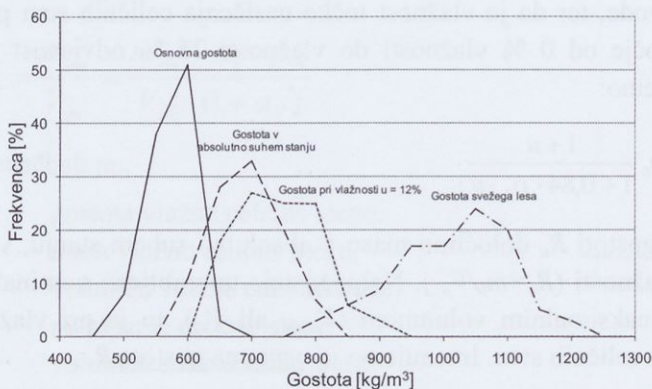
Posebno v angleški literaturi se zelo pogosto uporablja relativna gostota d_u (angl. specific gravity), ki je po definiciji razmerje med nominalno gostoto lesa in gostoto vode pri 4 °C (ρ_{vode}).

Relativna gostota z naraščajočo vlažnostjo pada in doseže pri točki nasičenja celičnih sten svojo najmanjšo vrednost, ki ostane z nadaljnjim zviševanjem lesne vlažnosti nespremenjena.

$$d_u = \frac{R}{\rho_{vode}}$$



Slika 28 Odvisnost gostote poroznega lesa (ρ_u) in nominalne gostote (R_u) od vlažnosti lesa.



Slika 29 Variabilnost različno izražene gostote bukovine. (po Kollmann in Cote, 1968)

Standardizirano je ugotavljanje (SIST ISO 3131):

- gostote pri dejanski, izmerjeni vlažnosti ($\rho_u = m_u/V_u$), najpogosteje pri zračni suhosti, ko je vlažnost lesa med 12 % in 15 %.
- gostote v absolutno suhem stanju ($\rho_0 = m_0/V_0$) in
- osnovne gostote ($R = m_0/V_{maks}$).

Lesne vrste razdelimo v več gostotnih razredov (pregl. 11).

Preglednica 11 Razvrstitev nekaj lesnih vrst po gostotnih razredih.

	Gostota lesa v absolutno suhem stanju ρ_0 [kg/m ³]	Lesne vrste
Izjemno nizka	< 200	balsa
Zelo nizka	200 – 300	zeleni bor
Nizka	300 – 450	smreka, jelka, bor, topol, trepetlika, jelša
Srednja	450 - 600	macesen, domači kostanj, lipa, češnja
Srednjevisoka	600 - 700	javor, breza, bukev, hrast, jesen, oreh, tik
Visoka	700 - 800	robinija, gaber
Zelo visoka	800 - 1000	bangossi, palisander, evkalipt
Izjemno visoka	> 1000	gvajak, palisander - rio, ebenovina

Vlažnost in poroznost lesa

Les je kapilarna porozna snov, zgrajena iz različnih celic. K poroznosti poleg lumnov prispevajo še manjše odprtine (razpoke) v celični steni, povezovalni pikenjski sistem, smolni žepi in kanali ter intercelularni prostori. Celični lumni s premeri nad 2 μm predstavljajo makrokapilare (k njim prištevamo tudi medcelične prostore), najmanjše mikrokapilare (intermikrofibrilne in intramikrofibrilne prostore) najdemo v celični steni ($r = 1 - 10 \text{ nm}$).

Svež les takoj po poseku vsebuje velike količine vode, ki ne zagotavlja dimenzijske stabilnosti in biološke odpornosti ter tako omejuje njegovo nadaljnjo predelavo in obdelavo. Delež vode v svežem lesu se med drevesnimi vrstami pa

tudi v okviru iste močno razlikuje, zato je z vidika nadaljnje uporabe pomembno poznavanje njene razporeditve.

Svež les vsebuje večje ali manjše količine vode kot:

- vezano ali higroskopno vodo v celičnih stenah,
- prosto ali kapilarno vodo v celičnih lumnih in
- paro v celičnih lumnih (zaradi majhnih količin ni pomembna).

Vsa vlažnostna stanja oz. oblike vode v lesu se med seboj razlikujejo tudi v energijskem nivoju. Najvišji nivo ima vodna para v celičnih lumnih, ki pa je glede na količino zanemarljiva. Sledi kapilarna voda v celičnih lumnih s približno enakim energijskim nivojem kot navadna prosta voda. Energijski nivo vezane vode v celičnih stenah je najnižji in se še znižuje s padajočo vlažnostjo pod točko nasičenja celičnih sten. Tako moramo pri sušenju vezane vode dovesti toploto, ki je enaka vsoti izparilne toplote tekoče vode in diferencialne sorpcijske toplote, to je toplote, ki je potrebna, da se vezane vodne molekule odcepijo od sorpcijskih mest in postanejo "aktivirane".

Vlažnost lesa je v lesni tehnologiji izražena relativno kot količina vode na maso lesa v absolutno suhem stanju:

$$u = \frac{m_{\text{vode}}}{m_0} = \frac{m_{\text{vl}} - m_0}{m_0} \quad [\text{kg/kg}]$$

oz.
$$U = \frac{m_{\text{vl}} - m_0}{m_0} 100 \quad [\%]$$

Manj pogosto določamo absolutno vlažnost, ki je definirana kot razmerje med maso vode v lesu in maso vlažnega lesa:

$$x = \frac{m_{\text{vode}}}{m_{\text{vl}}} = \frac{m_{\text{vl}} - m_0}{m_{\text{vl}}} \quad [\text{kg/kg}]$$

pri čemer velja

$$u = \frac{x}{1-x} \quad \text{in} \quad x = \frac{u}{1+u}$$

V zgornjih enačbah je:

u, U lesna vlažnost, [kg/kg], [%]

m_{vode} masa vode v lesu, [kg]

m_0 masa absolutno suhega lesa, [kg]

m_{vl}	masa vlažnega lesa,	[kg]
x	absolutna vlažnost lesa	[kg/kg]

Ker v lesni tehnologiji količino vode izražamo z relativno vlažnostjo, je dejanska masa vode v določenem volumnu odvisna tudi od gostote lesa. Tako vsebuje 1 m³ redke topolovine z vlažnostjo 20 % (gostota topolovine v absolutno suhem stanju je 330 kg/m³) 66 kg vode, enak volumen gabrovine (z gostoto v absolutno suhem stanju 790 kg/m³) z enako vlažnostjo ($u = 20\%$) pa 158 kg vode.

Vpliv gostote moramo upoštevati tudi pri sušenju, saj se pri enakem odstotku zmanjšanja vlažnosti pri različnih vrstah izločijo različne mase vode.

Prostorninski delež suhega lesa brez por (c_0) je razmerje med nominalno gostoto (R) in gostoto suhe celične stene (ρ_{les}):

$$c_0 = \frac{R}{\rho_{les}}$$

delež por v absolutno suhem lesu (n) pa

$$n = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_{les}} \quad n = 1 - 667 \cdot \rho_0$$

Druga enačba velja, če predpostavimo, da je gostota celične stene 1500 kg/m³.

Poroznost na celotnem vlažnostnem območju (v_a) izračunamo:

$$v_a = 1 - \rho_u \left(\frac{1}{\rho_{les}} + \frac{u_{vez}}{\rho_{vv}} + \frac{u_{pr}}{\rho_{vode}} \right)$$

Enačba je zelo priročna za izračun maksimalne količine impregnacijskega sredstva, ki lahko penetrira v les znane gostote in vlažnosti, nakazuje pa tudi neposredno zvezo med poroznostjo in gostoto (pregl. 12).

Ker je prostorninski delež v celične stene vrinjene vezane vode (u_{vez}) enak volumenskemu skrčku (β_V), je delež vlažnega lesa (c_{vl}) enak vsoti deležev suhega lesa in proste vode, razlika do enote pa predstavlja volumen por v vlažnem lesu (P_{vl}).

Navedene veličine izračunamo po naslednjih formulah:

$$c_{vl} = c_0 + \beta_V$$

$$\beta_V = u_{vez}$$

$$\beta_V = \frac{V_{maks} - V_0}{V_{maks}}$$

$$P_{vl} = 1 - c_{vl}$$

V zgornjih enačbah je:

- c_{vl} delež vlažnega lesa
- c_0 prostorninski delež suhega lesa brez por
- u_{vez} prostorninski delež vezane vode
- β_V volumenski skrček izražen v deležih (ne v %)
- V_{maks} volumen lesa v svežem stanju
- V_0 volumen lesa v absolutno suhem stanju
- P_{vl} volumen por v vlažnem lesu

Preglednica 12 Delež por in delež celičnih sten v svežem lesu iglavcev. (Panshin in DeZeeuw, 1980)

Lesna vrsta	rani les		kasni les	
	stene [%]	pore [%]	stene [%]	pore [%]
duglazija	26,0	74,0	62,4	37,6
macesen	36,1	63,9	77,8	22,2
jelka	25,6	74,4	50,6	49,4

Pri vlažnostih nad točko nasičenja celičnih sten so lumni oz. pore bolj ali manj zapolnjene s prosto vodo ali s plini. Razliko med absolutno vlažnostjo (x) in deležem vezane vode predstavlja delež proste (kapilarne) vode u_{pr} , z vodo nezapolnjeni lumni pa predstavljajo delež plinov (Pl).

$$u_{pr} = x - \beta_V \frac{\rho_{vode}}{R + \beta_V \cdot \rho_{vv}}$$

$$Pl = P_{vl} - u_{pr}$$

$$\rho_{vv} \sim 1130 \text{ kg/m}^3$$

Končni preizkus izračuna izvedemo s seštevanjem deležev lesa, vezane vode, proste vode ter plinov.

$$c_0 + u_{vez} + u_{pr} + Pl = 1$$

V svežem lesu prosta voda nikoli popolnoma ne zapolnjuje lumnov, temveč so v njih prisotni tudi plini oz. plinski mehurčki. Zapolnjenost lumnov s plini (G) oz. prosto vodo (W) izračunamo:

$$W = \frac{u_{pr}}{P_{vl}} \quad \text{delež proste vode v lumnih}$$

$$G = \frac{Pl}{P_{vl}} \quad \text{delež plinov v lumnih}$$

S približkom lahko predpostavimo, da se velikost celičnih lumnov med krčenjem in nabrekanjem praktično ne spreminja, zato veljajo naslednje zveze med skrčkom (nabrekom), vlažnostjo pri točki nasičenja celičnih sten in gostotami:

$$\beta_V = u_{TNCS} R$$

$$\alpha_V = u_{TNCS} \rho_0$$

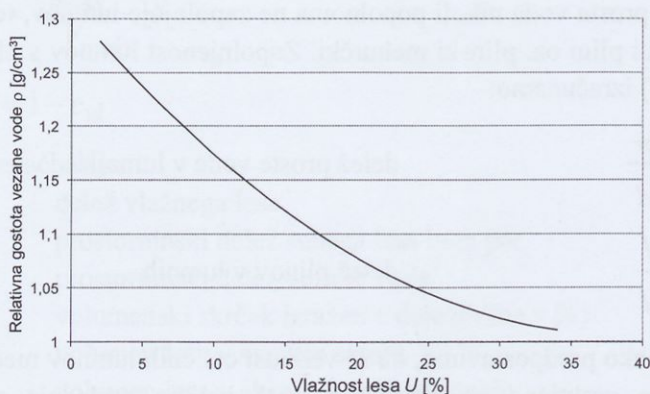
$$u_{TNCS} = \frac{\beta_V}{R} = \frac{\alpha_V}{\rho_0}$$

Pri natančnih izračunih upoštevamo še zgostitev vezane vode v celični steni. Gostota le-te je v povprečju 1130 kg/m^3 . Od točke nasičenja celičnih sten se z nižanjem vlažnosti povečuje in doseže pri absolutni suhosti gostoto 1300 kg/m^3 (sl. 30).

$$u_{TNCS} = \frac{\beta_V \cdot \rho_{vv}}{R} = \frac{\alpha_V \cdot \rho_{vv}}{\rho_0}$$

Kjer pomenijo:

β_V	volumenski skrčček	$[\text{m}^3/\text{m}^3]$
α_V	volumenski nabrek	$[\text{m}^3/\text{m}^3]$
u_{TNCS}	vlažnost točke nasičenja celičnih sten	$[\text{kg}/\text{kg}]$
R	osnovna gostota	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
ρ_0	gostota lesa v absolutno suhem stanju.	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
ρ_{vv}	srednja gostota vezane vode	$[\text{kg}/\text{m}^3]$



Slika 30 Gostota vezane vode v odvisnosti od vlažnosti lesa. (Siau, 1984)

Največjo količino vode, ki jo je les sposoben sprejeti tako, da so celične stene in celični lumni popolnoma zaliti z vodo, je mogoče doseči le s potopitvijo lesa v vodo. Takrat je dosežena napojitvena vlažnost.

$$u_{maks} = u_{TNCS} + \frac{(\rho_{les} - \rho_0) \cdot \rho_{vode}}{\rho_0 \cdot \rho_{les}}$$

V zgornji enačbi je:

U_{maks}	napojitvena vlažnost	[kg/kg]
u_{TNCS}	vlažnost točke nasičenja celičnih sten	[kg/kg]
ρ_0	gostota lesa v absolutno suhem stanju.	[kg/m ³]
ρ_{vode}	gostota vode	[kg/m ³]
ρ_{les}	gostota celičnih sten v absolutno suhem stanju.	[kg/m ³]

VODA V LESU

Radialna porazdelitev vode v svežem lesu

Porazdelitev vode v živem drevesu je odraz prevajalne vloge sekundarnega ksilema, ki prevaja vodo iz koreninskega sistema v krošnjo. Tudi po poseku vsebuje svež les veliko količino vode, ki ne omogoča njegove takojšnje uporabe, zato je sušenje nujna in največkrat prva faza predelave lesa v končne izdelke.

Določanje vlažnosti svežega lesa je pomembno pri:

- optimalnem vodenju sušilnega postopka,
- računanju časa sušenja in porabe energije ter
- načrtovanju proizvodnje.

Funkcionalno aktivna beljava je bolj ali manj nasičena z vodo, ko pa celice ne opravljajo več primarne funkcije transporta, se voda v lumnih v večji ali manjši meri zamenja s plini, ki vključujejo tudi vodno paro. Najznačilnejša in z največjimi razlikami je zato porazdelitev vode v radialni smeri.

Pri iglavcih in difuznoporoznih listavcih z veliko listno površino je velikost prevodnega prereza debla v korelaciji z velikostjo transpiracijske površine (krošnje). Pri prevajanju vode sodeluje beljava, vendar periferni deli bolj kot notranji.

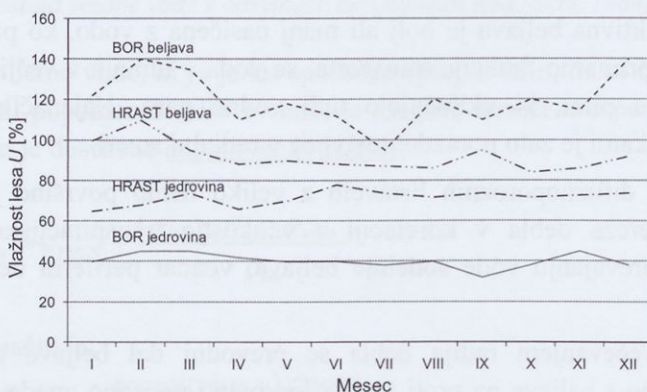
Skladno s povečevanjem radija debla se prevodni del beljave odmika na periferijo, vlažnost beljave pa proti meji z jedrovino navadno upada, sredica se vse bolj izsušuje (zrelina, sušina), celične stene pa ostanejo običajno napojene. Na meji z jedrovino pride do strmega padca vlažnosti, ki ga pri iglavcih spremlja aspiracija obokanih pikenj, pri listavcih pa otiljenje. Pri vrstah brez jedrovine vlažnost dokaj enakomerno pada proti strženu, kjer doseže svoje najnižje vrednosti, vendar nikoli nižje od nasičenja celičnih sten.

Pri mnogih vrstah pride po predhodni izsušitvi (dehidraciji) na lokaciji jedrovine do ponovnega navlaževanja oz. akumulacije vode. Tedaj govorimo o mokrinah in mokrem srcu (npr. mokro srce pri jelki), ki ga obdaja suha cona. Mokrine se lahko širijo tudi v beljavo. Najpogosteje se povišana vlažnost pojavi na bazi drevesa, v območju krošnje ali lokalno na mestih štrcljev vej pa nakazuje vpliv odmiranja korenin, vej in krošnje. Tudi diskoloriran les ima navadno večje količine vode, zato ga uvrščamo v isto kategorijo mokrin (npr. rdeče srce pri bukvi, rjavo srce pri topolu in jesenu). Zaradi slabših lastnosti lesa predstavljajo

mokrine v predelavi lesa tehnološko napako. Poleg višje in neenakomerno razporejene vlažnosti so mokrine pogosto obarvane, les ima lahko manjšo trdnost, lahko pa se pojavi tudi bakterijska ali glivna okuženost. Med sušenjem, ki je počasnejše kot pri normalnem lesu, se pogosteje pojavijo kolaps in razpoke.

Zaradi tako raznolike porazdelitve vode že v živem drevesu vsebuje les tudi po poseku na različnih mestih različne količine vode. Vlažnost lesa v svežem stanju je odvisna od časa sečnje in transporta, vrste lesa, starosti, velikosti krošnje, radialne in vertikalne distribucije v drevesu (beljava-jedrovina-višina).

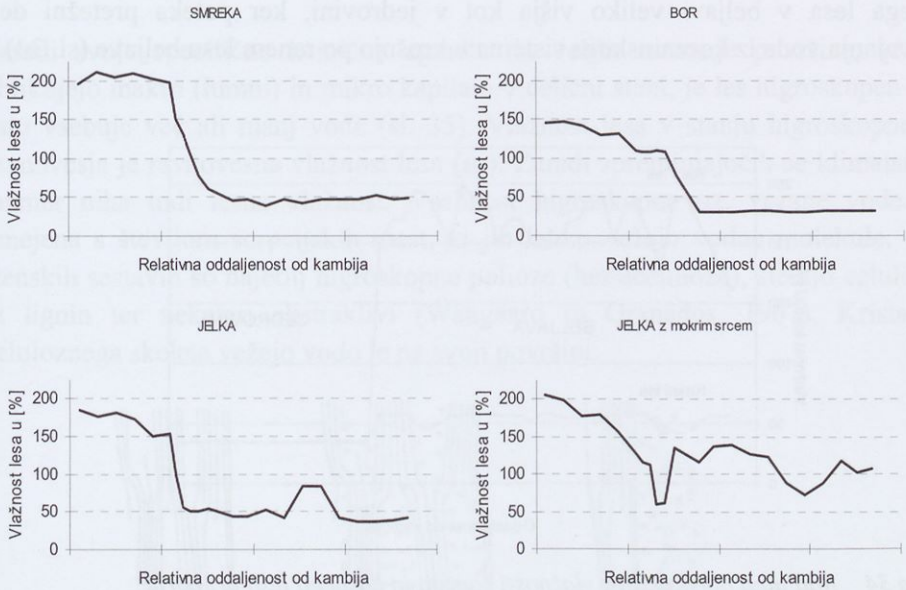
Poleti in v zgodnji jeseni je vlažnost debla nižja, največja pa je spomladi in v zgodnjem poletju. Sezonska nihanja vlažnosti so značilna predvsem za beljavo, velik vpliv nanjo pa ima tudi intenzivnost transpiracije z listne površine, vlažnost tal in permeabilnost beljave (sl. 31).



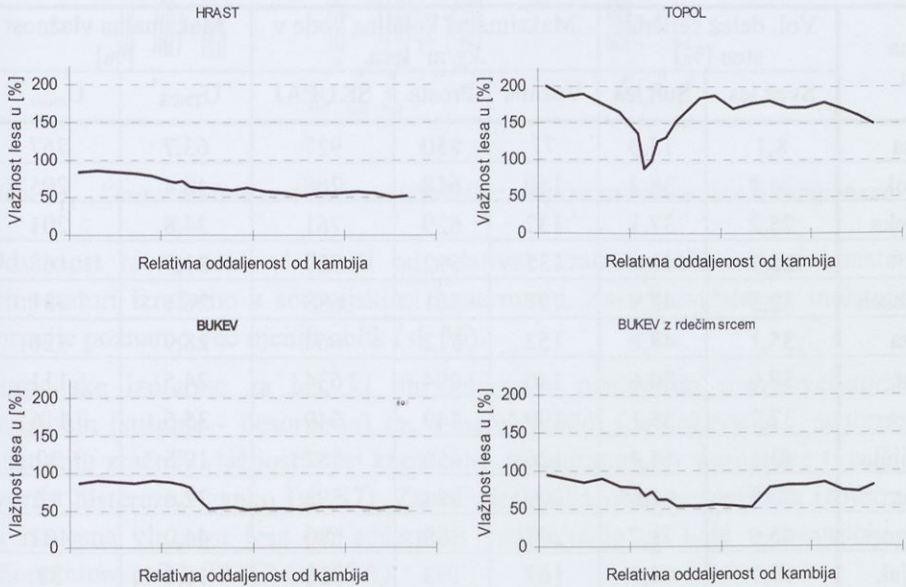
Slika 31 Letno nihanje vlažnosti beljave in jedrovine borovine ter hrastovine.

Razlika vlažnosti med beljavo in jedrovino je pri iglavcih nekajkratna, pri listavcih pa ne tako izrazita (sl. 32 in sl. 33).

Poznavanje porazdelitve vlažnosti v svežem lesu je pomembno zlasti v sušilni praksi. Zaradi želje po čim hitrejšem obračanju kapitala se vse več lesa tehnično suši takoj po razžagovanju, ko les vsebuje še velike količine vode. Večina sušilnih procesov temelji na merjenju in sledenju lesne vlažnosti zato za doseganje visoke kakovosti osušenega lesa pazljivo izbiramo merilna mesta oziroma sledilne vzorce, kar pa nam otežuje zelo variabilna porazdelitev vlažnosti (pregl. 13).

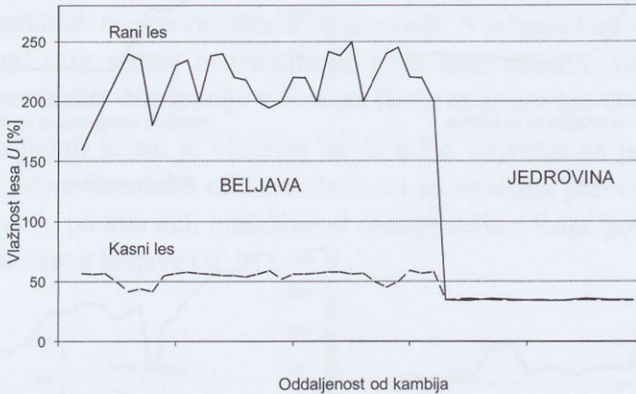


Slika 32 Radialna porazdelitev vlažnosti pri nekaterih iglavcih v odvisnosti od relativne oddaljenosti od stržena.



Slika 33 Radialna porazdelitev vlažnosti pri nekaterih listavcih v odvisnosti od relativne oddaljenosti od stržena.

Vlačnost kasnega lesa v beljavi in jedrovini je izenačena, medtem ko je vlažnost ranega lesa v beljavi veliko višja kot v jedrovini, ker poteka pretežni del prevajanja vode iz koreninskega sistema v krošnjo po ranem lesu beljave (sl. 34).



Slika 34 Radialna porazdelitev vlažnosti ranega in kasnega lesa pri boru.

Preglednica 13 Delež celičnih sten in maksimalne količine proste in vezane vode za nekatere lesne vrste (Eichler, 1980).

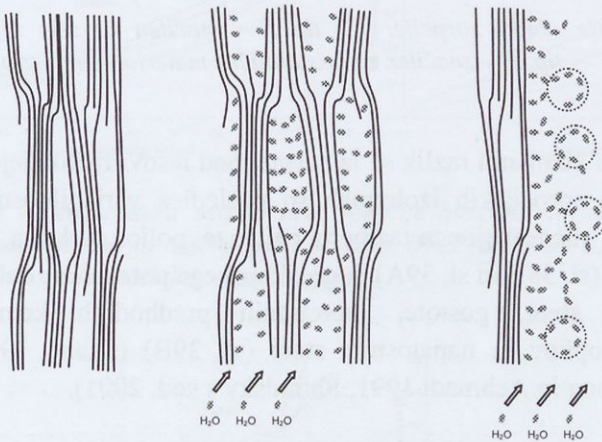
Lesna vrsta	Vol. delež celičnih sten [%]		Maksimalna količina vode v kg/m ³ lesa			Maksimalna vlažnost [%]	
	Svež les	Suh les	Vezana	Prosta	SKUPAJ	U _{TNCS} [*]	U _{maks} ^{**}
Balsa	8,1	15,0	77	850	927	63,7	767
Topol	24,7	38,2	150	618	768	40,4	205
Smreka	25,2	37,1	132	629	761	34,8	201
Bor	28,7	40,8	135	592	727	31,3	168
Macesen	32,5	43,9	127	561	688	26,1	131
Breza	35,1	48,8	152	512	664	28,9	126
Hrast	38,0	50,6	140	494	634	24,5	111
Bukev	37,2	55,1	199	449	649	35,6	116
Robinja	43,1	54,4	126	456	582	19,5	90
Gaber	42,8	61,6	209	384	593	32,6	92
Bongossi	45,0	71,7	297	383	680	44,0	101
Gvajak	69,7	84,7	167	153	320	16,0	31

* vlažnost točke nasičenja celičnih sten

** napojitvena vlažnost

Sorpcijske lastnosti lesa – sorpcijske izoterme in histereza

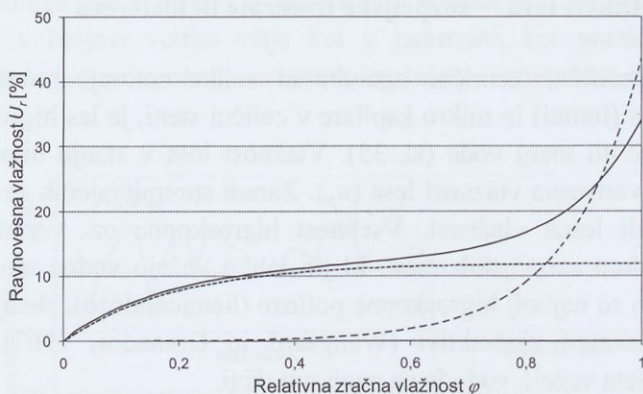
Zaradi svoje specifične kemične zgradbe in velike notranje površine, ki jo oblikujejo makro (lumni) in mikro kapilare v celični steni, je les higroskopen ter zato vsebuje več ali manj vode (sl. 35). Vlažnost lesa v stanju higroskopnega ravnovesja je ravnovesna vlažnost lesa (u_r). Zaradi spreminjajočih se klimatskih razmer niha tudi lesna vlažnost. Vsebnost higroskopne oz. vezane vode je omejena s številom sorpcijskih mest, ki jih lahko vežejo vodne molekule. Od stenskih sestavin so najbolj higroskopne polioze (hemiceluloze), sledijo celuloza in lignin ter nekateri ekstraktivi (Wangaard in Granados, 1967). Kristaliti celuloznega skeleta vežejo vodo le na svoji površini.



Slika 35 Vezava vodnih molekul na hidroksilne skupine osnovnih lesnih komponent.

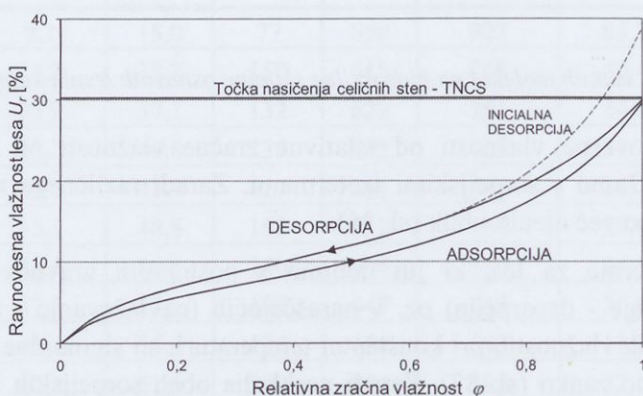
Odvisnost ravnovesne vlažnosti od relativne zračne vlažnosti pri konstantni temperaturi izražamo s sorpcijskimi izotermami. Zaradi različnega mehanizma sorpcije poznamo več njenih oblik (sl. 36).

Sorpcijske izoterme za les, ki jih dobimo s postopnim uravnovešanjem v padajočih (sušenje - desorpcija) oz. v naraščajočih (navlaževanje - adsorpcija) relativnih zračnih vlažnostih pri konstantni temperaturi, so sigmoidne (tip III) in tvorijo histerezo zanko (sl. 37). Zaradi neskladja obeh sorpcijskih izoterm, je ravnovesna vlažnost lesa pri adsorpciji vedno nižja od tiste v desorpciji (do temperature pribl. 70 °C) (sl. 38A).



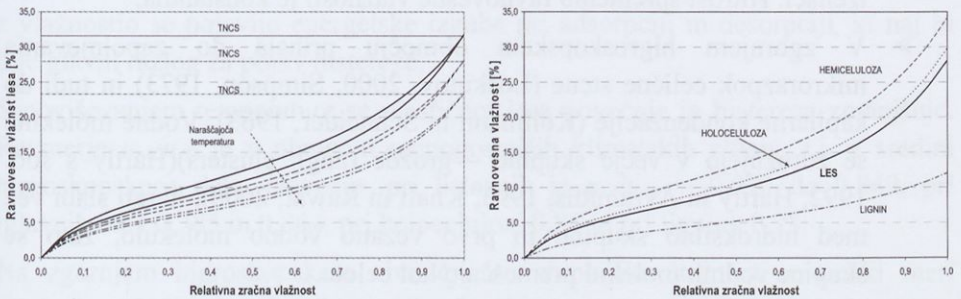
Slika 36 Najpogostejše oblike sorpcije: tip I – značilen za zelo higroskopske materiale; - - - tip III – značilen za kristalinične materiale in — tip II značilen za les.

Zaradi strukturnih in kemičnih razlik se izoterme med lesovi razlikujejo. Razlike v higroskopnosti in sorpcijskih izotermah so posledica variabilnosti kemične zgradbe lesne snovi (medsebojnega razmerja celuloze, polioz, pektina, lignina in ekstraktivnih snovi) (sl. 38B in sl. 39A), higroskopskega potenciala, deleža mikro razpok v celični steni, gostote, morebitnih predhodnih kemičnih ali hidrotermičnih postopkov in napetostnih stanj (sl. 39B) (Skaar, 1972, 1988, Choong, 1969, Choong in Achmadi 1991, Shmulsky s sod. 2001).

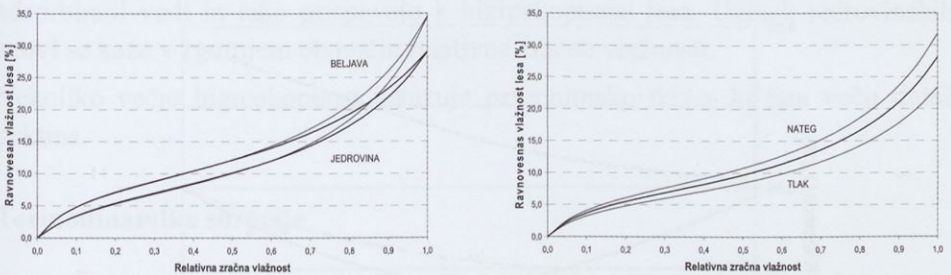


Slika 37 Tipična sorpcijska histereza za les. Desorpcijska in adsorpcijska izoterma zapirata histerezno zanko, višja je le začetna ali inicialna desorpcijska krivulja.

Higroskopski potencial posameznih komponent lesa je pri nižjih vlažnostih odvisen od razpoložljivih sorpcijskih mest, ki jih predstavljajo predvsem proste hidroksilne skupine. Teh je največ pri razvejanih molekulah hemiceluloz, medtem ko so pri celulozi dostopne le skupine na površini kristalitov in skupine v prehodnih amorfni področjih. Zaradi največjega deleža prispeva k celotni sorpciji še vedno največ celuloza (pribl. 47 %), nato sicer najbolj higroskopske hemiceluloze 37 % in najmanj lignin 16 % (Christensen in Kelsey. 1959)



Slika 38 A - Temperatura znižuje nivo sorpcije histereze in zmanjšuje razliko med adsorpcijsko in desorpcijsko krivuljo. B - Primerjava sorpcijskih izoterm za polioze, holo celulozo, les in lignin.



Slika 39 A - Vpliv jedrovinskih snovi na sorpcijo se kaže v zgornjem higroskopskem območju, kjer je ravnovesna vlažnost jedrovine nižja od beljave. B - Natežno obremenjen les izkazuje nekoliko višjo ravnovesno vlažnost od neobremenjenega oziroma tlačno obremenjenega.

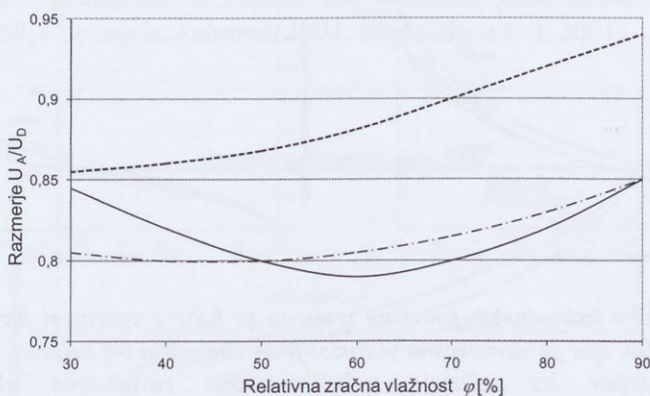
Načelno razdelimo sorpcijske izoterme v tri območja.

- V območju nizkih vlažnosti sprejme vsako sorpcijsko mesto po eno vodno molekulo – prevladuje mehanizem monomolekularne (kemi-) sorpcije (od absolutne suhosti do ravnovesja z relativno zračno

vlažnostjo $\varphi \cong 20\%$ do 30%) (Niemz, 1993, Stamm, 1964, 1977). Hitrost spremembe ravnovesne vlažnosti z vlažnostjo pada.

- Pri nekoliko višjih vlažnostih (v ravnovesju s 30% do 55% relativne zračne vlažnosti) se molekule vode vežejo tudi v več plasteh (kvazilinearno območje) (Hao in Avramidis, 2000). Molekule vode reagirajo druga z drugo in medsebojno tvorijo skupine ter prehajajo v dinamično ravnovesje, ko se vezalna energija med sorpcijskimi mesti izenači. Hitrost sprememb ravnovesne vlažnosti je konstantna.
- V zgornjem higroskopskem območju prihaja do zapolnjevanja mikrorazpok celične stene (Loskutov, 2000, Simpson, 1973) in tudi do kapilarne kondenzacije (Kollmann in Schneider, 1963). Vodne molekule se združujejo v večje skupine – grozde (angl. clusters)(Hartly s sod. 1992, Hartly in Avramidis, 1993, Khali in Rawat, 2000), hkrati slabi vez med hidroksilno skupino in prvo vezano vodno molekulo, zato se skupine vodnih molekul premeščajo kot celote.

Neskladje med ravnovesno vlažnostjo, dobljeno v procesu adsorpcije in desorpcije (razmerje u_{rA}/u_{rD}), je praviloma največje v območju relativne zračne vlažnosti $\varphi = 60\%$ do 80% (sl. 40) (Okoh in Skaar1980, Lenth in Kamke, 2001).



Slika 40 Razmerje ravnovesnih vlažnosti adsorpcije in desorpcije.

Histerezo pripisujemo polarnim hidroksilnim skupinam celuloze, ki vežejo vodo z vodikovo vezjo. V nasičenem stanju so vse hidroksilne skupine stenskih sestavin nasičene z adsorbirano vodo. Pri sušenju hidroksilne skupine oddajajo vodo in se zaradi krčenja celične stene približajo ter medsebojno zasitijo. Pri

naslednji adsorpciji vse hidroksilne skupine niso takoj v stanju vezati vodo, zato je ravnovesna vlažnost v poteku adsorpcije nižja. Pri temperaturi nad 70 °C se gibljivost vezane vode povečuje, močnejše pa začne nihati tudi celulozna kristalna rešetka. Vezi med sosednjimi celuloznimi molekulami slabijo in razlike v vezavi med adsorpcijo in desorpcijo se zmanjšujejo. Histerezo lahko razložimo tudi s termodinamičnega vidika. Les kot nabrekajoči gel ni popolnoma elastičen. Krčenje in nabrekanje povzročita nastanek različnih deformacij, ki jih pogojujejo napetostna stanja v lesnem tkivu. Zaradi spreminjanja plastične preoblikovanosti z vlažnostjo se pojavijo energetske izgube pri adsorpciji in desorpciji, ki naj bi bile glavni razlog za pojav histereze.

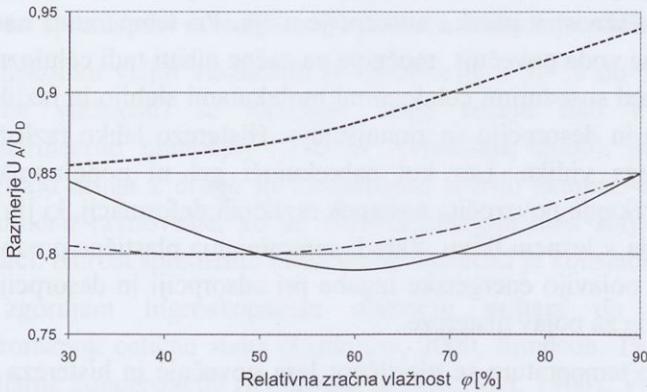
S poviševanjem temperature se plastičnost lesa povečuje in histereza zmanjšuje. Razmerje u_{rA}/u_{rD} je v območju najpogostejših klimatskih nihanj, t.j. v sredini higroskopskega dela, največje; pri listavcih je $u_{rA}/u_{rD} = 0,970$ do $0,849$, pri iglavcih med $0,785$ in $0,844$, pri holocelulozi $0,86$ in pri ligninu $0,78$.

Na zgornjem higroskopskem območju so sorpcijske lastnosti v veliki meri odvisne tudi od sekundarnih sprememb v lesu, pri čemer mislimo predvsem na transformacijo beljave v jedrovino. V celično steno se inkrustrirajo nizkomolekularne jedrovinske snovi - polifenoli (flavonoidi, lignani, tanini), ki "zasedejo" prostor vezani vodi. Posledica tega je nižja ravnovesna vlažnost jedrovine. Nekateri jedrovinske snovi se pri višjih temperaturah raztopijo v adsorbirani vodi in tako prispevajo k higroskopsnosti lesa. Učinek jedrovinskih snovi se kaže v zgornjem območju relativne zračne vlažnosti.

Nekoliko večjo higroskopsnost izkazuje parenhimsko tkivo, ki ima večji delež pektina.

Termodinamika sorpcije

Znano je, da ima sorbirana voda nižji delni tlak pare kot prosta voda, zato je aktivnost vode izražena z razmerjem med dejanskim parnim tlakom (p_{vp}) in tlakom nasičenja (p_0) vodne pare ($h = a_w = p_{vp}/p_0$) vedno manjša od 1. Aktivnost vode podaja tudi stopnjo zasičenosti zraka z vodno paro, ki je v praksi bolj znana kot relativna zračna vlažnost (φ) in se navaja v deležu ali pogosteje v odstotkih. Hkrati so tudi entalpija (H), entropija (S), prosta (Gibbsova) energija (G) in kemični potencial (μ) vezane vode nižji ali bolj negativni od vrednosti za prosto vodo (po Skaar, 1988)(sl. 41).



Slika 41 Odvisnost diferencialne sorpcijske energije (E_s), proste entalpije (G_s) in entropije (S) od vlažnosti lesa.

Entalpija (H) predstavlja celotno notranjo energijo in je definirana z vsoto notranje energije (U) in dela proti tlaku pri povečanju volumna ($P \cdot \Delta V$). V diferencialni obliki jo zapišemo:

$$dH = dQ = dU + PdV$$

Pri konstantnem tlaku lahko tako definiramo ustrezno specifično toploto (c_p): t.j. toplota, ki je potrebna, da se enota množine snovi segreje za en kelvin (stopinjo)

$$c_p = \frac{dH}{dT}$$

Zveza med tremi osnovnimi termodinamičnimi veličinami je podana z enačbo

$$H = G + TS$$

oziroma v diferencialni obliki

$$\frac{dG}{dT} = \frac{dH}{dT} - \frac{dTS}{dT} = -S,$$

ki pojasnjuje zmanjševanje proste energije z naraščajočo temperaturo in počasnejše naraščanje entalpije v primerjavi s produktom med temperaturo in entropijo.

Razliko med entalpijo vezane vode (H_s) in entalpijo vode (H_v) imenujemo diferencialna sorpcijska toplota (ΔH_s) in je enaka sproščeni toploti pri adsorpciji enega mola vode pri konstantni vlažnosti. Diferencialna sorpcijska toplota se z lesno vlažnostjo močno spreminja.

$$H_s = H_v - \Delta H_s$$

Tudi entropija vezane vode (S_s) je nižja od proste vode (S_v).

$$S_s = S_v - \frac{\Delta H_s}{T} + \frac{\Delta G_s}{T}$$

Sprememba proste energije sorpcije (ΔG_s) je enaka razliki kemičnih potencialov proste (μ_v) in vezane (μ_s) vode ter predstavlja njeno zmanjšanje, ko se voda veže na higroskopne materiale oziroma v našem primeru na les. Gippsova prosta energija je enaka razpoložljivemu delu, ki ga lahko dobimo iz zaprtega sistema in je priročen kriterij za določanje spontanosti procesov.

$$\Delta G_s = \mu_v - \mu_s$$

Ko sistem pri izotermnih in reverzibilnih spremembah doseže ravnovesje, je Gibbsova energija enaka kemičnemu potencialu. Izmenjavo dela z okolico lahko zato zapišemo z enačbo enakosti kemičnega potenciala dveh agregatnih stanj snovi (npr. vodne pare – indeks p in vode – indeks v):

$$V_p \cdot dP_p = V_v \cdot dP_v$$

Gibbsova prosta energija je v izotermnih pogojih enaka razliki prostih energij vezane in proste vode, ki ob predpostavkah, da je parna faza idealni plin, ter da je volumen kondenzirane faze zanemarljiv v primerjavi z volumnom pare, omogoča izračun energije, potrebne za premagovanje sorpcijskih vezi.

$$\Delta G_s = -RT \ln \frac{P_{vp}}{P_0} = -RT \ln \varphi$$

V enačbi je R splošna plinska konstanta (8,314 J/mol K), T temperatura, p_{vp} parni tlak, p_0 tlak nasičenja in φ relativna zračna vlažnost, izražena v deležih.

Vežalna energija se iz 100 J/mol v večjih porah ($d > 0,1 \mu\text{m}$) lahko dvigne tudi na 5000 J/mol pri kemičnih vezeh (npr. kristalizaciji). Tudi difuzijsko gibanje

vezane vode poteka v smeri zmanjševanja proste energije. Iz enačbe je razvidno, da je prosta energija v tesni zvezi z relativno zračno vlažnostjo. Ob zmanjševanju relativne vlažnosti absolutna vrednost proste energije vlažnega materiala narašča. Spremembo proste energije zaznamo tudi pri zmanjšanju parnega tlaka v kapilarah. Vzrok je površinska energija tekočine. Podana je s Kelvinovo enačbo:

$$\Delta G_s = -RT \ln \psi = \frac{2 \cdot \sigma \cdot v_v}{r} \cos \psi$$

kjer je σ površinska napetost tekočine, v_v specifični volumen, r polmer meniskusa in ψ kot omočitve.

Na znižanje parnega tlaka vplivajo tudi vodotopne ekstraktivne snovi, ki se nahajajo v celičnih lumnih. Iz Kelvinove enačbe je indirektno mogoče določiti tudi izparilno toploto ali na ožjih temperaturnih intervalih diferencialno sorpcijsko toploto pri določenih ravnovesnih stanjih oziroma vlažnostih. Uporabimo lahko tudi Clausius-Clapeyronovo enačbo in trditev, da je razlika entalpij vezane in proste vode enaka diferencialni sorpcijski toploti:

$$\left[\frac{\partial \ln \left(\frac{P_{vp}}{P_0} \right)}{\partial T} \right]_u = -\frac{1}{R} \left[\frac{H_s - H_v^0}{T^2} \right]$$

S preureditvijo enačbe izračunamo diferencialno sorpcijsko toploto, ki je odvisna od relativne zračne vlažnosti in je v funkcijski zvezi z ravnovesno vlažnostjo lesa.

$$\Delta H_s = -RT^2 \left[\frac{\partial \ln \varphi}{\partial T} \right]_u = -R \left[\frac{\partial \ln \varphi}{\partial \frac{1}{T}} \right]_u$$

$$\frac{d \ln \varphi}{d \frac{1}{T}} = -\frac{\Delta H_s}{R}$$

Diferencialno sorpcijsko toploto določimo iz naklona premice ($-\Delta H_s/R$), ki podaja zvezo med naravnim logaritmom relativne zračne vlažnosti in recipročno vrednostjo absolutne temperature, ali iz znanih pogojev dveh ravnovesnih stanj, ki jih določata temperatura (T) in relativna zračna vlažnost (φ).

$$-\Delta H_s \approx \frac{RT_1 T_2 \ln \frac{\varphi_2}{\varphi_1}}{T_2 - T_1} \approx \frac{R\bar{T}^2 \ln \frac{\varphi_2}{\varphi_1}}{T_2 - T_1}$$

Empirična enačba odvisnosti diferencialne sorpcijske toplote od vlažnosti ima eksponentno obliko in jo izrazimo na mol ali kg izločene vode

$$\Delta H_s = 21100e^{-14u} \quad [\text{J/mol}]$$

$$Q_s = 1,1 \times 10^6 e^{-14u} \quad [\text{J/kg}]$$

Zgornje termodinamične zveze kažejo, da ima voda različna energijska stanja, ki so vezana na njihovo urejenost, temperaturo in obliko (npr. sorpcijo, kristalizacijo ipd.). Med »čistimi« agregatnimi stanji ima najvišji nivo vodna para, ki se od vode razlikuje za izparilno toploto; še za talilno toploto ima nižje energijsko stanje led. Energijsko stanje v celične stene vezane vode je odvisno od vlažnostnega stanja; pri zelo nizkih vlažnostih je še nižje od ledu, s poviševanjem vlažnosti se približuje prosti vodi in doseže njen energijski nivo v območju nasičenja celičnih sten.

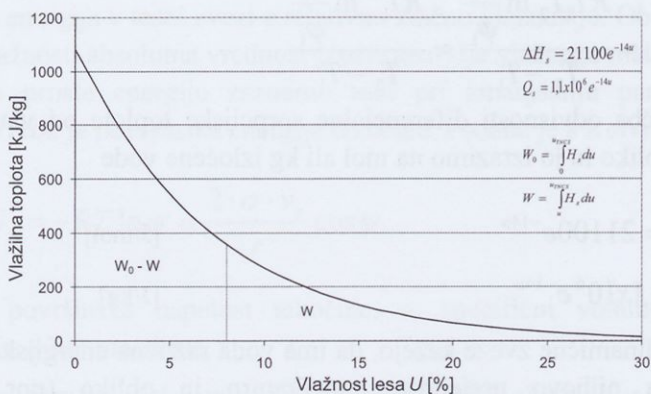
Obratno, kot je potrebno pri sušenju dovajati energijo, se pri navlaževanju lesa toplota sprošča (sl. 42). Največ toplote se razvije, če navlažujemo absolutno suh les. Dobljeno toploto imenujemo skupno ali totalno vlažilno toploto (W_0), izračunamo jo iz znane diferencialne sorpcijske toplote:

$$W_0 = \int_0^{u_{TNCS}} H_s du$$

Vlažilno toploto določimo tudi od poljubne vlažnosti (integralna sorpcijska toplota) do vlažnosti točke nasičenja celičnih sten:

$$W = \int_u^{u_{TNCS}} H_s du$$

Poviševanje vlažnosti nad območje nasičenja ne vpliva na generiranje vlažilne toplote.



Slika 42 Odvisnost diferencialne sorpcijske toplote od lesne vlažnosti in grafični pomen vlažilne toplote (Skaar, 1988).

Če velja med diferencialno sorpcijsko toploto in lesno vlažnostjo enostavna eksponentna zveza, sta si vlažilna toplota in diferencialna sorpcijska toplota premo-sorazmerni. Veličini se med seboj razlikujeta v interpretaciji; diferencialna sorpcijska toplota predstavlja potrebno energijo za premagovanje energije vezave vodnih molekul z lesom, skupna vlažilna toplota pa je proporcionalna s številom vseh sorpcijskih mest v lesu, ki so dostopna vodnim molekulam. Višja vlažilna toplota je potemtakem značilna za bolj higroskopske lesove, ki imajo tudi višjo točko nasičenja celičnih sten. Nakazuje se linearna zveza med vlažilno toploto in vlažnostjo TNCS, zato je tudi njuno razmerje konstantno ($W_0/U_{TNCS} \approx 0,8$). Skupna vlažilna toplota, ki se giblje med 3,0 in 4,4 kJ/kg absolutno suhega lesa, je za jedrovino nekoliko nižja kot za beljavo, nižjo pa izkazujejo tudi lesovi z visokim deležem ekstraktivnih snovi. Tudi bolj higroskopske polioze imajo višjo skupno vlažilno toploto ($W_0 = 6,7$ kJ/kg) od celuloze ($W_0 = 4,5$ kJ/kg) ali lignina ($W_0 = 3,3$ kJ/kg) (Wadsö, 1993).

Modeli sorpcije

Sigmoidno obliko sorpcijske izoterme lahko dokaj uspešno pojasnimo z dvodelnimi modeli. Pri nižjih vlažnostih sorpcijsko krivuljo pojasnjuje Langmuirjeva izoterma hidratacije, drugi del pa Henry ali Flory-Hugginsova izoterma raztopine. Obravnavani modeli sorpcije temeljijo na domnevni interakciji sorbiranih vodnih molekul s stenskiimi komponentami, lahko tudi v več slojih in medsebojnem združevanju in povezovanju vodnih molekul v grozde

(»klastre«) (npr. Dentova, Brunauer-Emmett-Teller-jeva - BET in Guggenheim - Anderson - De Boerov – GAB teorija). Nekateri modeli so razširjeni še z vplivom nabrekovalnega tlaka med adsorpcijo (Dent, 1977, Wadsö, 1993, Peralta, 1995, Nakano, 2003). Teorije skušajo pojasniti mehanizem vezave vodnih molekul v celično strukturo na več predpostavkah in modelih :

- a/ monomolekularni sorpcijski model,
- b/ polimolekularna sorpcija, kapilarna kondenzacija in zapolnjevanje mikro-prostorov v celični steni ter formiranje grozdov - klastrov,
- c/ model raztopine ali
- d/ modeli, ki skušajo sorpcijske krivulje obravnavati zgolj z empiričnimi statističnimi enačbami.

Večina modelov vodi do kvadratne odvisnosti ravnovesne vlažnosti in relativne zračne vlažnosti.

$$\frac{\varphi}{u} = A + B \cdot \varphi - C \cdot \varphi^2$$

φ	aktivnost vode oziroma relativna zračna vlažnost [-]
u	vlažnost lesa izražena kot delež [-]
A, B in C	koefficienti kvadratne funkcije

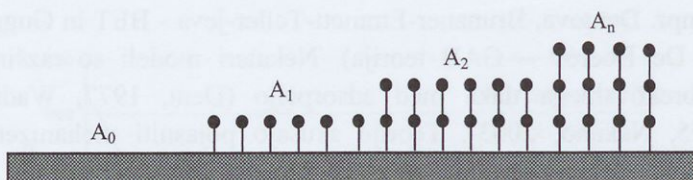
Mnoge teorije in modeli se dopolnjujejo in prepletajo.

Dentova teorija loči dve kategoriji adsorbirane vode v celični steni;

- primarne molekule so vezane neposredno na sorpcijska mesta,
- sekundarne vodne molekule pa so vezane na že zasedena primarna mesta ali tudi druga sekundarna mesta, torej lahko tudi v več slojih.

Za primarni sloj je značilna večja vezalna energija, vsi nadaljnji sloji pa imajo enake lastnosti kot sekundarne molekule vode.

Pri določeni vlažnosti je nekaj površine še proste in je na razpolago za sorpcijo vode (A_0), del površine zasedajo samo primarne molekule (A_1), prav tako pa je del površine zasedene z dvema (A_2), tremi (A_3) ali več (A_n) sloji vodnih molekul (sl. 43).



Slika 43 Vezava vodnih molekul na površino lesa v enem oz. več slojih po Dentovem modelu sorpcije.

Celotna razpoložljiva površina je tako enaka vsoti vseh površin:

$$A = A_0 + A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n = \Sigma A_n$$

Volumen, ki ga lahko zasedejo primarne molekule, je pri debelini sloja vode d_0 enak:

$$V_0 = d_0 A = d_0 (A_0 + A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n) = d_0 \Sigma A_n$$

Celotni volumen vezane vode pa je enak:

$$V = d_0 (A_1 + 2 A_2 + 3 A_3 + \dots + n A_n)$$

V ravnovesnem stanju obstaja med lesom in okolico dinamično ravnovesje, prav tako pa tudi med posameznimi sorpcijskimi ravninami v celični steni; število vezanih vodnih molekul je enako številu odcepljenih. Tako je npr. vezava vodnih molekul na prosto površino A_0 enaka hitrosti cepitve vodnih molekul z A_1 , hkrati je hitrost izmenjevanja vodnih molekul med posameznima slojema premo-sorazmerna z aktivnostjo vode oz. vodne pare.

$$A_i = b_i \cdot \varphi \cdot A_{i-1}$$

Pri čemer so b_i značilne konstante, φ pa aktivnost vode (relativna zračna vlažnost). Ker so lastnosti vseh sekundarnih vodnih molekul enake, velja:

$$b_2 = b_3 = b_4 = \dots = b_n \quad (n \neq 1) \text{ in}$$

$$A_i = b_2 \cdot \varphi \cdot A_{i-1} \quad (n \neq 1)$$

Iz enačb sledi

$$V_0 = d_0 \{A_0 + A_1 [1 + b_2 \varphi + (b_2 \varphi)^2 + (b_2 \varphi)^3 + \dots]\}$$

$$V = d_0 A_1 [1 + 2 b_2 \varphi + 3 (b_2 \varphi)^2 + 4 (b_2 \varphi)^3 + \dots]$$

Za razmerje med celotno količino vode in volumnom primarnih molekul (razmerje je enako tudi količniku med vlažnostjo lesa in vlažnostjo t.i. primarne

sorpcije, ki bi jo les dosegel pri popolni zasedenosti vseh sorpcijskih mest s po eno vodno molekulo) dobimo:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{u}{u_0} = \frac{A_1(1-b_2 \cdot \varphi)^{-2}}{A_0 + A_1(1-b_2 \cdot \varphi)^{-1}} = \frac{b_1 \cdot \varphi}{(1-b_2 \cdot \varphi)(1-b_2 \cdot \varphi + b_1 \cdot \varphi)}$$

Preureditev enačbe pokaže znan odnos med aktivnostjo vodne pare in lesno vlažnostjo:

$$\frac{\varphi}{u} = \frac{1}{u_0 \cdot b_1} + \frac{(b_1 - 2 \cdot b_2)}{u_0 \cdot b_1} \cdot \varphi - \frac{(b_1 \cdot b_2 - b_2^2)}{u_0 \cdot b_1} \cdot \varphi^2$$

Oziroma

$$\frac{\varphi}{u} = A + B \cdot \varphi - C \cdot \varphi^2$$

$$A = \frac{1}{u_0 \cdot b_1}, B = \frac{(b_1 - 2 \cdot b_2)}{u_0 \cdot b_1}, C = \frac{(b_1 \cdot b_2 - b_2^2)}{u_0 \cdot b_1}$$

Sorpcijske izoterme lahko napovemo, če poznamo konstante u_0 , b_1 in b_2 , ki jih izračunamo iz eksperimentalnih podatkov.

$$b_2 = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4 \cdot A \cdot C}}{2 \cdot A}$$

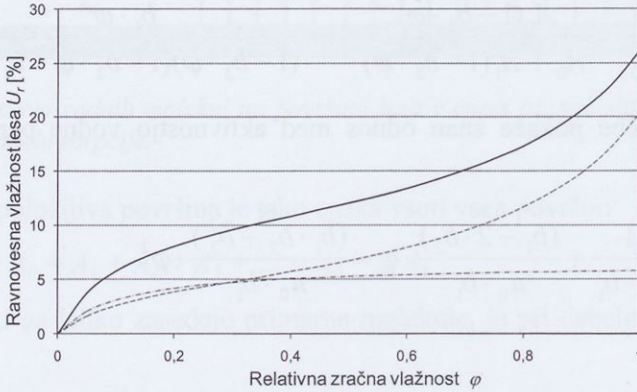
$$b_1 = 2 \cdot b_2 + \frac{B}{A}$$

$$u_0 = \frac{1}{A \cdot b_1}$$

Konstanti b_1 in b_2 določata energijsko razmerje med primarnimi oz. sekundarnimi molekulami vode, medtem ko je u_0 vlažnost pri nasičenju primarnih sorpcijskih mest.

Vlažnost lesa je enaka vsoti dejanske količine primarno vezanih vodnih molekul (u_1), ki predstavlja Langmuirjevo sorpcijsko izotermo in sekundarno (u_2) vezanih molekul (sl. 44).

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{u_1}{u_0} = \frac{b_1 \cdot \varphi}{(1 - b_2 \cdot \varphi + b_1 \cdot \varphi)}$$



Slika 44 Dentov model sorpcijske izoterme (--- primarna sorpcija; sekundarna sorpcija; — skupna sorpcija lesa).

$$\frac{V_2}{V_0} = \frac{u_2}{u_0} = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot \varphi^2}{(1 - b_2 \cdot \varphi) \cdot (1 - b_2 \cdot \varphi + b_1 \cdot \varphi)}$$

$$u = \frac{u_0 \cdot b_1 \cdot \varphi}{(1 - b_2 \cdot \varphi) \cdot (1 - b_2 \cdot \varphi + b_1 \cdot \varphi)}$$

Med najpogosteje uporabljenimi teorijami sorpcije je že leta 1937 postavljena **Brunauer-Emmett-Teller-jeva ali BTE teorija**, ki tudi obravnava večplastno sorpcijo vode s predpostavljjanjem enakih lastnosti sekundarnih plasti vode.

Najbolj običajno se BET enačba pojavlja v naslednji obliki:

$$\frac{u}{u_m} = \frac{C \cdot \varphi^2}{(1 - \varphi) \cdot (1 - \varphi + C \cdot \varphi)}$$

kjer konstanti u_m in C teoretično ustrezata u_0 in b_1 iz Dentove teorije, medtem ko je vrednost b_2 enaka 1.

Iz najpogostejše oblike enačbe

$$\frac{\varphi}{u \cdot (1 - \varphi)} = \frac{1}{u_m \cdot C} + \frac{(C - 1)}{u_m \cdot C} \cdot \varphi$$

predvidevamo linearno odvisnost levega člena od vodne aktivnosti, vendar se dejansko izkaže da je zveza skladna le za manjše vrednosti vodne aktivnosti ($h < 0,4$). Boljše prilagajanje dobimo z omejitvijo števila slojev (n) vezane vode:

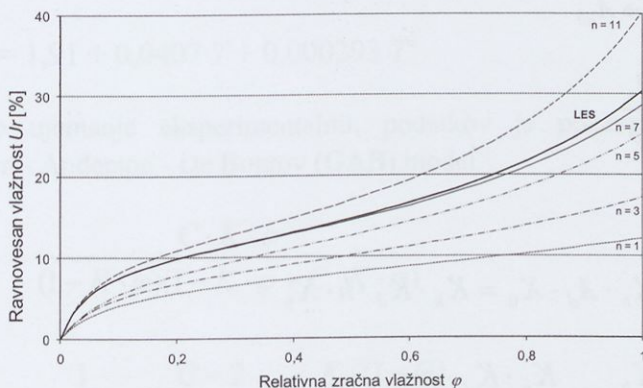
$$\frac{\varphi}{u \cdot (1 - \varphi)} = \frac{1 - \varphi + C \cdot \varphi \cdot (1 - \varphi^n)}{u_m \cdot C \cdot [1 - (n + 1 - n \cdot \varphi) \cdot \varphi^n]}$$

$$\frac{\varphi}{u \cdot (1 - \varphi)} = \frac{1 - \varphi + C \cdot \varphi \cdot (1 - \varphi^n)}{u_m \cdot C \cdot [1 - (n + 1 - n \cdot \varphi) \cdot \varphi^n]}$$

$$u = \frac{C \cdot u_m \cdot \varphi}{(1 - \varphi)} \left(\frac{1 - (n + 1) \cdot \varphi^n + n \cdot \varphi^{n+1}}{1 + (C - 1) \cdot \varphi - C \cdot \varphi^{n+1}} \right)$$

Kadar narašča število slojev vezane vode n proti neskončno, dobimo izhodiščno BET enačbo, če pa je n enako 1, pa dobimo Langmuirjevo enačbo.

Krivulja se najboljše ujema z eksperimentalnimi podatki pri vrednostih n med 6 in 10, ki predstavljajo tudi maksimalno število molekul vode, vezanih na eno sorpcijsko mesto (sl. 45).



Slika 45 BTE model sorpcijske izoterme in vpliv števila slojev na sorpcijske karakteristike (n – število slojev vezane vode).

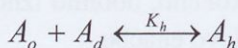
Hailwood-Horrobinov model sorpcije predvideva, da del vezane vode z lesom tvori hidrat, preostanek pa tvori raztopino. Celična stena naj bi bila po modelu sestavljena iz suhega lesa X_0 , hidrata X_h in raztopljene vode X_d . Za idealne raztopine lahko njihove aktivnosti zapišemo:

$$A_0 = \frac{X_0}{X_0 + X_h + X_d}$$

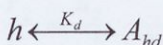
$$A_h = \frac{X_h}{X_0 + X_h + X_d}$$

$$A_d = \frac{X_d}{X_0 + X_h + X_d} \text{ ali } \frac{1}{A_d} = \frac{X_0 + X_h}{X_d} + 1 \text{ in } \frac{X_0 + X_h}{X_d} = \frac{1}{A_d} - 1 = \frac{1 - A_d}{A_d}$$

Za ravnotežje med suhim lesom in raztopljenjo vodo (hidratom) je konstanta ravnotežja enaka razmerju med aktivnostjo produkta in produktom aktivnosti reaktantov, podobno pa velja tudi za ravnotežje med vlago v zraku in raztopljenjo vodo:



$$K_h = \frac{A_h}{A_0 A_d} = \frac{X_h}{X_0 A_d}$$



$$K_h = \frac{d_h}{\varphi}$$

sledi

$$X_h = K_h \cdot A_d \cdot X_0 = K_h \cdot K_d \cdot h \cdot X_0$$

$$\frac{X_0 + X_h}{X_d} = \frac{K_h \cdot K_d \cdot \varphi}{1 + K_h \cdot K_d \cdot \varphi}$$

$$u = u_0 \cdot \left(\frac{K_h \cdot K_d \cdot \varphi}{1 + K_h \cdot K_d \cdot \varphi} + \frac{K_d \cdot \varphi}{1 - K_d \cdot \varphi} \right)$$

S preureditvijo lahko dobi enačba obliko kvadratne funkcije

$$\frac{\varphi}{u} = \frac{1}{u_0 \cdot K_d \cdot (K_h + 1)} + \frac{K_h - 1}{u_0 \cdot (K_h + 1)} \cdot \varphi - \frac{K_h \cdot K_d}{u_0 \cdot (K_h + 1)} \cdot \varphi^2$$

Hailwood-Horrobinov model sorpcije je prilagojen tudi za eksplicitno določanje ravnovesne vlažnosti lesa pri različnih temperaturah (sl. 46).

$$U_r = \frac{1800}{w} \cdot \left(\frac{K_1 \cdot K \cdot \varphi + 2 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K^2 \cdot \varphi^2}{1 + K_1 \cdot K \cdot \varphi + K_1 \cdot K_2 \cdot K^2 \cdot \varphi^2} + \frac{K \cdot \varphi}{1 - K \cdot \varphi} \right)$$

kjer je

U_r ravnovesna vlažnost lesa, izražena v % ,
 φ relativna zračna vlažnost, izražena z razmerjem delnega tlaka vodne pare in tlakom nasičenja ter
 w, K, K_1, K_2 temperaturno odvisne vrednosti.

$$w = 349 + 1,29 T + 0,0135 T^2$$

$$K = 0,805 + 0,0007736 T + 0,00000273 T^2$$

$$K_1 = 6,27 - 0,00938 T - 0,000303 T^2$$

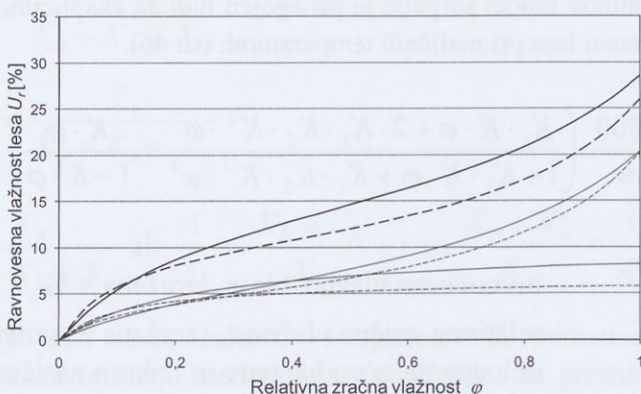
$$K_2 = 1,91 + 0,0407 T + 0,000293 T^2$$

Zadovoljivo ujemanje eksperimentalnih podatkov je pokazal tudi novejši Guggenheim - Anderson - De Boerov (**GAB**) model

$$\frac{u}{u_0} = \frac{C \cdot K \cdot \varphi}{(1 - K \cdot \varphi)(1 - K \cdot \varphi + C \cdot K \cdot \varphi)}$$

$$\frac{\varphi}{u} = \frac{1}{u_0 \cdot C \cdot K} + \frac{C - 2}{u_0 \cdot C} \cdot \varphi + \frac{K \cdot (1 - C)}{u_0 \cdot C} \cdot \varphi^2$$

V enačbi je u_0 vlažnost monomolekularne sorpcije, C je konstanta razmerja sorpcijske toplote in K konstanta odnosa lastnosti polimolekularne sorpcije.



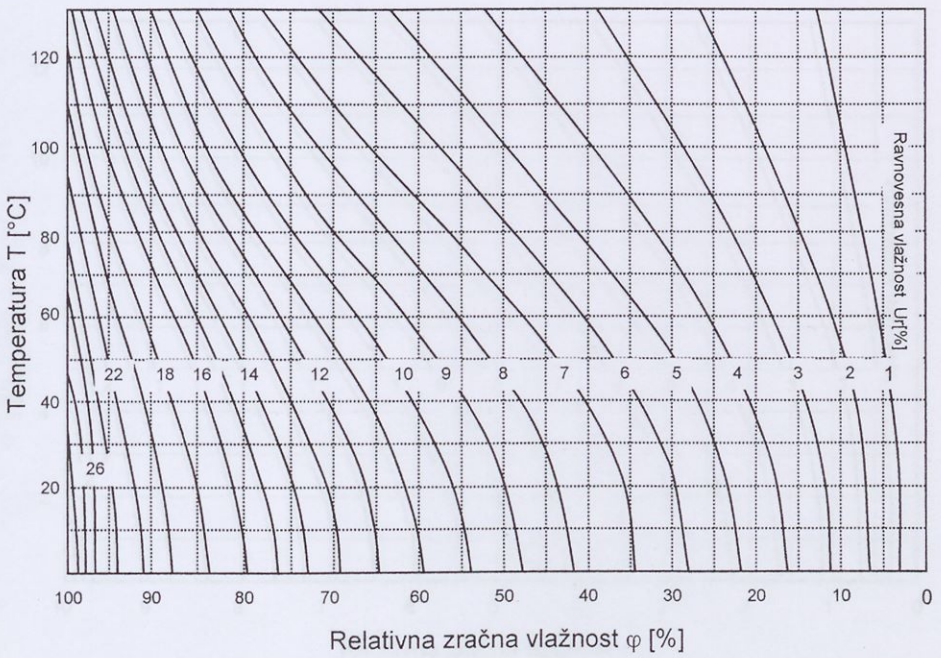
Slika 46 Primerjava Dentovega (polna črta) in Hailwood-Horrobinovega (črtkana) modela sorpcije s primarnim in sekundarnim delom.

Ravnovesna vlažnost lesa u_r - nihanje ravnovesne vlažnosti lesa v okolju in v uporabi

Ravnovesna vlažnost lesa je v tesni zvezi s temperaturo in relativno zračno vlažnostjo okolja, v katerem se nahaja. Bolj kot zgoraj navedene matematične zveze ravnovesne vlažnosti lesa s temperaturo in relativno zračno vlažnostjo, v praksi za ugotavljanje ravnovesne vlažnosti uporabljamo nomogram (ali tabele), ki sicer velja za les smreke – sitke (*Picea sitchensis* Carr.), vendar jih z zadovoljivo natančnostjo uporabljamo tudi za druge srednje goste lesne vrste (sl. 47).

Pri vgraditvi lesa moramo paziti, da je lesna vlažnost približno enaka ravnovesni vlažnosti, kot jo narekujejo srednje klimatske razmere na mestu vgraditve, sicer pride do nezaželenega krčenja ali nabrekanja. Razen v klimatiziranih prostorih ne moremo preprečiti večjega ali manjšega "delovanja" lesa zaradi klimatskih nihanj, npr. med zimskim in letnim časom pa tudi med nočjo in dnevom ali deževnim in suhim vremenom. Ravnovesna vlažnost v normalni klimi ($\varphi = 65\%$, $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$) je pribl. 12 %, v prostorih s centralnim ogrevanjem 6 % do 8 %, v prostorih, ogrevanih s pečmi, pa 8 % do 10 %. Najvišja vlažnost, ki še zagotavlja varnost pred okužbami z glivami, je od 18 % do 20 % (pregl. 14).

Namen in mesto uporabe lesa predstavlja z vidika možnosti bioloških okužb z insekti ali glivami večjo ali manjšo ogroženost. Evropski standard SIST EN 335-2 uvaja pet razredov ogroženosti (pregl. 15)



Slika 47 Odvisnost ravnovesne vlažnosti lesa od temperature in relativne zračne vlažnosti.

Preglednica 14 Ravnovesna vlažnost lesa (u_r) v uporabi in priporočena ciljna vlažnost po sušenju (u).

Namen uporabe, oprema	Pribl. u_r [%]	Ciljna vlažnost (u) [%]
Konstruktivski les	13 - 17	15 - 25 (suš. na prostem)
Les za ladje in čolne	16 - 18	13 - 15
Športna oprema, ladijska in čolnarska notranja		
Oprema, ostrešni les, pohištvo v neogrevanih prostorih	13 - 17	14 ± 2
Les za notranjo opremo	12 - 16	
Stavbno pohištvo		13 ± 2
Talne in stenske obloge, pohištvo		
- v kurjenih prostorih	10 - 12	
- v centralno ogrevanih prostorih	8 - 10	
Glasbeni instrumenti	8 - 11	9 ± 1

Preglednica 15 Razredi ogroženosti glede na mesto uporabe, vlažnost lesa in možnosti bioloških okužb z insekti ali glivami (SIST EN 335-2).

Razred ogroženosti	Mesto uporabe	Lesna vlažnost	Biotski dejavniki	
			Insekti	Glive
1	Notranji prostori, pohištvo, obloge, notranja vrata	Vedno pod 20 %	+	-
2	Pokriti zunanji prostori, ostrešja in podporni les (s prezračevanjem)	Izjemoma nad 20 %	+	+
3	Nepokriti prostori, vendar ne v stiku s tlemi ali vodo Konstrukcijski les, izpostavljen padavinam	Občasno ali pogosto nad 20 %	+	+
4	V vodi ali tleh Drogovi, železniški pragovi, lesene podloge	Stalno nad 20 %	+	+
5	V morski vodi Piloti	Stalno nad 20 %	+	+

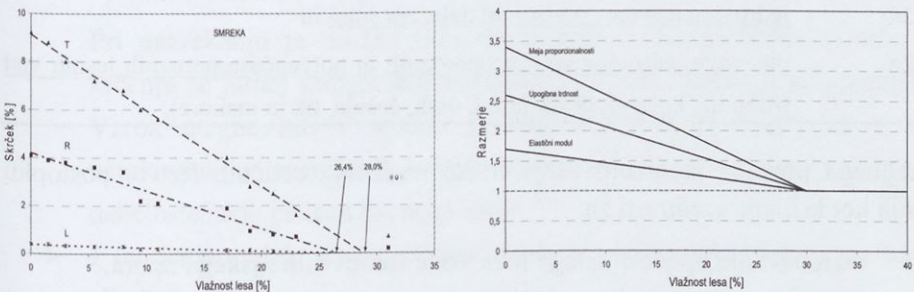
Poleg vpliva vlažnosti lesa na njegovo trajnost je za njegovo uporabnost v konstrukcijske namene zelo pomemben učinek vlažnosti na trdnost. V ta namen razvrščamo les v tri razrede:

- A razred uporabnosti les se uporablja v prostoru s povprečno temperaturo 20 °C, relativna zračna vlažnost lahko v letu preseže 65 % le za nekaj tednov.
- B razred uporabnosti lesena talna obloga se uporablja v prostoru s povprečno temperaturo 20 °C, relativna zračna vlažnost pa v letu lahko preseže 85 % le za nekaj tednov
- C razred uporabnosti klimatske razmere v prostoru redno presežejo relativno zračno vlažnost 85 %

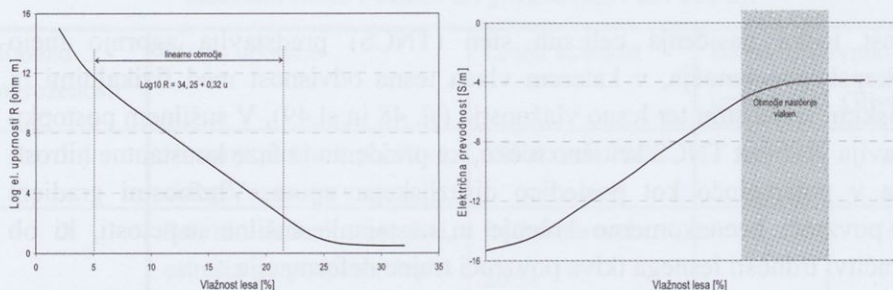
Točka nasičenja celičnih sten (TNCS) - metode določanja in pomen

Vlačnost točke nasičenja celičnih sten (TNCS) predstavlja zgornjo mejo higroskopskega območja, v katerem vlada tesna odvisnost med fizikalnimi in mehanskimi lastnostmi ter lesno vlažnostjo (sl. 48 in sl.49). V sušilnem postopku predstavlja vlažnost TNCS kritično točko, ko preidemo iz faze konstantne hitrosti sušenja v pojemajočo kot posledico difuzijskega upora. Vlažnostni gradient hkrati povzroči neenakomerno krčenje in nastajanje sušilne napetosti, ki ob prekoračitvi trdnosti lesnega tkiva povzroči trajne deformacije.

Teoretično stanje oz. vlažnost, pri kateri so celične stene še nasičene s higroskopsko (vezano) vodo, lumni pa že izpraznjeni, imenujemo točko nasičenja celičnih sten (vlaknen) - TNCS (angl. fibre saturation point - FSP, nem. Fasersättigungspunkt - FSP). Vlažnost TNCS (u_{TNCS}) je približno enaka ravnovesni vlažnosti, kot se vzpostavi v klimi s 100 % relativno zračno vlažnostjo. Definiciji TNCS sta zaradi svoje enostavnosti zelo sprejemljivi, pri čemer pa so vrednosti, zaradi anatomskih, strukturnih in kemijskih razlik med posameznimi tkivi zelo različne in variabilne, zato je mnenje, da je vlažnost točke nasičenja celičnih sten $u_{TNCS} = 30 \%$ zmotno (pregl. 16)(Babiak in Kúdela, 1995). Vrednosti so odvisne tudi od uporabljene metode, ki temeljijo na posrednem določanju TNCS. Eksperimentalno jo določamo največkrat z ekstrapolacijo (Gorišek, 1994). Tudi v samem preizkušancu se ne moremo popolnoma izogniti vlažnostnemu gradientu, zato so njene vrednosti variabilne in z manjšo natančnostjo. V praksi je zato primerneje obravnavati območje nasičenja celičnih sten in ne le točko.



Slika 48 Odvisnost a/ krčenja (β_T - tangencialni, β_R - radialni, in β_L - longitudinalni skrček) ter b/ mehanskih lastnosti od vlažnosti lesa s točko nasičenja celičnih sten.



Slika 49 Vpliv vlažnosti na a/ električno upornost in b/ prevodnost lesa.

Preglednica 16 Vlažnost TNCS med lesovi močno variira, za prakso pa jih razvrščamo v pet skupin.

u_{TNCS} [%]	Kategorija lesa
32 - 35	<u>difuznoporoznen les listavcev brez jedrovine</u> (lipa, vrba, topol, jelša, breza, bukev), <u>beljava venčastoporoznih in polvenčastoporoznih vrst</u> (robinija, kostanj, hrast, jesen, oreh in češnja) in <u>tropski lesovi</u> (npr. sapeli, sipo, temnordeči meranti, niangon),
30 - 34	<u>les iglavcev z neobarvano jedrovino</u> (smreka, jelka) in <u>beljava iglavcev, ki imajo jedrovino</u> (bor, macesen),
26 - 28	<u>jedrovina iglavcev z zmernim deležem smol</u> (bor, macesen, duglazija),
22 - 24	<u>jedrovina iglavcev z visokim deležem smol</u> in
23 - 25	<u>obarvane jedrovine venčastoporoznih in polvenčastoporoznih lesnih vrst</u> (robinija, kostanj, hrast, jesen, oreh, češnja, tik in makore).

Temeljnega pomena je razumevanje točke nasičenja celičnih sten v postopku sušenja kot kritične vrednosti za:

- razumevanje upočasnjenega toka vode zaradi difuzijskega upora,
- pojasnitev generiranja sušilnih napetosti, ki nastanejo v procesu higroskopskega krčenja zaradi vlažnostnega gradienta ali/in anizotropne zgradbe,

- razumevanje zmanjšanja toplotnega toka na površino lesa in zmanjšanja masnega toka s površine zaradi manjše temperaturne in vlažnostne razlike med površino lesa in okolico.

Pri listavcih, ki imajo večji delež bolj higroskopnih polioz, je vlažnost nasičenja celičnih sten nekoliko višja kot pri iglavcih. Ekstraktivi znižujejo ravnovesno vlažnost v zgornjem območju relativnih zračnih vlažnosti, zato je tudi ravnovesna vlažnost in TNCS beljave vselej višja od ravnovesne vlažnosti in TNCS jedrovine. Prav tako sta ravnovesna vlažnost in TNCS ekstrahirane jedrovine vselej višji od ravnovesne vlažnosti in TNCS neekstrahirane jedrovine. Trakovi imajo nižjo TNCS od osnovnega aksialnega tkiva, verjetno zaradi drugačne kemične sestave.

TNCS lahko določimo na več načinov, vsi pa temeljijo na drastičnih spremembah fizikalnih, mehanskih in drugih lastnosti v higroskopskem območju in dokaj stabilnih vrednostih nad točko nasičenja celičnih sten:

- z ekstrapolacijo sorpcijske izoterme do 100 % relativne zračne vlažnosti (Kelsey, 1954),
- z določitvijo začetka krčenja v procesu sušenja ali prenehanja nabrekanja v procesu vlaženja (metoda intersekcijske točke),
- z računanjem razmerja med volumenskim skrčkom (β_V) in osnovno gostoto (R) ob korekciji gostote adsorbirane vode (ρ_{vv}) ali nabrekom (α_V) in gostoto v absolutno suhem stanju (ρ_0),

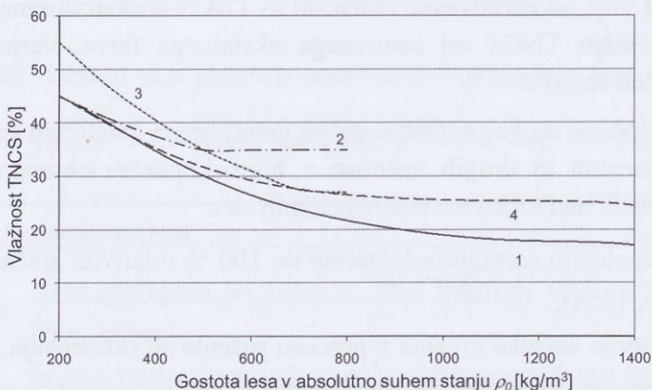
$$u_{TNCS} = \frac{\beta_V \rho_{vv}}{R} = \frac{\alpha_V \rho_{vv}}{\rho_0}$$

Pri nabrekanju je možna tudi sprememba volumna lumnov; npr. pri krčenju se lumni ranega lesa duglazije povečajo, kasnega pa zmanjšajo. Vzrok utegne biti v srednji lameli, bogati z ligninom, ki je bolj učinkovita pri zmanjšanju krčenja tankostenskih celic ranega lesa kot pri debelostenskih celicah kasnega lesa.

- z merjenjem električne upornosti, kota izgube in dielektrične konstante ali obojega,
- termodinamsko, z merjenjem sorpcijske (vlažilne) toplote,
- z metodo porozne ploščice,
- z visokim kapilarnim tlakom s centrifugiranjem,
- s presevanjem z beta žarki,

- s spremljanjem biološkega razkroja z glivami, ki povzročajo trohnobo,
- z izmenjavanjem oz. izločevanjem vezane vode s polimeri,
- z merjenjem odvisnosti trdnostnih lastnosti (zlasti tlačne) od vlažnosti.

Redkejši lesovi imajo višjo vlažnost nasičenja celičnih sten (sl. 50), vendar moramo omenjeno zakonitost pretehtati tudi z vidika ostalih vplivnih dejavnikov, ki v mnogih premerih celo prevladajo.

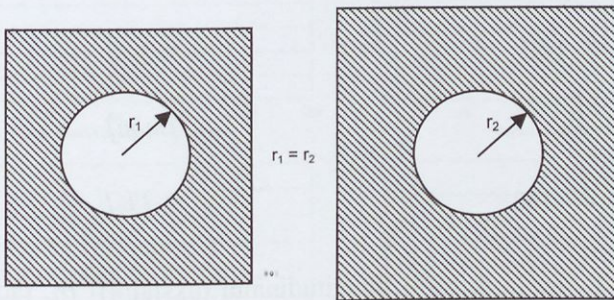


Slika 50 Odvisnost točke nasičenja celičnih sten od gostote lesa v absolutno suhem stanju (iz Gorišek, 1992 po 1 –Vorreiter (1963), 2 –Feist in Tarkow (1967), 3 –Kellogg in Wangaard (1969) in 4 –Cudinov (1981)).

KRČENJE, NABREKANJE IN KRČITVENA ANIZOTROPIJA

Krčenje lesa štejemo med njegove najneugodnejše lastnosti, saj zaradi higroskopsnosti dimenzije lesa ne ostajajo stabilne niti po osušitvi na primerno vlažnost. Krčenje ali nabrekanje lesa je vezano na spremembo vlažnosti v higroskopskem območju, to je od točke nasičenja celičnih sten (TNCS) do absolutno suhega stanja (Mantanis s sod. 1994).

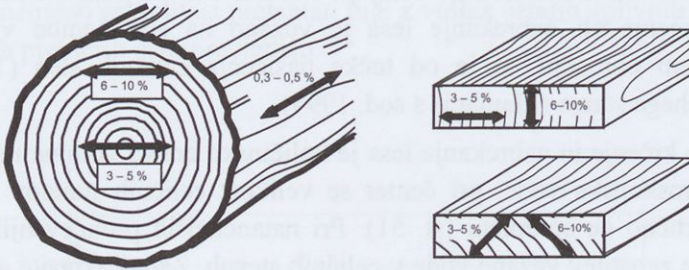
Volumensko krčenje in nabrekanje lesa je količinsko enako volumnu oddane oz. sprejete higroskopske vode, pri čemer se velikost celičnih lumnov v procesu krčenja praktično ne spremeni (sl. 51). Pri natančnejših proučevanjih moramo upoštevati še zgostitev vezane vode v celičnih stenah. Zaradi izrazite anatomske, kemične in fizikalne anizotropije na makroskopskem, mikroskopskem, submikroskopskem in makromolekularnem nivoju se tudi krčenje in nabrekanje razlikujeta glede na anatomske smeri. Krčenje oziroma nabrekanje je v longitudinalni smeri praktično zanemarljivo (pribl. 0,3 %) v radialni in tangencialni smeri pa je 10 oz. 20 krat večje. (sl. 52 ter pregl. 17). Na krčenje v longitudinalni smeri delujejo zaviralno vzdolžno orientirani kristaliti celuloze, usmerjenost mikrofibril v prevladujočem srednjem sloju sekundarne stene in prem potek vlaken v samem deblu, medtem ko se krčenje realizira v prečni smeri, t.j. radialno in tangencialno (Barber, 1968, Barber in Meylan, 1964, Barret in sod. 1972, Boyd, 1974, Harris in Meylan, 1965, Keylwerth, 1962, 1964).



Slika 51 Volumensko krčenje in nabrekanje lesa je količinsko enako volumnu oddane oz. sprejete higroskopske vode.

Krčenje je še zlasti neugodno v postopku sušenja, ko se zaradi vlažnostnega gradienta in krčitvene anizotropije generirajo napetosti, ki ob prekoračitvi prečne natezne trdnosti lesa povzročajo razpoke in izkrivljenosti (distorzije) (Hittmeier, 1967, Hsu in Tang, 1975, Kollmann, 1981).

Higroskopsko krčenje in nabrekanje je treba strogo ločiti od dimenzijskih sprememb, ki nastanejo kot posledica sproščanja rastnih napetosti, ki se generirajo v zadnji fazi diferenciacije v kambijevi coni in se delno sprostijo že pri poseku drevesa, še preden se les začne sušiti.



Slika 52 Anizotropija krčenja v glavnih anatomskih smereh (odstotki predstavljajo približne skrčke od točke nasičenja celičnih sten do absolutno suhega stanja).

Celotni ali »totalni« prostorninski ali volumenski skrček (β_V) je definiran s spremembo volumna od svežega do absolutno suhega stanja glede na dimenzije pred krčenjem, to je v svežem stanju, ko je vlažnost lesa nad točko nasičenja celičnih sten. Po enakem načelu so določeni tudi linerani skrčki v vzdolžni (β_L), radialni (β_R) in tangencialni smeri (β_T).

$$\beta_V = \frac{V_{vl} - V_0}{V_{vl}} \quad [m^3/m^3]$$

$$\beta_V = \frac{V_{vl} - V_0}{V_{vl}} \cdot 100 \quad [\%]$$

$$\beta_{L,R,T} = \frac{l_{vl} - l_0}{l_{vl}} \quad [m/m]$$

$$\beta_{L,R,T} = \frac{l_{vl} - l_0}{l_{vl}} \cdot 100 \quad [\%]$$

Nabrek (volumenski - α_V in linearni: longitudinalni (aksialni)- α_L , radialni - α_R ter tangencialni - α_T) je definiran kot povečanje dimenzij lesa glede na dimenzije v sušilnično oziroma absolutno suhem stanju ($u \sim 0 \%$):

$$\alpha_V = \frac{V_{vl} - V_0}{V_0} \quad [m^3/m^3] \quad \alpha_V = \frac{V_{vl} - V_0}{V_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

$$\alpha_{L,R,T} = \frac{l_{vl} - l_0}{l_0} \quad [m/m] \quad \alpha_{L,R,T} = \frac{l_{vl} - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

V zgornjih enačbah je:

$\beta_{V,L,R,T}$	skrček (volumenski, vzdolžni radialni ali tangencialni)
$\alpha_{V,L,R,T}$	nabrek (volumenski, vzdolžni radialni ali tangencialni)
V_{vb}, l_{vl}	dimenzije (volumen ali razdalja) v svežem stanju
V_0, l_0	dimenzije (volumen ali razdalja) v absolutno suhem stanju

Med skrčkom in nabrekom veljata naslednji zvezi:

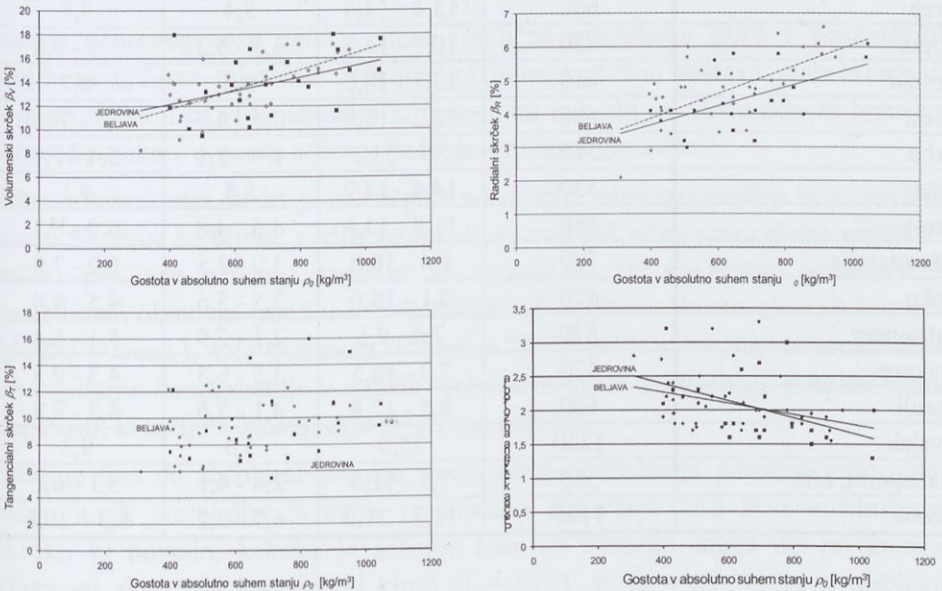
$$\alpha = \frac{\beta}{1 - \beta} \text{ in } \beta = \frac{\alpha}{1 + \alpha}$$

Približno je mogoče določiti volumensko krčenje in nabrekanje tudi iz linearnih skrčkov oz. nabrekov:

$$\beta_V \sim \beta_L + \beta_R + \beta_T - 0,01 \beta_T \beta_R \text{ oz. } \beta_V \sim \beta_T + \beta_R$$

$$\alpha_V \sim \alpha_L + \alpha_R + \alpha_T - 0,01 \alpha_T \alpha_R \text{ oz. } \alpha_V \sim \alpha_T + \alpha_R$$

Obstaja pozitivna odvisnost med volumenskim, radialnim in tangencialnim nabrekom ter gostoto (sl. 53). Najznačilnejši je vpliv gostote na radialno krčenje. Stabilizirajoči vpliv jedrovinskih snovi je pri redkejših lesovih večji kot pri gostejših, kjer gostota prekrije učinek ojedritve na fizikalne lastnosti lesa.



Slika 53 a) Volumenski, b) radialni in c) tangencialni nabrek ter d) prečna krčitvena anizotropija v odvisnosti od gostote lesa v absolutno suhem stanju. (Gorišek, 1992)

Preglednica 17 Gostota ρ_{12} pri lesni vlažnosti $u = 12\%$, volumenski β_V , radialni β_R in tangencialni β_T skrček za nekatere domače iglavce in listavce ter za nekaj tropskih vrst (Wagenführ in Schreibe 1986; Gorišek, 1992)

Lesna vrsta	Gostota ρ_{12} [kg/m ³]	Skrček		
		volumenski β_V [%]	radialni β_R [%]	tangencialni β_T [%]
Jelka	450	10,2 - 11,5	2,9 - 3,8	7,2 - 7,6
Macesen	590	11,4 - 15,0	3,3 - 4,3	7,8 - 10,4
Smreka	470	11,6 - 12,0	3,5 - 3,7	7,8 - 8,0
Bor, rdeči	520	11,2 - 12,4	4,0 - 3,3	7,5 - 8,0
Duglazija	510	11,5 - 12,5	4,2 - 4,8	7,0 - 7,4
Tisa	670	8,4 - 9,2	3,7	5,3
Javor	630	11,5 - 11,8	3,0	8,0
Kostanj, divji	550	11,0	3,3	6,8
Jelša	550	12,6 - 14,2	4,4	9,3
Breza	650	13,7 - 14,2	5,3	7,8
Gaber, beli	830	18,8	6,8	11,5
Bukev	720	14,0 - 21,0	5,8	11,8
Jesen	690	12,8 - 13,6	4,6 - 5,0	8,0 - 8,4
Oreh	680	13,4 - 14,0	5,4	7,5
Topol	450	10,7 - 14,3	3,3 - 5,2	7,1 - 9,8
Češnja	610	13,7 - 14,0	5,0	8,7
Hrast	690	12,2 - 15,0	3,5 - 4,7	7,7 - 10,0
Vrba	350	7,9 - 11,3	1,9 - 3,1	5,4 - 7,1
Lipa	530	14,4 - 14,9	5,5	9,1
Brest	680	11,8 - 13,8	4,6 - 4,8	6,9 - 8,3
Afrozija	700	9,4 - 10,0	3,0 - 3,5	6,0 - 7,0
Iroko	620	7,1 - 15,6	2,5 - 5,6	4,5 - 9,8
Palisander	870	7,4 - 9,5	2,1 - 2,9	5,1 - 6,4
Makore	620	7,9 - 16,5	3,5 - 6,5	4,3 - 9,5
Sapeli	650	8,5 - 17,8	4,1 - 7,6	4,3 - 9,8
Gvajak	1230	15,0	5,6	9,3
Mahagonij, afr.	510	7,5 - 11,8	2,4 - 4,1	5,1 - 6,2
Azobe	1100	15,2 - 21,0	6,7 - 9,2	8,3 - 10,8

Volumensko krčenje in nabrekanje lesa bi bilo v primeru homogene celične stene neodvisno od deleža praznih prostorov. Če domnevamo, da je točka nasičenja celičnih sten 30 %, relativna gostota celične stene 1,5 ter da je povečanje volumna zaradi nabrekanja enako volumnu vezane vode, je volumenski nabrek

od absolutno suhega stanja do vlažnosti točke nasičenja celičnih sten $0,45 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Potemtakem je maksimalni nabrek celične stene 45 %. V tem kontekstu je nabrek odvisen od gostote lesa oz. deleža celičnih sten in od TNCS.

Pri natančnih izračunih je treba upoštevati še zgostitev vezane vode v celični steni, ki se povečuje z nižanjem vlažnosti in doseže pri absolutni suhosti gostoto 1300 kg/m^3 . Srednja gostota vezane vode je 1130 kg/m^3 (glej. sl. 30). Odstopanja pogosto povzročajo znaten začetni skrček zaradi kolapsa, vsebnost ekstraktivnih snovi in pepela ali drugačna higroskopnost parenhimskega tkiva. Razmerje med spremembo volumna lesa (velja za krčenje in nabrekanje) in maso sprejete oz. oddane vode (razmerje r) se z naraščajočo gostoto zmanjšuje (Choon in Fogg, 1989). To utegne pomeniti, da pride pri manj gostih lesovih do zmanjšanja (kontraksije) lumnov ($r > 1$), pri gostejših pa do njihovega povečanja (ekspanzije) ($r < 1$).

$$r = \frac{V_{maks} - V_0}{m_V}$$

Nabrekanje masivnega lesa je nekoliko manjše od nabrekanja celičnih sten, kar je posledica vzajemnega učinka orientacije fibril, debeline posameznih slojev celičnih sten in kemične zgradbe.

Zaradi nehomogenosti celične stene (različna orientacija fibril v posameznih slojih in njihova relativna debelina, različna kemična sestava, nabrekanje in togost) zveza med volumenskim in linearnimi nabreki ter vlažnostjo ni linearna, temveč poteka v procesu adsorpcije in desorpcije sigmoidno.

Hitrost nabrekanja dm/dv je na začetku adsorpcije relativno majhna in narašča do $u \sim 5 \%$. Prve sorbirane vodne molekule se namreč vežejo na celični matriks v mikro poklinah celične stene in ne sodelujejo pri povečanju volumna. V naslednjem območju (med $u \sim 5 \%$ do 25%) narašča volumen (kvazi) linearno ($dv/dm = konst.$), nato spet pada. V bližini TNCS pride v "večjih" mikroporah še do kapilarne kondenzacije v smislu Kelvinove enačbe, ali pa do nabrekovalnih napetosti, ki težijo k zmanjšanju skupnega nabreka.

Sušenje lesa do absolutno suhega stanja nima praktičnega pomena, zato poleg celotnih ali »totalnih« skrčkov vrednotimo delovanje lesa še s sušilničnimi skrčki, ki povedo, kakšno je krčenje lesa od svežega stanja do ravnovesne vlažnosti, dosežene v normalni klimi ($T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ in $\varphi = 65 \%$), ki je približno 12%.

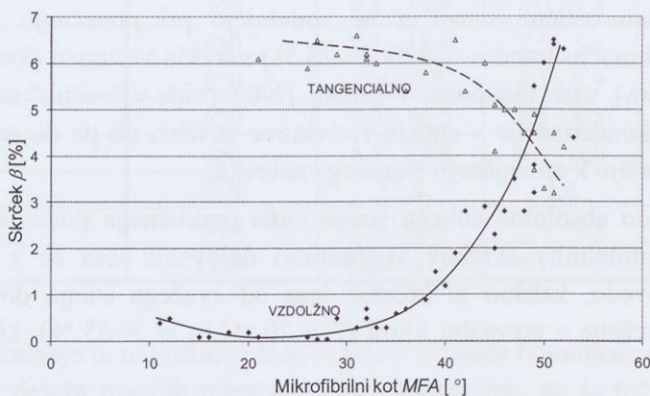
$$\beta_{suš.,L.,R.,T} = \frac{l_{vl} - l_{U=12\%}}{l_{vl}} 100 \quad [\%]$$

Krčenje in nabrekanje v longitudinalni smeri

Longitudinalno (osno, aksialno, vzdolžno) nabrekanje zrelega adultnega lesa je nekajkrat manjše od prečnega. Znaša le 0,1 % do 0,3 % ali je celo negativno in je praktično zanemarljivo. Vzdolžno krčenje zavirajo mikrofibrile v najbolj masivnem sloju celične stene (S2), ki potekajo bolj ali manj vzporedno z osjo vlaken in osjo drevesa.

Juvenilni in krošnjev les imata večji vzdolžni skrček zaradi večjega fibrilnega kota v srednjem sloju sekundarne stene (S2) in spiralnega poteka vlaken (McAlister in Clark, 1992). Zaradi večjega mikrofibrilnega kota imata nenormalno velik skrček tudi kompresijski in tenzijski les (kompresijski do 5 % in tenzijski do 1,5 %)(Meyland, 1968). Večji longitudinalni skrček tenzijskega lesa je posledica velikega mikrofibrilnega kota v zunanjem sloju sekundarne stene (S1), slaba kohezivnost z želatinoznim slojem in manjša lignifikacija G sloja pa tega ne more preprečiti. V kompresijskem lesu je veliko longitudinalno krčenje posledica tega, da potekajo mikrofibrile v srednjem sloju sekundarne stene pod večjim kotom. Občutnejši longitudinalni skrček juvenilnega in reakcijskega lesa se v postopku sušenja kaže v najrazličnejših veženjih.

Vpliv naklona mikrofibril na krčenje treh medsebojno pravokotnih ravnin lahko razložimo s primerjavo krčenja izotropnega medija (sl. 54). Vzdolžno krčenje se z naraščajočim mikrofibrilnim kotom do 30° zmanjšuje, potem pa narašča. Pri kotih med 20° in 40° lahko postane celo negativno, kar pomeni, da pride v vzdolžni smeri na tem območju celo do rahlega nabreka. Prečno krčenje je največje pri kotu 0° in počasi pada do kota 30°, nato se strmo zmanjša. Pri kotu 45° je enako kot pri vzdolžni smeri.



Slika 54 Vpliv orientacije mikrofibril (mikrofibrilni kot) na prečno tangencialno in vzdolžno krčenje celične stene. (Barber in Meyland, 1964)

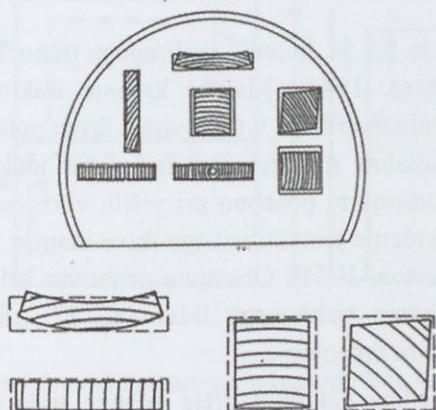
Krčenje in nabrekanje v tangencialni in radialni smeri - prečna krčitvena anizotropija

Tangencialno krčenje je na celotnem higroskopskem območju od 3,5 % do 15,0 %, v radialni smeri so skrčki približno polovico manjši (od 2,4 % do 9,0 %), z veliko variabilnostjo med lesnimi vrstami kot tudi v okviru iste vrste (pregl. 17)(Schniwind, 1989, Schroeder, 1972, Schwab, 1977, Tsoumis, 1991).

Izrazito neenako krčenje v radialni in tangencialni smeri se v praksi kaže med sušenjem na oblikovnih spremembah prečnega prereza (sl. 55). Deformacije so odvisne od intenzivnosti krčenja, na katerega vpliva tudi gostota in od razmerja krčenja v tangencialni in radialni smeri. Količnik med tangencialnim in radialnim skrčkom imenujemo prečna krčitvena anizotropija ($A_n = \beta_T/\beta_R = \alpha_T/\alpha_R$). Zaradi higroskopsnosti lesa velja ekvivalentno tudi za nabrek. Za oblikovno stabilnejše vrste je prečna krčitvena anizotropija manjša od 2, pri nestabilnih pa je večja.

Posledice prečne krčitvene anizotropije so:

- za tangencialno orientirane deske je značilna koritavost oz. žlebatost;
- kvadratast prečni prezek se pri orientiranih vzorcih (obdelavne ravnine so vzporedne z osnovnimi anatomskimi) deformira v pravokotnega, pri neorientiranih pa celo v rombastega,
- okrogel prezek svežega lesa se spremeni v eliptičnega,
- pri sušenju okroglega lesa se pojavijo radialne »klinaste« razpoke:

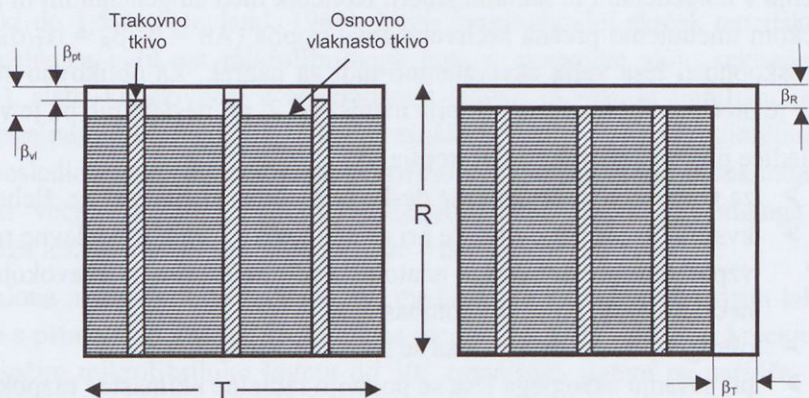


Slika 55 Učinki prečne krčitvene anizotropije in sprememba oblike ter dimenzij lesa po sušenju.

Razloge za prečno krčitevno anizotropijo je mogoče pripisati:

- vplivu anatomskih in kemičnih razlik med radialnimi in tangencialnimi stenami vlaknastih celic (bolj značilno za les iglavcev) ter
- vplivu anatomskih, fizikalnih in kemičnih razlik med posameznimi tkivi ali deli tkiv (pretežno les listavcev).

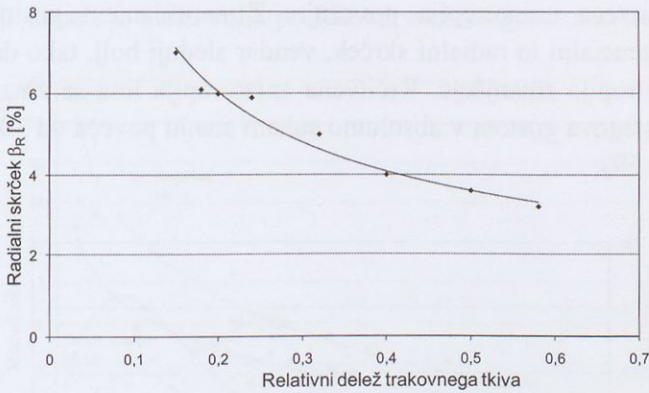
Teorija o **zaviralnem učinku trakovnega tkiva** (sl. 56) temelji na domnevi, da se trakovno tkivo v radialni smeri krči manj kot osno in tako zavira radialno krčenje, hkrati pa je togost trakovnega tkiva v "vzdolžni" smeri večja od prečne togosti vlaken.



Slika 56 Interpretacija zaviralnega učinka trakovnega tkiva (Skaar, 1988).

Povprečno radialno krčenje lesa je 5,1 %, krčenje izoliranega trakovnega tkiva v tej smeri pa le 2,2 % (Bosshard, 1974). Manjše krčenje trakovnega tkiva pripisujemo več dejavnikom: celulozne fibrile v trakovnem tkivu potekajo vzdolž traku, kar je bolj ali manj radialno na drevesno os, nižja točka nasičenja parenhimskega tkiva upočasnjuje sušenje in posebno pri višjih vlažnostih »zadržuje« radialno krčenje; v splošnem je krčenje parenhimskega tkiva manjše v primerjavi z osnovnim (Morschauer in Preston, 1954). Obstajata negativna odvisnost med radialnim skrčkom lesa in deležem trakovnega tkiva (sl. 57), obratno velja pozitivna odvisnost s tangencialnim krčenjem.

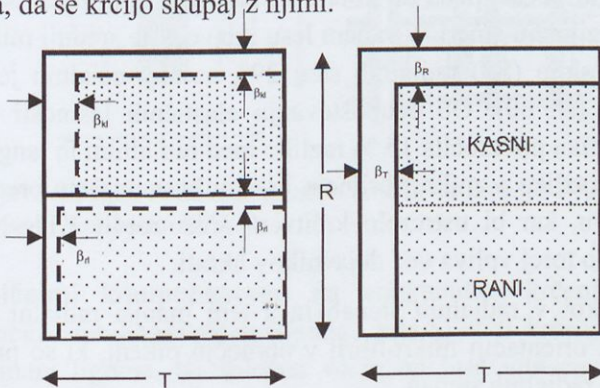
Razlike v krčenju so tudi posledica nekoliko nižje gostote trakovnega tkiva. Vzrok prečni anizotropiji krčenja je lahko tudi učinek Poissonovega razmerja, ki zaradi zaviranja radialnega krčenja osnovnega tkiva poveča njegovo krčenje v tangencialni smeri.



Slika 57 Vpliv deleža trakovnega tkiva na radialno krčenje bukovine (McIntosh, 1955).

Zaviralni učinek trakovnega tkiva je odvisen tudi od oblike; kratki in široki trakovi naj bi zmanjšali radialni skrčec bolj kot visoki in ozki. Z naraščanjem gostote vpliv morfologije trakov vse bolj slabi.

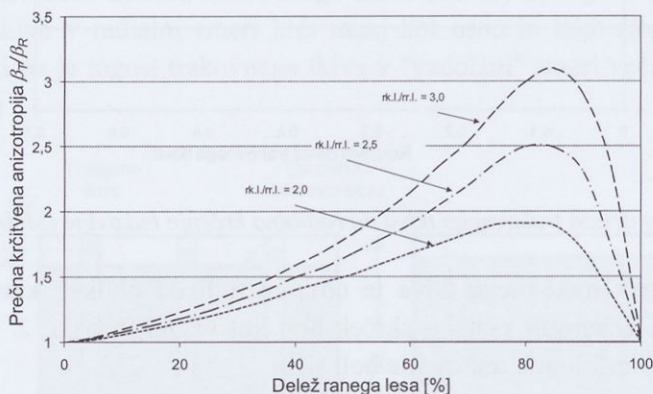
Teorija **interakcije ranega in kasnega lesa** pripisuje prečno krčitveno anizotropijo menjavanju plasti ranega in gostejšega kasnega lesa v radialni smeri (sl. 58). Gostejši kasni les se krči bolj od ranega in je tudi bolj tog, zato tangencialni pasovi kasnega lesa »prisilijo« pasove redkejšega in manj togega ranega lesa, da se krčijo skupaj z njimi.



Slika 58 Učinek interakcije ranega in kasnega lesa na prečno krčitveno anizotropijo.

Skrčec v radialni smeri je enak tehtani aritmetični sredini skrčkov posameznih plasti ranega in kasnega lesa. Dejansko je radialno krčenje zaradi Poissonovega razmerja še manjše (močno tangencialno krčenje poveča radialne dimenzije).

Z večjim deležem ranega lesa in večjim razmerjem gostot kasnega ter ranega lesa se prečna krčitvena anizotropija povečuje. Z naraščanjem gostote lesa se povečujeta tangencialni in radialni skrček, vendar slednji bolj, tako da se prečna krčitvena anizotropija zmanjšuje. Krčitvena anizotropija lesa se zmanjša s 3,68 na 1,23, če se njegova gostota v absolutno suhem stanju poveča od 300 kg/m^3 do 1100 kg/m^3 (sl. 59).



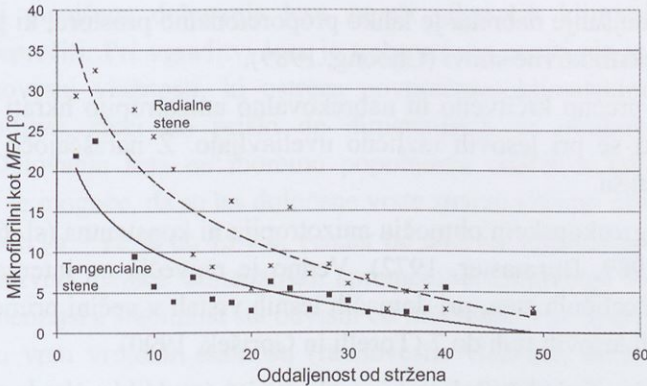
Slika 59 Vpliv deleža ranega lesa na prečno krčitveno anizotropijo (Skaar, 1988).

K razlikam krčenja prispeva tudi **orientacija mikro fibril**. Prečni nabrek je največji pri kotu 0° in počasi pada do kota 30° , nato se strmo zmanjša. Pri kotu 45° je enak kot pri vzdolžni smeri. V ranem lesu iglavcev je srednji mikro fibrilni kot v sekundarnem sloju (S2) radialnih sten 29° , v tangencialnih je nekoliko manjši – pribl. 23° (sl. 60). Ob neupoštevanju elastičnih lastnosti in stopnji lignifikacije bi ta razlika povzročila 15 % razliko med radialnim in tangencialnim krčenjem. Ustrezna razlika v mikro fibrilnem kotu v kasnem lesu predstavlja le 2% razlike v krčenju, kar bi ustrezalo krčitveni anizotropiji 1,11. Na prečno krčitveno anizotropijo torej vpliva več dejavnikov hkrati.

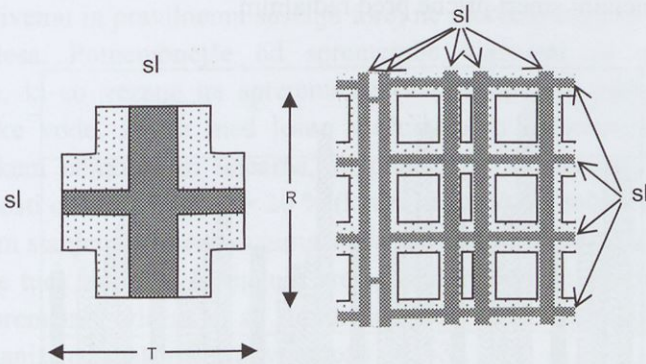
Večji mikro fibrilni kot v radialnih stenah in s tem manjši radialni skrček se pripisuje tudi krožni orientaciji mikro fibril v območju pikenj, ki so pri iglavcih najštevilnejše prav v radialnih stenah.

H krčitveni anizotropiji očitno prispeva tudi različna debelina **srednje lamele** v radialni in tangencialni smeri (sl. 61). Srednja lamela naj bi se zaradi večje vsebnosti higroskopnega pektina (heteropolisaharid) bolj krčila in nabrekala od sekundarne stene. Srednje lamele radialnih sten so debelejšje in njihova skupna

debelina je na dolžinsko enoto v tangencialni smeri večja kot v radialni smeri. Vpliv srednje lamele je zlasti velik pri lesovih z nizko gostoto in tankimi stenami.



Slika 60 Mikrofibrilni kot v radialnih in tangencialnih stenah smrekovine v odvisnosti od oddaljenosti od stržena.



Slika 61 Vpliv debeline in deležev srednje lamele na krčenje v radialni in tangencialni smeri (Bosshard, 1974).

Med **kemičnimi komponentami** na volumensko krčenje vpliva vsebnost inkrustriranega stabilizirajočega lignina, zato je tudi krčenje lesa listavcev, ki vsebujejo manj lignina, na splošno večje od lesa iglavcev (Schroeder, 1972, Matejak, 1984). Pri iglavcih so radialne stene bolj lignificirane (zato tudi bolj toge in manj higroskopne) od tangencialnih, kar tudi prispeva h krčitveni anizotropiji.

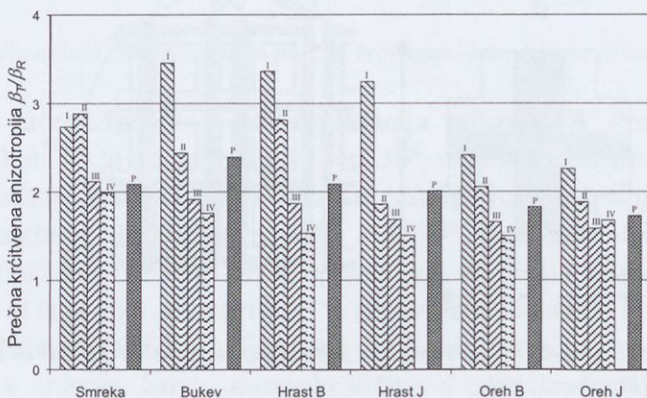
Šibkejša lignificiranost na splošno zmanjšuje krčitveno anizotropijo in je v smiselni korelaciji z razliko v lignificiranosti radialnih in tangencialnih sten. Les dreves z višjih nadmorskih višin (nad 1300 m) se volumensko manj krči zaradi

večje vsebnosti lignina, ki se vgradi zaradi močnejšega UV sevanja. Vpliv ekstraktivov je večji v radialnih stenah tako ranega kot kasnega lesa, ker imajo radialne stene več mikro razpok oz. prostorov, v katere lahko difundirajo ekstraktivi. Zmanjšanje nabreka je lahko proporcionalno prostoru, ki ga v celični steni zasedejo ekstraktivne snovi (Choong, 1989).

Na nezaželeno prečno krčitveno in nabrekovalno anizotropijo hkrati vpliva več mehanizmov, ki se pri lesovih različno uveljavljajo. Z naraščajočo gostoto se anizotropija manjša.

Na celotnem higroskopskem območju anizotropija ni konstantna (sl. 62) (Becker in Kommert, 1989, Burmaster, 1972). Vedno je največja na intervalu tik pod točko nasičenja celičnih sten, pri domačih lesnih vrstah v večini primerov med 3 in 4, pri tropskih lesovih tudi do 7 (Torelli in Gorišek, 1990).

Rezultati raziskav na različnih lesnih vrstah potrjujejo, da se tekom navlaževanja radialno nabrekanje konča pri vlažnostih, ki so za 3 % do 5 % nižje od tiste, pri kateri preneha tangencialno nabrekanje, velja seveda tudi obratno; krčenje se pri sušenju v tangencialni smeri prične pred radialnim.



Slika 62 Prečna krčitvena anizotropija na štirih intervalih higroskopskega območja (I - od $\varphi \sim 100\%$ do $\varphi = 87\%$; II - od $\varphi = 87\%$ do $\varphi = 65\%$; III - od $\varphi = 65\%$ do $\varphi = 34\%$ in IV - od $\varphi = 34\%$ do $\varphi \sim 0\%$) ter P - povprečna prečna krčitvena anizotropija za B - beljavo in J - jedrovino nekaj domačih lesnih vrst. (Gorišek, 1994)

Vzroki visoke prečne krčitvene anizotropije v zgornjem intervalu higroskopskega območja so v sorpcijskih in permeabilnostnih lastnostih trakovnega parenhimskega tkiva in v pojavu kolapsa že pri vlažnostih nad TNCS, tudi v primeru zelo previdnega sušenja.

DIMENZIJSKO DELOVANJE LESA

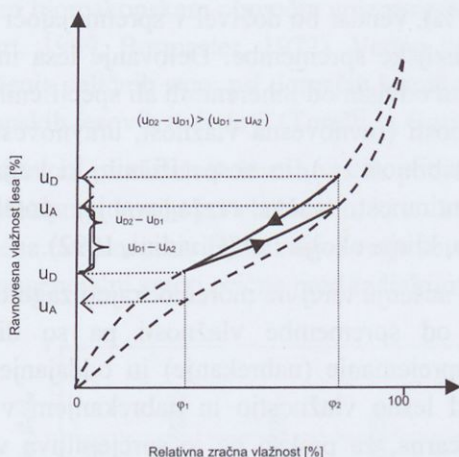
Večjega ali manjšega delovanja lesa zaradi nihajočih klimatskih razmer ne moremo preprečiti. Pri vgraditvi lesa je treba strogo paziti, da je lesna vlažnost enaka ravnovesni vlažnosti, ki ustreza povprečnim klimatskim razmeram na mestu vgraditve, sicer bo prišlo do dimenzijskih in oblikovnih sprememb izdelkov. Delovanja lesa ne moremo popolnoma enačiti s krčenjem lesa pri sušenju, saj je mogoče, da se les določene vrste znatno krči pri prvem sušenju, do zračne suhosti ($u = 12\%$ do 15%), vendar bo doživel v spreminjajoči se klimi v uporabi relativno majhne dimenzijske spremembe. Delovanje lesa in od njega odvisna dimenzijska stabilnost sta odvisni od inherentnih ali specifičnih lastnosti, t.j. določeni vrsti vrojenih lastnosti (ravnovesna vlažnost, uravnovesna hitrost, skrček oz. nabrek, oblikovna stabilnost ...), in nespecifičnih, ki veljajo za vse vrste enako (dimenzije, orientiranost, način razžagovanja, potek vlaken, konstrukcija, površinska obelava, klima okolja ...) (Cividini, 1992).

Kljub pazljivemu in pravilnemu sušenju torej ne moremo trajno zagotoviti stalne vlažnosti lesa. Pomembnejše od spremembe vlažnosti pa so dimenzijske spremembe, ki so vezane na sprejemanje (nabrekanje) in oddajanje (krčenje) higroskopske vode. Zveza med lesno vlažnostjo in nabrekanjem v celotnem higroskopskem območju ni linearna, za prakso pa je sprejemljiva v območju lesne vlažnosti od $u = 7\%$ do $u = 20\%$ (kvazi linearno območje). Interval ustreza ravnovesnim stanjem med relativnima zračnima vlažnostima od $\varphi \sim 30\%$ do $\varphi \sim 90\%$. To je tudi območje normalnih vremenskih nihanj oz. klimatskih oscilacij. Ciklične spremembe vlažnosti so zaradi neskladja med desorpcijo in adsorpcijo nekoliko manjše od maksimalnih vrednosti (sl. 63).

Delovanja lesa v nihajočih klimatskih razmerah tako tudi v uporabi ne moremo popolnoma preprečiti, lahko pa njegovo krčenje in nabrekanje omilimo:

- les osušimo na primerno vlažnost in vzdržujemo konstantne klimatske pogoje na mestu uporabe (vlažnost mora ustrezati povprečnim klimatskim razmeram kjer les uporabljamo – predvsem relativni zračni vlažnosti in tudi temperaturi),
- uporabimo stabilnejše lesne vrste in izberemo usmerjene elemente (les se v tangencialni smeri krči in nabreka dvakrat bolj kot v radialni), pazimo, da je les brez izrazitih rastnih posebnosti,

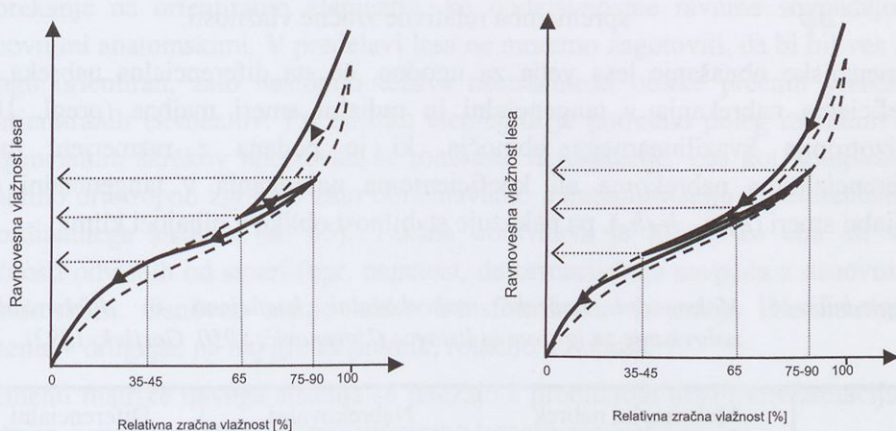
- izvedemo pravilne postopke vgradnje (preprečevanje dodatnega navlaževanja od sovgrajenih materialov, primerna hidro izolacija, uporaba pomožnih materialov – npr. lepila, ki ne vsebujejo vode),
- les zaščitimo s premaznimi sredstvi, ki delujejo hidrofobno in upočasnijo hitrost uravnovešanja in
- les obdelamo s posebnimi postopki za zagotavljanje dimenzijske obstojnosti lesa.



Slika 63 Zmanjšano delovaje lesa zaradi sorpcijske histezeze.

Krčenje in nabrekanje lesa v kvazilinearnem območju vrednotimo s kazalniki dimenzijske stabilnosti: diferencialnim nabrekom (q), koeficientom nabrekanja (h) sorpcijskim kvocientom (s) in časom ali polovičnim časom uravnovešanja ($t_{0,5}$). Kazalnike uporabljamo enakovredno za krčenje ali nabrekanje lesa.

Določanje kazalnikov dimenzijske stabilnosti je zaradi uravnovešanja in anizotropnega značaja delovanja lesa dolgotrajno in zamudno. Poskus izvedemo po parih, tako da lahko primerjalno vrednotimo podatke za procesa adsorpcije in desorpcije. Vse sveže vzorce najprej osušimo v normalni klimi ($20^\circ / 60\%$). Po uravnovešanju jih polovico navlažimo na relativni zračni vlažnosti okrog 80% , drugo polovico pa osušimo v klimi z relativno zračno vlažnostjo pribl. 30% . Po uravnovešanju vzorce stehamo in dimenzijsko premerimo, zamenjamo klimi ter ponovno uravnovesimo. Po ponovnih meritvah vzorce še osušimo do absolutno suhega stanja (sl. 64).



Slika 64 Štiristopenjsko določanje kazalnikov dimenzijske stabilnosti v procesu adsorpcije in desorpcije.

Diferencialni nabrek q (velja tudi za skrček) je med najprimernejšimi kazalniki dimenzijskih sprememb. V radialni (q_R) in tangencialni (q_T) smeri podaja spremembo prečnih dimenzij lesa, če se lesna vlažnost spremeni za 1 %:

$$q_T = \frac{\Delta \alpha_T}{\Delta u}$$

$$q_R = \frac{\Delta \alpha_R}{\Delta u}$$

Koeficient nabrekanja v radialni (h_R) in tangencialni (h_T) smeri nakazuje spremembo dimenzije, če se relativna zračna vlažnost spremeni za 1 %:

$$h_T = \frac{\Delta \alpha_T}{\Delta \varphi}$$

$$h_R = \frac{\Delta \alpha_R}{\Delta \varphi}$$

Sorpcijski kvocient (s) je neposredna mera lesne higroskopsnosti, saj pove, za koliko se spremeni lesna vlažnost, če se relativna zračna vlažnost spremeni za 1%:

$$s = \frac{h}{q} = \frac{\Delta u}{\Delta \varphi}$$

V zgornjih enačbah je:

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l}$$

nabrek (ali skrček) na obravnavanem intervalu

Δu sprememba vlažnosti na istem intervalu

$\Delta \varphi$ sprememba relativne zračne vlažnosti.

Dimenzijsko obnašanje lesa velja za ugodno, če sta diferencialna nabreka in koeficienta nabrekanja v tangencialni in radialni smeri majhna (pregl. 18). Anizotropija kvazilinearne območja, ki je podana z razmerjem med diferencialnima nabrekoma ali koeficientoma nabrekanja v tangencialni ali radialni smeri (q_T/q_R , h_T/h_R), pa nakazuje stabilnost oblike v nihajoči klimi.

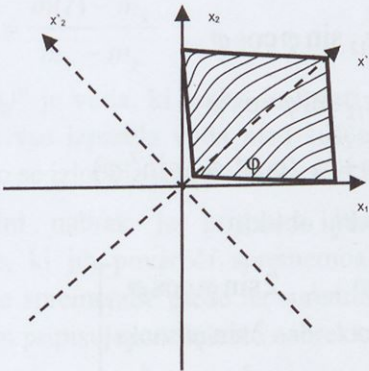
Preglednica 18 Maksimalni nabreki, nabrekovalni koeficienti in diferencialno nabrekanje za iglavce in listavce (Ugrenović, 1950, Gorišek, 1992).

Lesna vrsta	Maksimalni nabrek α [%]			Nabrekovalni koeficient h [%/%]		Diferencialni nabrek q [%/%]	
	Long.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.
smreka	0,2...0,4	3,7	8,5	0,037	0,070	0,19	0,36
bor	0,2...0,4	4,2	8,3	0,035	0,068	0,19	0,36
macesen	0,1...0,3	3,4	8,5	0,027	0,057	0,14	0,30
duglazlja	0,1...0,3	5,0	8,0	0,025	0,046	0,15	0,27
klek	0,2...0,6	2,5	5,3	0,015	0,030	0,10	0,20
samba	0,2...0,3	3,5	6,2	0,011	0,023	0,10	0,18
mahagoni	0,1...0,2	3,4	4,7	0,015	0,023	0,16	0,28
azobe	0,2...0,3	7,7	11,4	0,069	0,096	0,31	0,40
bukev	0,2...0,6	6,2	13,4	0,032	0,065	0,20	0,41
hrast	0,2...0,3	5,3	11,3	0,028	0,058	0,19	0,31
češnja	0,2...0,4	4,3	13,2	0,033	0,057	0,18	0,35
gaber	0,2...0,6	6,3	16,8	0,057	0,095	0,26	0,44
meranti	0,2...0,3	4,3	10,7	0,035	0,067	0,17	0,32
iroko	0,2...0,7	3,5	5,5	0,031	0,045	0,19	0,28
topol	0,2...0,4	3,4	8,9	0,012	0,029	0,10	0,28
sipo	0,2...0,3	5,5	6,7	0,037	0,047	0,20	0,25
tik	0,2...0,3	2,7	4,8	0,022	0,035	0,16	0,26

S kazalniki dimenzijske stabilnosti relativno enostavno predpostavimo krčenje in nabrekanje na orientiranih elementih, ko obdelavnostne ravnine sovpadajo z osnovnimi anatomskimi. V predelavi lesa ne moremo zagotoviti, da bi bil ves les strogo orientiran, zato nastopijo težave nestabilnosti oblike prečnih prerezov neorientiranih elementov. Pri takšnih elementih je potrebno poleg radialnih ali tangencialnih skrčkov upoštevati še rombaste deformacije. Les kot kompozit z značilno ortotropno zgradbo zato obravnavamo s transformacijo iz referenčnega koordinatnega sistema (sl. 65). Takšna obravnava je nujna, ko ena ali več lastnosti odvisnih od smeri (npr. napetost, deformacije) ne sovpada z osnovnimi anatomskimi. Osnovno stanje lahko transformiramo iz enega koordinatnega sistema v drugega, pa naj gre za premik, rotacijo ali oboje.

Elementi matrike novega sistema se izražajo s produktom med transformacijsko matriko, osnovno matriko in transponirano transformacijsko matriko.

$$\mathbf{A}' = \mathbf{T} \mathbf{A} \mathbf{T}^T$$



Slika 65 Deformacija prečnega prereza pri sušenju neorientiranega elementa.

Elementi matrike \mathbf{A} so znane komponente v osnovnem koordinatnem sistemu; \mathbf{A}' predstavlja matriko komponent v transformiranem sistemu; \mathbf{T} je transformacijska matrika, \mathbf{T}^T pa transponirana transformacijska matrika.

Elementi transformacijske matrike vsebujejo smeri naklona, ki se izražajo s kosinusi zasukov - rotacij posameznih osi:

$$a_{ij} = \cos(x'_i, x_j)$$

V tridimenzionalnem prostoru jih je 9 (od katerih je 6 neodvisnih), v ravninskem pa 4. Velikost kota je določena med pozitivno smerjo osi premaknjene sistema (x'_i) in osjo osnovnega sistema (x_j) v smeri vrtenja urinega kazalca.

Za dvodimenzionalni sistem, ki ga uporabimo tudi pri obravnavanju deformacije prečnega prereza, je izpeljava relativno enostavna:

$$T = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \cos(-(\frac{\pi}{2} - \varphi)) \\ \cos(\frac{\pi}{2} + \varphi) & \cos \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}$$

V razširjeni obliki dvodimenzionalnega sistema zapišemo matrike v naslednji obliki:

$$\begin{bmatrix} x'_{11} & x'_{12} \\ x'_{21} & x'_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} \\ x_{21} & x_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}$$

Z množenjem matrik na desni strani enačbe se elementi prve matrike izražajo:

$$x'_{11} = x_{11} \cos^2 \varphi + x_{22} \sin^2 \varphi + 2x_{12} \sin \varphi \cos \varphi$$

$$x'_{22} = x_{11} \cos^2 \varphi + x_{22} \sin^2 \varphi - 2x_{12} \sin \varphi \cos \varphi$$

$$x'_{12} = x'_{21} = (x_{22} - x_{11}) \sin \varphi \cos \varphi + x_{12} (\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi)$$

Elemente pogosto zapišemo tudi v naslednji obliki:

$$\begin{bmatrix} x'_{11} \\ x'_{22} \\ x'_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \varphi & \sin^2 \varphi & 2 \sin \varphi \cos \varphi \\ \sin^2 \varphi & \cos^2 \varphi & -2 \sin \varphi \cos \varphi \\ -\sin \varphi \cos \varphi & \sin \varphi \cos \varphi & \cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi \end{bmatrix}$$

Z upoštevanjem kosinusov dvojnih kotov je rezultat mogoče zapisati še v sledeči zvezi:

$$x'_{11} = \frac{x_{11} + x_{22}}{2} + \frac{x_{11} - x_{22}}{2} \cos 2\varphi + x_{12} \sin 2\varphi$$

$$x'_{22} = \frac{x_{11} + x_{22}}{2} - \frac{x_{11} - x_{22}}{2} \cos 2\varphi - x_{12} \sin 2\varphi$$

$$x'_{12} = x'_{21} = -\frac{x_{11} - x_{22}}{2} \sin 2\varphi + x_{12} \cos 2\varphi$$

Ker indeksi v zgornjih enačbah predstavljajo ustrezno koordinatno os, lahko transformacije smotno uporabimo pri definiranju oblike neorientiranega prečnega prereza obdelovanca s tako preoblikovanimi kazalniki dimenzijske

stabilnosti. Na orientiranih vzorcih so tudi komponente x_{12} in x_{21} enake nič, zato so zadnji členi enaki nič in enačbe se poenostavijo.

Za določanje oblik prečnega prereza neorientiranih vzorcev diferencialne nabreke zapišemo:

$$q'_T = \frac{q_T + q_R}{2} + \frac{q_T - q_R}{2} \cos 2\varphi$$

$$q'_R = \frac{q_T + q_R}{2} - \frac{q_T - q_R}{2} \cos 2\varphi$$

$$q'_{TR} = q'_{RT} = -\frac{q_T - q_R}{2} \sin 2\varphi$$

Polovični uravnovesni čas in uravnovesni čas sta določena z uravnovešanjem vzorcev med dvema ravnovesnima legama. Izguba vode je izražena z relativnim zmanjšanjem mase E :

$$E = \frac{m(t) - m_k}{m_z - m_k}$$

" $(m(t) - m_k)$ " je voda, ki lahko še izpari od časa t do končne vlažnosti, " $(m_z - m_k)$ " pa je vsa izparela voda med sušenjem. Polovični uravovesni čas določa trenutek, ko se izloči iz lesa polovica vse vode ($E = 0,5$).

Diferencialni nabrek je primeren kazalnik, če ugotavljamo dimenzijske spremembe, ki jih povzroči sprememba lesne vlažnosti, če pa obravnavamo dimenzijske spremembe glede na spreminjajočo se relativno zračno vlažnost, se večji pomen pripisuje koeficientu nabrekanja.

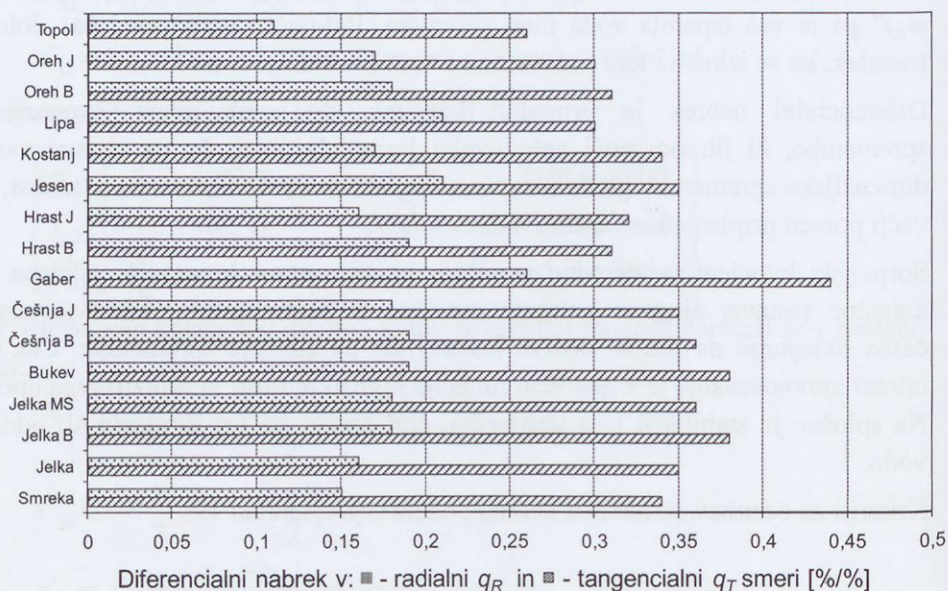
Sorpcijski kvocient neposredno označuje higroskopsnost lesa, ki je odvisna od kemične sestave, njegove notranje površine in ekstraktivov. Iz uravnovesnih časov sklepamo na hitrost odziva lesne vrste na zunanje spremembe. Čas oz. hitrost uravnovešanja je v glavnem funkcija higroskopsnosti in difuzijskega upora. Na splošno je stabilnost lesa tem večja, čim počasneje les sprejema ali oddaja vodo.

Kriteriji za ocenitev stabilnosti lesa so podani v preglednici 19.

Preglednica 19 Kriteriji za ocenitev dimenzijske stabilnosti (Noack s sod. 1973, Torelli, 1983).

Kazalnik	Neugodno	Normalno	Ugodno	Zelo ugodno
q_T [%/%)	> 0,4	0,3 - 0,4	< 0,3	
$q_T - q_R$ [%/%)	> 0,2	0,12 - 0,2	< 0,12	
h_T [%/%)	> 0,065	0,050 - 0,065	< 0,050	
$h_T - h_R$ [%/%)	> 0,035	0,020 - 0,035	< 0,020	
q_T/q_R	> 2,0	1,6 - 2,0	< 1,6	
s [%/%)	> 0,16	0,15 - 0,16	0,14 - 0,15	< 0,14

Razlike med lesovi pripisujemo gostoti in kvantitativnim razlikam v kemični sestavi, deležu ekstraktivnih snovi in razlikam med beljavo in jedrovino. Idealno dimenzijsko in oblikovno stabilni so lesovi z majhnim skrčkom, majhno krčitveno anizotropijo in dolgim uravnovesnim časom (sl. 66 in pregl. 20).



Slika 66 Diferencialni nabreki v: ■ - radialni in ▨ - tangencialni smeri za nekatere naše lesove. (B – beljava, J – jedrovina, MS mokro srce).

Preglednica 20 Kazalniki dimenzijske stabilnosti za nekatere domače in tropske lesne vrste.

Lesna vrsta	Gostota	Dif. nabrek		Koef. nabrekanja		Sorp. kvoc.
	ρ_{12} [kg/m ³]	q_T [%/%]	q_R [%/%]	h_T [%/%]	h_R [%/%]	s [%/%]
Smreka	470	0,39	0,19	0,080	0,039	0,20
Bor, rdeči	520	0,36	0,10	0,071	0,037	0,20
Brest	680	0,43	0,22	0,092	0,047	0,21
Breza	650	0,41	0,29	0,091	0,065	0,22
Bukev	720	0,41	0,20	0,071	0,034	0,17
Gaber, beli	830	0,39	0,23	0,081	0,049	0,21
Hrast	690	0,36	0,16	0,069	0,031	0,19
Kostanj, divji	550	0,35	0,11	0,095	0,029	0,28
Jesen	690	0,45	0,20	0,098	0,043	0,22
Oreh	680	0,28	0,18	0,054	0,034	0,19
Robinija	770	0,38	0,24	0,084	0,053	0,22
Cedrela	510	0,23	0,12	0,045	0,024	0,19
Grenadill	1100	0,44	0,22	0,066	0,033	0,19
Sapeli	650	0,32	0,24	0,066	0,050	0,21
Gvajak	1230	0,58	0,37	0,086	0,054	0,15
Azobe	1100	0,46	0,33	0,100	0,071	0,21

Postopki za zagotavljanje dimenzijske obstojnosti lesa

Delovanje lesa sodi med njegove najneugodnejše lastnosti, zato poskušamo z najrazličnejšimi postopki to neprijetnost odpraviti še pred njegovo uporabo. Dolgotrajna raba in kakovost lesenih izdelkov je zato odvisna od njihove proizvodnje, od pravih postopkov vgradnje in od pravih vzdrževanja. Poleg že znanih ukrepov pri izbiri najprimernejšega lesa in pravih sušenja za učinkovito preprečevanje delovanja in zmanjšanje anizotropije krčenja izvajamo specialne postopke dimenzijske in oblikovne stabilizacije (Stamm, 1977, Rowell, 2005, Hill, 2006).

Tudi postopki ne omogočajo v celoti preprečiti odzivov lesa na spreminjajoče klimatske razmere, zato njihovo učinkovitost vrednotimo glede na zmanjšanje dimenzijskega delovanja in zmanjšanje možnosti sprejemanja ali navzema vode.

V skupino kazalnikov, ki vrednotijo uspešnost postopka pri zmanjšanju delovanja lesa, sodita protikrčitvena učinkovitost (antishrinking efficiency – *ASE*) in zmanjšanje nabrekanja (reduction in swelling – *R*), zmanjšanje higroskopsnosti lesa pa ocenjujemo z vodoodbojno učinkovitostjo (moisture excluding efficiency – *MEE*) in vodoodbojnostjo (water repellency – *WR*). Vsi navedeni kazalniki so primerjalni in povedo, kolikšno je zmanjšanje krčenja oziroma sprejemanje vode glede na netretiran les.

$$ASE(R) = \frac{\Delta\alpha_K - \Delta\alpha_T}{\Delta\alpha_K}$$

$$MEE = \frac{\Delta m_K - \Delta m_T}{\Delta m_K}$$

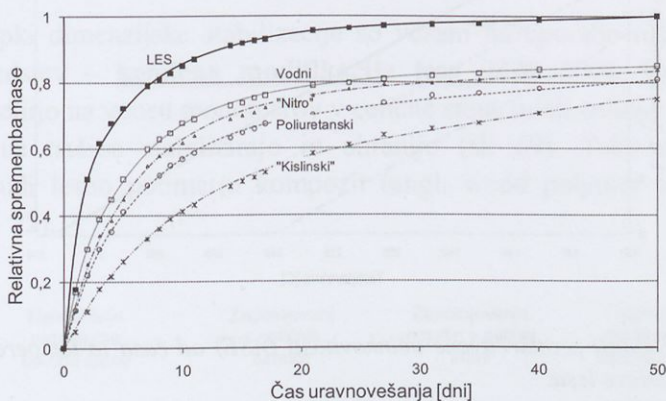
V zgornjih enačbah je $\Delta\alpha = \Delta l/l$ sprememba dimenzij in Δm sprememba mase med dvema ravnovesnima legama; T in K sta indeksa, ki označujeta vrednosti za vzorce podvržene postopkom (tretirane) in kontrolne oziroma netretirane vzorce.

Za obdelavo lesa z različnimi postopki in uporabo različnih kemičnih snovi, ki trajno vplivajo na spremembe lastnosti lesa, se je uveljavil izraz modifikacija lesa. Izraz je v ožjem smislu bolj uveljavljen na področju biološke zaščite lesa. Vzporedno dosežemo pri obdelavi –modifikaciji lesa še druge ugodne lastnosti; poveča se neprepustnost za vodo, odpornost proti kislinam ali bazam, UV-odpornost, biološka odpornost, termična odpornost ali pa se izboljšajo mehanske lastnosti. Modifikacijo lesa razdelimo na: toplotno, fizično, kemično in encimatsko (Hill, 2006).

Obdelava lesa s premaznimi sredstvi ima dvojno vlogo: povečamo estetsko oziroma dekorativno vrednost s poudarjanjem teksture naravnega lesa ali spreminjanja naravne barve, videza in otipa; les zaščitimo pred agresivnimi snovmi, delovanjem visokih temperatur in ultravijolično svetlobo ter izboljšamo mehansko odpornost površine.

Naravni, danes tako imenovani biopremazi, kot so olja, voski in smole imajo predvsem vodo odbojni učinek in preprečujejo hitro prodiranje tekoče vode v kapilarno strukturo lesa, zmanjšanje higroskopsnosti lesa pa je majhna, saj ta sredstva ne prodirajo v celično steno. Tudi filmotvorni premazni sistemi ne nudijo bistvene zaščite pred dimenzijskimi

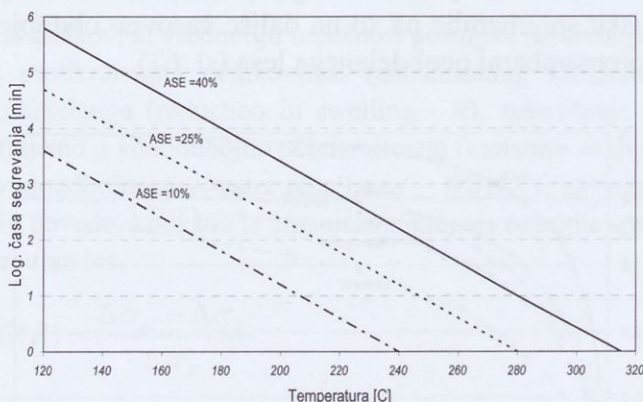
spremembami saj deluje površinski film le dodatno difuzijsko prepreko, ki le upočasni prehod vode iz okolice in njeno sorpcijo v celično strukturo. Uravnesni časi površinsko obdelanega lesa so lahko zato relativno dolgi, dimenzijske spremembe pa so na daljše časovne obdobje še vedno primerljive s spremembami neobdelanega lesa (sl. 67).



Slika 67 Primerjava časov uravnovešanja neobdelane bukovine s površinsko obdelanimi elementi.

Toplotna obdelava lesa je bila med prvimi industrijskimi postopki, s katerimi se je poskušalo zmanjšati delovanje lesa (Hillis, 1985, Hillis in Rozsa, 1985). Manjše delovanje lesa je posledica zmanjšanja higroskopsnosti lesa zaradi termične razgradnje najbolj higroskopsnih in nestabilnih polioz (Kubinsky, 1971, Kürschner in Malcerova, 1965). Polioze se razgradijo v furfural in sladkorje, ki v drugi stopnji medsebojno reagirajo in tvorijo netopne polimere. Učinek je odvisen od pogojev obdelave (temperature, časa in tlaka) in samega materiala (lesne vrste, vlažnosti). Z normalnotemperaturnimi sušilnimi postopki (do 100 °C) dosežemo komaj zaznaven učinek dimenzijske stabilizacije, učinkovitejši pa so postopki toplotne obdelave pri močno povišanih temperaturah (od 160 °C do 300 °C) (sl. 68 in pregl. 21). Ker obstaja pri tako visokih temperaturah nevarnost vžiga, postopki potekajo brez prisotnosti kisika v inertnih klimah, vakuumu, nasičeni pari ali pa les segrevamo v oljih. Pozitivni učinki se kažejo na manjšem delovanju lesa, zmanjšani higroskopsnosti in povečani biološki odpornosti. Delovanje visokih temperatur povzroči potemnenje lesa, les ima nekaj časa neprijeten vonj, na lesu niso primerni vsi standardni postopki površinske obdelave in lepljenja. Neodpornost srednjega sloja celične stene proti visokim temperaturam povzroči tudi zmanjšanje trdnosti termično obdelanega lesa;

najopaznejše je zmanjšanje obrabne odpornosti. Med postopkom izrazitega segrevanja je les bolj podvržen pokanju in izpadanju grč.



Slika 68 Odvisnost protikrčitvene učinkovitosti (ASE) od časa in temperature toplotne obdelave lesa.

Preglednica 21 Vpliv temperature termične obdelave (10 min.) na izgubo mase, poslabšanje mehanskih lastnosti in dosežen protikrčitveni učinek.

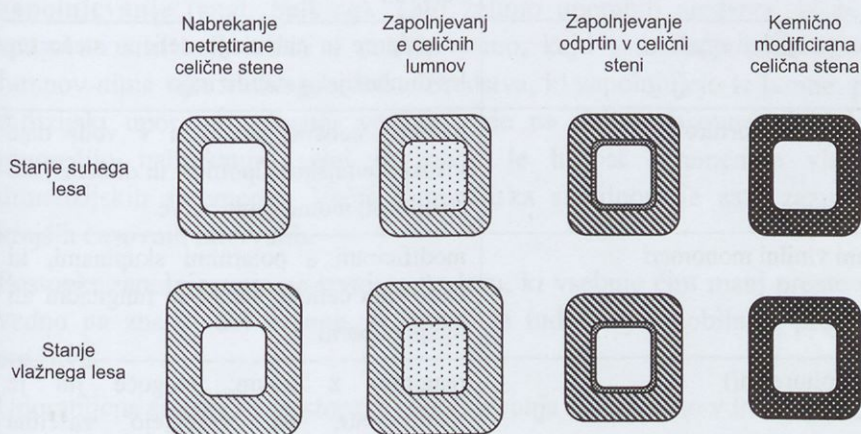
Temperatura [°C]	Izguba mase [%]	Zrušilna trdnost [%]	Trdota [%]	E- modul [%]	Obrabna odpornost [%]	Protikrčitveni učinek (ASE) [%]
210	0,5	2,0	5,0	4,0	40	10
245	3,0	5,0	12,5	20,0	80	25
280	8,0	17,0	21,0	40,0	92	40

Glede na načine toplotne obdelave lesa srečamo na trgu različne komercialne izdelke: »Thermowood« prihaja iz Finske, »Plato« so razvili na Nizozemskem, postopka »Retification« in »Perdure« sta francoskega porekla, iz Nemčije pa izvirajo toplotno obdelani lesovi v rastlinskih oljih.

S **postopki križnega lameliranja** skušamo izkoristiti zaviralni učinek vzdolžno orientiranega lesa proti večjemu prečnemu delovanju. V to skupino štejemo predvsem ves vezan les, z nekoliko zadržki lahko vključimo tudi izdelke (plošče) iz dezintegriranega lesa. Učinkovitost postopka je odvisna od vrste uporabljenega

lepila, ter dosežene temperature in tlaka v postopku stiskanja. Pri visokotemperaturnih postopkih križnega lameliranja se zmanjša higroskopnost ter tako delno realizira tudi stabilizacija, podobno kot pri toplotnih obdelavah, posamezne plasti pa so pod močnimi tlačnimi napetostmi, kar pripomore k znižanju ravnovesnih vlažnosti. Po debelini elementov je direktni zaviralni učinek manjši.

Mnogi postopki dimenzijske stabilizacije so vezani na uporabo najrazličnejših kemičnih sredstev – **kemična modifikacija lesa** (Hill, 2006, Rapp, 2001). Postopki temeljijo na vnosu monomerov v celične stene in/ali celične lumne, kjer se na različne načine stabilizirajo in ohranijo (sl. 69). Tako obdelan les imenujemo tudi lesno polimerni kompozit (angl. wood polymer composite – WPC) (pregl. 22).



Slika 69 Učinek kemičnih postopkov na delovanje celičnih sten in lumnov.

Kompoziti se od masivnega lesa razlikujejo po fizikalnih in mehanskih lastnostih, med katerimi so najznačilnejše: povečanje površinske trdote, dimenzijska stabilnost in kakovostna površinska obdelanost brez dodatnih obdelav. Tradicionalnejše je tretiranje listavcev, omejena uporaba iglavcev v ta namen pa je vezana na težje prepajanje jedrovine in večjo porabo kemijskega sredstva zaradi večje poroznosti.

Preglednica 22 Nekaj tipov monomer in predpolimer, ki se uporabljajo pri izdelavi WPC (lesno polimernih kompozitov) in njihove značilnosti

Kemična snov	Značilnosti
vinil in derivati (metil metakrilat, stiren, dialilftalat, poliester stiren)	navadno čista snov z dodanimi snovmi za prečno vezavo in/ali obarvanje; ne nabreka celične stene, torej zapolnjuje lumne; stiren se težko eliminira iz lesnih proizvodov
predpolimeri topni v vodi in alkoholu (fenol-, urea- in melamin- formaldehid)	obdelava furnirjev (izdelava Compreg in Impreg); fenolne smole imajo svetlo do temno rjavo barvo; melaminske in sečninske smole so svetle in jih je moč obarvati
nizkoviskozne epoksi smole	so polarne in nabrekajo celično steno ter les dimenzijsko stabilizirajo
polarni monomeri (furfurol)	nabreka celično steno in v vodi daje visoko kemijsko odpornost in dimenzijsko stabilnost; temno rjave barve
modificirani vinilni monomeri	modificirani s polarnimi skupinami, ki nabrekajo celično steno, so fungicidni ali ognje odporni
izocianati (poliuretani)	reagirajo z lesom; mogoče jih je modificirati, da vsebujejo zaščitna sredstva

Vnašanje kemičnih sredstev poteka po porozni kapilarni strukturi lesa. Hitrost prodiranja je odvisna predvsem od prevodnosti (permeabilnosti) lesnega tkiva in viskoznosti uporabljenega sredstva, količina porabe pa je odvisna od poroznosti lesa in od učinka, ki ga želimo doseči. Glede na velikost monomerov lahko le-ti zapolnijo le celične lumne, manjše molekule pa lahko prodrejo tudi v mikropore v celični steni. Velikost mikro razpok v celični steni se spreminja z lesno vlažnostjo; največje so v stanju nasičenja (vlažnost točke nasičenja celičnih sten) in se pri sušenju ožijo. Vnos kemičnih sredstev v celično steno je zato učinkovitejši v območju nasičenja celičnih sten in le polarne snovi prodirajo v celično steno tudi pri nižjih lesnih vlažnostih.

Vnos kemičnih sredstev v celično strukturo pospešimo z ustvarjanjem tlačnega gradienta (ali s tlakom ali z vakuumiranjem), kjer smo omejeni s trdnostjo lesnega tkiva. Praktično se največ uporabljajo tlaki do 1 MPa. Stabilizacija kemičnih sredstev v lesu se izvaja z ionizirajočim sevanjem (elektroni, γ in X – žarki), s katalizatorji in povišano temperaturo (tudi s segrevanjem v dielektričnem polju visoke frekvence). Med utrjevanjem in zamreževanjem nekaj monomer izhlapi in se izloči. Med polimerizacijo se večina monomerov skrči, kar povzroča praznine in možnosti delovanja, pa tudi polimerizacija ni vedno popolna. Stranski produkti pri reakciji so najpogosteje voda, ogljikov dioksid ali formaldehid, ki se izločijo. Tudi pri adiciji reakcije niso popolne. Manjši delež ostanka monomer je celo dobrodošel, saj prispeva k večji plastičnosti.

Postopke, pri katerih želimo vezano vodo zamenjati s stabilnejšimi kemičnimi komponentami, ki bi bile čim manj občutljive na nihanje klime, imenujemo tudi **zapolnjevanje** (angl. bulking). Zato želimo uporabiti sredstva, ki bi se bila sposobna čim bolj vriniti v celično steno, kajti samo zapolnjevanje celičnih lumnov nima tako velikega učinka. Sredstva, ki zapolnjujejo le lumne, povečajo difuzijski upor, pri gibanju vezane vode na daljše časovno obdobje pa ne preprečijo nabrekanja; torej se zavre le hitrost spremembe vlažnosti in dimenzijskih sprememb. Večja dimenzijska stabilnost je zato zaznana le na krajših časovnih intervalih.

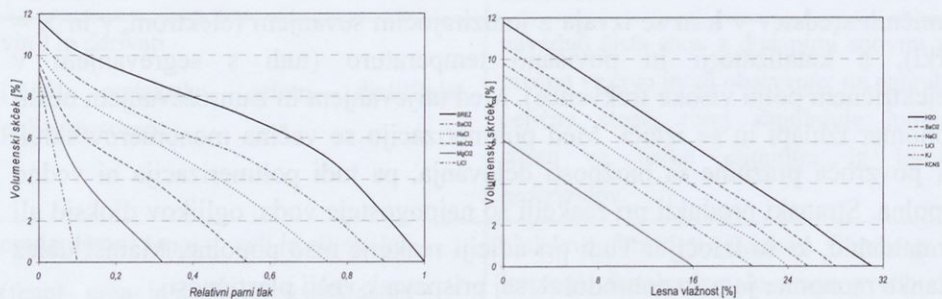
Postopki zapolnjevanja se izvajajo na lesu, ki vsebuje čim manj proste vode, še vedno pa znaten del vezane, ki omogoča tudi večjo mobilnost prodirajočega sredstva.

Uporabljena sredstva v postopkih zapolnjevanja razvrščamo v tri skupine:

- snovi, ki se ne vežejo v celično steno in jih voda lahko izpere,
- snovi, ki se ne vežejo v celično steno, vendar v vodi niso topne in
- snovi, ki se v celično steno vežejo in jih voda ne izpira.

V prvo skupino sodijo najrazličnejše soli, sladkorji in polietilen glikol (sl. 70). Za uporabo naj bi bila najbolj primerna nehlapljiva sredstva, ki bi bila zelo (»neskončno«) topna v vodi in bi čim manj zmanjšala relativni delni parni tlak. Najpogosteje uporabljene snovi imajo dvojni učinek; z zapolnitvijo celičnih sten je krčenje zmanjšano, hkrati pa se zniža tudi relativni parni tlak. Krčenje lesa se ne pojavi toliko časa, dokler dejanski parni tlak ne pade pod tlak nasičenja raztopine. Pri sušenju se koncentracija raztopine v lumnih povečuje, zato raztopljene snovi difundirajo v celično steno, ki se tako ne more popolnoma skrčiti. Krčenje se zmanjša za volumen zadržane soli v celični steni. Postopek je

praktično omejen, ker je takšen les bolj vlažen in ga zato ni mogoče zadovoljivo lepiti ali površinsko obdelati.

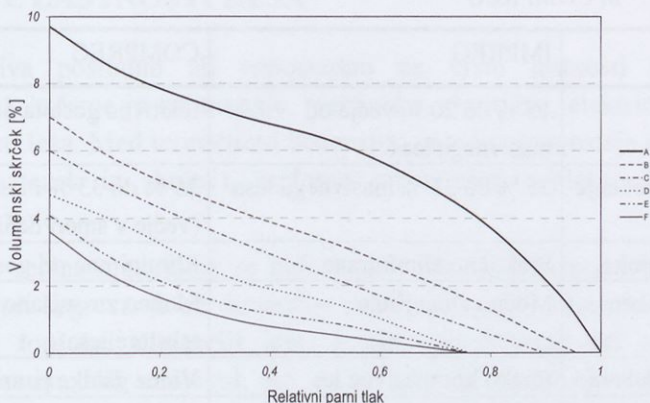


Slika 70 Vpliv delovanja nekaterih solnih raztopin na volumenski skrčec smrekovine.

Med sladkorji se je sicer že praktično uporabljal invertni sladkor (enak delež glukoze in fruktoze), ki pa se ni uveljavil zaradi bistveno zmanjšane biološke odpornosti lesa. Dodajanje toksičnih sredstev močno podraži postopke, površina ostaja vlažna do 80 % relativne zračne vlažnosti (sl. 71).

Učinkovitost postopka s polietilen glikolom (PEG) je odvisna od njegove molske mase, saj lahko skupaj z glicerinom zamenjata vso v celično steno vrinjeno vezano vodo, če je stopnja polimerizacije PEG zelo nizka. Vendar tako nizko polimerni PEG ni primeren, ker se zelo lahko izpira iz celične stene, medtem ko so molekule visoko polimernih PEG prevelike, da bi lahko difundirale v celično steno. V praksi se je uveljavil PEG – 1000, ki se uporablja za stabilizacijo puškinih kopit. PEG se uporablja tudi za ohranjanje (konzervacijo) potopljenih lesenih predmetov; najbolj znana je njeno uporaba pri reševanju potopljene vikinške ladje Vasa.

Med najučinkovitejša sredstva uvrščamo tista, ki se vrinejo v celično steno, vendar se iz nje ne izpirajo. Na tržišču je najbolj znan les prepojen s fonolnimi smolami pod imenoma **impreg** in **compreg** (pregl. 23). Zaradi hitrejšega in enakomernejšega prodiranja smole v les se izvaja prepajanje tanjših lesnih sortimentov (furnir do debeline 8 mm). Količina dodane smole je 25 % do 35% glede na absolutno suho stanje lesa. Utrjevanje poteka pri visokih temperaturah, pri »compregu« pa tudi pri povišanem tlaku do 7 MPa; od tod tudi ime.



Slika 71 Volumenski skrčček borovine prepojene z različnimi raztopinami v odvisnosti od relativnega parnega tlaka: A – voda; B – 6,25 % saharoza in 6,25 % invertni sladkor, C – 12,5 % saharoza; D – 80 % saharoza; E – 12,5 % invertni sladkor in F – 50,0 % invertni sladkor.

Med kemičnimi snovmi, ki se vežejo v celično steno in se ne izpirajo so najbolj znani postopki acetilacije, pri katerih se hidroksilne skupine zamenjajo z acetilno skupino ($-\text{CO}-\text{CH}_3$) in ftaliranje z zamenjavo hidroksilnih skupin s ftalnimi skupinami ($-\text{CO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{COOH}$).

Nekatere kemične snovi lahko vzpostavijo tudi vez med dvema hidroksilnima skupinama vzporedno potekajočih lesnih komponent. Pri tem se tvorijo močnejše prečne vezi (angl. cross-linking). V absolutno suhem stanju je gostota nekoliko večja, povečajo pa se tudi dimenzije. Kot vezna snov se pogosto uporabljajo pare formaldehida. Postopek poteka v zaprtih prostorih pri nekoliko povišani temperaturi ($50\text{ }^\circ\text{C}$ do $60\text{ }^\circ\text{C}$). Del paraformaldehida se v celični steni kondenzira. Pri segrevanju s toplim zrakom ali z vodo se paraformaldehid lahko iz celične stene izloči, trajnejše učinke pa se doseže s kislinskimi katalizatorji. Z uporabo mravljične ali očetne kisline je učinek nekoliko slabši ($\text{ASE} = 10\%$), s katalizacijo z močnejšimi anorganskimi kislinami so doseženi učinki zelo dobri.

Preglednica 23 Primerjava lastnosti s fenolnimi smolami prepojenega lesa – IMPREG in COMPREG

Lastnost	IMPREG	COMPREG
Gostota	15 % do 20 % večja od masivnega lesa	relativna gostota od 1,0 do 1,4
Krčenje in nabrekanje	25 % do 33 % masivnega lesa	25 % do 33 % masivnega lesa (večje v smeri delovanja tlaka)
Površinske razpoke	Praktično eliminirane	Eliminirane pri gostotah do 1,3
Dvigovanje vlaken	Močno zmanjšano	Močno zmanjšano in izenačenje teksture lesa
Površinska obdelava	Enako kot masiven les	Videz gladke površine
Prevodnost za vodno paro	Pribl. 10 % masivnega lesa	Manjša od impreg-a
Biološka odpornost	Znatno večja od masivnega lesa	Znatno večja od masivnega lesa
Odpornost proti kislinam	Znatno večja od masivnega lesa	Boljša od impreg zaradi nepermeabilnosti
Odpornost proti bazam	Enako kot masivni les	Nekoliko boljša od masivnega lesa - zaradi nepermeabilnosti
Požarna odpornost	Enako kot masivni les	Pri daljši izpostavitvi enako kot masivni les, pri krajši pa nekoliko boljša
Električna prevodnost	10 % vrednosti masivnega lesa pri $\varphi=30\%$ in 1% pri $\varphi=100\%$	Nekoliko večja kot impreg (ujeta voda)
Toplotna prevodnost	Rahlo narašča	Narašča z naraščajočo gostoto
Tlačna trdnost	Narašča z naraščajočo gostoto	Narašča z naraščajočo gostoto
Natezna trdnost	Nekoliko pada	Nekoliko narašča z naraščajočo gostoto
Trdota	Narašča z gostoto	10 do 20 kratne vrednost masivnega lesa
Udarne žilavost	50 % masivnega lesa	50 % do 75 % masivnega lesa
Obrabna odpornost	50 % masivnega lesa	Narašča sorazmerno z gostoto
Obdelavnost	Čistejša površina kot pri masivnem lesu	Zahteva orodja za obdelavo kovin, enako hitrost
Lepljenje	Enako kot masivni les	Enako kot masivni les

TOPLOTNE LASTNOSTI LESA

Toplota vpliva posredno ali neposredno na vrsto lastnosti lesa kot so higroskopnost, krčenje in nabrekanje, mehanske, akustične, električne in mnoge druge lastnosti lesa. Med termičnimi lastnostmi snovi najpogosteje obravnavamo dilatacijo (raztezek in skrček), toplotno prevodnost, toplotno kapaciteto in specifično toploto.

Podobno kot večina materialov se tudi les pri nihanju temperature dimenzijsko spreminja – pri segrevanju se dimenzije povečujejo, pri ohlajanju zmanjšujejo. Govorimo o **toplotni dilataciji** lesa. Povečanje dimenzij pri segrevanju je posledica razmikajočih molekul, ko se z naraščajočo temperaturo povečuje amplituda oscilirajočih molekul. Termična dilatacija lesa je v primerjavi z drugimi konstrukcijskimi materiali primerljiva, vendar zanemarljiva v primerjavi z veliko večjimi dimenzijskimi spremembami zaradi higroskopskega delovanja. Naraščajoča temperatura vpliva na povečanje dimenzij lesa, hkrati pa vpliva na zmanjšanje higroskopskega delovanja lesa.

Dimenzijske spremembe zaradi temperaturnih sprememb vrednotimo s temperaturnimi koeficienti raztezka (α), ki povedo, za kolikšen del se poveča dimenzija trdnega telesa, če se temperatura poveča za 1 K.

$$dl = \alpha l_0 dT \Rightarrow l = l_0 (1 + \alpha (T - T_0))$$

Anizotropna zgradba lesa vpliva značilno tudi na toplotno raztezanje, saj ima les najmanjšo termično dilatacijo v vzdolžni smeri, večjo radialno in največjo tangencialno (pregl. 24). Tangencialno raztezanje je primerljivo z drugimi konstrukcijskimi materiali (npr. steklo $9,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, jeklo $11,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, aluminij $24,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Anizotropija prečne in vzdolžne termične dilatacije je v razmerju prečnih in vzdolžnih dimenzij elementarnega kristalnega dela celuloze v celični steni.

Temperaturni koeficienti linearnega raztezka so na območju od $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ do $+60 \text{ }^\circ\text{C}$ približno konstantni. Pri večjih temperaturnih razlikah upoštevamo povečevanje koeficienta z naraščajočo temperaturo, sicer pa s temperaturo pri večini materialov naraščajo. Tudi zveza med dilatacijo in gostoto je linearna.

Zanimive so dimenzijske spremembe pri segrevanju svežega lesa v vroči vodi, tangencialno se dimenzije povečajo (od 0,5 % do 2,0 %), radialno pa zmanjšajo (pribl. 2 %). Navidezno anomalijo pripisujemo sproščanju ravnih napetosti.

Preglednica 24 Koeficienti temperaturnih linearnih raztezkov v vzdolžni (α_L), radialni (α_R), in tangencialni (α_T), smeri za nekaj lesnih vrst Weatherwax in Stamm, 1946).

	Vzdolžno α_L [10^{-6} K^{-1}]	Radialno α_R [10^{-6} K^{-1}]	Tangencialno α_T [10^{-6} K^{-1}]
jelka	3,7	15,8	58,4
črni bor	4,0	18,4	72,7
smreka	5,41	6,3	34,1
jesen	9,5		
bukev	5,4	22,0	34,8
kostanj	6,5		32,5
hrast	4,92	11,1	54,4
V MEJAH	2,5 - 11	16 - 35	24 - 75

Toplotna prevodnost (λ [W/mK]) je snovna lastnost, določena kot sorazmernostni koeficient med gradientom temperature in gostoto toplotnega toka. Na toplotno prevodnost lesa vpliva njegova struktura, gostota, vlažnost, temperatura, ekstraktivi in rastne anomalije (grče, razpoke)(po Kollmann in Coté; 1968, Siau, 1984). Vzdolžno je pribl. 2-krat večja kot radialno ali tangencialno. Povprečna toplotna prevodnost lesa je:

- vzdolžno 0,223 W/mK - 0,331 W/mK
- radialno 0,121 W/mK - 0,176 W/mK
- tangencialno 0,105 W/mK - 0,174 W/mK

Večji mikrofibrilni kot (npr. v kompresijskem lesu) zmanjšuje razlike med longitudinalno in radialno prevodnostjo. Toplotna prevodnost narašča z naraščajočo gostoto, lesno vlažnostjo in temperaturo. Vpliv gostote na prečno prevodnost v območju gostot od 200 kg/m^3 do 800 kg/m^3 pri $25 \text{ }^\circ\text{C}$ je podan z empirično enačbo:

$$\lambda = 0,207 \times R_{u=12\%} + 0,023 \left[\frac{J}{mK} \right]$$

λ toplotna prevodnost [J/mK]

$R_{u=12\%}$ nominalna gostota pri lesni vlažnosti 12 %

V higroskopskem območju je hitrost spremembe toplotne prevodnosti od 0,70 % do 1,25 %, povprečno pa 1,18 % na 1 % spremembe lesne vlažnosti. Tako lahko skupni vpliv gostote in vlažnosti empirično predstavimo kot:

$$\lambda = 0,165 + \rho_0(1,39 + 0,038u),$$

pri čemer je

- λ toplotna prevodnost [J/mK]
- ρ_0 gostota lesa v absolutno suhem stanju [kg/m³] in
- u vlažnost lesa [%]

Pri nižjih temperaturah je les nekoliko boljši »izolator«, saj z naraščajočo temperaturo narašča tudi toplotna prevodnost:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + b \cdot T) \quad b = \frac{0,3}{1 - 270 \frac{\rho_0}{\rho_{cs}}}$$

kjer so

- λ toplotna prevodnost odvisna od temperature [J/mK]
- λ_0 toplotna prevodnost pri 0 °C in
- b korekturni faktor poroznosti lesa.

Specifična toplota lesa je večja od kovin in podobnih materialov ter je vezana na nizko toplotno prevodnost. Specifična toplota lesa ni posebno odvisna od vrste in gostote, narašča pa s temperaturo in lesno vlažnostjo. Specifična toplota sušilnično suhega lesa je povprečno 1,3567 kJ/kgK, v odvisnosti od vlažnosti pa jo zapišemo z empirično enačbo:

$$c_u = \frac{(u \cdot c_{vode} + c_0)}{1 + u},$$

kjer je u - lesna vlažnost, c_{vode} - specifična toplota vode ($c_{vode} \approx 4,185$ kJ/kgK) in c_0 - specifična toplota suhega lesa ($c_0 \approx 1,36$ kJ/kgK).

Vignoletto (1984) je bil prvi avtor, ki je predlagal uporabo metode za določanje toplotne prevodnosti lesa. Njegova metoda je temeljila na merjenju toplotne prevodnosti lesa s pomočjo toplotne kamere. Njegova metoda je temeljila na merjenju toplotne prevodnosti lesa s pomočjo toplotne kamere. Njegova metoda je temeljila na merjenju toplotne prevodnosti lesa s pomočjo toplotne kamere.

Material	Temperature (K)	Thermal Conductivity (W/mK)	Thermal Diffusivity (m²/s)
Wood	293	0.12	1.5 × 10⁻⁷
Concrete	293	1.7	8.0 × 10⁻⁸
Brick	293	0.7	1.0 × 10⁻⁷
Insulation	293	0.04	1.0 × 10⁻⁷
Steel	293	50	1.2 × 10⁻⁵
Aluminum	293	200	9.0 × 10⁻⁵

Toplotna prevodnost λ (W/mK) je lastnost materiala, ki kaže na sposobnost materiala, da prevaja toploto. Na toplotno prevodnost vplivajo različni dejavniki, kot so vrsta materiala, temperatura, vlaga in tlak. Toplotna prevodnost lesa je odvisna od vrste lesa, njegove vlage in temperature. Toplotna prevodnost lesa je odvisna od vrste lesa, njegove vlage in temperature. Toplotna prevodnost lesa je odvisna od vrste lesa, njegove vlage in temperature.

Toplotna prevodnost lesa je odvisna od vrste lesa, njegove vlage in temperature. Toplotna prevodnost lesa je odvisna od vrste lesa, njegove vlage in temperature. Toplotna prevodnost lesa je odvisna od vrste lesa, njegove vlage in temperature. Toplotna prevodnost lesa je odvisna od vrste lesa, njegove vlage in temperature. Toplotna prevodnost lesa je odvisna od vrste lesa, njegove vlage in temperature.

Toplotna prevodnost lesa je odvisna od vrste lesa, njegove vlage in temperature. Toplotna prevodnost lesa je odvisna od vrste lesa, njegove vlage in temperature. Toplotna prevodnost lesa je odvisna od vrste lesa, njegove vlage in temperature. Toplotna prevodnost lesa je odvisna od vrste lesa, njegove vlage in temperature. Toplotna prevodnost lesa je odvisna od vrste lesa, njegove vlage in temperature.

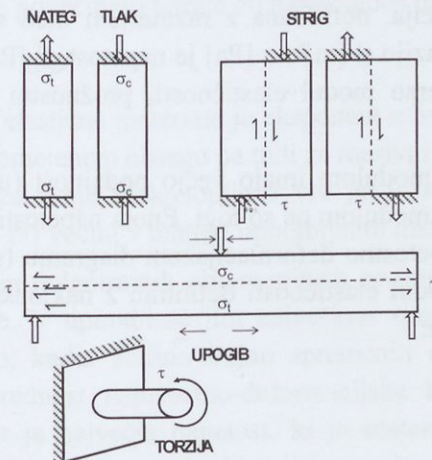
ELASTIČNOST LESA

Med prvimi materiali, ki jih je človek uporabljal za konstrukcijske namene, je bil prav gotovo les in je v mnogih predelih sveta, poleg vsestranske uporabe za notranjo opremo, še danes najbolj razširjen material za gradnjo.

Pred drugimi inženirskimi gradivi ima les kar nekaj prednosti. Poleg prijetnega videza je kot naraven biološki material obnovljiv, v postopkih predelave in obdelave lesa so energijske zahteve manjše, zato je proizvodnja okolju prijazna. Uporabnost lesa se kaže tudi v zelo ugodnem razmerju med trdnostjo in gostoto. Nekatero neugodne lastnosti lesa izboljšujemo s toplotnimi, kemičnimi in mehanskimi postopki ali ga uporabljamo v kombinaciji z drugimi materiali (s kovinami, polimeri, ...). Izkoriščanje lesa je zato sodobno na širokem področju uporabnosti.

Z evolucijskim razvojem rastlin je les postal najodličnejši material, zato tudi pri razvoju naj sodobnejših materialov skušamo slediti »rešitvam« narave oziroma zgradbi in strukturi lesa ter tako dosegati optimalne lastnosti. Razvijajo se novi polimerni materiali, tudi v kombinaciji z lesom in tako skušajo pridobiti njegove bistvene prednosti ter se hkrati izogniti nezaželenim (kot npr. veliki nehomogenosti, variabilnosti in anizotropnosti).

V predelovalnih in obdelovalnih postopkih ter v uporabi je les obremenjen zelo različno (Anon., 1999). V uporabi je les obremenjen natežno, tlačno, strižno, upogibno in torzijsko (sl. 72). Napetosti učinkujejo z različnimi hitrostmi in trajanjem: statično, dinamično, dolgotrajno in nihajoče (utripno, izmenično).



Slika 72 Osnovne vrste obremenitev.

Mehanske značilnosti lesa kot konstrukcijskega materiala obravnavamo, podobno kot pri več drugih, v območjih nižjih vlažnosti in temperatur z vidika linearne elastičnosti, vendar le pri manjših napetostih. Dejansko je les viskoelastičen material, na katerem se pri dolgotrajnih obremenitvah pojavijo časovno odvisne deformacije. Značilen je tudi vpliv lesne vlažnosti, temperature in mnogih drugih dejavnikov. Med najpomembnejšimi inherentnimi lastnostmi lesa, ki vplivajo na njegove mehanske značilnosti, so gostota, orientacija, potek vlaken, mikrofibrilni kot in anomalne rastne posebnosti (Dinwoodie, 2000, Bodig in Jayne, 1982, Panshin in De Zeeuw, 1980).

Elastične deformacije

Pri manjših obremenitvah lesa je zveza med napetostjo in deformacijo linearna, na lesu pa opazujemo reverzibilne elastične deformacije. Tudi v večini primerov uporabe, kljub dolgotrajnejšim obremenitvam, predstavlja elastična komponenta prevladujočo deformacijo. V stabilnem elastičnem območju velja linearna zveza med napetostjo in specifično deformacijo, ki jo lahko ponazorimo s Hookovim modelom idealne linearne elastičnosti – model vijačne vzmeti. Natezna napetost vzporedna z vlakni izkazuje linearnost v območju obremenitev do 35 % izjemoma tudi do 80 % zrušilne trdnosti, medtem ko se pri tlačnih obremenitvah linearno območje zaključi pri nižjih napetostih (do 20 % oz. do 50 % zrušilne trdnosti). Hookov model predpostavlja, da so deformacije trenutne in reverzibilne. Matematično zapišemo linearno zvezo napetosti in deformacije:

$$\sigma = E \varepsilon$$

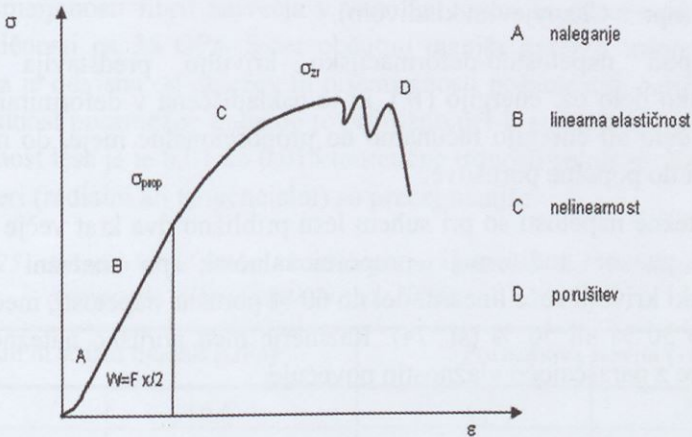
kjer je ε [-] specifična deformacija, definirana z razmerjem med spremembo dolžine (Δl [m]) in prvotno dimenzijo (l [m]), σ [Pa] je napetost, E [Pa] je faktor proporcionalnosti, ki ga imenujemo modul elastičnosti, prožnostni modul, E-modul ali Youngov modul.

Materiali z majhnim elastičnim modulom imajo večjo podajnost (upogljivost) oziroma so prožni, tisti z velikim modulom pa so togi. Enota napetosti in modula elastičnosti je paskal [Pa]. V napetostno-deformacijskem diagramu (sl. 73) je v začetnem linearnem območju modul elastičnosti definiran z naklonskim kotom napetostno-deformacijske krivulje:

$$\operatorname{tg} \varphi = E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon}$$

Pri nateznih obremenitvah elastični modul pojasnimo tudi kot napetost, pri kateri bi se preizkušane podaljšal za svojo osnovno dolžino. Takšna napetost je

nekajkrat večja od trdnosti lesa, zato bi že prej prišlo do porušitve. Elastična modula pridobljena iz tlačnega in nateznega preizkusa sta pri osušenem lesu praktično enaka, zato sta tudi naklona obeh krivulj enaka. Pri višjih vlažnostih je naklon napetostno deformacijske krivulje pri tlačnem preizkusu manjši, zato je E-modul vlažnega lesa, določen iz nateznega eksperimenta, večji.



Slika 73 Napetostno deformacijska krivulja; σ_{prop} – meja proporcionalnosti, σ_{zr} – zrušitvena napetost, W – delo do meje proporcionalnosti.

Splošno zapišemo zvezo med napetostjo in deformacijo s potenčno obliko Hookovega zakona. Pri večjih obremenitvah in v realnih pogojih preizkušanja se deformacije povečujejo hitreje od naraščajoče napetosti.

$$\sigma^n = E \varepsilon$$

Za idealno elastične materiale je eksponent n enak ena, kar velja npr. za jeklo in aluminij v omejenem obsegu pa tudi za masivni les. Za beton, granit in sivo litino je $n > 1$, za usnje in konopljeno vrv pa je $n < 1$. Meji proporcionalnosti in elastičnosti pri večini v tehniki uporabljenih materialov sovpadata.

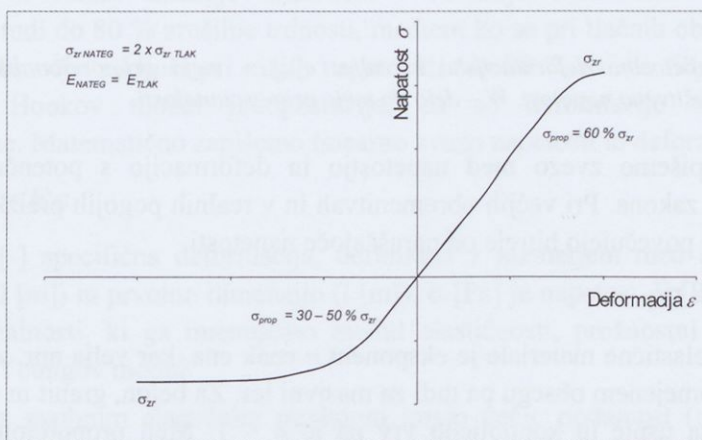
Pri večjih in dolgotrajnih obremenitvah se pojavijo trajne nepovratne plastične deformacije. V uporabi se jim največkrat skušamo izogniti, namenoma pa jih povzročimo, kadar želimo trajno spremeniti obliko (npr. pri krivljenju lesa). Najvišja vrednost napetostno-deformacijske krivulje je porušna napetost ali trdnost, kar je največja napetost, ki jo material lahko še zdrži. Pri nekaterih materialih je zrušitev zelo hitra potem, ko je bila dosežena zgornja meja napetosti. Pri drugih materialih se pri doseženi najvišji vrednosti pojavi več

delnih porušitev, medtem ko še vedno nosijo nekaj bremena. Konstruktivski materiali s širšim območjem porušitve, kamor uvrščamo tudi les, imajo velik pomen z varnostnega vidika.

Materiali ali les, ki se pri delujoči zunanji sili teže zlomijo, so žilavi. Odpornost proti udarcem imenujemo udarno žilavost, odpornost proti pokanju pa lomno žilavost. Žilavost določimo z energijo, ki je potrebna, da z udarcem material prelomimo (npr. s Chapyjevim kladivom).

Površina pod napetostno-deformacijsko krivuljo predstavlja specifično deformacijsko delo oz. energijo (W), ki je uskladiščena v deformiranem telesu. Specifično delo ali energijo računamo do proporcionalne meje, do maksimalne napetosti ali do popolne porušitve.

Porušne natezne napetosti so pri suhem lesu približno dva krat večje od tlačnih, razlikujeta pa se tudi meji proporcionalnosti; pri natezni napetostno-deformacijski krivulji seže linearni del do 60 % porušne napetosti, medtem ko pri tlačni le do 30 % ali 50 % (sl. 74). Razmerje med porušno natezno in tlačno napetostjo se z naraščajočo vlažnostjo povečuje.



Slika 74 Napetostno-deformacijska krivulja pri tlačnih in nateznih obremenitvah.

Ortotropnost lesa

Na trdnostne lastnosti lesa značilno vpliva vzdolžno usmerjena zgradba na makroskopskem, mikroskopskem, submikroskopskem in makromolekularnem nivoju. Velike natezne napetosti v longitudinalni smeri temeljijo na veliki vzdolžni natezni trdnosti celuloznih molekul (npr. v srednjem sloju sekundarne

stene). Trdnost vzdolžno vezanih celuloznih molekul je 8 GPa, pri več vzporednih molekulah pa doseže tudi 4×10^{10} Pa. Kristalni del celuloze izkazuje izrazito anizotropnost (pregl. 25), medtem ko je amorfni matriks izotropen (pregl. 26). Manjša trdnost celične stene je posledica omejene dolžine celuloznih fibril in v njej prisotnih amorfnih področij, zaradi česar prihaja do prečnih trganj in medsebojnega zdrsa kristalnih področij. Natezna trdnost celične stene vlaken je zaradi usmerjenosti fibril največja v vzdolžni smeri in doseže do 150 MPa, modul elastičnosti pa 35 GPa. Sicer občutno manjša natezna trdnost v prečni smeri vlakna je odvisna od deležev in orientiranosti posameznih celičnih slojev. Vzdolžna trdnost posamezne traheide je približno pet-krat večja od trdnosti lesa. Natezna trdnost lesa je le 0,01 do 0,015 teoretične trdnosti celuloze. Trdnosti lesa v prečni smeri (radialni ali tangencialni) so precej manjše.

Preglednica 25 Inženirske elastične konstante za kristalni del celuloze glede na orientacijo v lesu (Smith in sod. 2003).

E-moduli in strižni moduli [GPa]		Poissonova števila (10^{-3})	
E_R	16,4	ν_{LT}	-0,141
E_T	25,2	ν_{LR}	-0,0921
E_L	246,4	ν_{TR}	33,6
G_{RT}	2,58	ν_{RL}	3,44
G_{TL}	0,240	ν_{RT}	41,0
G_{LR}	0,173	ν_{TL}	2,74

Preglednica 26 Inženirske elastične konstante za matrični izotropni del s poudarjeno togostjo, povprečno in veliko podajnostjo (Smith s sod. 2003).

	Velika togost	Povprečno	Velika podajnost
E-modul E [GPa]	7,0	1,8	0,2
Strižni modul G [GPa]	2,7	0,7	0,08
Poissonovo razmerje ν	0,3	0,3	0,3

Porušitve, ki jih na lesu povzročijo natezne napetosti, so trenutne in v primerjavi s tlačnimi skoraj brez plastičnih deformacij. Natezne napetosti prekoračijo trdnost že pri 1% deformaciji. V kasnem lesu je porušna ravnina vzporedna z delovanjem napetosti, predvidoma v zunanjem sloju sekundarne stene ali na meji med zunanjim in notranjim slojem sekundarne stene. To dokazuje, da so strižne trdnosti lamel v celični steni manjše od ligninsko-pektinskega sloja, ki

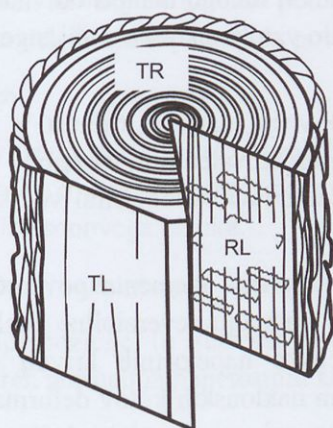
medsebojno povezujejo posamezna vlakna. V ranem lesu nastanejo porušitve prečno na vlakna. Splošno kažejo porušeni vzorci na večjo prepletenost vlaken v kasnem lesu in mnogo manjšo v ranem.

Natezne trdnosti lesa v vzdolžni smeri so približno 2-krat večje od tlačnih trdnosti. Medtem, ko natezne napetosti povzročijo porušitve v celični steni ali v medceličnem sloju, se pri tlačnih napetostih porušitve odrazijo v uklonih vedno večjega števila vlaken. Končna porušitev se pojavi kot strižna deformacija vzdolž nagnjenih in uklonjenih vlaken. Pri prečnih obremenitvah (v radialni in tangencialni smeri) so trdnosti signifikantno manjše. Natezne napetosti povzročajo razkol vzdolž vlaken, v tangencialni smeri tudi med trakovnim tkivom in vlakni. Tlačne napetosti povzročijo upogib in zrušitev sten v celične lumne.

V osnovni zgradbi lesa se pojavijo tudi različni tipi »motenj« v strukturi lesa (plastne nepravilnosti, prazni prostori, sekundarni procesi, predhodne razpoke v slabotnejših plasteh, piknje, prečkanje trakov, konci vlaken, grče ipd.), ki lahko predstavljajo koncentracijo napetosti in vodijo do porušitev. Inherentno šibkejšje je tudi parenhimsko tkivo, tako trakovno, longitudinalno kot tudi epitelno.

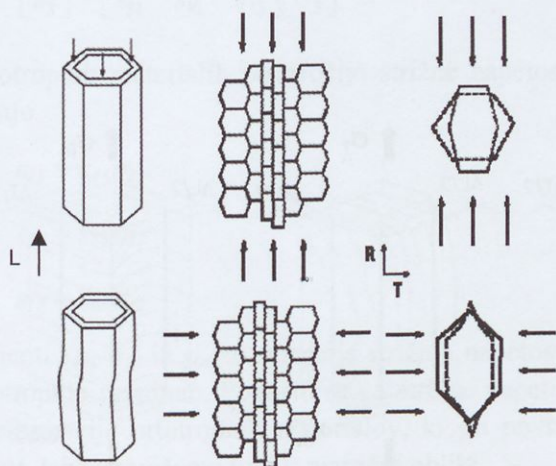
Vzdolžne natezne trdnosti lesa so v primerjavi s trdnostmi ostalih materialov ekstremno velike. Raztržna dolžina, t.j. dolžina, pri kateri se material zruši zaradi lastne teže, je za les mnogo večja kot za večino konstrukcijskih materialov (za železo od 7 km do 10,8 km, iglavci 11 km do 30 km in listavci 7 km do 30 km).

Z vidika opisane zgradbe les in lesne kompozite uvrščamo med ortotropne materiale, za katere je značilno, da imajo tri med seboj pravokotne osi simetrije. V smeri drevesne osi je vzdolžna ali longitudinalna os, v smeri trakov je radialna os, v smeri letnic na obodu dreves pa poteka tangencialna os. Predvsem na periferijah debelih dreves si lahko predstavljamo medsebojno pravokotno usmerjene vse tri osi, centripetalno pa je tangencialna ravnina vse bolj cilindrično zaokrožena (»cilindrična ortotropija«) (sl. 75). Zaradi ortotropne zgradbe in lastnosti se tudi pri obremenjevanju lesa v različnih smereh pojavljajo različne deformacije.



Slika 75 Cilindrično ortotropen les s: prečno oziroma tangencialno-radialno ravnino (TR) in vzdolžnima - tangencialno (TL) ter radialno (RL).

Pri vzdolžnih tlačnih obremenitvah je deformacija po celotnem prerezu enakomerna in predvsem odvisna od poroznosti lesnega tkiva, pri večjih obremenitvah prihaja do uklonov ali zdrsov. Pri radialnih in tangencialnih obremenitvah pa deformacija ni posledica deformacij v celični steni, temveč posledica upogibnih deformacij sten v tangencialni ali radialni ravnini (sl. 76).



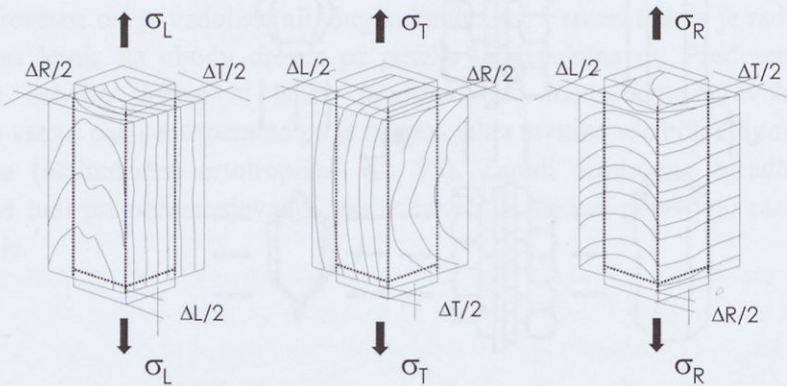
Slika 76 Deformacije celičnih sten pri tlačnih obremenitvah v vzdolžni (L), radialni (R) in tangencialni (T) smeri.

Za upogibne deformacije je potrebna mnogo manjša napetost kot pri nateznih ali tlačnih. Tako je tudi togost v prečni smeri mnogo manjša od vzdolžne. Radialno orientirano trakovno tkivo pa naj bi bilo vzrok nekoliko večji togosti v tej smeri v primerjavi s tangencialno.

Na submikroskopskem nivoju lahko večjo natezno trdnost v vzdolžni smeri pripišemo med drugim tudi močnejšim kovalentnim vezem v prevladujočem srednjem sloju sekundarne stene v primerjavi s šibkejšimi vodikovimi v prečni smeri (Koponen s sob. 1989, 1991).

Oсна obremenitev orientiranega ortotropnega elementa povzroči tri normalne deformacije (ε_i), ki so v elastičnem območju reverzibilne funkcije napetosti. Sorazmernostne konstante deformacijsko napetostnih krivulj so podajnostni koeficienti (s_{ij}), ki so enaki tangensom naklonskih kotov deformacijskih krivulj. V vseh treh pravokotnih smereh delovanja napetosti je deformacija podana s produktom podajnosti in napetosti ($\varepsilon_1 = s_{11}\sigma_1$, $\varepsilon_2 = s_{22}\sigma_2$, $\varepsilon_3 = s_{33}\sigma_3$). Ugotovimo lahko, da so podajnostni koeficienti v smeri delovanja napetosti enaki recipročni vrednosti modula elastičnosti, deformaciji prečno na delujočo napetost pa nastaneta zaradi Poissonovega učinka (sl. 77). Prečne deformacije določimo z ustreznimi podajnostnimi koeficienti ali s Poissonovimi števili. Poissonovo število (ν) je po definiciji negativna vrednost razmerja med pasivno (ε_j) in aktivno (ε_i) deformacijo (najpogosteje med prečno in vzdolžno).

$$\nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i}$$



Slika 77 Deformacije vzdolžno, tangencialno in radialno obremenjenih elementov.

Prečne deformacije se izražajo s produktom med podajnostnimi koeficienti in napetostjo. S prvim številom v indeksu podajnosti označujemo smer deformacije, z drugim pa smer delovanja napetosti, ki povzroča deformacijo.

$$\varepsilon_2 = s_{21}\sigma_1 \quad \varepsilon_3 = s_{31}\sigma_1$$

Tudi napetosti v drugi in tretji osi povzročita dve normalni deformaciji v smeri delovanja ($\varepsilon_2 = s_{22}\sigma_2$, $\varepsilon_3 = s_{33}\sigma_3$), po dve pa nastaneta zopet zaradi prečne kontrakcije oz. Poissonovega učinka.

$$\varepsilon_1 = s_{12}\sigma_2 \quad \varepsilon_3 = s_{32}\sigma_2 \quad \text{in} \quad \varepsilon_1 = s_{13}\sigma_3 \quad \varepsilon_2 = s_{23}\sigma_3$$

Po principu superpozicije (s seštevanjem vseh deformacij) dobimo učinek delovanja vseh treh normalnih napetostnih komponent na skupno deformacijo.

$$\varepsilon_1 = s_{11}\sigma_1 + s_{12}\sigma_2 + s_{13}\sigma_3$$

$$\varepsilon_2 = s_{21}\sigma_1 + s_{22}\sigma_2 + s_{23}\sigma_3$$

$$\varepsilon_3 = s_{31}\sigma_1 + s_{32}\sigma_2 + s_{33}\sigma_3$$

V matrični obliki jih zapišemo:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix}$$

Na ortotropnih materialih povzročijo strižne napetosti le strižne deformacije z velikostjo

$$\varepsilon_{23} = s_{44}\sigma_{23}$$

$$\varepsilon_{13} = s_{55}\sigma_{13}$$

$$\varepsilon_{12} = s_{66}\sigma_{12}$$

Koeficienti s_{44} , s_{55} in s_{66} so razmerja strižnih napetosti in premikov (deformacij) na ortotropnih ravninah. Pogosto se za strižne napetosti uporablja grška črka τ . Vse deformacije ortotropnih materialov, ki jih povzročijo normalne in strižne napetosti, lahko zapišemo tudi v matrični obliki

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

Za veljavnost tako opisanega Hookovega zakona morajo simetrijske in geometrijske smeri sovpadati; ravnine obdelave se morajo skladati z osnovnimi anatomskimi ravninami. Pri odklonjenih ravninah, ko imamo opraviti z neorientirani elementi, kjer vzdolžni potek vlaken ali letnice ni vzporeden z geometrijskimi osmi vzorca, tudi normalne napetosti povzročijo strižne deformacije in obratno.

V splošnem primeru je deformacija simetrični tenzor zapisana z več parametri, kar velja tudi za napetost. Tako lahko v anizotropnem telesu vsaka komponenta napetosti povzroči vse komponente deformacije, enako velja tudi obratno. Konstitutivne enačbe vseh šestih komponent deformacije izrazimo s produkti napetostnih komponent in podajnostnih koeficientov.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{15} & s_{16} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & s_{25} & s_{26} \\ s_{31} & s_{23} & s_{33} & s_{34} & s_{35} & s_{36} \\ s_{41} & s_{43} & s_{43} & s_{44} & s_{45} & s_{46} \\ s_{51} & s_{53} & s_{53} & s_{54} & s_{55} & s_{56} \\ s_{61} & s_{62} & s_{63} & s_{64} & s_{65} & s_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}$$

Zgornjo obliko lahko pretvorimo tudi v zapis komponent napetostne matrike s produktom deformacijskih komponent in elastičnih koeficientov. Podajnostna in elastična matrika združujeta 36 podajnostnih ali elastičnih (togostnih) koeficientov in sta med seboj inverzni.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{43} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{53} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix}$$

Iz termodinamskih razlogov sta tako podajnostna kot elastična matrika simetrični ($s_{ij} = s_{ji}$ oz. $C_{ij} = C_{ji}$), kar zmanjša število neodvisnih koeficientov na 21. Število koeficientov se lahko še zmanjša, če v materialu obstaja še kakšna simetrija. Kot smo ugotovili, se pri ortotropnih materialih s tremi medsebojno pravokotnimi ravninami simetrije, število neodvisnih elementov matrike zmanjša na 9 (velja tudi enakost $s_{21} = s_{12}$, $s_{13} = s_{31}$ in $s_{23} = s_{32}$).

Kot smo že omenili so moduli elastičnosti recipročne vrednosti podajnostnih koeficientov na osi matrike; trije so količniki med normalno napetostjo in deformacijo v glavnih smereh, trije pa razmerja med strižno napetostjo in strižno deformacijo v ortotropnih ravninah. Za določitev celotnih deformacij na ortotropnih materialih potrebujemo še 6 Poissonovih števil, od katerih so, zaradi simetričnosti podajnostne matrike, le trije neodvisni, kajti velja $s_{12} = s_{21}$; $s_{13} = s_{31}$ in $s_{23} = s_{32}$.

Iz definicije Poissonovega števila in s substitucijo lahko podajnostne koeficiente zapišemo tudi s tehničnimi elastičnimi parametri:

$$s_{12} = -\frac{\nu_{21}}{E_2} \quad s_{13} = -\frac{\nu_{31}}{E_3} \quad s_{23} = -\frac{\nu_{32}}{E_3}$$

$$s_{21} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} \quad s_{31} = -\frac{\nu_{13}}{E_1} \quad s_{32} = -\frac{\nu_{23}}{E_2}$$

Če ortotropne osi enačimo s ksilotomskimi (os 1 je identična longitudinalni (L), os 2 radialni (R) in os 3 tangencialni (T), se deformacije s tehničnimi elastičnimi parametri lahko zapišejo v matrični obliki (prvi indeks pri Poissonovih številih pomeni smer delovanja napetosti).

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_{RT} \\ \varepsilon_{LT} \\ \varepsilon_{LR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \sigma_{RT} \\ \sigma_{LT} \\ \sigma_{LR} \end{bmatrix}$$

Poissonovi števili ν_{RL} in ν_{TL} sta zelo majhni ter eksperimentalno težko določljivi, zato jih izračunavamo na osnovi simetričnosti podajnostne matrike:

$$\frac{\nu_{RL}}{E_R} = \frac{\nu_{LR}}{E_L}$$

$$\frac{\nu_{LT}}{E_L} = \frac{\nu_{TL}}{E_T}$$

velja pa tudi

$$\frac{\nu_{RT}}{E_R} = \frac{\nu_{TR}}{E_T}$$

Deformacije določimo s tehničnimi parametri tudi iz naslednjih zvez

$$\varepsilon_L = \frac{1}{E_L}(\sigma_L - \nu_{LR}\sigma_R - \nu_{LT}\sigma_T)$$

$$\varepsilon_R = \frac{1}{E_R}(\sigma_R - \nu_{RL}\sigma_L - \nu_{RT}\sigma_T)$$

$$\varepsilon_T = \frac{1}{E_T}(\sigma_T - \nu_{TL}\sigma_L - \nu_{TR}\sigma_R)$$

Med vsemi materiali je za les značilna posebno visoka anizotropija: razmerje modulov elastičnosti je pri iglavcih še bolj izrazito ($E_T : E_R : E_L = 1 : 1,7 : 20$) kot pri listavcih ($E_T : E_R : E_L = 1 : 1,7 : 13$) (pregl. 27). Visoka ortotropnost lesa je posledica njegove zgradbe, saj tako osnovno vlaknasto tkivo, kot tudi mikrofibrile v prevladujočem srednjem sloju sekundarne stene potekajo bolj ali manj vzporedno z drevesno osjo.

Kot smo že uvodoma napovedali lahko tudi fizikalno-mehanske lastnosti lesa predpostavimo na osnovi specifične kompozitne zgradbe lesa na več nivojih, vključno z vidika makromolekularne zgradbe.

Preglednica 27 Razmerja elastičnih modulov ($E_{L,T,R}$) in strižnih modulov ($G_{RL,TL,RT}$) med anatomskimi smermi (Hearmon, 1948).

Vrsta lesa	Razmerja elastičnih modulov			Razmerja strižnih modulov		
	E_L/E_R	E_L/E_T	E_R/E_T	G_{RL}/G_{TL}	G_{RL}/G_{RT}	G_{TL}/G_{RT}
Hrastovina	2,60	5,91	2,22	1,61	3,19	1,98
Bukovina	6,13	12,06	1,97	2,07	4,22	2,04
Brezovina	14,79	26,48	1,79	1,05	5,70	5,43
Jesenovina	10,47	19,67	1,88	1,32	4,63	3,51
LISTAVCI	7,89	15,30	1,96	1,49	4,03	3,03
Jelovina	13,83	26,53	1,92	1,25	6,33	5,07
Duglazijevina	12,60	18,15	1,44	1,34	17,28	12,90
Borovina	14,76	28,52	1,93	1,71	17,61	10,30
Smrekovina	23,10	40,56	1,75	1,55	18,59	11,99
IGLAVCI	15,67	25,73	1,67	1,34	18,15	13,95

Kristalna struktura celuloze ima zanemarljivo adsorpcijo vode. Zaradi vzporedno potekajočih celuloznih molekul je njena zgradba izrazito anizotropna predvsem med vzdolžno in prečno smerjo, medtem ko lastnosti v prečni smeri smatramo s približkom izotropne. Ker je voda sorbirana le na površino kristalne strukture celuloze, je vpliv vlažnosti na togost zanemarljiv (Mark, 1967). Togostno matriko kristalne celuloze (D_C) zapišemo tako le s štirimi neodvisnimi elementi ($s_{22} = s_{33}$, $s_{12} = s_{13} = s_{21} = s_{23} = s_{31} = s_{32}$ in $s_{44} = s_{55} = s_{66}$).

$$D_C = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{22} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{12} & s_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} \end{bmatrix}$$

Pri vrednostih $s_{11} = 137$ [GPa], $s_{22} = 27$ [GPa], $s_{12} = 14$ [GPa] in $s_{44} = 6,6$ [GPa] zapišemo togostno matriko za celulozo (Cave, 1978, Persson, 1997):

$$D_C = \begin{bmatrix} 137 & 14 & 14 & 0 & 0 & 0 \\ 14 & 27 & 14 & 0 & 0 & 0 \\ 14 & 14 & 27 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6,6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6,6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6,6 \end{bmatrix} \text{ [GPa]}$$

Za hemiceluloze je v primerjavi s celulozo značilna manjša anizotropija med prečno in vzdolžno smerjo (manjše razlike med s_{11} in s_{22} v togostni matriki za hemiceluloze D_H). Zaradi velike higroskopnosti so elementi odvisni tudi od vlažnosti. Na območju vlažnosti od 5 % do točke nasičenja celičnih sten elemente v odvisnosti od togostnega parametra h , faktorja površine a in lesne vlažnosti u zapišemo:

$$D_H = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{22} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{12} & s_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} \end{bmatrix} \cdot h \cdot \frac{0,1 + 0,9 \cdot (1-u)}{1+a}$$

Pri vrednostih elementov togostne matrike hemiceluloz $s_{11} = 8$ [GPa], $s_{22} = 2$ [GPa], $s_{12} = 4$ [GPa] in $s_{44} = 1$ [GPa] in ocenjenih vrednosti togostnega parametra ($h \approx 0,6$) in faktorja površine ($a \approx 1,0$) lahko matriko zapišemo:

$$D_H = \begin{bmatrix} 8 & 4 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 2 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 4 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot 0,6 \frac{0,1 + 0,9 \cdot (1-u)}{2} \text{ [GPa]}$$

Togostna matrika izotropnega lignina (D_L) ima le tri neodvisne elemente, ki so odvisni tudi od lesne vlažnosti:

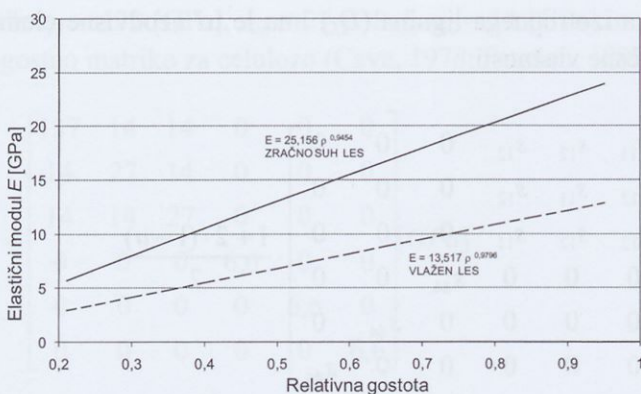
$$D_L = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{12} & s_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} \end{bmatrix} \cdot \frac{1 + 2 \cdot (1 - u)}{2}$$

Togostno matriko lignina z vrednostjo elementov $s_{11} = 4$ [GPa], $s_{12} = 2$ [GPa] in $s_{44} = 1$ [GPa] in ocenjenim faktorjem površine ($a \approx 1,0$) zapišemo:

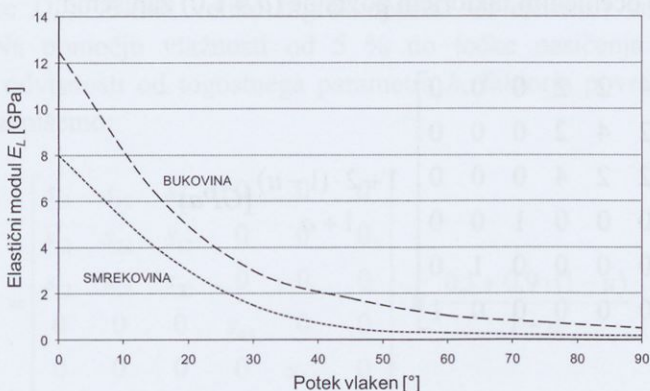
$$D_L = \begin{bmatrix} 4 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 4 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \frac{1 + 2 \cdot (1 - u)}{1 + a} [\text{GPa}]$$

Vplivni dejavniki na elastične lastnosti lesa

Na elastične lastnosti lesa vpliva vrsta dejavnikov z večjim ali manjšim učinkom. Vpliv **gostote lesa** smo že razložili s fenomenološkega gledišča, vrsta raziskav takšna razmišljanja le še potrjuje (sl. 78). Od gostote izjemoma nista odvisna strižna modula v radialno-vzdolžni in tangencialni-vzdolžni smeri, potrdimo pa lahko tudi neodvisnost Poissonovih števil. **Ortotropna zgradba** lesa napoveduje znaten vpliv usmerjenosti vlaken na elastične parametre (sl. 79 in sl. 80). Učinek je zelo izrazit pri odklonih vlaken do 40° , pri večjih kotih so spremembe manjše. Matematično lahko vpliv poteka vlaken izrazimo s transformacijo oziroma zasukom osnovnih osi, v praksi pa pogosto uporabljamo Hankinsonovo formulo. Seveda ni niti presenetljivo, da tudi prisotnost **grč** zmanjša togost lesa, vpliv pa je težko kvantitativno določiti, saj so parametri odvisni od njihovega števila, velikosti, oblike, stanja, lege in usmerjenosti.



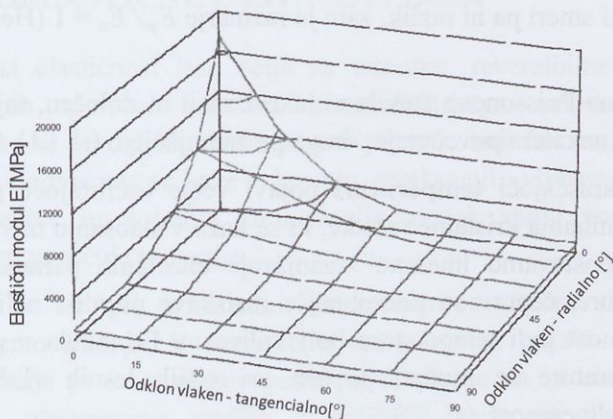
Slika 78 Vpliv gostote na elastični modul pri zračno suhem in vlažnem lesu.



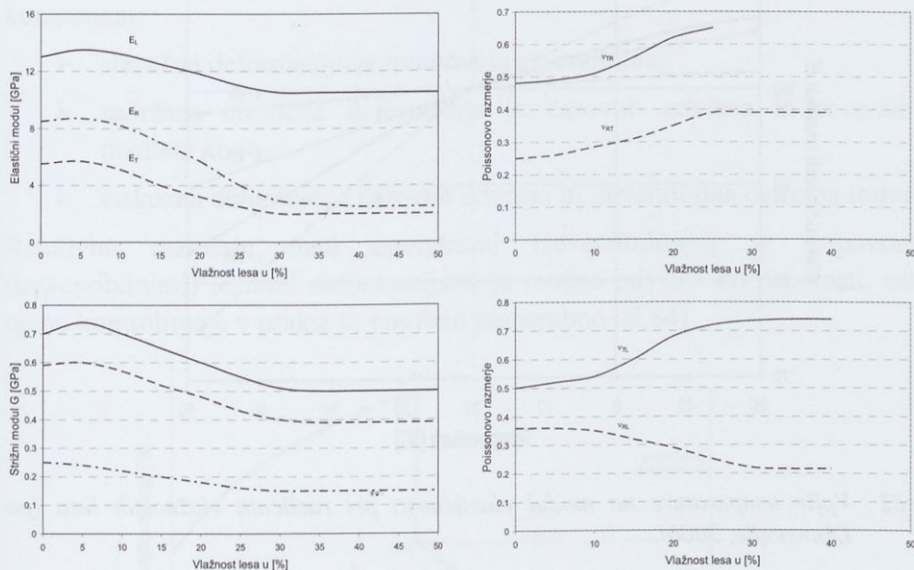
Slika 79 Vpliv poteka vlaken glede na os drevesa na elastični modul pri smrekovini in bukovini.

Med osnovnimi **kemičnimi komponentami** lesa značilno vplivata na elastičnost v mikrofibrilah kristalizirana celuloza in inkrustrirani amorfn lignin. Poleg manjše higroskopnosti vpliva lignin tudi na povečanje togosti, kar dokazuje primerjava z nelignificiranimi vlakni. Najznačilnejši vpliv na elastične parametre ima potek mikrofibril v najširšem srednjem sloju sekundarne stene (S2).

Vpliv **lesne vlažnosti** na elastične module je, tako kot za večino fizikalno-mehanskih lastnosti, značilen le v higroskopskem območju. Vlažnost bistveno bolj vpliva na elastična modula v radialni in tangencialni smeri kot na vzdolžnega (potek fibril!). Zaradi vpliva tlačnih in nateznih obremenitev na ravnovesno



Slika 80 Anizotropni značaj elastičnega modula pri brezovini.



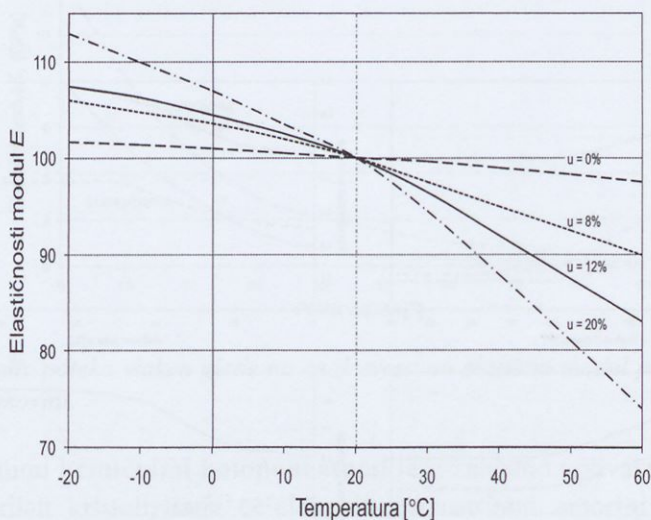
Slika 81 Vpliv vlažnosti lesa na elastične module in Poissonova števila (po Dinwoodie, 2000).

vlažnost lesa prihaja tudi do odstopanja vrednosti pri konstantni relativni zračni vlažnosti oziroma pri konstantni lesni vlažnosti. Razmerje E-modulov, določenih pri konstantni relativni zračni vlažnosti (E_φ) in pri konstantni lesni vlažnosti (E_u),

je največje v tangencialni smeri, ($E_{\varphi}/E_u = 0,92$) nekoliko manjše je v radialni ($E_{\varphi}/E_u = 0,95$), v vzdolžni smeri pa ni razlik, zato je razmerje $E_{\varphi}/E_u = 1$ (Hearmon, 1948).

Vpliv lesne vlažnosti na Poissonova števila ni tako izrazit in določen, saj se pri povečevanju vlažnosti nekatera povečujejo, druga pa zmanjšujejo (sl. 81).

Tudi v lesu se pri naraščajoči **temperaturi** pojavi večje oscilirajoče gibanje molekul in povečanje nihanja kristalne rešetke, ki se kaže v slabšanju mehanskih lastnosti. V praksi upoštevamo linearno zmanjšanje elastičnih parametrov z naraščanjem temperature, čeprav so podrobnejše raziskave potrdile nelinearno zvezo. Tako kot vlažnost tudi temperatura bolj vpliva na E-modula v prečnih smereh. Vpliv temperature se močno poveča pri višjih lesnih vlažnostih, izrazitejša pa je tudi nelinearnost. (sl. 82).



Slika 82 Vpliv temperature na modul elastičnosti pri različnih vlažnostih lesa (po Dinwoodie, 2000).

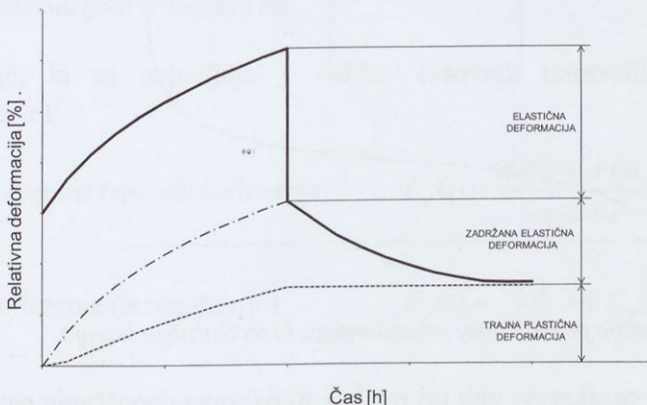
VISKOELASTIČNE LASTNOSTI LESA

Linearna elastičnost lesa velja za trenutne, reverzibilne deformacije in je v praktičnih uporabah lesa kot konstrukcijskega materiala povsem ustrezna. Dejansko se pri daljših obremenitvah pojavijo tudi časovno odvisne deformacije. Časovna odvisnost se kaže v lezenju, relaksaciji, odvisnosti trdnosti od trajanja obremenitve in dušenju. Deformacije in tok snovi pod vplivom delovanja napetosti proučuje reologija.

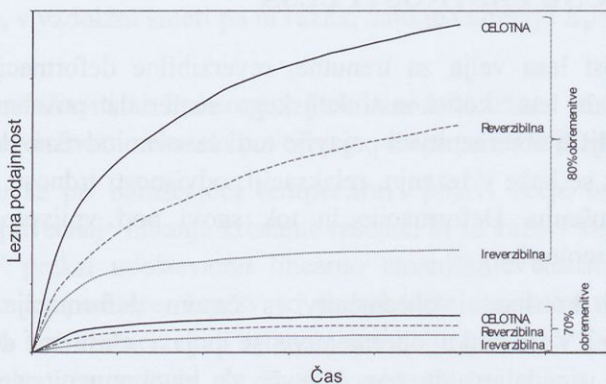
Pojav, ko se pri konstantni obremenitvi s časom deformacija povečuje, imenujemo lezenje. V trenutku obremenitve se pojavi elastična deformacija, deformacija pa se v nadaljevanju povečuje, ne da bi obremenitev stopnjevali. Manjše obremenitve vodijo v daljšem časovnem obdobju do navidezno ravnovesne deformacije (primarno lezenje). Ob razbremenitvi se deformacija zmanjša približno za elastično deformacijo, ki je nastala v trenutku obremenitve. Del deformacije se časovno zmanjšuje in izniči, nekaj pa je ostane (sl. 83). Po teoriji linearne viskoelastičnosti obravnavamo celotno deformacijo kot vsoto treh komponent:

- elastična deformacija je trenutna in reverzibilna,
- zadržana elastična deformacija je časovno odvisna in reverzibilna, medtem ko je
- viskozna deformacija časovno odvisna in ireverzibilna oziroma trajna.

Relativno razmerje med povratnimi (reverzibilnimi) in nepovratnimi (ireverzibilnimi) leznimi deformacijami je močno odvisna od napetosti, zato je njeno kontroliranje v praksi še posebno pomembno (sl.84).

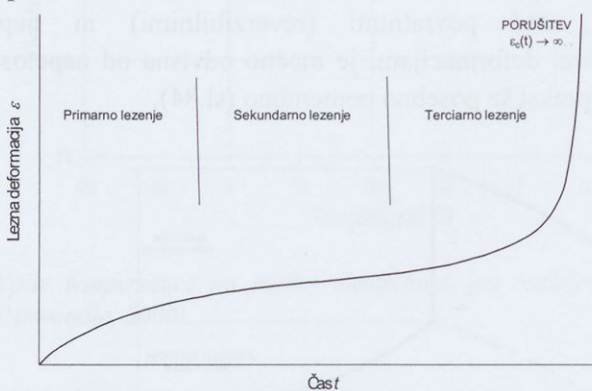


Slika 83 Tipična krivulja lezenja lesa.



Slika 84 Relativni odnos povratnih in nepovratnih deformacij pri /0 in pri 80 % porušni upogibni obremenitvi

Podobno kot nekateri inženirski materiali tudi les izkazuje odvisno od nivoja stalne obremenitve tri stopnje lezenja. Pri začetnem primarnem lezenju se hitrost deformacije s časom zmanjšuje; pri sekundarnem lezenju je hitrost deformacije konstantna, pri terciarnem pa se hitrost deformacije stalno povečuje. Terciarno lezenje se povečuje do porušitve (sl. 85). Pojav sekundarnega in terciarnega lezenja je odvisen od vrste obremenjevanja, nivoja napetosti, temperature, vlažnosti in vrste materiala. Pri tlaku in upogibu je odmik od linearnosti navadno večji kot v primeru natezne obremenitve.

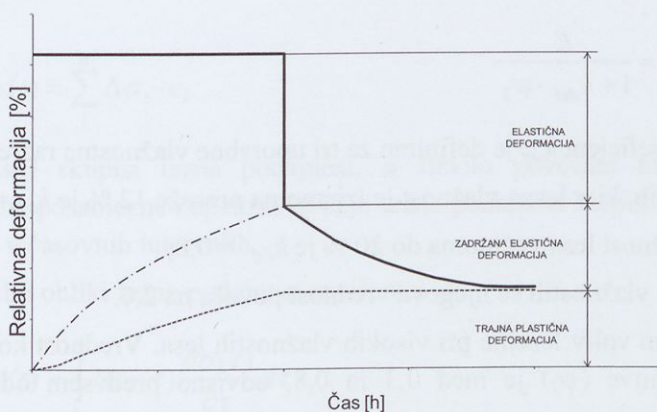


Slika 85 Deformacije primarnega, sekundarnega in terciarnega lezenja.

Viskoelastičnost se izkazuje tudi pri relaksaciji oziroma popušcanju napetosti (sl. 86). Po določeni obremenitvi, ki povzroči deformacijo, se potrebna sila za

vzdrževanje konstantne deformacije sčasoma zmanjšuje. Ob obremenitvi je vsa deformacija elastična, s časom se pojavita in povečujeta še zadržana elastična in viskozna deformacija. Tako se delež posameznih komponent deformacije časovno spreminja. V trenutku popolne razbremenitve elastična deformacija izgine, nadaljnji časovni odziv pa se zrcali v zadržani elastičnosti in trajni - permanentni deformaciji.

Na trajne ali nepovratne deformacije močno vpliva nivo napetosti, povišana vlažnost in temperatura. Meja linearnosti med lezenjem ter napetostjo je odvisna od načina obremenjevanja, temperature, vlažnosti ter vrste lesa oz. vrste lesnega materiala (Schniewind, 1966, Schniewind, 1968, Schniewind in Barret, 1972 Ranta-Maunus, 1975, Dinwoodie, 2000). Lezenje in relaksacija sta podobno kot ostale lastnosti anizotropna in sta večji v prečni smeri ter nekoliko večji pri nategu kot pri tlaku.



Slika 86 Relaksacijska krivulja za les.

Deformacije, ki se pojavljajo v daljših časovnih intervalih izrazimo ali ocenjujemo kot:

lezna podajnost (specifično lezenje)
$$C_c(t) = \frac{\text{deformacija}}{\text{napetost}} = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma}$$

relativno lezenje (lezno število)
$$C_r(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon_0} \text{ ali } C_r(t) = \frac{\varepsilon(t) - \varepsilon_0}{\varepsilon_0}$$

relaksacijski modul
$$M_c(t) = \frac{\text{napetost}}{\text{deformacija}} = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon}$$

Relativno lezenje, ki je definirano kot odklon oz. povečanje odklona glede na začetno elastično deformacijo, je večje v smeri pravokotno na vlakna kot pa vzporedno z njimi. Velik del narasle deformacije nastopi v nepovratni komponenti lezenja, ki je povezana z naraščajočimi strukturnimi spremembami, lahko tudi že z začetki porušitve.

Linearna viskoelastičnost se kaže pri nizkih stopnjah obremenjevanja, pri višjih se les in lesni materiali obnašajo nelinearno. Meja linearnosti med lezenjem ter napetostjo je odvisna od načina obremenjevanja, temperature, vlažnosti ter vrste lesa. Pri tlaku in upogibu je odklon od linearnosti navadno večji kot v primeru natezne obremenitve.

Pri načrtovanju lesenih konstrukcij upoštevamo morebitni vpliv lezenja pri povišanih vlažnostih in dolgotrajnejših obremenitvah z ustreznima koeficientoma, ki zmanjšata vrednost elastičnega modula:

$$E_{k_{def}, \psi} = \frac{E}{1 + k_{def} \cdot \psi_2}$$

Deformacijski koeficient k_{def} je definiran za tri uporabne vlažnostne razrede;

- v prostorih, kjer lesna vlažnost le izjemoma preseže 12 % je $k_{def} = 0,6$;
- če je vlažnost lesa večinoma do 20 % je $k_{def} = 0,8$;
- pri višjih vlažnostih se njegova vrednost poveča na 2,0.

To kaže na znaten vpliv lezenja pri visokih vlažnostih lesa. Vrednost koeficienta trajanja obremenitve (ψ_2) je med 0,3 in 0,8, odvisno predvsem od trajanja obtežbe.

Pri hkratnem delovanju več obtežb izračunamo končno deformacijo po principu superpozicije:

$$\varepsilon_k = \varepsilon(t = \infty) = \sum_{i=1}^N (\varepsilon_{0i} + \Delta \varepsilon_i) = \sum_{i=1}^N (\varepsilon_{0i} \cdot (1 + \psi_2 \cdot k_{def}))$$

Relaksacijski modul in lezna podajnost sta si recipročna le na začetku, ko je $t = 0$. Tako kot za elastične materiale lahko tudi za lezenje ortotropnih materialov zapišemo deformacije v matrični obliki, kjer je zaradi termodinamskih razlogov in soodvisnosti med referenčnimi osmi in osmi simetrije ravno tako potrebnih 9 podajnostnih koeficientov, ki pa so seveda predvsem časovno odvisne funkcije.

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

V pogojih zmernih temperatur in vlažnosti ter nizke napetosti se les obnaša kot linearno viskoelastičen material, zato je mogoče pri napovedi odziva lesa na več zaporednih obremenitev uporabiti Boltzmanov princip superpozicije. Lezenje, ki se pojavi pod različnimi povečanji napetosti, je enako vsoti vseh individualnih odzivov.

$$\varepsilon(t) = \sum_1^n \Delta\sigma_i \cdot c_i$$

kjer je $\varepsilon(t)$ skupna lezna podajnost, n število povečanj napetosti, $\Delta\sigma_i$ je sprememba posamezne napetosti in c_i je lezna podajnost za posamezne prirastke napetosti v časovnih intervalih.

V integralni obliki lezno podajnost zapišemo:

$$\varepsilon(t) = \int_0^t J(t-\tau) \frac{\partial\sigma(\tau)}{\partial\tau} d\tau$$

ali

$$\varepsilon(t) = J_0\sigma(t) + \int_0^t J_d(t-\tau) \frac{\partial\sigma(\tau)}{\partial\tau} d\tau$$

Moment J_d je določen z lezno krivuljo, njegova uporabnost pa je odvisna od prilagajanja in ujemanja eksperimentalnih podatkov z empirično krivuljo (pregl. 28). Parametre krivulje se lahko določi grafično ali statistično.

Preglednica 28 Najpogosteje uporabljene matematične zveze pri obravnavanju lezenja (Bodig in Jayne, 1982).

Naziv	Enačba	Konstante
Potenčna	$\varepsilon = \varepsilon_0 + at^m$	a, m
Polinomska	$\varepsilon(t) = a + b \log t + c(\log t)^2$	a, b, c
Burgerjevo telo	$\sum_{i=1}^r A_i(1 - e^{-t/\tau_i}) + B_i t$	τ_i, B_i
Andrade prvi-tretji zakon	$l = l_0 \left(1 + at^{\frac{1}{3}}\right) e^{mt}$	L_0, a, m
Logaritmična	$\varepsilon = a + b \log t$	a, b
McVetty	$\frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{d\varepsilon_0}{dt} = ae^{-bt}$	a, b
Marion-Pao	$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + a\sigma^m(1 - be^{-nt}) + c\sigma^p t$	a, b, c, m, n

Pogosto obnašanje visokopolimernih snovi ponazarjamo z reološkimi modeli. Idealno elastično obnašanje primerjamo z vijačno vzmetjo ali Hookovim telesom. Viskoznost materiala pa ponazorimo z Newtonovim telesom v obliki dušilke. S kombinacijo vzporednih in zaporednih vezav vzmeti in dušilk se lahko dokaj natančno približamo realnemu odzivu lesa. Hookovo in Newtonovo telo sta zaporedno vezana v Kelvinovo (Voightovo) telo z enakim odzivom deformacije na vzmeti in dušilki in ponazarjata zadržano elastičnost. Maxwelllovo telo sestoji iz zaporedne vezave vzmeti in dušilke ter pojasnjuje permanentno deformacijo (sl. 87). Za posamezna reološka telesa se deformacije izražajo:

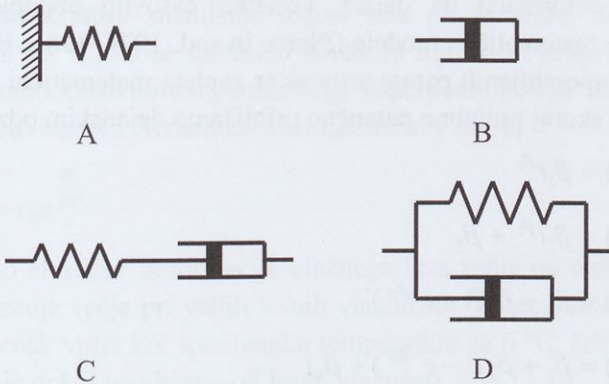
$$u_E = u_0 + \frac{F}{k} \cdot t \quad \text{Hook}$$

$$u_v = u_0 + \frac{F}{\eta} \cdot t \quad \text{Newton}$$

$$u_M = \frac{F}{k} + \frac{F}{\eta} \cdot t \quad F = F_0 \cdot e^{-t} \quad \text{Maxwell}$$

$$u_K = \frac{F}{k} \cdot (1 - F_0 \cdot e^{-t/\tau})$$

Kelvin



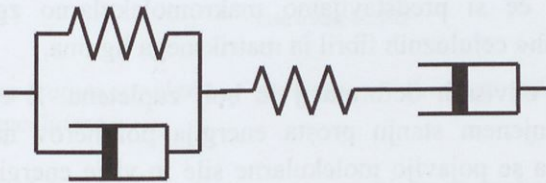
Slika 87 Reološki modeli za: A - Hookovo, B - Newtonovo, C - Maxwelllovo in D - Kelvinovo telo.

V matematičnih zapisih reoloških modelov je:

- u deformacija;
- F delujoča sila;
- k prožnostna konstanta vzmeti;
- η konstanta viskoznosti;
- τ razmerje med konstantama viskoznosti in prožnosti;
- t čas

Burgerjev model predstavlja zaporedno vezana Maxwellov in Kelvinov model in zadovoljivo opiše časovno obnašanje lesa pri konstantni vlažnosti in temperaturi (sl. 88).

$$u = \frac{\sigma}{E_1} + \sigma \left[1 - \exp\left(\frac{-t \cdot E_2}{\eta_2}\right) \right] + \frac{\sigma \cdot t}{\eta_3}$$



Slika 88 Burgerjev reološki model.

Čeprav krivulje lezenja večinoma nakazujejo v daljših časovnih intervalih stabilizacijo deformacije, je večkrat obravnavana logaritemska odvisnost, ki kaže pri daljših časih še vedno znatno povečevanje deformacije, zavajajoča. Za napovedovanje deformacij na daljše, večletno časovno obdobje uporabimo večparametrične matematične modele (Pierce in sod. 1979, 1985, Bažant, 1985). Večanje števila uporabljenih parametrov sicer zapleta matematični zapis, vendar pa se lahko tako skoraj poljubno natančno približamo dejanskim odzivom lesa.

$$\varepsilon(t) = \beta_1 t^{\beta_2}$$

$$\varepsilon(t) = \beta_1 t^{\beta_2} + \beta_3$$

$$\varepsilon(t) = \beta_1 + \beta_2(1 - e^{-\beta_3 t})$$

$$\varepsilon(t) = \beta_1 + \beta_2(1 - e^{-\beta_3 t}) + \beta_4 t$$

$$\varepsilon(t) = \beta_1 + \beta_2(1 - e^{-\beta_3 t}) + \beta_4 t^{\beta_5}$$

Vse komponente deformacije je mogoče pojasniti s specifično makromolekularno zgradbo lesa. Strukturo s pretežno vzdolžnimi primarnimi vezmi med monomeri in prečnimi sekundarnimi vezmi med njihovimi verigami si lahko poenostavljeno predstavljamo kot mrežasto strukturo. Zaradi elastičnega značaja kemičnih vezi lahko medsebojno povezavo smatramo kot vzmeti različnih konstant prožnosti, ki omogočijo, da se po razbremenitvi stenske molekule povrnejo v prvotni položaj.

Sekundarno lezenje pripisujemo spremembam števila aktivnih vodikovih vezi ali njihovemu trganju ter ponovnemu vzpostavljanju na novih mestih, na kar znatno vpliva difuzijsko gibanje vodnih molekul. Lezenje je mogoče interpretirati tudi z vidika nastanka zdrsnih ravnin v celičnih stenah, nastalih med tlačnimi ali upogibnimi obremenitvami. Zdrsne ravnine naj bi nastale zaradi prekinjanja vodikovih vezi posebno ob spremembi vlažnosti. Število nastalih zdrsnih ravnin je sorazmerno spremembi vlažnosti in tudi velikosti aksialnega skrčka ali nabreka. Nastala sprememba orientacije mikrofibril v področju drsnih ravnin poleg povečanja krčenja ali nabrekanja zmanjša tudi elastični modul. Pojav si lahko razložimo tudi, če si predstavljamo makromolekularno zgradbo lesa sestavljeno iz »elastičnih« celuloznih fibril in matriksnega lignina.

Interpretacija časovno odvisnih deformacij je bolj zapletena. Z energijskega vidika je v neobremenjenem stanju prosta energija polimerov najmanjša, s spremembo dimenzij pa se pojavijo molekularne sile in višje energijsko stanje. Premikanje in deformacije vsake od lesnih komponent je energijsko značilno, vendar tudi soodvisno od vseh ostalih. Razlika v gibanju lignina in neligninskih

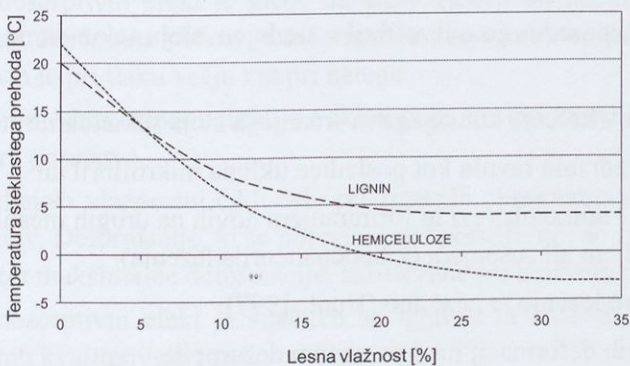
molekul povzroči interferenco, tako se lahko nastale napetosti prenesejo z ene komponente na drugo. Amorfn lignin ima verjetno pri tem vlogo energijskega ponora, ki zadržuje in nadzoruje kopičenje energije med obremenjevanjem.

Naraščajoča temperatura zmanjšuje togost lesa pri upogibu, tlaku in nategu, posebno še nad 55 °C, ko se spremeni struktura lignina in pride do »mehčanja« polioz. Z uporabo časovno-temperaturnega superpozicijskega načela podajamo temperaturno odvisnost z Arrheniusovim zakonom v obliki

$$\tau(T) = \tau_0 e^{\frac{W}{RT}}$$

Podobno kot so elastične deformacije vlažnega lesa večje od deformacij suhega lesa, je tudi lezenje večje pri višjih lesnih vlažnostih. Sprememba vlažnosti za 4 % predstavlja enak vpliv kot sprememba temperature za 6 °C. Izkaže pa se, da je relativno lezenje dokaj neodvisno od lesne vlažnosti.

Lastnosti polimernih materialov se s temperaturo močno spreminjajo. Pri nizkih temperaturah imajo visok modul elastičnosti in lastnosti krhkosti, zato imenujemo tako stanje steklasto. Edino dopustno gibanje so vibracije na stabilnih mestih. Z naraščajočo temperaturo povišano energijsko stanje omogoča tudi premočrtno in krožno gibanje, ki povzroči hitro in ostro zmanjšanje modula. Material postane plastičen. To področje imenujemo temperaturo steklastega prehoda. (T_g).



Slika 89 Temperatura steklastega prehoda v odvisnosti od vlažnosti za lignin in hemiceluloze.

V absolutno suhem stanju je temperatura steklastega prehoda za celulozo 230 °C, za hemiceluloze 200 °C in za lignin 180 °C (Hillis in Rozsa, 1985). Pri povišani

vlažnosti se temperatura steklastega prehoda znižuje, vendar pri manj higroskopsnem ligninu počasneje kot pri ostalih dveh komponentah celične stene (sl. 89). Temperatura steklastega prehoda za lignin se ustali pri vlažnosti 15 % na temperaturi 70 °C. Z navlaževanjem se temperatura steklastega prehoda pri hemicelulozah zmanjšuje še hitreje in doseže v območju nasičenja (pri vlažnosti 30 %) temperaturo $T_g = -20$ °C.

Amorfni deli celuloze in hemiceluloze pri vlažnosti točke nasičenja celičnih sten izkazujejo celo pri normalni temperaturi lastnosti gumijastega stanja.

Mehanosorptivno lezenje

Nihanje lesne vlažnosti pospešuje lezenje obremenjenega lesa. Končna deformacija je večja kot v primeru konstantne vlažnosti. Pojav je označen kot mehanosorptivni efekt. Medtem ko je viskoelastično lezenje odvisno od trajanja obremenjevanja, so mehanosorptivne deformacije odvisne od intervala vlažnostnih sprememb pod točko nasičenja celičnih sten. Na deformacijo, ki se pojavi zaradi ciklične spremembe vlažnosti lesa, vplivajo: karakteristike lesa, nivo napetosti, predhodna napetostna stanja, čas učinkovanja napetosti, lesna vlažnost in interval spremembe vlažnosti, predhodno vlažnostno stanje in temperatura (Schniewind, 1968, Armstrong, 1972, Ranta-Maunus, 1975, Grossman, 1976, Hunt, 1988, Hoffmeyer in Davidson, 1989).

Vzroke mehano-sorptivnega pojava v lesu lahko razložimo:

- z lečasto razporeditvijo mikrofibril v srednjem sloju sekundarne stene (S2),
- z razlikami v krčenju zunanjega in srednjega sloja sekundarne stene,
- s pojavom zdrsnih ravnin kot posledice uklona mikrofibril ali
- s trganjem vodikovih vezi in formiranjem novih na drugih mestih med navlaževanjem ali sušenjem (kinetična teorija lezenja).

Za mehanosorptivno lezenje je značilno (Hunt, 1997):

- Povečanje leznih deformacij med procesom desorpcije.
- Povečanje deformacij med prvo adsorpcijo in vsemi nadaljnjimi, pri katerih se vlažnost poveča nad začetno vlažnost.
- Večji porast deformacije ob obremenitvi pri prvotno vlažnem lesu kot pri prvotno suhem nosilcu.

-
- Ob razbremenitvi je trenutna elastična deformacija, ki se povrne, večja od začetne elastične deformacije.
 - Hitrost spremembe vlažnosti vpliva na hitrost spremembe deformacije, ne vpliva pa na njeno velikost. Velikost deformacije je proporcionalna celotni spremembi vlažnosti.
 - Po razbremenitvi ter povrnitvi trenutne elastične deformacije, se velik delež celotne deformacije ohrani. Deformacija, ki se ohrani po razbremenitvi, v resnici ni trajna, saj se je pri ponovni izpostavitvi cikličnim spremembam vlažnosti velik del izniči. Med procesom adsorpcije se povrne večji del deformacije kot med procesom desorpcije.
 - Konstantni gradient vlažnosti, ki vodi h kontinuiranemu gibanju vodnih molekul skozi material brez kakšnihkoli lokalnih sprememb v vsebnosti vlage, ne povzroči mehanosorptivnih deformacij.
 - Obremenjeni nosilec se poruši v krajšem času in/ali pri nižjih obremenitvah.
 - Zmanjšan je modul elastičnosti.
 - Nad točko nasičenja celičnih sten, kjer ni običajnega krčenja, so pri nekaterih vrstah opazne velike deformacije obremenjenega lesa med sušenjem. Mehanosorptivni efekt se pojavi pri vrstah, nagnjenih h kolapsu in povzroči neobičajne skrčke že nad točko nasičenja celičnih sten. Ukrepi, kot je npr. zamrzovanje, ki zmanjša dimenzijske spremembe lesa, nagnjenega h kolapsu, zmanjša tudi mehanosorptivne deformacije.
 - Mehanosorptivni efekt je glede na smer vlaken ali načina obremenjevanja različen. Prečno na vlakna je deformacija večja kot v smeri vlaken in v obeh primerih je pri tlaku večja kot pri nategu.
 - Pri prvem vlažnostnem ciklu je odklon večji kot pri kasnejših ciklih, razen v primeru porušitve.
 - Ponavljajoči vlažnostni cikli celo pri zmernih obremenitvah lahko vodijo do porušitev. Deformacije, ki se pojavijo pred porušitvijo, so zelo visoke, znatno višje kot maksimalne deformacije, zabeležene pri kratkotrajnih testih.
 - Mehanosorptivni efekt je značilen za iglavce in listavce, med njimi pa ni zaznanih kvalitativnih razlik.
 - Mehanosorptivni efekt je izrazitejši pri vlaknenih in ivernih ploščah kot pri masivnem lesu.
 - Mehanosorptivno obnašanje lesa je linearno zgolj pri nizkih stopnjah obremenjevanja.
-

- Spremembe vsebnosti vlage povzročijo tudi dimenzijske spremembe lesa oz. lesnega sestavljenca, kar je potrebno upoštevati pri računanju mehanosorptivnih deformacij.

Modele mehanosorptivnega lezenja so v grobem klasificirali v štiri skupine:

- reološke (mehanske komponente), (Hunt, 1997)
- matematične (empirične enačbe) (Ranta-Maunus, 1975, Hunt, 1986, Martensson, 1988, Dinwoodie, 2000),
- tehniške (napoved učinka) (Pierce in sod., 1985) in
- pojasnjevalne (opis strukture lesa na različnih nivojih: molekularnem, mikroskopskem, makroskopskem,...) (Boyd, 1982, Hoffmeyer in Davidson, 1989, Mukudai in Yata, 1986, Hoffmayer, 1985).

Prvi trije modeli so interpolacijski in so narejeni z namenom, da se prilegajo eksperimentalnim rezultatom. Pojasnjevalni strukturni modeli so osnovani na poznavanju lesne zgradbe in se uporabijo z numeričnimi ekstrapolacijami ter računalniško simuliranimi eksperimenti.

Pojasnjevalni modeli skušajo lezenje interpretirati z vidika induciranih napetosti in interakcijami med posameznimi komponentami celičnih sten, najpogosteje med kristalinitnimi in nekristalinitnimi. Osnovne strukturne enote naj bi razvile obliko lečaste rešetke, ki naj bi vsebovala hidrofilni gel. Celulozne mikrofibrile so kot rešetke, ki imajo lečaste odprtine zapolnjene z amorfnio matriksno snovjo. Med vlažnostnimi spremembami ter obremenitvami naj bi ta hidrofilni gel spreminjal obliko in povzročal lezne deformacije. Ob zmanjšanju vlažnosti naj bi se hidrofilni gel skrčil, s tem bi se zmanjšala lateralna opora in povzročila odklon mikrofibril. Odklon bi lahko bil tako velik, da bi povzročil tok matriksa. V splošnem je širina teh lečastih odprtin majhna v primerjavi z višino in narašča sorazmerno z odklonom mikrofibril glede na vzdolžno os.

Visoke tlačne ali upogibne napetosti prečno na vlakna povzročijo mikroporušitve oz. drsne ravnine (»slip planes«) v celični steni, pri katerih v srednjem sloju sekundarne stene (S2) del sloja zdrsne preko drugega. Nastanek drsne ravnine naj bi bil pogojen s porušitvami in ponovnim formiranjem vodikovih vezi. Sprememba orientacije mikrofibril v območju drsne ravnine spremeni mehanske ter fizikalne lastnosti lesa. Modul elastičnosti se zmanjša, longitudinalno krčenje in nabrekanje pa se povečata sorazmerno z intenziteto drsnih ravnin. Število drsnih ravnin je sorazmerno s stopnjo napetosti, vlažnostjo ter trajanjem obremenjevanja. Longitudinalno krčenje (nabrekanje) narašča s številom drsnih ravnin in z velikostjo vlažnostnih sprememb. Elastične, viskoelastične ter

viskozne lastnosti lesa se spreminjajo sorazmerno s številom drsnih ravnin, torej tudi intenzivnostjo vlažnostnih sprememb.

Orientacija mikrofibril, sestavljenih iz kristalitev celuloze, določa diferencialno krčenje in nabrekanje različnih slojev celične stene; krčenje in nabrekanje sta znatno večja prečno na mikrofibrile kot pa vzdolžno. V zunanjem (S1) in notranjem (S3) sloju sekundarne stene je potek mikrofibril pod velikim kotom, zato je higroskopsko krčenje v osni smeri veliko večje kot prečno. Srednji sloj (S2), ki je s svojim pribl. 70 % deležem tudi prevladujoči, ob predpostavki, da celični lumni ostanejo nespremenjeni, zaradi poteka fibril nabreka centrifugalno proti zunanjemu sloju in se med sušenjem krči proti notranjemu sloju. Srednja lamela, primarna stena in zunanji sloj sekundarne stene (S1) so zelo fleksibilni in sledijo krčitvam in nabrekom srednjega sloja sekundarne stene (S2). Pri spremembah vlažnosti se zaradi anizotropnega krčenja v notranjosti celične stene generirajo napetosti, ki so največje med zunanjim in srednjim slojem (S1 in S2) sekundarne stene in povzročijo zdrse na meji med obema slojema.

Pri določanju matematičnega modela moramo v celotno deformacijo vključiti več komponent.

Reološki model se tako razširi (sl. 90). Časovne spremembe elastičnih (ε_e), zadržanih elastičnih (ε_{ve}), viskoznih (ε_p), mehanosorptivnih (ε_{ms}), termičnih (ε_T) in higroekspanzijskih (ε_u) (zaradi krčenja in nabrekanja lesa) deformacij zapišemo matematično:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_e + \dot{\varepsilon}_{ve} + \dot{\varepsilon}_p + \dot{\varepsilon}_{ms} + \dot{\varepsilon}_T + \dot{\varepsilon}_u$$

$$\dot{\varepsilon}_e = \frac{d}{dt} \left(\frac{\sigma}{E_e} \right)$$

$$\dot{\varepsilon}_e = \frac{d}{dt} \left(\frac{\sigma}{E_H} \right)$$

$$\dot{\varepsilon}_p = \frac{d\varepsilon_p}{dt} = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{if } \sigma \leq \sigma_p \\ 1 - \frac{\varepsilon_p}{|\sigma|} \cdot \frac{1}{\eta_p} \cdot \sigma & \text{if } \sigma > \sigma_p \end{array} \right\}$$

$$\dot{\varepsilon}_{ms} = \frac{d\varepsilon_{ms}}{dt} = \frac{1}{\eta_{ms}} \cdot \left| \frac{du}{dt} \right| \cdot (\sigma - E_{ms} \cdot \varepsilon_{ms})$$

$$\sigma = \eta_{ms} \frac{1}{\left| du / dt \right|} \cdot \varepsilon_{ms} + E_{ms} \cdot \varepsilon_{ms}$$

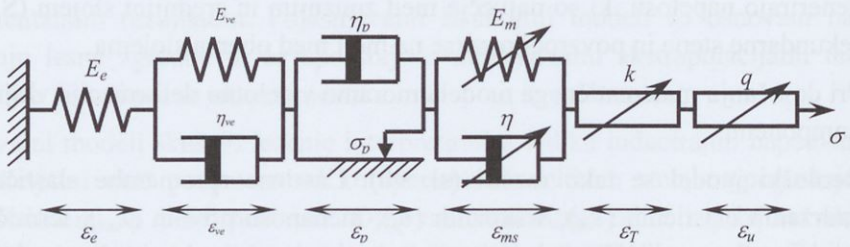
$$\dot{\varepsilon}_T = \frac{d\varepsilon_T}{dt} = k \cdot \frac{dT}{dt}$$

$$\dot{\varepsilon}_u = \frac{d\varepsilon_u}{dt} = q \cdot \frac{du}{dt} \Big|_{u \leq TNCs}$$

kjer so :

- ε komponente deformacije,
- σ delujoča napetost ,
- E elastični moduli posameznih reoloških elementov,
- k koeficient termičnega raztezka,
- q diferencialni nabrek,

indeksi pa ponazarjajo veličine pri e elastični, ve zadržani elastični, p viskozni, ms mehanosorptivni, T termični in u higroskopski komponenti.



Slika 90 Reološki model vpliva elastičnosti (ε_e), zadržane elastičnosti (ε_{ve}), viskoznosti (ε_p), mehanosorptivnega lezenja (ε_{ms}) ter termične dilatacije (ε_T) in higroskopskega krčenja (nabrekanja) (ε_u) na deformacije.

Mehanosorptivna deformacija pri konstrukcijah iz suhega lesa je znatno manjša kot v konstrukcijah iz svežega lesa, kjer se les suši pod obremenitvijo. Zaradi dolgega začetnega sušenja je mehanosorptivna deformacija nekajkrat večja od začetne elastične. Na suhem lesu vlažnostne spremembe niso tako velike in tudi ne sežejo preko celotnega prereza elementov.

TRDNOST LESA

Največjo napetost, ki jo material lahko še zdrži, imenujemo zrušilna ali porušitvena napetost oziroma trdnost in jo predstavlja najvišja točka napetostno deformacijske krivulje. Porušitev je lahko hipna ali pa je postopna, ko material še kljubuje obremenitvi, zrušilno območje pa je širše, kar je izredno pomemben kriterij varnosti. Hipno porušitev ima les s krajšimi vlakni (juvenilni les, kompresijski les), biološko degradiran les, les podvržen ostrejšim hidrotermičnim postopkom ipd. pri normalnem lesu pa je običajno postopna. Osnovne značilnosti, ki določajo trdnost, so gostota, smer obremenjevanja, potek vlaken, vlažnost, temperatura ter hitrost, način in trajanje obremenitve. Ne smemo pa zanemariti anomalij v zgradbi, ki tudi pomembno vplivajo na trdnosti: grče, odkloni vlaken (spiralni, diagonalni potek), reakcijski les, smolni in lateksni kanali, rastne anomalije ter razpoke. V literaturi navadno podane vrednosti so navadno maksimalne vrednosti, ki jih lahko pripišemo le t.i. čistim vzorcem in usmerjenim lesa. Vsi odkloni v zgradbi večinoma zmanjšujejo maksimalne trdnosti lesa (Smith in sod. 2003). Zaradi velike heterogenosti lesa in velikega števila vplivnih dejavnikov so tudi posamezne trdnostne lastnosti zelo variabilne (pregl. 29).

Preglednica 29 Koefficient variacije za gostoto in nekaj mehanskih lastnosti za smrekovino, bukovino in povprečno za komercialne lesne vrste.

Lastnost	Koefficient variacije [%]		
	Smrekovina	Bukovina	Povprečno za komercialne vrste
Gostota	9,7	6,0	10,0
Upogibna trdnost	14,2	9,3	16,0
Modul elastičnosti	19,7	9,7	22,0
Tlačna trdnost	14,4	11,6	18,0
Strižna trdnost	14,7	15,7	14,0

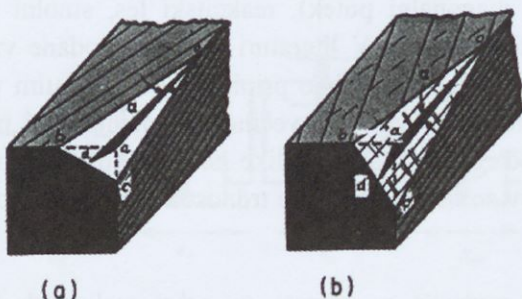
Vplivni dejavniki na trdnost lesa

Potek vlaken je prem, ko vlakna potekajo vzporedno z robom elementa, pri nevporednem poteku pa govorimo o odklonu. Odkloni nastanejo lahko že v času rasti, še teže pa je doseči popolnoma raven potek pri obdelavi.

Glede na odklon vlaken v anatomskih ravninah ločimo predvsem:

- spiralni potek v tangencialni ravnini zaradi rasti ali
- diagonalni potek kot posledica odklona vlaken med predelavo (npr. razžagovanjem) (sl. 91).

Lokalno se odkloni pojavijo v okolici strukturnih anomalij, kot so grče, poškodbe ipd.



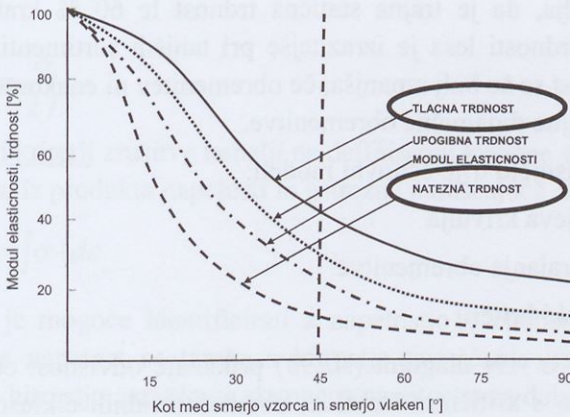
Slika 91 Spiralni in diagonalni potek vlaken.

Splošni ali lokalni odklon vlaken drastično vpliva na zmanjšanje mehanskih lastnosti; med njimi najbolj na natezno trdnost, nekoliko manj na upogibno in tlačno (sl. 92). Najobčutnejše zmanjšanje trdnosti je zaznано do odklona 40° , pri večjih kotih pa so spremembe manjše. Pri pravokotnem odklonu je dosežena prečna smer. Kako izraziti je vpliv »lokalnih« nepravilnosti v rasti, je odvisno od položaja, velikosti, geometrijske oblike in tudi zdravstvenega stanja lesa.

Največja anizotropija se izkazuje pri nateznih obremenitvah (pregl. 30).

Orientacijsko vrednost trdnosti (σ_θ) pri poljubnem kotu poteka vlaken (θ), pri znanih vrednostih trdnosti vzporedno (σ_L) in pravokotno (σ_T) na vlakna, ocenimo s Hankinsonovo formulo:

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_L \cdot \sigma_T}{\sigma_L \sin^n \theta + \sigma_T \cos^n \theta}$$



Slika 92 Vpliv poteka vlaken na natezno, tlačno in upogibno trdnost ter modul elastičnosti

Koeficient n je eksperimentalno določena konstanta in ima za izračunavanje nateznih napetosti vrednost $n = 1,5$ do $2,0$, za upogibne napetosti $n = 2,0$ in tlačne $n = 2,0$ do $2,5$.

Preglednica 30 Vpliv vlažnosti in usmerjenosti vzorca na natezno in tlačno trdnost lesa.

Vlažnost [%]	Vzporedno z vlakni [N/mm ²]	Pravokotno na vlakna [N/mm ²]	Razmerje
	Nateg		
27	131	2,69	48,7
12	138	2,90	47,6
	Tlak		
27	24,1	4,14	5,82
12	49,6	6,90	7,19

Grče vplivajo na odstopajoč potek vlaken, hkrati vlakna v grči potekajo prečno, branike so razporejene cilindrično (večji skrčki!), pogosto pa je vlažnost grč nižja, zato se hitreje pojavijo tudi razpoke.

Trajne obremenitve zmanjšujejo trdnosti lesa, kar pripisujemo **utrujanju materiala**. Splošno velja, da je trajna statična trdnost le 60 % kratkotrajne. Zmanjšanje trajne trdnosti lesa je izrazitejše pri tanjših sortimentih in lesu slabše kakovosti. Trdnost se še bolj zmanjša, če obremenitev ni enakomerna in se pojavijo utripne ter nihajne dinamične obremenitve.

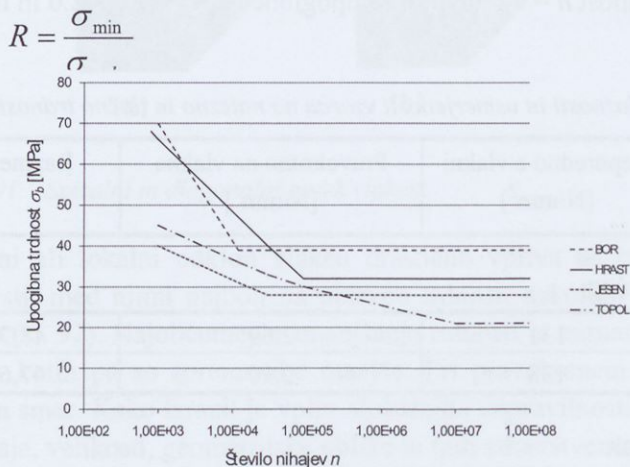
Utrujenost materiala opisujejo trije osnovni modeli:

- A/ Wöhlerjeva krivulja
- B/ Model trajanja obremenitve
- C/ Energijski kriterij

Wöhlerjeva krivulja ali σ - N diagram (sl. 93) prikazuje odvisnost odpornosti materiala proti utrujanju s kritičnim številom obremenjevalnih ciklov, ki pri določenem nivoju napetosti vodijo do porušitve.

$$\log(N) = A + B \log(\sigma)$$

Koeficienta A in B sta odvisna od parametra R, ki je definiran z razmerjem med minimalnim in maksimalnim nivojem napetosti pri enem ciklu.



Slika 93 Vpliv izmenične upogibne obremenitve na trdnost (Wöhlerjeva krivulja) borovine, hrastovine, jesenovine in topolovine.

Krivulja se pri velikem številu nihajev približuje končni vrednosti napetosti, ki jo imenujemo »dinamična trdnost«.

V modelu trajanja obremenitve je zrušitev mogoče predpostaviti s kriterijalno vrednostjo T, ki je definirana s številom ciklov obremenjevanja in frekvenco f, ki

v frekvenčnem območju od 0,1 Hz do 10^6 Hz močno vpliva na trajno trdnost lesa.

$$T = \frac{N}{2f}$$

Energijski kriterij zrušitve temelji na definiranju kritične specifične energije, ki je izračunana iz produkta napetosti in ustrezne naraščajoče deformacije

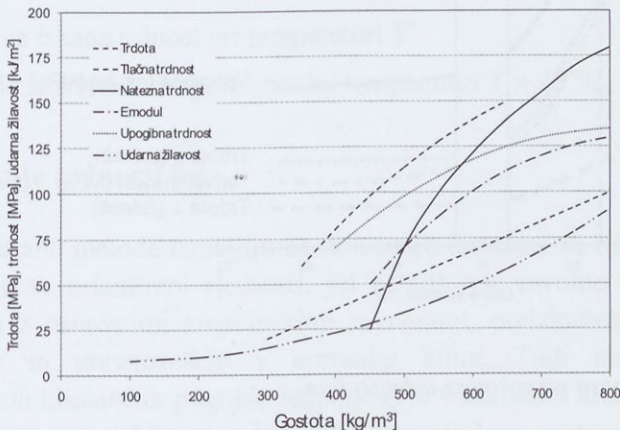
$$w = \int \sigma \cdot d\varepsilon$$

Napetost je mogoče identificirati z napetostjo v elementu reološkega modela. Zrušitvena napetost se izraža s hitrostjo naraščanja napetosti in deformacije oziroma s hitrostjo naraščanja skupnega napetostnega dela:

$$w(t_f) = \int_0^{t_f} \dot{\sigma} \cdot \varepsilon + \sigma \cdot \dot{\varepsilon} \cdot dt = \int_0^{t_f} \dot{w} \cdot dt$$

Razmerje med trdnostjo pri izmenični in statični obremenitvi je pri lesu med 0,25 in 0,39 ter je višja kot pri večini kovin.

Kot je že poznano, je **gostota** lesa kot poroznega materiala odvisna od debeline celičnih sten oziroma od relativnega razmerja med celičnimi stenami in lumni kot tudi deleža različnih anatomskih elementov. Variabilnost gostote ni tako strogo vezana le na različne lesne vrste, temveč lahko nastane tudi v okviru iste vrste ali celo drevesa. Na splošno velja, da se z naraščajočo gostoto izboljšujejo tudi trdnostne lastnosti, tako ostaja gostota še vedno najenostavnejši kazalnik trdnostnih karakteristik lesa (sl. 94).



Slika 94 Odvisnost nekaterih trdnosti lesa od njegove gostote.

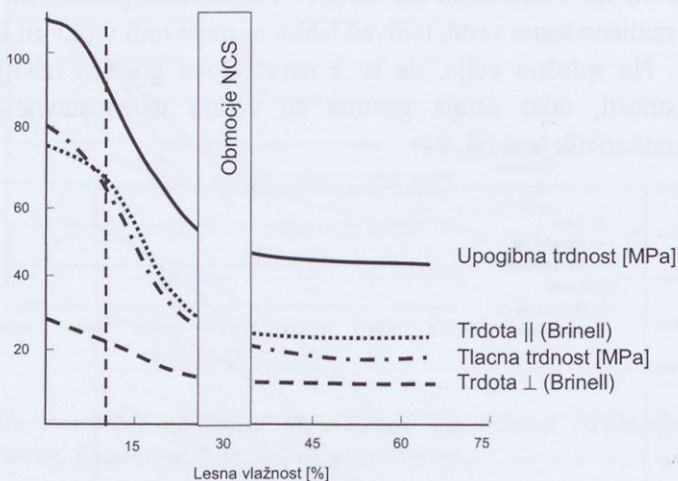
Najpogosteje relacijo med trdnostnimi lastnostmi (σ) in gostoto (ρ) podajamo v potenčni odvisnosti:

$$\sigma = k \cdot \rho^n$$

Razlike v gostoti ranega in kasnega lesa vzajemno vplivajo tudi na celotno trdnost lesa, ki jo s trdnostmi ranega (σ_r) in kasnega lesa (σ_k) ter deležem kasnega lesa (s) izrazimo:

$$\sigma = \sigma_r + (\sigma_k - \sigma_r) \cdot s$$

Pri zniževanju **vlačnosti** v higroskopskem območju, to je pod točko nasičenja celičnih sten, se večina mehanskih lastnosti izboljšuje (sl. 95). Razlog je verjetno v vzpostavljanju novih vodikovih vezi med mikrofibrilami, ko se le-te med izhajanjem vezane vode medsebojno približajo. Vpliv vlažnosti na mehanske lastnosti je na območju med 8 % in 22 % vlažnosti linearen, pri višjih vpliv pojenja. Pri povišani vlažnosti se trdnosti zmanjšajo zaradi slabjenja medveržnih vodikovih vezi v amorfni področjih. Mehanske lastnosti se nekoliko poslabšajo tudi v območju monomolekularne sorpcije (slabše prečne povezave pri nepopolni primarni, monomolekularni sorpciji).



Slika 95 Vpliv vlažnosti na nekatere trdnosti lesa.

Vlažnost ima največji vpliv na tlačno trdnost, manjšo na strižno trdnost in elastični modul ter najmanjšo na natezno trdnost.

V normalni klimi, v kateri se najpogosteje določajo tudi mehanske lastnosti lesa, je ravnovesna vlažnost pribl. 12 %, zato so tudi trdnosti pri različnih vlažnostih pogosto vezana na to ravnovesje.

$$\sigma_U = \sigma_{12} \left(\frac{\sigma_{12}}{\sigma_{TNCs}} \right)^{\frac{U-12}{U_{TNCs}-12}}$$

Mehanske lastnosti večinoma z naraščajočo **temperaturo** slabijo, učinek pa lahko primerjamo z vplivom na elastični modul. Na temperaturo sta najobčutljivejša E-modul in tlačna trdnost pravokotno na vlakna. Pri visokih vlažnostih lesa je vpliv temperature še občutnejši. Učinek temperature je odvisen še od trajanja.

Pri kratkotrajnem delovanju temperature do 95 °C so trdnostne lastnosti lesa reverzibilne, pri delovanju daljši čas pri temperaturi 65 °C pa se pojavijo ireverzibilne spremembe, ki se kažejo v termični degradaciji s trganjem celuloznih molekul in v kemičnih spremembah hemiceluloz. Večji učinek se kaže tudi pri cikličnih temperaturnih obremenitvah. Temperaturno občutljivejši so listavci.

Vpliv temperature na trdnostne lastnosti lesa vrednotimo primerjalno z vrednostmi trdnosti pri normalni temperaturi (najpogosteje pri 20 °C).

$$\sigma' = \sigma [1 + \alpha(T' - T)]$$

σ' je iskana trdnost pri temperaturi T'

σ je znana trdnost pri normalni temperaturi $T = 20$ °C.

Določevanje trdnosti lesa

Standardizirane metode temeljijo na določanju lastnosti na čistih malih vzorcih. Preizkušajo se orientirani elementi, pri katerih vse ravnine obdelave potekajo vzporedno z osnovnimi anatomskimi ravninami, preizkušanci so brez rasti posebnosti in uravnovešeni v normalni klimi. Tudi testiranje poteka v kontroliranih klimatskih pogojih, najpogosteje v normalni klimi ($T = 20$ °C, $\varphi = 65$ %). Velika variabilnost trdnostnih lastnosti lesa zahteva tudi zadovoljivo število preizkušancev (pregl. 31)(ISO 3129).

Preglednica 31 Število potrebnih preizkušancev za določevanje gostote in trdnosti pri različnih točnostih srednje vrednosti pri 95 % intervalu zaupanja iz enega ali dveh slučajnostno izbranih dreves.

Točnost srednje vrednosti (pri 95 % int. zaupanja)	1 testno drevo		2 testni drevesi	
	Gostota	Trdnost	Gostota	Trdnost
± 15 %	4	6	3	5
± 10 %	5	12	4	8
± 15 %	2	35	12	20
± 2,5 %	70	150	40	80

Statični upogib (SIST EN 408; ISO 3133; ISO 3349)

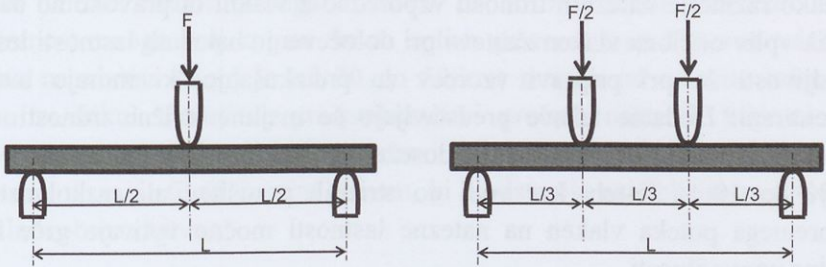
Strojno razvrščanje lesa temelji na upogibnem preizkusu, zato je ta metoda najpogosteje uporabljena za določanje trdnostnih karakteristik lesa, s katero določamo modul elastičnosti in upogibno trdnost, ki sta osnovni vrednosti za poenostavljeno izračunavanje in dimenzioniranje konstrukcij ter tudi predvidevanja ostalih mehanskih lastnosti. Dimenzije prečnega prereza standardnih vzorcev imajo velikost 20 mm x 20 mm, njihova dolžina pa je 300 mm oziroma je vsaj 19x večja od višine. Vzorce testiramo na valjčnih podporah z razmikom 280 mm in z obremenjevanjem na sredini podpor (tritočkovni test) ali na dveh simetričnih točkah (štiritočkovni preizkus) (sl. 96). Obremenjevanje poteka vzporedno z letnicami in s konstantno hitrostjo 0,11 mm/s. Med izvajanjem eksperimenta se poleg spremljanja povečevanja sile beleži še upogib. Iz začetnega linearne dela izračunamo E-modul;

$$E_{L3} = \frac{L^3 \cdot \Delta F}{4 \cdot e \cdot h^3 \cdot \Delta u}$$

Pri največji sili je dosežena upogibna trdnost oziroma največja napetost, ki jo element še zdrži (zrušilna napetost).

Površina pod krivuljo med izhodiščno točko in upogibno trdnostjo je enaka vložnemu maksimalnemu delu, ki je mera sproščene energije pri poružitvi.

$$\sigma_{maks} = \frac{3 \cdot F_{maks} \cdot L}{2 \cdot d \cdot h^2}$$



Slika 96 Upogibni preizkus s tri in štiri točkovno obremenitvijo.

Na nenatančnost pri tritočkovnem obremenjevanju vpliva vtiskanje merilnega valja na površino lesa, težave pri merjenju povesa in pojav strižnih napetosti, ki so največje na mestu merjenja povesa. Strižne napetosti lahko zanemarimo le pri velikih razmerjih med dolžino in višino preizkušancev ($L/h > 20$) ali s korekcijo izračuna E-modula, kjer ima znaten vpliv tudi razmerje med elastičnim in strižnim modulom ($E/G \approx 17$). Zmanjšanje učinka strižnih napetosti se tako izraža z enačbo:

$$E_{L3} = \frac{L^3 \cdot \Delta F}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \Delta u} \left(1 + 1,2 \cdot \frac{E}{G} \cdot \frac{h^2}{L^2} \right)$$

Natančnejše meritve izvajamo s štiri točkovno obremenitvijo. Vrednosti trdnosti so nekoliko višje. Modul elastičnosti se v tem primeru izraža:

$$E_{L4} = \frac{3 \cdot (L - a) \cdot m^2 \cdot \Delta F}{8 \cdot b \cdot h^3 \cdot \Delta u}$$

Do meje proporcionalnosti sta elastična modula natezne in tlačne strani enaka, pri višjih obremenitvah se v tlačni coni pojavi tečenje oz. plastične deformacije prej kot v natezni, nevtralna os pa se premakne proti konveksni, natezni strani. Upogibno trdnost lesa predstavljajo prve porušitve bodisi na tlačni ali natezni strani.

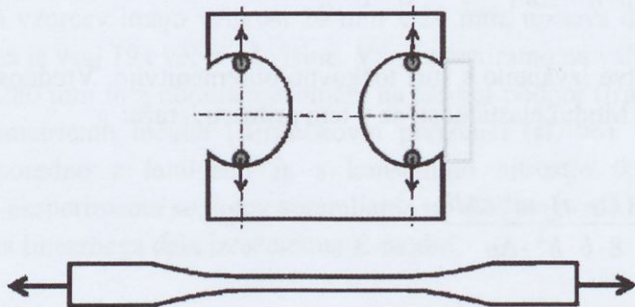
Porušitve se realizirajo kot pretrganje vlaken na konveksni natezni strani, kot uklon na konkavni tlačni strani ali kot zdrs vlaken v sredini preizkušanca zaradi strižnih napetosti. Učinek grčavosti je zlasti zaznan na natezni strani.

Nateg (ISO 3345; ISO 3346)

Veliko razmerje nateznih trdnosti vzporedno z vlakni in pravokotno na njih ter velik vpliv odklona vlaken zahteva pri določevanju nateznih lastnosti lesa veliko pazljivosti že pri pripravi vzorcev za preizkušanje, ki morajo biti strogo orientirani. Dodatne težave predstavljajo še majhne strižne trdnosti. Natezne trdnosti vzporedno z vlakni lahko dosežejo izjemnih 300 MPa, strižne trdnosti le 6 % do 10 % le-teh, kar vodi do strižnih porušitev ali razkolnosti. Poleg nepremega poteka vlaken na natezne lastnosti močno vplivajo grče in druge rastne nepravilnosti.

Standardna dimenzija preizkušancev za določevanje nateznih trdnosti vzporedno z vlakni je 20 mm x 6 mm, njihova dolžina pa je 300 mm. V srednjem delu so preizkušanci zoženi na prerez 3 x 6 mm, ker se na prijemališčih pojavljajo velike strižne in tlačne napetosti. Dolžina zoženega dela mora imeti vsaj 9-kratno dimenzijo večje prečne dimenzije. Letnice morajo potekati pravokotno na daljšo stranico prereza. Natezno trdnost izračunamo iz maksimalne sile (F_{maks}) in prereza preizkušajca (A_0) (sl. 97):

$$\sigma = \frac{F_{maks}}{A_0}$$



Slika 97 Preizkušanci za določanje natezne trdnosti lesa v vzdolžni in prečni smeri.

Tudi določanje nateznih karakteristik lesa prečno na vlakna je povezano z vrsto eksperimentalnih težav, zato se prečne trdnosti določajo tudi z razkolnim testom.

Natezna trdnost vzporedno z vlakni (σ_{\parallel}) je 2 do 2,5 krat večja od tlačnih, vendar je obnašanje natezno obremenjenega lesa neplastično, zato so porušitve hipnejše. Porušitev pri prekoračitvi natezne trdnosti se pri redkejšem lesu pojavi s trganjem

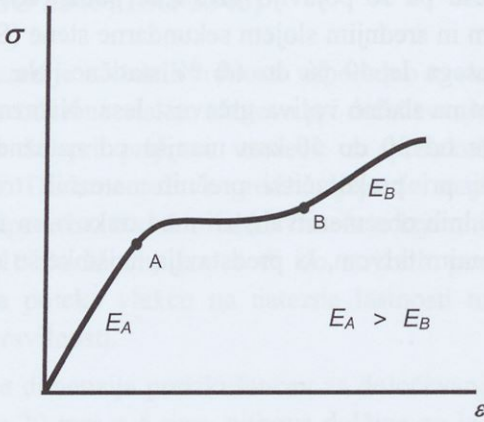
celične stene, pri gostejšem lesu pa se pojavijo vzdolžne porušitve v srednji lameli ali na meji med zunanjim in srednjim slojem sekundarne stene (S1 in S2). Dinamična natezna trdnost dosega le 40 % do 60 % statične. Na vzdolžno natezno trdnost mnogo bolj kot na tlačno vpliva grčavost lesa. Natezna trdnost pravokotno na vlakna (σ_{\perp}) je od 30 do 50-krat manjša od natezne trdnosti vzporedno z vlakni. Porušitve pri prekoračitvi prečnih natezних trdnosti se pojavijo v ranem lesu (pri radialnih obremenitvah) ali med trakovnim tkivom in vzdolžno orientiranim fibriformnim tkivom, ki predstavlja najšibkejšo mesto pri tangencialnih obremenitvah.

Tlak (ISO 3132)

Določanje tlačnih trdnosti lesa ima pomembno vlogo pri uporabi lesa kot konstrukcijskega materiala. Tlačne napetosti pri vzdolžni obremenitvi niso enakomerno razporejene po prerezu lesa zaradi menjavajočih se pasov ranega in kasnega lesa. Pri večjih obremenitvah se poveča plastično obnašanje lesa, lom pa nastopi pri relativno veliki specifični deformaciji ($\varepsilon \sim 7\%$). Pri dolgotrajnih obremenitvah se trdnost zmanjša od 55 % do 60 % trenutne, medtem ko je pri dinamičnih obremenitvah zmanjšanje trdnosti manj občutno.

Tlačna trdnost pravokotno na vlakna je nizka. Do meje proporcionalnosti se les obnaša elastično, sledi območje gnetenja oziroma zruševanja celičnih sten v lumne, nato pa sledi ponovno linearno območje z manjšim naklonom (manjši elastični modul) (sl. 98). V prečni smeri se večinoma pojavijo zgnečenine in ne prihaja do pravih porušitev.

Za določanje tlačne trdnosti vzporedno in pravokotno na vlakna mora imeti preizkušane enakomeren prerez po celotni dolžini, končni obremenjevanje ploskvi pa morata biti vzporedni. Obremenjevanje poteka z rahlo zaokroženo površino, tako da je onemogočeno upogibanje. Povečevanje sile poteka s konstantno hitrostjo (0,01 mm/s), tako da je dosežena porušitev v 180 do 420 sekundah (300 ± 120 s). Tlak se vrši na kvadratno površino, velikosti 20 mm x 20 mm pri EN standardih in 50 mm x 50 mm pri ameriških. Rezultati tlačne trdnosti so manjši pri večjih dimenzijah.



Slika 98 Napetostno deformacijska krivulja pri prečnih tlačnih obremenitvah.

Udarna žilavost (ISO 3348)

V mnogih primerih uporabe (letalstvo, športna orodja, ročna orodja ...) je les pogosteje kot statičnim izpostavljen hipnim obremenitvam. Udarne žilavost je sposobnost materiala za absorpcijo energije, ki se izniči z deformacijo. Udarne napetost deluje le kratek čas (nekaj μs). Les z visoko odpornostjo proti udarcem označujemo z žilavim, les z majhno odpornostjo pa s krhkim. Pri hitrem delovanju sile je les sposoben prenesti večje obremenitve (do 150 %) kot pri standardnem upogibnem eksperimentu, povese je pri tem do 2-krat večji.

Bolj neposredno določanje prevzete energije kot pri upogibnem eksperimentu opravimo z določanjem udarne žilavosti.

Za določevanje udarne žilavosti se najpogosteje uporablja metoda nihajočega udarnega kladiva. Ob udarcu na preizkušane se del energije padajočega kladiva absorbira, preostali del pa se v nadaljevanju nihaja ponovno pretvori v potencialno energijo.

Absorbirana energija je enaka razliki potencialnih energij kladiva na začetku in zaključku nihaja.

Trdota (SIST EN 1534)

Trdota predstavlja odpor materiala proti vrinjenju drugega materiala. Tako je trdota močno povezana z odpornostjo proti razenju, praskanju in drugim poškodbam površine. Zaradi velike raznolikosti materialov se v znanosti o materialih (strojništvu, metalurgiji, gradbeništvu, geologiji, lesarstvu, ...) uporablja različne trdotne lestvice ter merilne in preskusne metode (pregl. 32).

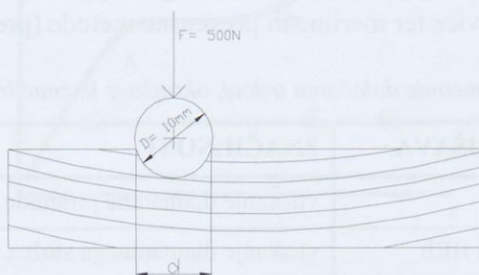
Preglednica 32 Najpogostejše metode določanja trdote, okrajšave in značilnosti.

METODA	OKRAJŠAVA	ZNAČILNOST
trdota po Vickersu	HV	vtiskanje diamantne piramide
trdota po Rockwellu	HRC ali HRB	vtiskanje diamantnega stožca ali kroglice
trdota po Shoru	HS	merilo za trdoto je višina odboja kladivca z diamantno konico, ki z določene višine pada na merjenec
trdota po Brinellu	HB	vtiskanje kroglice iz kaljenega jekla ali s karbidno trdino v merjenec z določeno silo in merjenje velikosti odtisa
trdota po Janki	HJ	določanje sile, ki je potrebna za vtiskanje kroglice

Zaradi anatomskih posebnosti in variabilnih lastnosti je natančno določevanje trdote lesa nekoliko vprašljivo, zato se velikokrat podajajo le relativne vrednosti. Za ugotavljanje trdote lesa se uporablja standardizirana Brinellova metoda (EN 1534) (sl. 99) ali nekoliko modificirana, imenovana po avtorju Janka. Trdota je definirana s silo, ki je potrebna, da v les popolnoma vtisnemo kroglico s površino 1 cm^2 . Pri prirejeni Brinellovi metodi se uporablja jeklena kroglica s premerom $D = 10 \text{ mm}$, ki se jo vtiska v les s silo 100 N pri mehkih lesovih, 500 N pri srednje trdih in 1000 N pri trdih lesovih. Obremenitev povečujemo približno 15 s , pustimo pri maksimalni obremenitvi 30 s in razbremenimo v 15 sekundah . Iz velikosti odtisa oziroma premera odtisa (d) izračunamo trdoto po enačbi:

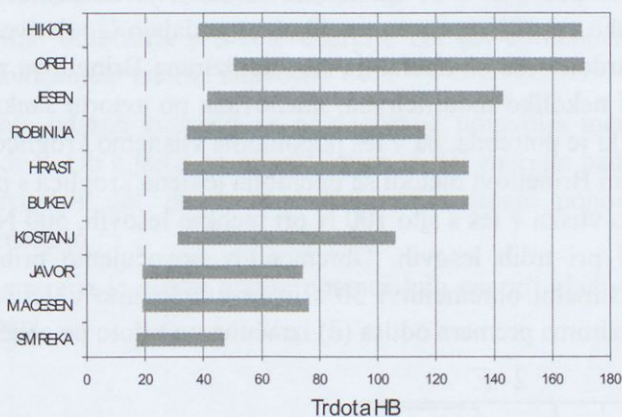
$$H_B = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Pri lesu moramo nujno upoštevati in pri objavi rezultatov tudi navesti smer obremenjevanja, gostoto in vlažnost lesa. Na trdoto vplivajo še potek vlaken, hitrost, način in trajanje obremenitve, temperatura in zgradbene anomalije (grče, odkloni vlaken – spiralni ali diagonalni potek, reakcijski les, smolni in lateksni kanali, rastne anomalije ter razpoke). Zaradi korektna primerjave izvajamo meritve na različnih in orientiranih vzorcih brez nastnih posebnosti.



Slika 99 Princip določanje trdote po Brinellu.

Zaradi anizotropne zgradbe lesa se pri lesu določa trdota v vseh osnovnih anatomskih smereh. Trdota merjena vzporedno z vlakni (HB \parallel) v praksi pogosto ni relevantna. Posebno pri iglavcih in venčastoporoznih listavcih moramo trdoto določati na radialnih površinah (HB \perp), saj velike razlike v gostoti ranega in kasnega lesa na tangencialni površini močno povečajo variabilnost izmerjenih vrednosti. Pri korektnem navajanju trdote moramo navesti tudi hitrost obremenjevanja. Zaradi viskoelastičnosti lesa se pojavljajo velika odstopanje predvsem pri preskušanju vlažnega lesa, kjer so bolj izražene njegove viskozne lastnosti (sl. 100).



Slika 100 Razpon trdote po Brinellu za pomembnejše listavce, pogosteje uporabljene za lesene talne obloge.

Za posamezne namene uporabe se od lesnih vrst zahtevajo ustrezne trdnostne lastnosti. Vrste zato razvrščamo po trdnostnih kriterijih, ki nam omogočajo napovedovanje možne uporabe, medsebojno primerjavo ali iskanje alternativnih vrst (pregl. 33 in 34). Karakteristične vrednosti trdnostnih in togostnih parametrov kakovostnih razredov iglavcev in listavcev po standardu EN 338 so podane v pregl. 35 in pregl. 36.

Preglednica 33 Gostota, upogibna trdnost, E-modul, udarna žilavost, tlačna trdnost, trdota in strižna trdnost za nekaj značilnih listavcev in iglavcev.

	Gostota [kg/m ³]	Upogibna trdnost [N/mm ²]	E-modul [N/mm ²]	Udarna žilavost [m]	Tlačna trdnost [N/mm ²]	Trdota [N]	Strižna trdnost [N/mm ²]
Balza	176	23	3200		15,5		2,4
Obehe	368	54	5500	0,48	28,2	1910	7,7
Mahagonij	497	78	9000	0,58	46,4	3690	11,8
Jesen	689	116	11900	1,07	53,3	6140	16,6
Hrast	689	97	10100	0,84	51,6	5470	13,7
Afzelija	817	125	13100	0,79	79,2	7870	16,6
Greenheart	977	181	21000	1,35	89,9	10450	20,5
Smreka	417	72	10200	0,58	36,5	2140	9,8
Bor	433	80	8300	0,56	42,1	2050	9,3
Duglazija	497	91	10500	0,69	48,3	3420	11,6
Karibski bor	769	107	12600	0,91	56,1	4980	14,3

Preglednica 34 Kriteriji za oceno upogibne trdnosti $\sigma_{b//}$, modula elastičnosti E in tlačne trdnosti $\sigma_{c//}$ vzporedno z vlakni ter trdote.

Ocena	Upogib.trdnost $\sigma_{b//}$ [MPa]	E-modul E [MPa]	Tlačna trdnost $\sigma_{c//}$ [MPa]	Ocena	Trdota (po Brinellu)
Zelo nizka	< 50	< 10	< 20	Zelo mehak	< 3,5
Nizka	50 - 85	10 - 12	20 - 35	Mehak	3,5 - 4,0
Srednja	85 - 120	12 - 15	35 - 55	Srednje trd	4,0 - 5,0
Visoka	120 - 175	15 - 20	55 - 85	Trd	5,0 - 7,0
Zelo visoka	> 175	> 20	>85	Zelo trd	>7

Preglednica 35 Karakteristične vrednosti trdnostnih in togostnih parametrov kakovostnih razredov iglavcev (po EN 338).

Razvrstitveni razred	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Gostota [kg/m ³]												
Karakteristična	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
Povprečna	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550
Trdnost [MPa]												
Upogib	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Nateg – vzporedno	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
Nateg – pravokotno	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Tak – vzporedno	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
Tlak – pravokotno	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
Strig	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,8	3,8
Togost [GPa]												
E – modul povprečno	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
E- modul, 0,05	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7
E- modul pravokotno	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
Strižni modul	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00

Preglednica 36 Karakteristične vrednosti trdnostnih in togostnih parametrov kakovostnih razredov listavcev (po EN 338).

Razvrstitveni razred	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Gostota [kg/m³]						
Karakteristična	530	560	590	650	700	900
Povprečna	640	670	700	780	840	1080
Trdnost [MPa]						
Upogib	30	35	40	50	60	70
Nateg – vzporedno	18	21	24	30	36	42
Nateg – pravokotno	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Tak – vzporedno	23	25	26	29	32	34
Tlak – pravokotno	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5
Strig	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0
Togost [GPa]						
E – modul povprečno	10	10	11	14	17	20
E- modul, 0,05	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8
E- modul pravokotno	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33
Strižni modul	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25

VIRI

- Anon. 1999. Wood Handbook. Wood as an Engineering Material. Forest Product Laboratory, Madison US Government Printing Office 0-495-044-
- Armstrong L.D., Grossman P.U.A. 1972. The behaviour of particle board and hardboard beams during moisture cycling. *Wood Science and Technology*, 6: 128-137.
- Babiak, M.; Kúdela, J. 1995. A contribution to the definition of the fiber saturation point. *Wood Science and Technology*, 29, 3, s. 217
- Barber, N.F. 1968. A teoretical model of shrinking wood. *Holzforschung*. 22,4, s. 97-103.
- Barber, N.F.; Meylan, B. A. 1964. The anisotropic shrinkage of wood. A teoretical model. *Holzforschung*. 18, 5, s.146-156.
- Barrett, J.D.; Schniewind, A.P. Taylor, R.L. 1972. Teoretical shrinkage model for wood cell wall. *Wood Sience*. 4, 3, s. 192-197.
- Bažant Z. 1985. Constitutive equation of wood in variable humiditiy and temperature. *Wood Science and Technology*, 19: 159-177
- Becker, B.; Kommert, R. 1989. Die Veränderungen des Anisotropiefaktors unterhalb des Fasersättigungsbereiches bei Gemeiner Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) und Stiel - Eiche (*Quercus robur* L.). *Holztechnologie*, 30, 1, s. 15-17
- Bendtsen, B.A. 1978. Properties of wood from improved and intensively managed stands. *Forest Products Journal* 28(10): p61-72.
- Bodig, J.; Jayne, B. 1982. *Mechanics of Wood and Wood Composites*. VNR Van Nostrand Reinhold. New York. 700 str.
- Bosshard, H.H. 1974. *Holzkunde*. Band 2. Zur Biologie, Physik und Chemie des Holzes. Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Stuttgart. 312 str.
- Boyd, J. D. 1974. Anisotropic shrinkage of wood: Identification of the dominant determinants. *Mokuzai Gakkaishi* 20, 10, s. 473 do 826.
- Boyd, J. D. 1977. Relationship between fibre morfology and shrinkage of wood. *Wood science and Technology*, 11, 1, s. 3-22.
- Boyd. J.D. 1982. An anatomical-explanation for visco-elastic and mechano-sorptive creep in wood, and effects of loading rate on strenght. *New perspectives in Wood anatomy*, Ed. P. Baas Martinus Nijhoff/Dr W. Junk, The Hague: 171-222.
- Bucur, V. 2003. *Nondestructive Characterization and Imagine of Wood*. Springer-Verlag. Berlin. 353 str.
- Burmester, A. 1972. Swelling and swellig anisotropy of wood in various moisture-content ranges. *Holz ais Roh und Werkstoff* 30, 10, s. 380-381.
- Cave, I. D. 1978. Modelling moisture related mechanical properties of wood. Part I. Properties of the wood constituents, *Wood Science and Technology*, 12: 75-86
-

Choong, E.T. 1969. Effect of extractives on shrinkage and other hygroscopic properties of ten southern pine woods. *Wood Fibre* 1, 1, s 124-133.

Choong in Achmadi 1991. Effect of extractives on moisture sorption and shrinkage in tropical woods. *Wood and Fiber Science*. 23 (2) : 185-196.

Choong, E.T.; Fogg, P.J. 1989. Differences in moisture content and shrinkage between innerwood and outerwood of two shortleaf pine trees. *Forest Products Journal*. 39, 3, s. 13-18.

Christensen in Kelsey 1959. The sorption of water vapor by the constituents of wood. *Holz als Roh und Werkstoff*. 17 (5) :189-204.

Cividini, R. 1992. Wood stability and moisture content. Behaviour of the material. Wood in the air - Hygroscopicity of the wood. *Wood stability*. Xilon – Wood Technology, 5, 57, s. 44-55; 6, 59, s. 24-30.

Čufar, K. 2006. Anatomija lesa. Univerzitetni učbenik. Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo. Ljubljana. 183 str.

Dent R. W. 1977. A multilayer theory for gas sorption. I. Sorption of a single gas. *Textil Research Journal* 47 145-152.

Dinwoodie, J. M. 2000. Timber. Its Nature and Behaviour. BRE, London & New York. 257 str.

Eichler, h. 1981. Praxis der Fengel, D.; Wegener, G. 1984. Wood. Chemistry, ultrastructure, reactions. Water de Gruyter. Berlin New York. 613 str.

Gorišek, Ž. 1992. Vpliv prečne krčivne anizotropije lesa na sušenje in stabilnost. Doktorska disertacija. Ljubljana, VDO Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, 120 s.

Gorišek, Ž. 1994. Točka nasičenja celičnih sten kot kritična točka v procesu sušenja lesa. *Les*, 46, 3, s. 53-58

Grosser, D. 1977. The timbers of Central Europe. A students' atlas of photomicrographs. [Die Holzer Mitteleuropas. Ein mikrographischer Lehratlas.] Univ. Munchen, German Federal Republic: Inst. f. Holzforsch.

Grossman P.U.A. 1976. Requirements for a model that exhibits mechano-sorptive behaviour. *Wood Science and Technology*, 10: 163-168.

Hao, B., Avramidis, S. 2000. Wood sorption fractality in the hygroscopic range. Evaluation of a modified classic BET model. *Wood and Fiber Science*, 33 (1) : 119-125.

Harris, J.M.; Meylan, B.A. 1965. The influence of microfibril angle on longitudinal and tangential shrinkage in *Pinus radiata*. *Holzforschung*. 19, 5, s. 144-153.

Hartly, I.D. Kamke, F.A. Peemoeller, H. 1992. Cluster theory of water sorption in wood. *Wood Science and Technology*. 26, 1, s. 83-99.

-
- Hartly, I. D.; Avramidis, S. 1993. Analysis of the wood sorption isotherm using clustering theory. *Holzforschung* 47 : 163-167.
- Haukal, D. 1982. Spiral grain in *Pinus occarpa*. *Wood and Fibre* 14, 4, s. 320-330.
- Hearmon, R. F. S. 1948. Elasticity of wood and plywood. Special Report no. 7. On Forest Products Research- London.
- Hill, C. A. S. 2006. Wood modification. Chemical, thermal and other processes. John Wiley & Sons. Bangor. 238 str.
- Hillis, W. E. 1985. High temperature and chemical effect on wood stability. *Wood Science and Technology*. 18 (4) : 281-293.
- Hillis W. E., Rozsa, A. N. 1985. High temperature chemical effect on wood stability. The effect of heat on rigidity and the stability of radiata pine. *Wood Science and Technology*, 19: 93-102.
- Hittmeier, M.E. 1967. Effect of structural direction and initial moisture content on swelling rate of wood. *Wood Science and Technology* 1, 2, s. 109-121.
- Hsu, N.N.; Tang, R.C. 1975. Distortion and internal stresses in lumber due to anisotropic shrinkage. *Wood science*. 7, 4, s. 198-307.
- Hoffmeyer P., Davidson R.W. 1989. Mechano-sorptive creep mechanism of wood in compression and bending. *Wood Science and Technology*, 23: 215-227
- Hon, D. N. S.; Shiraishi, N. 2001. Wood and cellulosic chemistry. Marcel Dekker, Basel, 914 str.
- Hunt, D.G. 1986. The mechano-sorptive creep susceptibility of two softwoods and its relation to some other materials properties. *Journal of Materials Science*, 21: 2088-2096.
- Hunt D.G., Shelton C.F. 1988. Logitudinal moisture-shrinkage coefficients of softwood at the mechano-sorptive creep limit. *Wood Science and Technology*, 22: 199-210.
- Hunt D.G. 1997. Dimensional changes and creep of spruce, and consequent model requirements. *Wood Science and Technology*, 31: 3-16.
- Kelsey, K.E. 1956. The shrinkage intersection point – its significance and the method of its determination. *Forest Products Journal*. 6, 12, s. 411-416.
- Keylwerth, R. 1962. Untersuchungen über freie und behinderte Quellung von Holz 1. Freie Quellung. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 20, 4, s. 252-259.
- Keylwerth, R. 1964. Untersuchungen über freie und behinderte Quellung von Holz 4. Untersuchungen über den Quellungsverlauf und die Feuchtigkeitsabhängigkeit der Rohdichte von Holzern. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 22, 4, s. 255-258.
- Khali, D. P.; Rawat, S. P. S. 2000. Clustering of water molecules during adsorption of water in brown rot decayed and undecayed wood blocks of *Pinus sylvestris*. *Holz als Roh- und Werkstoff* 58: 340-341.
- Koch, P. 1985. Utilization of Hardwoods Growing on Southern Pine Sites. U.S. Department of Agriculture, Forest Service. Washington. 605 str.
-

- Kollmann, F. 1981. Neues zur Anisotropie der Schwindung und Quellung von Holz. Holz als Roh- und Werkstoff 39, s. 357-260.
- Kollmann, F.; Côté, W. 1968. Principles of Wood Science and Technology. I. Solid Wood. Springer Verlag, Berlin 592 str.
- Kollmann, F.; Schneider, A. 1963. Über das Sorptionsverhalten Wärmebehandelter Hölzer. Holz als Roh- und Werkstoff, 21 (3) : 77-85.
- Koponen, S, Taratti, T., Kanerva, P. 1989. Modeling longitudinal elastic and shrinkage properties of wood. Wood Science and Technology, 23: 55-63.
- Koponen, S, Taratti, T., Kanerva, P. 1991. Modeling elastic and shrinkage properties of wood based on cell structure. Wood Science and Technology, 27: 229-239.
- Kučera, B. 1994. A hypothesis relating current annual height increment to juvenile wood formation in Norway spruce. Wood and fibre science, 26(1), s. 152-167.
- Kubinsky, E. 1971. Der Einfluss des Dämpfens auf die Holzeigenschaften. Holzforschung und Holzverwertung. 23 (1) : 1-11.
- Kübler, H. 1987. Growth stresses in trees and related wood properties. Forest Products Journal. 10 (3):61-119-.Lenth, CA; Kamke, FA; 2001. Equilibrium moisture content of wood in high temperature pressurized environments. Wood-and-Fiber-Science, 33: (1)104-118.
- Kürschner, K.; Malcerova, A. 1965. Über die chemischen veränderung des Buchenholzes bei termischer Behandlung. Holzforschung. 19 (6) : 161-178.
- Larson, P.R. 1969. Wood formation and the concept of wood quality. Yale Univ Sch For Bull 74, 54 s.
- Loskutov, S. R. 2000. Analysis of the wood sorption isotherm using the theory of micropore volume filling. Holzforschung 54, 301-304.
- Mantanis, G. I.; Young, R. A.; Rowell, R. M. 1994. Swelling of wood. Part 1. Swelling in water. Wood Science and Technology, 28, 2, s. 119-134
- Mark, R. E. 1967. Cell wall mechanics of tracheids. Yale Univesity Press, New Haven.
- Mårtensson A. 1988. Tensile behaviou of hardbord under combined mechanical and moisture loading. Wood Science and Technology, 22: 129-142
- Mayer, K.H.; Misch, L. 1937. Position des atomes dans le nouveau model spatial de la celulose. Helv. Chim. Acta, 20. 232-244.
- McAlister, R.; Clark, A. 1992. Shrinkage of juvenile and mature wood of lobbly pine from three locations. Forest Products Journal. 47(7/8), s. 25-28.
- Meylan, A. B. 1968. Cause of high longitudinal shrinkage of wood. Forest Products Journal, 18. (4) 75-78
- Morlie, P. 1999. Creep in Timber Structures. E & FN SPON. London. 145 str.

-
- Morschauer, C.R.; Preston, S.B. 1954. The effect of ray tissue on transverse shrinkage of red oak (*Quercus borealis* Michx). Mich Wood Technol 1, 1, s. 2
- Mukudai J., Yata S. 1987. Further modeling and stimulation of viscoelastic behavior (bending deflection) of wood under moisture change. Wood Science and Technology, 21: 49-63
- Nakato, K. 1958. On the cause of the anisotropic shrinkage of wood X. On the relationships between the microscopic structure and the anisotropic shrinkage in transverse section. Mokuzai Gakaishi 4, 2, s. 183-186.
- Nakano, T. 2003. Effects of cell structure on water sorption for wood. Holzforschung. 57 :312-218.
- Niemz, P. 1993. Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. DRW Verlag Tübingen, 243 P.
- Lenth, CA; Kamke, FA; 2001. Equilibrium moisture content of wood in high temperature pressurized environments. Wood-and-Fiber- Science, 33: (1)104-118.
- Noack, D., Schwab, E., Bartz, A. 1973. Characteristics for a judgment of the sorption and swelling behaviour of wood. Wood Science and Technology, 7(4):218-236
- Noskowiak, A.F. 1963. Spiral Grain in trees: a review. Forest Product Journal 13, 3, s. 266-275.
- Okoh, K. I. A.; Skaar, C. 1980. Moisture sorption isotherms of the wood and inner bark of ten southern US hardwoods. Wood Fiber 12: 98-111.
- Panshin, A.J.; DeZeeuw, C. 1980. Textbook of Wood Technology. Structure, Identification, Properties and Uses of the Commercial Woods. McGraw-Hill, New York. 722 str.
- Peralta, P. N. 1995. Modeling wood moisture sorption hysteresis using the independent - Domain theory. Wood and Fiber Science, 27, 3, s. 250-257
- Persson, K. 1997. Modelling of wood properties by a micromechanical approach. Report TVSM-3020, Division of Structural Mechanics University of Lund. Lund.
- Pierce C. B., Dinwoodie J. M. W., Paxton B.H. 1985. Creep in chipboard. Part 2: The use of fitted response curves for comparative and predictive purposes. Wood Science and Technology, 13: 265-282
- Pierce C. B., Dinwoodie J. M. W., Paxton B.H. 1985. Creep in chipboard. Part 5: An improved model for prediction of creep deflection. Wood Science and Technology, 19: 83-91
- Ranta -Maunus A. 1975. The viscoelasticity of wood at varying moisture content. Wood Science and Technology, 22: 189-205
- Rapp, A. O. 2001: Review on heat treatments of wood, Proceedings of the special seminar of COST Action E22, Antibes, France, 2001
-

- Ressel, J. 2007. Wood anatomy – an introduction. V Perre, P. 2007. Fundamentals of wood drying. COST E15 Nancy 366 s.
- Rowell, R: M. 2005 Chemical modification of wood. Wood material science and engineering. 1(1)29-33
- Schniewind A. P., 1966. Über den Einfluß von Feuchtigkeitsänderungen auf das Kriechen von Buchenholz quer zur faser unter Berücksichtigung von Temperatur und Temperaturänderungen. Holz als Roh- und Werkstoff, 24: 87-98
- Schniewind A.P. 1968. Recent progress in the study of the rheology of wood. Wood Science and Technology, 2: 188-206
- Schniewind A.P., Barrett J.D. 1972. Wood as a linear orthotropic viscoelastic material. Wood Science and Technology, 6: 43-57
- Schniewind, A. P. 1989. Concise Encyclopedia of Wood & Wood-based Materials. Pergamon Press Oxford. 354 str.
- Schroeder, H. A. 1972. Shrinking and swelling differences between hardwoods and softwoods. Wood and Fibre. 4(1), s. 20-25.
- Schwab, E. 1977. Ermittlung der Holzeigenschaften als Voraussetzung für eine Werkstoffgerechte Holzverwertung. Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forest-und Holzwirtschaft, Hamburg-Reinbek, Nr.118, s.197-204.
- Shmulsky, R; Kadir, K; Erickson, R: 2001. Effect of sample geometry on EMC and moisture hysteresis of red oak (*Quercus* sp.).Wood-and-Fiber-Science, 33: 4, 662-666;
- Siau, J. F. 1971. Flow in wood. Syracuse wood science series, 1. Syracuse University press. 131 s.
- Siau, J. F. 1984. Transport Processes in Wood. Springer-Verlag. Berlin. 279 str.
- Siau, J. F. 1995. Wood: Influence of Moisture on Physical Properties. Department of Wood Science and Forest Products. Virginia. 227 str.
- Simpson, W. T . 1973. Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematican models. Wood and Fiber. 5(1):41-49.
- Skaar, C. 1972. Water in wood. Syracuse University Press. New York. 218 str.
- Skaar, C. 1988. Wood-Water Relations. Springer-Verlag. Berlin. 283 str.
- Slaughter, A. E. 2004. Design and fatigue of a structural wood-plastic composite. Ms.Thesis, Washingt State University. 150 str.
- Smith,I; Landis,E.; Gong,M. 2003. Fracture and Fatigue in Wood. Wiley, Chichester. 234 str.
- Stamm, A. J. 1964. Wood and Cellulose Science. The Roland Press C. New York. 549 str.

- Stam, A. J. 1977. Dimensional changes of wood and their control. V Goldstein, I. S. 1977. Wood Technology: Chemical aspects. A. C. S. Symposium Series 4, American Chemical Society. Washington, 115-140.
- Stamm, A. J. 1977. Monomolecular adsorption and crystallite diameters of cellulose from structural and adsorption considerations. Wood Science and Technology, 11, 1, s. 39-49
- Šoškić, M.; Popović, D. 2002. Svojstva drveta. Šumarski fakultet Univerziteta u Beogradu. 298 str.
- Timell, E.T. 1986. Compression wood in Gymnosperms. Vol. 1- 5. Properties of compression wood Springed verlag. Berlin.
- Torelli N. 1974. Biološki vidiki ojedritve s poudarkom na fakultativno obarvani jedrovini (rdečem srcu) pri bukvi (*Fagus sylvatica* L.). Gozdarski vestnik, 32, 7/8: 253 – 281
- Torelli, N. 1983. Sorpcija in stabilnost lesa. Les. 35(4-5):101-106
- Torelli N. 1984. The ecology of wood as illustrated by beech (*Fagus sylvatica* L.). IAWA Bulletin, 5, 2:121 - 127
- Torelli, N. 1990. Les & skorja (Wood & Bark, Holz & Rinde). Slovar strokovnih izrazov. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, VTOZD za lesarstvo, 70 s.
- Torelli, N.; Gorišek, Ž. 1990. Krčenje in prečna krčitvena anizotropija na primeru centralnoameriških tropskih listavcev. Les, 42, 3/4, s. 85-88
- Tremblay, C. 1995. Longitudinal and radial variation of slope of grain in block spruce lumber. Forest Product Journal 45, 1, s. 79-83.
- Tsoumis, G. 1991. Science and Technology of Wood. Structure, Properties, Utilization. VNR Van Nostrand Reinhold. New York. 498 str.
- Ugrenović, A. 1950. Tehnologija drveta, Zagreb.
- Wadsö, L. 1993. Measurements of water sorption in wood. Part 1. Instrumentation. Wood Science and Technology, 27, 5, s. 396-400. Part 2. Results. Wood Science and Technology, 28, 1, s. 59-65
- Wagenführ, R.; Scheiber, Ch. 1996. Holzatlas. VEB Fachbuchverlag. Leipzig. 720 str.
- Wangaard, F. F; Granados, L. A. 1967. The effect of extractives on water-vapor sorption of wood. Wood Science and Technology. 1(4):253-277.
- Wasniewski, J. L. 1989. Evolution of juvenil wood and its effect on Douglas fir structural composite panels. Washington, Univer, inter particleboard / Composite materials. Proc. 23 rd, s.161-175.
- Zobel, B. J.; van Buijtenen, P. 1989. Wood Variation. Its Causes and Control Springer-Verlag. Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo Berlin. 363 str.



SIST EN 408 2003 Konstrukcijski les – Določanje nekaterih fizikalnih in mehanskih lastnosti lesa. Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties

SIST EN 518 1996 Konstrukcijski les – Razvrščanje - Zahteve za standarde za vizualno razvrščanje po trdnosti. Structural timber – Grading – Requirements for visual strength grading standards.

SIST EN 338 2004 Konstrukcijski les – Trdnostni razredi. Structural timber - Strength classes. 10 str

ISO 3129, 1975. Les – Vzorčenje in splošne zahteve za določanje fizikalnih in mehanskih lastnosti. Wood -- Sampling methods and general requirements for physical and mechanical tests.

ISO 3130, 1975. Les – Določanje lesne vlažnosti pri fizikalno- mehanskih testiranjih. Wood -- Determination of moisture content for physical and mechanical tests.

ISO 3131, 1975. Les – Določanje gostote pri fizikalno- mehanskih testiranjih. Wood -- Determination of density for physical and mechanical tests

ISO 3132, 1975. Les – Določanje tlačne trdnosti prečno na vlakna. Wood - Testing in compression perpendicular to grain.

ISO 3133, 1975. Les – Določanje upogibne trdnosti. Wood -- Determination of ultimate strength in static bending.

ISO 3345, 1975. Les – Določanje natezne trdnosti vzporedno z vlakni. Wood -- Determination of ultimate tensile stress parallel to grain

ISO 3346, 1975. Les – Določanje natezne trdnosti prečno na vlakna. Wood -- Determination of ultimate tensile stress perpendicular to grain

ISO 3347, 1976. Les – Določanje strižne trdnosti. Wood -- Determination of ultimate shearing stress parallel to grain.

ISO 3348, 1975. Les – Določanje udarne žilavosti- Wood -- Determination of impact bending strength.

ISO 3349, 1975. Les – Določanje modula elastičnosti iz upogibnega testa. Wood -- Determination of modulus of elasticity in static bending.

ISO 3350, 1975. Les – Določanje trdote. Wood -- Determination of static hardness.

ISO 3351, 1975. Les – Določanje odpornosti proti vtiskanju. Wood -- Determination of resistance to impact indentatio.



Slika na zadnji strani:

Navadna bukev (*Fagus sylvatica* L.): makroskopski in mikroskopski prečni, radialni ter tangencialni prerez. (Mikro foto: M. Zupančič)

NARODNA IN UNIVERZITETNA KNJIŽNICA

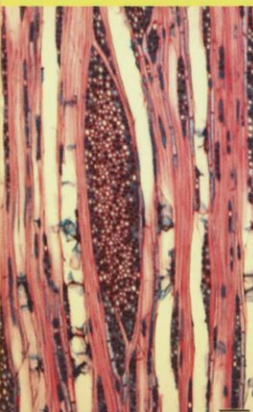
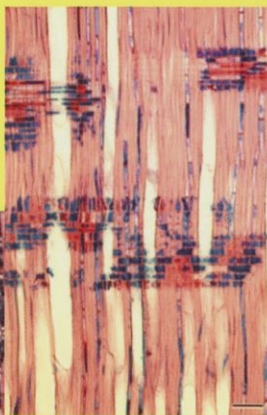
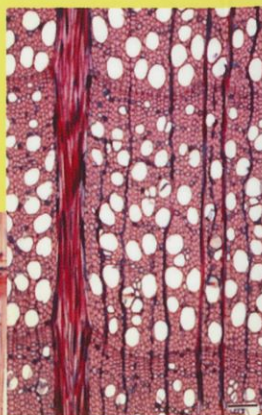
GS

I 711 675



200916378

COBISS ○



Univerza v Ljubljani
Biotehniška fakulteta
Oddelek za lesarstvo