

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Tomo STRLE

**SUŠILNE LASTNOSTI
KOMPRESIJSKEGA LESA**

DIPLOMSKO DELO

Univerzitetni študij

Ljubljana, 2008

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Tomo STRLE

SUŠILNE LASTNOSTI KOMPRESIJSKEGA LESA

DIPLOMSKO DELO
Univerzitetni študij

DRYING CHARACTERISTICS OF COMPRESSION WOOD

GRADUATION THESIS
University studies

Ljubljana, 2008

POPRAVKI:

Diplomsko delo je zaključek Univerzitetnega študija lesarstva. Opravljeno je bilo na Katedri za tehnologijo lesa ter v laboratoriju za sušenje lesa na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani

Senat Oddelka za lesarstvo je imenoval na za mentorja diplomskega dela prof. dr. Željka Goriška in za recenzentko prof. dr. Katarino Čufar.

Mentor: prof. dr. Željko Gorišek

Recenzentka: prof. dr. Katarina Čufar

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Tomo Strle

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Dn
DK	UDK 630*847
KG	les/normalni/kompresijski/sušenje/krčenje/dimenzijska stabilnost/difuzivnost/permeabilnost/ <i>Picea abies</i> Karst.
AV	STRLE, Tomo
SA	GORIŠEK, Željko mentor/ČUFAR, Katarina recenzentka
KZ	1000 Ljubljana, SLO, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2008
IN	SUŠILNE LASTNOSTI KOMPRESIJSKEGA LESA
TD	Diplomsko delo (univerzitetni študij)
OP	IX, 41 str., 8 pregl., 20 sl., 8 pril., 16 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Ugotavljali smo razlike v fizikalnih lastnostih normalnega in kompresijskega lesa smreke (<i>Picea abies</i> Karst.). Gostota kompresijskega lesa je bila nekoliko večja, volumenski, radialni in tangencialni skrčki pa so bili za polovico manjši kot pri normalnem lesu. Krčenje kompresijskega lesa v vzdolžni smeri je bilo kar 6x večje kot pri normalnem. Naše raziskave so potrdile znatne razlike v sušilnih lastnostih normalnega in kompresijskega lesa. Pri kompresijskem smo izmerili nekoliko manjšo prepustnost za pline v prečnih smereh in 6x manjšo prepustnost za pline v smeri vlaken. Kompresijski les se v higroskopnem območju počasnejše suši, ima pa tudi manjši difuzijski koeficient, merjen v radialni smeri.

KEY WORDS DOCUMENTATION

ND	Dn
DC	UDC 630*847
CX	wood/normal/compression/drying/shrinkage/dimensional stability/diffusivity/permeability/ <i>Picea abies</i> Karst.
AU	STRLE, Tomo
AA	GORIŠEK, Željko supervisor/ČUFAR Katarina, co-advisor
PP	1000 Ljubljana, SLO, Rožna dolina, c. VIII/34
PB	University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
PY	2008
TI	DRYING CHARACTERISTICS OF COMPRESSION WOOD
DT	Graduation Thesis (University studies)
NO	IX, 41 p., 8 tab., 20 fig., 8 ann., 16 ref.
LA	sl
AL	sl/en
AB	Differences in physical properties of normal and compression wood of spruce (<i>Picea abies</i> Karst.) were studied. The density of compression wood compared to the normal was slightly higher. The volume, radial and tangential shrinkage of compression wood with respect to the normal wood was half smaller, while shrinkage in longitudinal direction was 6x greater than that of the normal wood. Our research confirmed also a significant difference in drying characteristics of normal and compression wood. Compression wood, compared to normal secondary xylem of spruce, has slightly lower gas permeability in transverse direction, and more than 6x lower gas permeability in fiber direction. Slower drying of compression wood in hygroscopic range was also confirmed, as well as lower diffusion coefficient measured in radial direction.

KAZALO VSEBINE

	str.
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO PREGLEDNIC	VII
KAZALO SLIK	VIII
KAZALO PRILOG	X
SEZNAM OZNAK	XI
str.	
1 UVOD IN POSTAVITEV PROBLEMA.....	1
1.1 POSTAVITEV PROBLEMA.....	1
1.2 PREDPOSTAVKA	1
1.3 CILJ NALOGE	2
2 SPLOŠNI DEL.....	3
2.1 ANATOMSKA ZGRADBA KOMPRESIJSKEGA LESA	3
2.2 KEMIJSKA SESTAVA KOMPRESIJSKEGA LESA.....	4
2.3 FIZIKALNE LASTNOSTI KOMPRESIJSKEGA LESA.....	5
3 MATERIAL IN METODE DELA.....	11
3.1 MATERIAL	11
3.2 PRIPRAVA VZORCEV	15
3.2.1 Krčenje in dimenzijska stabilnost.....	15
3.2.2 Permeabilnost	16
3.2.3 Difuzivnost.....	16
3.3 METODE IN POSTOPKI DELA	16
3.3.1 Metoda in potek določanja osnovnih fizikalnih lastnosti.....	16
3.3.2 Metoda in potek določanja sušilnih lastnosti	19
4 REZULTATI.....	27

4.1	OSNOVNE FIZIKALNE LASTNOSTI.....	27
4.2	SUŠILNE LASTNOSTI	28
5	RAZPRAVA.....	29
5.1	OSNOVNE FIZIKALNE LASTNOSTI.....	29
5.2	SUŠILNE LASTOSTI	34
6	SKLEPI	37
7	POVZETEK.....	38
8	VIRI	40

ZAHVALA**PRILOGE**

KAZALO PREGLEDNIC

	str.
Preglednica 1: Kemična zgradba kompresijskega lesa v primerjavi z normalnim lesom (Panshin in de Zeeuw, 1980)	5
Preglednica 2: Smrekovina (<i>Picea abies</i> Karst.); oznaka drevesa, izvor materiala, mesec poseka.	11
Preglednica 3: Značilnosti smrekovine, ki smo jo uporabili pri vzorčenju normalnega in kompresijskega lesa.	12
Preglednica 4: Oznake na prečnih prerezih kolutov za nadaljnjo izdelavo grobih vzorcev.	12
Preglednica 5: Kriteriji za ocenitev dimenzijske stabilnosti lesa (Torelli, 1983).....	17
Preglednica 6: Primerjava osnovnih fizikalnih lastnosti normalnega in kompresijskega lesa navadne smreke (ρ_0 – gostota v absolutnem suhem stanju, β_R , β_T , β_L – radialno, tangencialno in vzdolžno krčenje, q_R , q_T – radialni, tangencialni diferencialni nabrek, h_R , h_T – radialni, tangencialni koeficient nabrekanja, s – sorpcijski kvocient).	27
Preglednica 7: Primerjava sušilnih lastnosti normalnega in kompresijskega lesa navadne smreke (k_{gR} , k_{gT} , k_{gL} – plinska permeabilnost v radialni, tangencialni in vzdolžni smeri, D_R – difuzijski koeficient v radialni smeri pri desorpciji).	28
Preglednica 8: Ovrednotenje kriterijev za ocenitev dimenzijske stabilnosti lesa po Torelliju	33

KAZALO SLIK

str.

Slika 1: Traheide kompresijskega lesa (<i>Picea abies</i> Karst.). Zaradi povišane vsebnosti lignina so celične stene po obarvanju s safraninom intenzivno rdeče barve.	6
Slika 2: Prečni prerez kompresijskega lesa (<i>Picea abies</i> Karst.). Med zaobljenimi traheidami so intercelularni prostori.....	6
Slika 3: Lezna deformacija po 24-urnem obremenjevanju normalnega in kompresijskega lesa z vlažnostjo 9% in 18% (po Keith, 1974).....	8
Slika 4: Primerjava mehanosorptivnega obnašanja adultnega in kompresijskega lesa pri obremenitvi 10 % maksimalne porušitvene trdnosti (Houška, Bučar 1996)	9
Slika 5: Prečni prerez koluta A z nakazanim vzorčenjem.	13
Slika 6: Prečni prerez koluta B z nakazanim vzorčenjem.	13
Slika 7: Prečni prerez koluta C z nakazanim vzorčenjem.	14
Slika 8: Prečni prerez koluta D z nakazanim vzorčenjem.	14
Slika 9: Shema naprave za določevanje plinske permeabilnosti (M-manometer, V-ventil, FM-merilec pretoka, S-vzorec lesa, MC – merilna celica, PC-balastna posoda, VP-vakuumska črpalka)	21
Slika 10: Naprava za merjenje permeabilnosti lesnih vrst z višjim pretokom, s pomočjo rotometra. (1. vakuumska črpalka, 2. balastna posoda, 3. živosrebrni manometer, 4. merilna celica, 5. rotameter).	22
Slika 11: Naprava za merjenje permeabilnosti lesnih vrst z nižjimi pretoki, s pomočjo kalibrirane kapilare. (1. vakuumska črpalka, 2. balastna posoda, 3. živosrebrni manometer, 4. merilna celica, 5. kalibrirna kapilara).	23
Slika 12: Določitev difuzijskega koeficiente po nestacionarni metodi (Siau, 1995 ,str 154).	24
Slika 13: Primerjava radialnega (β_R), tangencialnega (β_T) in vzdolžnega krčenja (β_L) adultnega (NL) in kompresijskega (KL) smrekovega lesa.	29
Slika 14: Primerjava diferencialnega nabreka v tangencialni (14a) in radialni (14b) smeri adultnega (NL) in kompresijskega (KL) smrekovega lesa.	31
Slika 15: Primerjava koeficiente nabrekanja v tangencialni (15a) in radialni (15b) smeri adultnega (NL) in kompresijskega (KL) smrekovega lesa.	31

Slika 16: Primerjava sorpcijskega kvocienta (s) (16b) adultnega (NL) in kompresijskega (KL) smrekovega lesa.....	32
Slika 17: Primerjava radialne (17a) in tangencialne (17b) plinske permeabilnosti adultnega (NL) in kompresijskega (KL) smrekovega lesa.....	34
Slika 18: Primerjava vzdolžne plinske permeabilnosti (k_{gL}) adultnega (NL) in kompresijskega (KL) smrekovega lesa.....	34
Slika 19: Primerjava radialne difuzivnosti (D_R) adultnega (NL) in kompresijskega (KL) smrekovega lesa.....	35
Slika 20: Sušilna krivulja za tangencialne smrekove žaganice iz adultnega (NL) in kompresijskega (KL) smrekovega lesa, sušenega v konstantni klimi ($\varphi = 35\%$, $T = 20^\circ C$).....	36

KAZALO PRILOG

Priloga A: Izračuni osnovnih fizikalnih lastnosti normalnega lesa (ρ_0 – gostota v absolutnem suhem stanju, β_R , β_T , β_L , β_V – radialno, tangencialno, vzdolžno in volumensko krčenje)

Priloga B: Izračuni osnovnih fizikalnih lastnosti kompresijskega lesa (ρ_0 – gostota v absolutnem suhem stanju, β_R , β_T , β_L , β_V – radialno, tangencialno, vzdolžno in volumensko krčenje)

Priloga C: Izračuni osnovnih kazalnikov dimenzijske stabilnosti normalnega lesa (q_R , q_T – radialni, tangencialni diferencialni nabrek, h_R , h_T – radialni, tangencialni koeficient nabrekanja, s – sorpcijski kvocient)

Priloga D: Izračuni osnovnih kazalnikov dimenzijske stabilnosti kompresijskega lesa (q_R , q_T – radialni, tangencialni diferencialni nabrek, h_R , h_T – radialni, tangencialni koeficient nabrekanja, s – sorpcijski kvocient)

Priloga E: Izračuni osnovnih kazalnikov sušilnih lastnosti normalnega lesa (k_{gR} , k_{gT} , k_{gL} – plinska permeabilnost v radialni, tangencialni in vzdolžni smeri, D_R – difuzijski koeficient v radialni smeri pri desorpciji)

Priloga F: Izračuni osnovnih kazalnikov sušilnih lastnosti kompresijskega lesa (k_{gR} , k_{gT} , k_{gL} – plinska permeabilnost v radialni, tangencialni in vzdolžni smeri, D_R – difuzijski koeficient v radialni smeri pri desorpciji)

Priloga G: Izračuni lesne vlažnosti normalnega lesa v odvisnosti od časa uravnovešanja

Priloga H: Izračuni lesne vlažnosti kompresijskega lesa v odvisnosti od časa uravnovešanja

SEZNAM OZNAK

- > $\beta_R, \beta_T, \beta_L$ – radialni, tangencialni in vzdolžni skrček
- > $\varphi_{85\%}$ – relativna zračna vlažnost 85%
- > $\varphi_{35\%}$ – relativna zračna vlažnost 35%
- > ρ_0 – gostota v absolutno suhem stanju
- > A – površina [m^2]
- > D – povprečni difuzijski koeficient [m^2/s]
- > \bar{E} - povprečna brezdimenzijska sprememba mase
- > h_T, h_R - koeficient nabrekanja v tangencialni in radialni smeri
- > k_g - permeabilnost za pline [$m^3/(mPas)$]
- > $l_{85\%}$ - dimenzija uravnovešenega vzorca v vlažni klimi pri $\varphi = 85\%$ in $T = 20^\circ C$
- > $l_{35\%}$ - dimenzija uravnovešenega vzorca v suhi klimi pri $\varphi = 35\%$ in $T = 20^\circ C$
- > l_0 – dimenzija absolutno suhega vzorca (po sušenju pri $103 \pm 2^\circ C$)
- > l_{vl} – dimenzija vzorca v svežem stanju
- > M_t – količina adsorbirane ali desorbirane vode v času t ,
- > M_∞ – količina vse adsorbirane ali desorbirane vode,
- > m_0 – masa absolutno suhega vzorca (po sušenju pri $103 \pm 2^\circ C$)
- > ΔP - razlika tlakov [kPa]
- > P_{zun} - zunanji tlak [101,3 kPa]
- > Q - tok [m^3/h]
- > q_T, q_R - diferencialni nabrek v tangencialni in radialni smeri
- > s - sorpcijski kvocient
- > t – čas potovanja kapljice po kapilari v [s]
- > $u_{85\%}$ - ravnovesna vlažnost vzorca pri $\varphi = 85\%$ in $T = 20^\circ C$
- > $u_{35\%}$ - ravnovesna vlažnost vzorca pri $\varphi = 35\%$ in $T = 20^\circ C$
- > V_0 – volumen absolutno suhega vzorca (po sušenju pri $103 \pm 2^\circ C$)
- > V – volumen [m^3]

1 UVOD IN POSTAVITEV PROBLEMA

1.1 POSTAVITEV PROBLEMA

Kompresijski les se zaradi svojih značilnih strukturnih značilnosti razlikuje od normalnega lesa tudi v fizikalno-mehanskih lastnostih. V praksi je še zlasti neugodno večje vzdolžno krčenje kompresijskega lesa, ki pride najbolj do izraza v postopku sušenja, ali pa v spreminjačih se klimatskih pogojih. Večje vzdolžno krčenje kompresijskega lesa povzroča predvsem na daljših elementih njihovo sločenje. Medtem ko so v praksi večji vzdolžni skrčki kompresijskega lesa dobro znani in tudi raziskani, pa je literatura glede permeabilnih in difuzijskih lastnosti dokaj skopa.

1.2 PREDPOSTAVKA

Pričakujemo, da so zaradi znanih razlik v kemijski zgradbi kompresijskega lesa spremenjene tudi njegove sorpcijske karakteristike. Posledično se razlikujejo tudi krčitvene in nabrekovalne lastnosti. Zaradi drugačne anatomske in kemijske zgradbe kompresijskega od normalnega lesa pričakujemo tudi razlike v sušilnih karakteristikah, ki se odražajo v prevodnosti oz. permeabilnosti in difuzivnosti lesnega tkiva. »Negativne« lastnosti kompresijskega lesa se še posebej intenzivno odrazijo v procesu sušenja.

V praksi se srečujemo z daljšimi časi sušenja in uravnovešanja kompresijskega lesa. Pri sušenju prihaja do zvijanja kompresijskega lesa, kar pa znižuje kakovost in uporabnost takšnega lesa v končnih izdelkih. Podvrženost veženju in slabše trdnostne lastnosti kompresijskega lesa omejujejo njegovo uporabnost tudi za konstrukcijske namene. S poznavanjem sorpcijskih in sušilničnih lastnosti kompresijskega lesa se je mogoče izogniti njegovim negativnim učinkom ter tako povečati kakovost končnih izdelkov in (zmanjšati izmet) ter povečati izkoristke.

1.3 CILJ NALOGE

V nalogi smo glede na bolj ali manj že poznano anatomsko zgradbo kompresijskega lesa smrekovine proučili in pojasnili tudi sorpcijske in sušilne karakteristike reakcijskega lesa. Osredotočili smo se na proučevanje lastnosti, ki so v strokovni literaturi manj poznane. Da bi čim bolje okarakterizirali sušilne lastnosti kompresijskega lesa smo primerjano z normalnim lesom raziskali:

- > volumensko in linearno krčenje v radialni ter tangencialni smeri, s posebnim poudarkom na izrazitem vzdolžnem krčenju,
- > kazalnike dimenzijske stabilnosti, kot so diferencialni nabrek in koeficienta nabrekanja v radialni in tangencialni ter sorpcijski kvocient, kot dober pokazatelj vpijanja vlage iz okolice,
- > permeabilnost lesnega tkiva kot najpomembnejši dejavnik pretoka proste vode v lesu in
- > difuzivnost lesnega tkiva, kot najpomembnejši dejavnik pretoka vezane vode v lesu.

2 SPLOŠNI DEL

Reakcijski les pri iglavcih nastaja na spodnji, tlačni strani ukrivljenih debel ali vej. Zaradi njegove lokacije in obremenitve so ga poimenovali kompresijski les. Nagnjeno deblo oz. veja je ekscentrična z daljšim polmerom na spodnji strani. Les je rdečkasto-rjave barve, brez leska, ima mrtev izgled, prehod iz ranega v kasni les je manj izrazit (Torelli, 1986). Delež kasnega lesa je v kompresijskem lesu povišan. Gostota je visoka, trdnostne lastnosti - z ozirom na gostoto - so nizke. Trdota je večja ter obdelovalnost težja (Bodig in Jayne, 1982). Kompresijski les se pogosteje pojavlja pri hitro rastočih drevesnih vrstah. V rasti zatrta drevesa vsebujejo zelo malo kompresijskega lesa. Kompresijski les lahko nastane tudi v koreninah nekaterih iglavcev (Panshin in de Zeeuw, 1980).

2.1 ANATOMSKA ZGRADBA KOMPRESIJSKEGA LESA

Traheide kompresijskega lesa so v prečnem prerezu zaobljene. Med njimi so intercelularni prostori, ki so najizrazitejši v delu branike, kjer so celične stene traheid najdebelejše (Torelli, 1986). Prvih nekaj traheid ranega lesa ima celične stene poligonalne, zato intercelularni prostori niso vidni, ravno tako niso opazni pri zadnjih sploščenih traheidah kasnega lesa ob zaključku branike. Pri nekaterih vrstah iglavcev so lahko intercelularni prostori delno ali povsem zapolnjeni z ligninom ali pektinskimi substancami. Debeline celičnih sten traheid kompresijskega lesa so lahko v najtemnejše obarvanih delih branike približno dvakrat večje kot pri traheidah normalnega lesa (Bodig in Jayne, 1982). Radialne dimenziije traheid znotraj branike zelo malo variirajo, razen ob letnici. V povprečju so radialne in tangencialne dimenziije manjše kot pri traheidah normalnega lesa. Traheide kompresijskega lesa so 10 do 40 odstotkov krajše od traheid normalnega lesa, kar je odraz splošnega zmanjšanja celičnih dolžin, ki spremlja pospešeno rast (Panshin in de Zeeuw, 1980).

Sekundarna celična stena traheid kompresijskega lesa sestoji iz zunanjega sloja S1 ter modificiranega srednjega sloja S2. Notranji sloj S3 sekundarne stene manjka. Sloj S1 je lahko debelejši kot sicer (Torelli, 1986). Mikrofibilarni kot v modificiranem sloju S2

sekundarne stene je pri kompresijskem lesu večji kot pri normalnem adultnem lesu in znaša približno 45 stopinj glede na celično os (Plomion in sod., 2001). V sloju S2 so prisotne helikalne razpoke, ki so v resnici radialne luknje (votline) in nastanejo med oblikovanjem sloja S2 sekundarne stene zaradi lignina, ki se v velikih količinah odlaga, in povzroča prečno natezno obremenitev na celično steno. Tvorba votlinic se prične z lateralnim krčenjem celuloznih lamel v sloju S2 sekundarne stene (Panshin in de Zeeuw, 1980).

Trakovi oz. trakovne celice kompresijskega lesa se navadno ne razlikujejo od celic normalnega lesa. Les, ki se nahaja na nasprotni strani kompresijskega lesa, na strani s krajšim polmerom, se tudi nekoliko razlikuje od normalnega lesa. Širine branik se spreminja, ravno tako delež kasnega lesa. Sloj S2 sekundarne stene je debelejši kot v normalnem lesu (Panshin in de Zeeuw, 1980).

Spremembe v strukturi celične stene med prehodom iz normalnega v kompresijski les si sledijo v naslednjem vrstnem redu:

- I. sloj S3 ne nastane,
- II. intenzivnost lignifikacije ter debelina celične stene se poveča,
- III. nastanek helikalnih razpok in reber,
- IV. traheide se zaobljijo.

Prehod iz kompresijskega lesa v normalnega:

- I. helikalne razpoke izginejo,
- II. pojavi se sloj S3,
- III. debelina celične stene se zmanjša,
- IV. intenzivnost lignifikacije se zmanjša (Yoshizawa in Idei, 1987).

2.2 KEMIJSKA SESTAVA KOMPRESIJSKEGA LESA

Kemijska zgradba kompresijskega lesa je izrazito drugačna od zgradbe normalnega lesa (Preglednica 1) (Panshin in de Zeeuw, 1980). Zvišana je vsebnost lignina (5-10%), ki vsebuje več p-hidroksifenilnih enot (Bodig in Jayne, 1982; Plomion in sod., 2001). Skladno s tem je zmanjšana vsebnost celuloze. Galaktoze je več kot sicer. Te spremembe

zmanjšujejo primernost kompresijskega lesa za celulozno in papirno industrijo (Panshin in de Zeeuw, 1980).

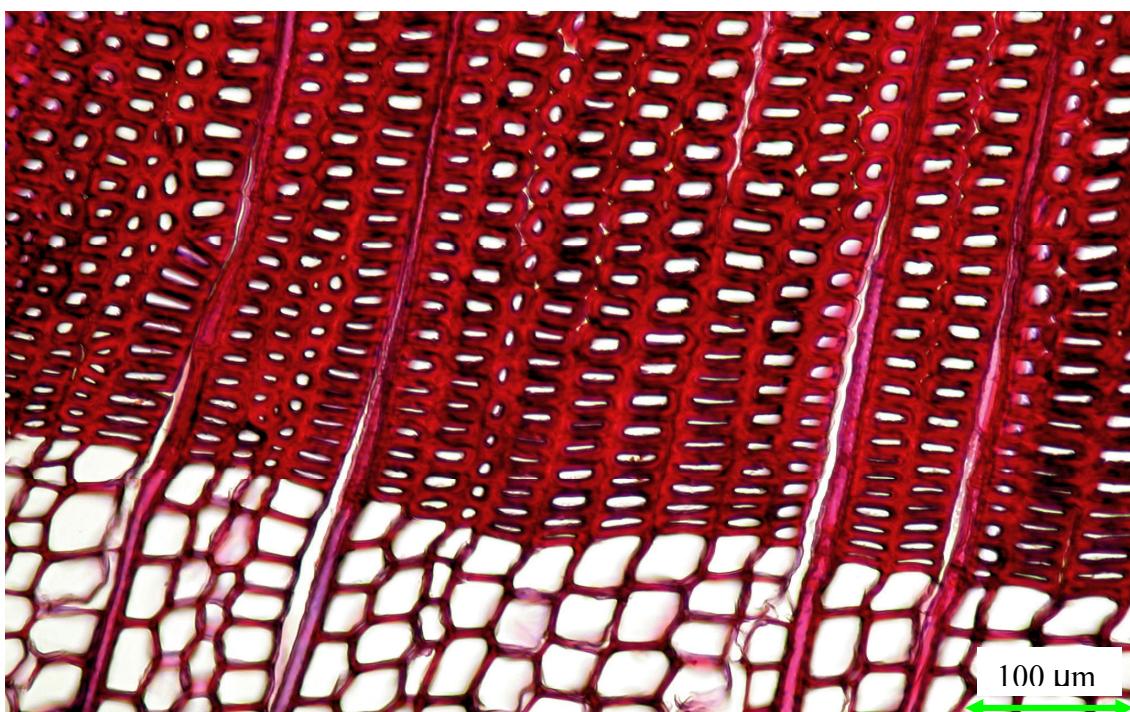
Struktura združene srednje lamele kompresijskega lesa je podobna zgradbi normalnega lesa. Sloj S1 je pri kompresijskem lesu debelejši ter ima približno enako mikrofibrilarno organizacijo, vendar pa je vsebnost lignina znižana. Modificiran sloj S2 je odebelen, v njem je manj celuloze kot običajno in stopnja kristaliničnosti je manjša. Lignin je v sloju S2 visoko koncentriran (Panshin in de Zeeuw, 1980).

Preglednica 1: Kemjska zgradba kompresijskega lesa v primerjavi z normalnim lesom (Panshin in de Zeeuw, 1980).

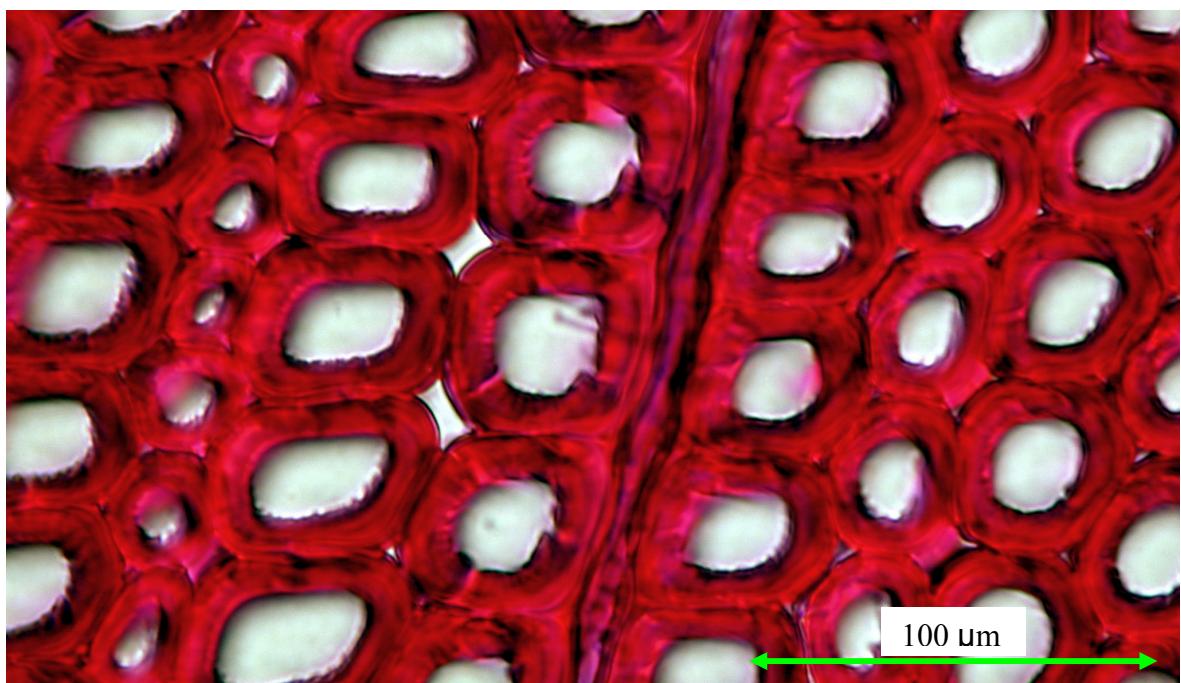
	Normalen les		Kompresijski les	
	povprečje	rang	povprečje	rang
Lignin [%]	28,8	24,2 – 33,3	37,7	30,9 – 40,9
Celuloza [%]	44,6	37,7 – 60,6	34,9	27,3 – 53,7
Galaktoza [%]	2,2	1,0 – 3,8	10,0	7,1 – 12,9

2.3 FIZIKALNE LASTNOSTI KOMPRESIJSKEGA LESA

V kompresijskem lesu so celične stene traheid v splošnem debelejše od sten normalnega lesa (Slika 1 in Slika 2) in vsebujejo približno tretjino več celičnega materiala, kar se kaže v večji gostoti kompresijskega lesa v primerjavi z normalnim (Panshin in de Zeeuw, 1980).



Slika 1: Traheide kompresijskega lesa (*Picea abies* Karst.). Zaradi povišane vsebnosti lignina so celične stene po obarvanju s safraninom intenzivno rdeče barve.



Slika 2: Prečni prerez kompresijskega lesa (*Picea abies* Karst.). Med zaobljenimi traheidami so intercelularni prostori.

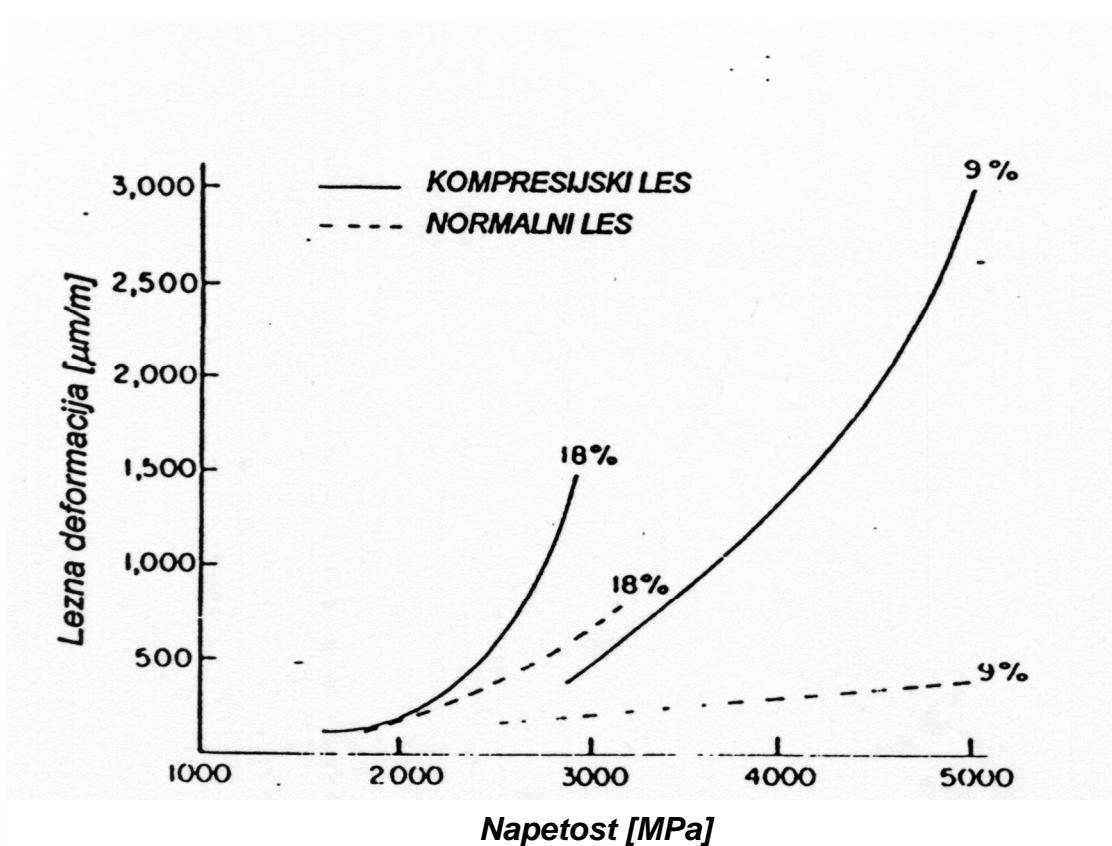
Krčenje in nabrekanje kompresijskega lesa v longitudinalni smeri je precej večje od krčenja normalnega lesa. Povezano je z zmanjšanim lateralnim krčenjem oz. nabrekanjem, ki je približno za polovico manjše od krčenja (nabrekanja) normalnega lesa (Panshin in de Zeeuw, 1980). Povečan skrček kompresijskega lesa v longitudinalni smeri povzroča krivljenje in zvijanje desk, ki ga vsebujejo (Bodig in Jayne, 1982). Aksialni skrček znaša tudi 6 do 7% pri kompresijskem lesu, pri normalnem lesu pa 0,1 do 0,2% in je zanemarljiv (Torelli, 1986). Na stiku kompresijskega lesa z normalnim les pogosto razpoka. Spremenjene karakteristike kompresijskega lesa so povezane z večjim mikrofibrilarnim kotom v sloju S₂ (približno 45°) sekundarne stene traheid, ki prispeva k večjim dimenzijskim spremembam v longitudinalni smeri (Panshin in de Zeeuw, 1980).

Ravnovesna vlažnost kompresijskega lesa je pri istih pogojih (relativna zračna vlažnost, temperatura) nekoliko višja kot pri normalnem lesu (Panshin in de Zeeuw, 1980). Točka nasičenja celičnih sten kompresijskega lesa je nižja kot pri normalnem lesu zaradi povišane vsebnosti lignina, ki je manj higroskopen. Permeabilnost v vzdolžni smeri je pri kompresijskem lesu zmanjšana verjetno zaradi manjših lumnov ter manjših pikenc (Panshin in de Zeeuw, 1980).

Kompresijski les je v svežem stanju bolj žilav od normalnega lesa in se bolje obnaša pri upogibu in tlaku paralelno z vlakni. Vendar se trdnostne lastnosti kompresijskega lesa s sušenjem počasneje povečujejo kot pri normalnem lesu (Panshin in de Zeeuw, 1980). Glede na visoko gostoto so lastnosti kompresijskega lesa slabše, kot bi pričakovali. Modul elastičnosti ter natezna trdnost paralelno z vlakni sta zmanjšana (Bodig in Jayne, 1982). Udarna žilavost je nižja (Torelli, 1986). Nižja natezna trdnost vzdolž celične osi je posledica helikalnih razpok v celičnih stenah traheid kompresijskega lesa. Razlogi za slabše trdnostne lastnosti kompresijskega lesa (razen tlačne trdnosti pravokotno na vlakna) so v strukturni in kemični zgradbi (Dinwoodie, 2000); zmanjšana je vsebnost celuloze (okrog 10 %), mikrofibrilarni kot je večji (okrog 45°) in pojavijo se helikalne razpoke. Povečana vsebnost lignina vpliva na povečano tlačno trdnost kompresijskega lesa pravokotno na vlakna. Prostori med mikrofibrilami so bolj zapolnjeni z ligninom (velika količina celičnega materiala), kar dovoljuje večje tlačne obremenitve na lesno tkivo, preden se poruši (Panshin in de Zeeuw, 1980). Konstrukcijski deli, ki vsebujejo večje

količine kompresijskega lesa, niso primerni za uporabo zaradi slabših mehanskih lastnosti ter povečanega longitudinalnega skrčka. Pri sušenju takšnega lesa se pojavijo razpoke, distorzije, zvijanje, zato les ni primeren za konstrukcijske namene (Bodig in Jayne, 1982). Trdota kompresijskega lesa je večja in obdelava težavnejša. Zlom je navadno kratko vlaknat (Torelli, 1986).

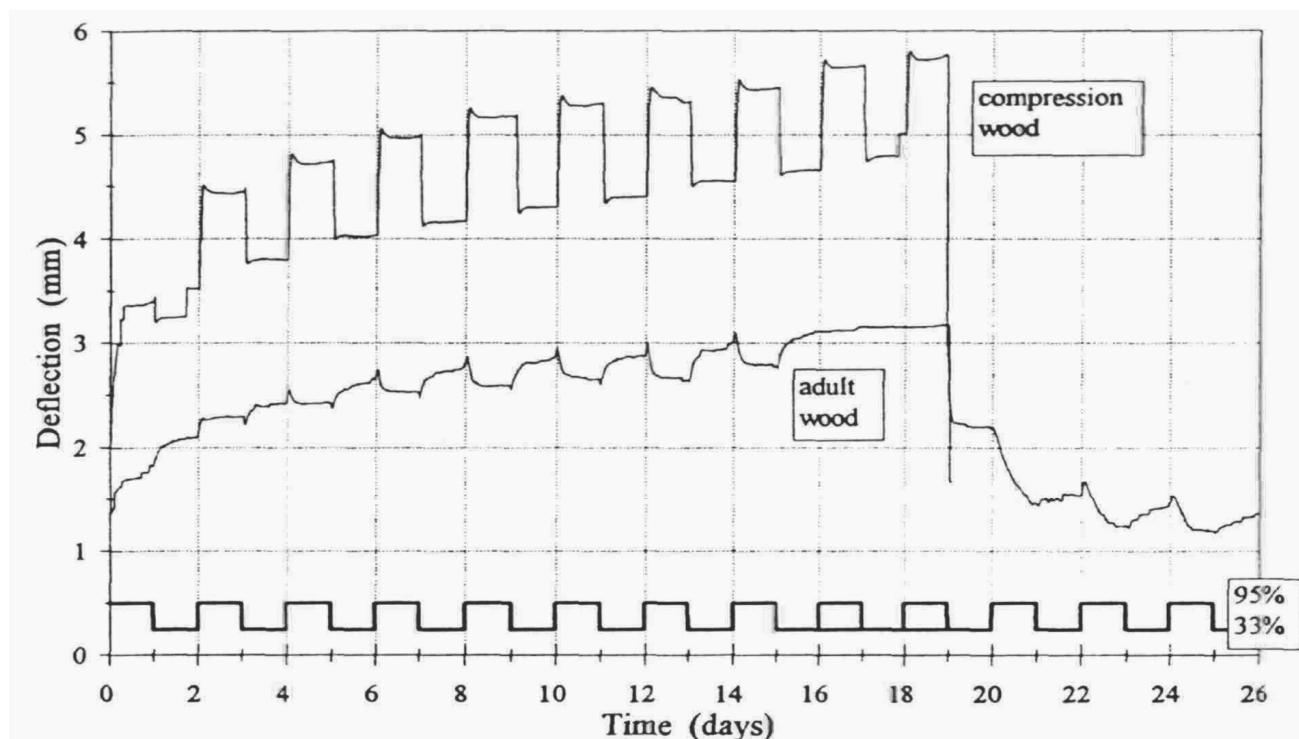
Lezenje kompresijskega lesa je še dokaj nepojasnjeno (Slika 3). Keith (1974) je primerjal lezenje kompresijskega lesa z rezultati, ki jih je dobil pri predhodnih preiskavah (Keith, 1974) normalnega lesa. Pri vzdolžni tlačni obremenitvi (24 ur) je meril deformacije (lezenje) na vzorčih vlažnosti 9 in 18%.



Slika 3: Lezna deformacija po 24-urnem obremenjevanju normalnega in kompresijskega lesa z vlažnostjo 9% in 18% (po Keith, 1974).

Ugotovil je, da so deformacije pri lezenju kompresijskega lesa značilno večje od deformacij nastalih pri lezenju normalnega lesa. Primerjava vzorcev z 9% in 18% vlažnostjo pri enaki napetosti pokaže, da imajo vlažni vzorci višjo raven deformacije, razmerje med deformacijami pa je lahko celo 1:10.

Zanimiva je tudi študija Houške in Bučarja (1996), ki sta opazovala mehanosorptivno lezenje adultnega in kompresijskega lesa (Slika 4). Meritve lezenja, pri konstantni obremenitvi na upogib ($\mathbf{S}_{up.} = 0,1 \cdot \mathbf{S}_{max.}$), so potekale na smrekovih vzorčkih preseka 10 x 5 mm, v komorah s spremenljivo klimo (33% in 95% relativne zračne vlažnosti).



Slika 4: Primerjava mehanosorptivnega obnašanja adultnega in kompresijskega lesa pri obremenitvi 10 % maksimalne porušitvene trdnosti (Houška, Bučar 1996)

Meritve so pokazale, da se pri mehanosorptivnem lezenju kompresijski les obnaša popolnoma drugače kot normalen les. V klimi z relativno zračno vlažnostjo 95% (adsorpcija) se deformacija normalnega lesa zmanjša, medtem ko se pri kompresijskem

lesu močno poveča. Pri pogojih 33% vlažnosti zraka (desorpcija) se zgodi ravno obratno. Tudi v tem primeru se je izkazalo, da so lezne deformacije kompresijskega lesa na splošno večje od deformacij normalnega lesa. Razloge za nenavadno mehanosorptivno obnašanje avtorja navajata v anatomski zgradbi lesa, predvsem v velikem mikrofibrilnem kotu sloja S2.

3 MATERIAL IN METODE DELA

3.1 MATERIAL

V diplomsko nalogu smo vključili izključno adultni kompresijski les smrekovine (*Picea abies* Karst.). V zimski sečnji smo ob pomoči gozdarjev na terenu pridobili krajše smrekove hlode dolžine približno 70 cm, izžagane iz več dreves, iz katerih smo izdelali tanjše kolute debeline 20 cm za pripravo vzorcev. Izvor materiala in datumi poseka so opisani v preglednici 2. Koluta A in B smo dobili na sečiščih GG Ljubljana, koluta C in D pa na zasebnih skladiščih, vse s predhodnim dogovorom z lastniki.

Preglednica 2: Smrekovina (*Picea abies* Karst.); oznaka drevesa, izvor materiala, mesec poseka.

oznaka drevesa	izvor materiala	čas poseka
A	Rovte pri Logatcu (gozd)	zimska sečnja
B	Logatec (gozd)	zimska sečnja
C	Rovte pri Logatcu (skladišče)	zimska sečnja
D	Logatec (skladišče)	zimska sečnja

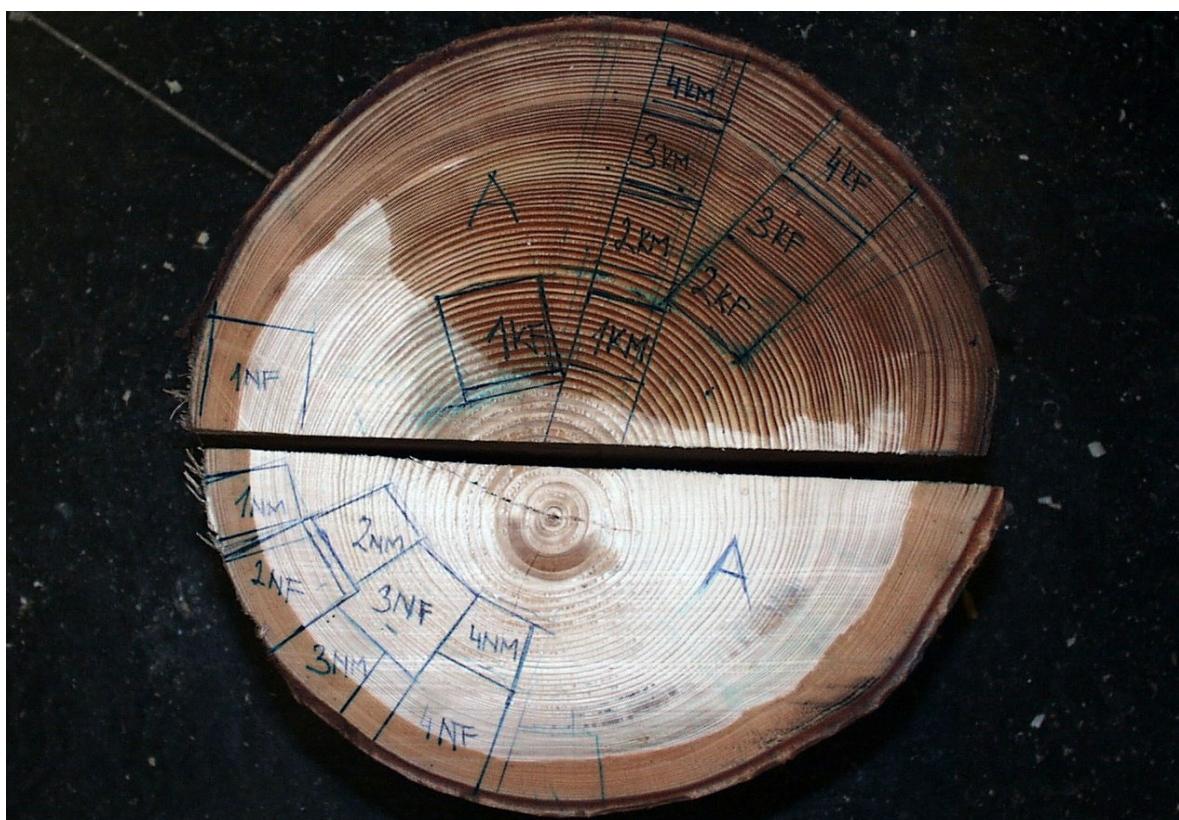
Iz debel smo na mestih, kjer je bil viden kompresijski les, z motorno žago grobo izžagali od 40 do 70 cm dolge kolute (Preglednica 3), jih zaščitili proti sušenju ter pripeljali do mizarske delavnice oddelka za lesarstvo. Pri izbiri lesa za izdelavo vzorcev smo upoštevali čim manjša odstopanja od pravilne rasti lesa. V izbor je tako prišel material oz. les z enakomerno rastjo skozi celoten prerez. Tako smo na prečnih prerezih kolutov - Preglednica 4 - označili najboljše lokacije za nadaljnjo izdelavo grobih vzorcev, kar je razvidno na slikah 5, 6, 7 in 8.

Preglednica 3: Značilnosti smrekovine, ki smo jo uporabili pri vzorčenju normalnega in kompresijskega lesa.

		Normalen les			Kompresijski les		
št. vzorca	oznaka koluta	vzorec vsebuje: beljavo	vzorec vsebuje: jedrovino	opomba	vzorec vsebuje: beljavo	vzorec vsebuje: jedrovino	opomba
1	A	delno	v večini	a) Drevo je bilo rahlo aksialno zavito.	ne	da	a) Zaporedni vzorci, ki si sledijo iz stržena proti skorji. b) Drevo je bilo rahlo aksialno zavito.
2	A	delno	v večini		ne	da	
3	A	ne	da		ne	da	
4	A	malo	veliko		da	da	
5	C	delno	v večini	zaporedna vzorca	ne	da	vzporedna vzorca (v tangencialni smeri)
6	C	ne	da	zaporedna vzorca	ne	da	vzporedna vzorca
7	D	delno	v večini	vzporedna vzorca	delno	v večini	vzporedna vzorca
8	B	da	da	vzporedna vzorca	ne	da	

Preglednica 4: Oznake na prečnih prerezih kolutov za nadaljnjo izdelavo grobih vzorcev.

oznake na slikah 5, 6, 7, 8.	opis
N	normalni les
K	kompresijski les
F	fizikalne lastnosti
M	mehanske lastnosti
A, B, C, D	oznaka drevesa
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	številka vzorca



Slika 5: Prečni prerez koluta A z nakazanim vzorčenjem.



Slika 6: Prečni prerez koluta B z nakazanim vzorčenjem.



Slika 7: Prečni prerez koluta C z nakazanim vzorčenjem.



Slika 8: Prečni prerez koluta D z nakazanim vzorčenjem.

3.2 PRIPRAVA VZORCEV

Priprava vzorcev je potekala enako za normalen kot kompresijski les smreke in za vsako metodo preizkušanja posebej. Pri pripravljanju vzorcev smo se poskušali izogniti vsem anomalijam lesa, ki bi že po predhodnih predvidevanjih vplivale na rezultate. Še posebej pozorni in natančni smo morali biti pri izdelavi vzorcev, ki so vsebovali kompresijski les. Vzorci so bili orientirani v anatomske smereh. Grobo izdelane vzorce z nadmerami smo uravnovešali v normalni klimi, pri $\phi = 65\%$ in $T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$, ki smo jo dosegli nad nasičeno raztopino soli natrijevega nitrita (NaNO_2). Po dobrih treh tednih, ko so se vzorci uravnovesili, smo iz grobih vzorcev izdelali vzorce, kot jih je zahtevala posamezna metoda nato smo jih še dodatno uravnovesili v isti klimi do ponovne vzpostavite konstantne mase. Najprej smo naredili vzorce za določanje krčenja in dimenzijske stabilnosti lesa. Iz preostanka materiala pa smo naredili vzorce, ki smo jih uporabili za določanje transportnih lastnosti vode – permeabilnosti in difuzivnosti.

3.2.1 Krčenje in dimenzijska stabilnost

Vzorci za določanje celotnih skrčkov in kazalnikov dimenzijske stabilnosti so bili narejeni iz predhodno pripravljenega ter anatomsko orientiranega materiala. Za radialno in tangencialno krčenje smo uporabili vzorce dimenzij $35 \times 35 \times 15 \text{ mm}$ (RxTxL), za vzdolžno krčenje pa vzorce dimenzij $15 \times 15 \times 100 \text{ mm}$ (RxTxL). Vsi so bili uravnovešeni pri normalni klimi ($T = 20^\circ\text{C}$; $\phi = 65\%$). Naredili smo po 16 vzorcev za vsako meritev, tako da smo imeli 8-krat po dva zaporedna vzorca za vsako kategorijo lesa. Po uravnovešanju v normalni klimi smo polovico vzorcev izpostavili višji relativni zračni vlažnosti ($\phi = 85\%$, $T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$), drugo polovico pa nižji ($\phi = 35\%$; $T = 20^\circ\text{C}$). Po doseženem ravnovesnem stanju je sledilo merjenje, nato pa smo vzorce v klimah zamenjali; tiste iz nižje relativne zračne vlažnosti smo prestavili v višjo in obratno. Po vsakem uravnovešanju smo vzorce stehtali na $0,0001 \text{ g}$ natančno in jim zmerili dimenzijske natančno na $0,01 \text{ mm}$. Temu je sledilo sušenje vzorcev do absolutno suhega stanja v sušilniku pri $T = 103 \pm 2^\circ\text{C}$. Postopek je bil enak za kompresijski kot normalni les.

3.2.2 Permeabilnost

Za določanje prevodnosti oz. permeabilnosti lesa smo pripravili za vsako anatomske smer po 8 vzorcev normalnega in 8 vzorcev kompresijskega lesa dimenzijs 15x15x10 mm za merjenje vzdolžne prevodnosti in 15x15x4 mm za merjenje prevodnosti v radialni oz. tangencialni smeri. Vzorci so bili pripravljeni na 0,1 mm natančno, da smo zagotovili prileganje in tesnjenje v merilni celici permeabilnostne naprave.

3.2.3 Difuzivnost

Za določanje difuzijskih koeficientov smo naredili 16 vzorcev dimenzijs 10x20x100 mm ($R \times T \times L$), ki so bili uravnovešeni v normalni klimi. Polovico vzorcev smo nato uravnovesili na zgornji meji kvazilinearega območja ($\varphi = 85\%$, $T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$, nasičena raztopina ZnSO_4), drugo polovico pa na spodnji meji ($\varphi = 35\%$, $T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$, nasičena raztopina MgCl_2). Po uravnovešanju ter premazanju vzorcev z epoksi smo po petih ploskvah (s tem smo omogočili izhlapevanje oz. navlažitev samo s tangencialne površine, to je v radialni smeri) smo vzorce prestavili v drugo klimo (iz $\varphi = 85\%$ v $\varphi = 35\%$) in obratno. V postopku uravnovešanja smo vzorce tehtali v postopno podaljšanih časovnih intervalih. Izpostavitev je trajala do doseženega ravnovesja, nato je sledilo tehtanje vzorcev. Postopek je bil tako enak za kompresijski in normalen les.

3.3 METODE IN POSTOPKI DELA

3.3.1 Metoda in potek določanja osnovnih fizikalnih lastnosti

Za določevanje osnovnih fizikalnih lastnosti - kazalnikov krčenja in dimenzijske stabilnosti - smo uporabili metodo, pri kateri vzorce izpostavimo različnim klimam. V našem primeru smo imeli osemkrat po dva zaporedno pripravljeni vzorce – za vsako anatomske smer – ki smo jih izpostavili različnim klimam, tako da smo vzorce po uravnovešanju prestavili v

komoro z nižjo relativno zračno vlažnostjo. Na koncu smo vse vzorce sušili do absolutno suhega stanja.

Dimenzijsko stabilnost preizkušancev smo ovrednotili s spodaj omenjenimi kazalniki dimenzijske stabilnosti. Rezultate smo primerjali s kriteriji, kot jih priporoča Torelli s sodelavci (1983) (Preglednica 5):

- > diferencialno nabrekanje v radialni in tangencialni smeri (q_T, q_R) – nam podaja spremembo dimenzij lesa, če se lesna vlažnost spremeni za 1 %,
- > koeficient nabrekanja v radialni in tangencialni smeri (h_T, h_R) – nam nakazuje spremembo dimenzijske v %, če se relativna zračna vlažnost spremeni za 1 % ,
- > sorpcijski kvocient (s) – nam pove, za koliko se spremeni lesna vlažnost, če se relativna zračna vlažnost spremeni za 1 %.

Preglednica 5: Kriteriji za ocenitev dimenzijske stabilnosti lesa (Torelli s sodelavci, 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	$> 2,0$	$1,6 - 2,0$	$< 1,6$	
$s [\%/\%]$	$> 0,16$	$0,15 - 0,16$	$0,14 - 0,15$	$< 0,14$

Kazalnike dimenzijske stabilnosti smo izračunali po naslednjih enačbah:

Diferencialni nabrek "q"

$$q = \frac{\Delta\alpha}{\Delta u} = \frac{(l_{85\%} - l_{35\%})}{l_0 \times (u_{85\%} - u_{35\%})} \times 100 \quad \left[\frac{\%}{\%} \right] \quad (1)$$

Nabrekovalni koeficient "h"

$$h = \frac{\Delta\alpha}{\Delta\varphi} = \frac{(l_{85\%} - l_{35\%})}{l_0 \times (\varphi_{85\%} - \varphi_{35\%})} \times 100 \quad \left[\frac{\%}{\%} \right] \quad (2)$$

Sorpcijski kvocient "s"

$$s = \frac{\Delta u}{\Delta\varphi} = \frac{(u_{85\%} - u_{35\%})}{(\varphi_{85\%} - \varphi_{35\%})} \times 100 \quad \left[\frac{\%}{\%} \right] \quad (3)$$

Skrčki

$$\beta_{L,R,T} = \frac{l_{vl} - l_0}{l_0} \times 100 \quad [\%] \quad (4)$$

Gostota

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (5)$$

V zgornjih enačbah pomenijo:

- > $l_{85\%}$ – dimenzija uravnovešenega vzorca v vlažni klimi pri $\varphi = 85\%$ in $T = 20^\circ C$
- > $l_{35\%}$ – dimenzija uravnovešenega vzorca v suhi klimi pri $\varphi = 35\%$ in $T = 20^\circ C$
- > $u_{85\%}$ – ravnolesna vlažnost vzorca pri $\varphi = 85\%$ in $T = 20^\circ C$
- > $u_{35\%}$ – ravnolesna vlažnost vzorca pri $\varphi = 35\%$ in $T = 20^\circ C$
- > $\varphi_{85\%}$ – relativna zračna vlažnost 85%
- > $\varphi_{35\%}$ – relativna zračna vlažnost 35%
- > l_{vl} – dimenzija vzorca v svežem stanju
- > l_0 – dimenzija absolutno suhega vzorca (po sušenju pri $103 \pm 2^\circ C$)
- > m_0 – masa absolutno suhega vzorca (po sušenju pri $103 \pm 1^\circ C$)
- > V_0 – volumen absolutno suhega vzorca (po sušenju pri $103 \pm 1^\circ C$)
- > ρ_0 – gostota v absolutno suhem stanju

Potek poizkusa

Merjenje kazalcev dimenzijske stabilnosti je potekalo po že opisanih korakih, kjer smo vzorce najprej uravnovesili v normalni klimi z vlažnostjo $\varphi = 65\%$ in temperaturo $T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$, ki smo jo dosegli z nasičeno raztopino NaNO_2 . Uravnovešanje je potekalo do dosežene konstantne mase. Po času uravnovešanja smo vzorce za določevanje skrčkov stehtali in jim izmerili dimenzijske ter jih polovico izpostavili klimi z nižjo vlažnostjo $\varphi = 35\%$, ki smo jo dosegli nad nasičeno raztopino magnezijevega klorida (MgCl_2) in drugo polovico višji relativni vlažnosti vlažnostjo $\varphi = 85\%$, oboje pri temperaturi $T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$. Uravnovešanje na omenjenih klimah je potekalo do dosežene konstantne mase. Vzorce smo nato stehtali in jim izmerili dimenzijske. Nato pa smo vzorce v klimah zamenjali; tiste iz nižje relativne zračne vlažnosti smo prestavili v višjo in obratno. Na koncu je sledilo sušenje vseh vzorcev v sušilniku. Sušenje je potekalo postopno, vzorce smo prvi dan sušili pri temperaturi $T = 65 \pm 1^\circ\text{C}$, drugi dan pa smo temperaturo dvignili na $T = 103 \pm 2^\circ\text{C}$ ter vzorce sušili še dva dneva, v katerih smo opravili še kontrolna merjenja.

Ohlajenim vzorcem smo nato še enkrat določili maso in dimenzijske, kot v predhodnih merjenjih. Iz dobljenih podatkov celotnega postopka ugotavljanja dimenzijske stabilnosti lesa smo izračunali kazalnike dimenzijske stabilnosti, skrčke in gostoto absolutno suhega vzorca.

3.3.2 Metoda in potek določanja sušilnih lastnosti

Permeabilnost

Določanje prevodnosti lesnega tkiva je potekalo na aparaturi za merjenje permeabilnosti. Uporabili smo vzorce, ki so bili uravnovešeni na normalni klimi pri temperaturi $T = 20^\circ\text{C}$ in $\varphi = 65\%$ in jih vstavili v merilno celico ter s pomočjo aparature izmerili pretok in razliko tlakov, ki sta nam omogočila izračunati koeficient permeabilnosti (Enačba 6). Poudariti je potrebno, da smo imeli na razpolago aparaturo, s katero je mogoče določiti permeabilnost plinov in ne tekočin. Za izračun permeabilnosti smo uporabili Darcyev zakon, ki ob upoštevanju stisljivosti plinov preide v naslednjo enačbo (Siau, 1984):

$$k_g = \frac{2QLP_{zun}}{A\Delta P(2P_{zun} - \Delta P)} \left[\frac{m^3}{mPas} \right] \quad (6)$$

kjer je:

- > k_g – permeabilnost za pline [$m^3/(mPas)$]
- > Q – tok [m^3/h]
- > L – dolžina vzorca [m]
- > A – površina [m^2]
- > ΔP – razlika tlakov [kPa]
- > P_{zun} – zunanji tlak [101,3 kPa]

Potek poizkusa

Pripravljen vzorec zahtevanih dimenzijs smo s pomočjo tesnila vpeli v merilno celico in zagotovili tok zraka v radialni, tangencialni in longitudinalni smeri. Shematski potek poizkusa je viden na sliki 9. Merilna celica je bila povezana z balastno posodo, preko katere smo s pomočjo črpalke ustvarili podtlak in na manometru odčitali razliko tlakov. Na drugi strani pa je bila merilna celica povezana z rotometrom, napravo za merjenje zračnega toka (Slika 10). Permeabilnost lesa smo izračunali po enačbi (6).

V primeru radialne in tangencialne smeri smo se soočili s tako nizkim pretokom zraka skozi les, da ga z rotometrom nismo zaznali, zato smo pretok izmerili s pomočjo merilne kapilare. Merili smo čas potovanja kapljice obarvanega etanola po kapilari znanega premera (Slika 11). Uporabili smo etanol, ki ima nizko površinsko napetost. S pomočjo enačbe (7) smo izračunali pretok zraka.

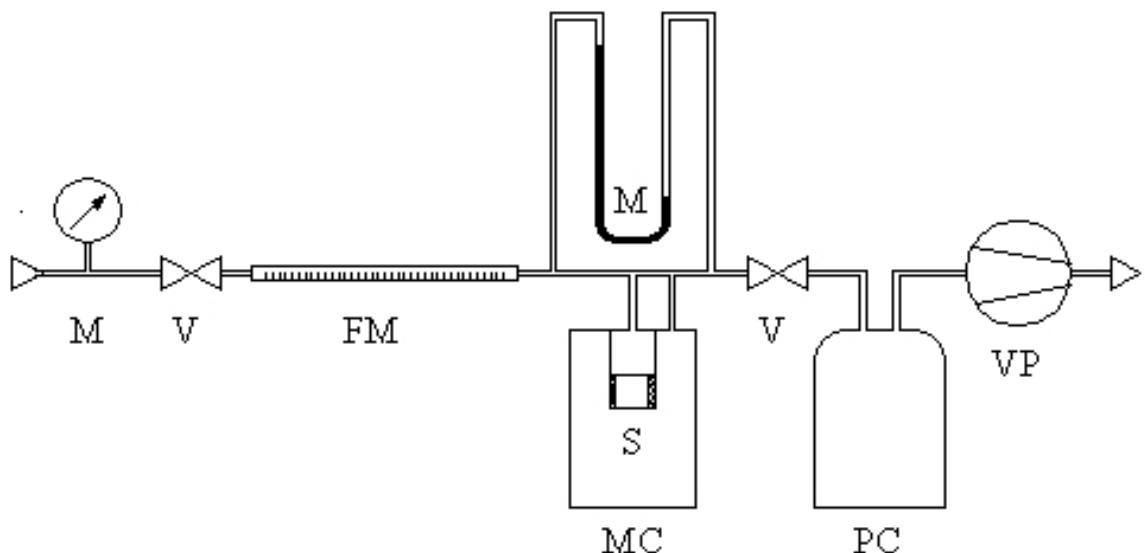
Podatek o pretoku zraka smo potrebovali za izračun permeabilnosti po enačbi (6).

Enačba za izračun pretoka:

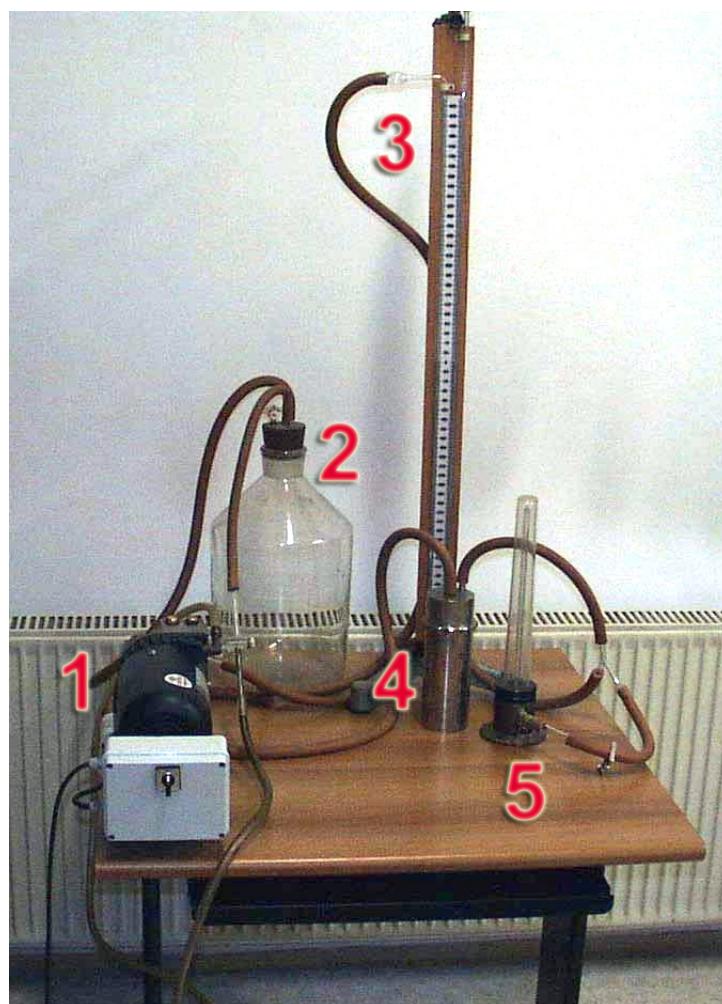
$$Q = \frac{V}{t} = \frac{L \cdot d^2 \cdot \pi}{4 \cdot t} \left[\frac{m^3}{h} \right] \quad (7)$$

kjer je:

- > $d = 0,09\text{mm}$ – premer kapilare [mm]
- > V – volumen [m^3]
- > L – dolžina kapilare [mm]
- > t – čas potovanja kapljice po kapilari v [s]
- > Q – tok [l/h]



Slika 9: Shema naprave za določevanje plinske permeabilnosti (M-manometer, V-ventil, FM-merilec pretoka, S-vzorec lesa, MC – merilna celica, PC-balastna posoda, VP-vakuumnska črpalka)



Slika 10: Naprava za merjenje permeabilnosti lesnih vrst z višjim pretokom, s pomočjo rotametra. (1. vakuumska črpalka, 2. balastna posoda, 3. živosrebrni manometer, 4. merilna celica, 5. rotameter).



Slika 11: Naprava za merjenje permeabilnosti lesnih vrst z nižjimi pretoki, s pomočjo kalibrirane kapilare. (1. vakuumska črpalka, 2. balastna posoda, 3. živosrebrni manometer, 4. merilna celica, 5. kalibrirna kapilara).

Difuzivnost

Za transport pri nestacionarnih pogojih je značilno, da sta tok in tlačni (temperaturni, koncentracijski) gradient časovni in krajevni spremenljivki. Realne procese sušenja oz. navlaževanja lesa, impregnacije lesa ipd. tako opisujemo le s transportnimi enačbami pri nestacionarnih pogojih.

Crank (1956) je podal enačbe, s katerimi je mogoče izračunati potencial v preizkušancu na katerikoli debelini v odvisnosti od časa. Enačbo je podal v obliki vrste, ki zelo hitro konvergira, tako da zadostuje za približno rešitev že njen prvi člen:

$$\bar{E} = \frac{M_t}{M_\infty} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\left(\frac{Dt}{L^2} \right)} \quad (8)$$

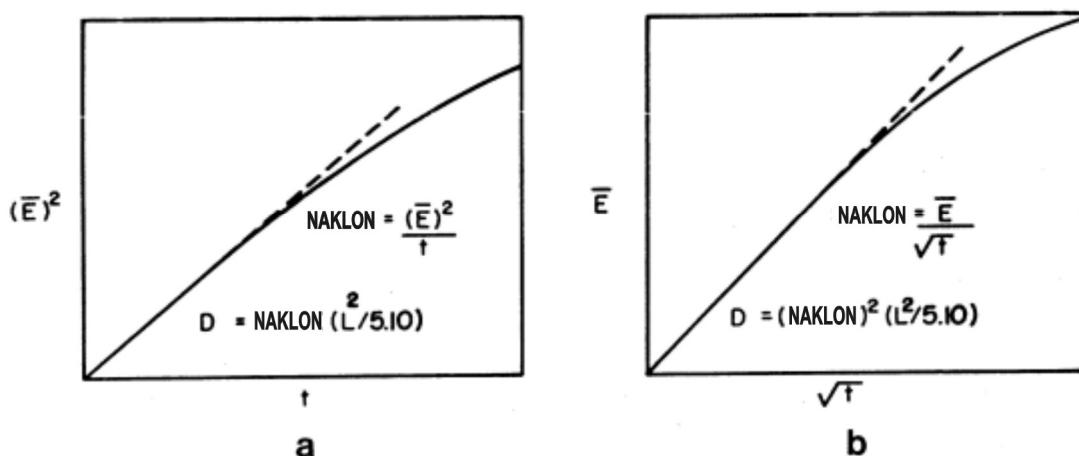
kjer je:

- > \bar{E} – povprečna brezdimenzijska sprememba mase
- > M_t – količina adsorbirane ali desorbirane vode v času t ,
- > M_∞ – količina vse adsorbirane ali desorbirane vode,
- > D – povprečni difuzijski koeficient [m^2/s],
- > $L=2a$ – debelina preizkušanca [m].
- > t – čas [s].

Iz slednje enačbe nato izrazimo difuzijski koeficient (D) kot:

$$D = \frac{\bar{E}^2 L^2}{\left(\frac{4}{\sqrt{\pi}} \right)^2 \cdot t} \quad (9)$$

ozioroma ga izrazimo s pomočjo enačbe premice, tangente na krivuljo povprečnega potenciala v začetnem delu eksperimenta, kar prikazuje slika 12.



Slika 12: Določitev difuzijskega koeficiente po nestacionarni metodi (Siau, 1995, str 154).

Slednja enačba za izračun difuzijskega koeficienta velja v primeru obojestranskega navlaževanja ali sušenja, pri enostranskem eksperimentu pa se preoblikuje v:

$$D = \frac{\bar{E}^2 L^2}{\left(\frac{2}{\sqrt{\pi}}\right)^2 \cdot t} \quad (10)$$

Povprečni difuzijski koeficient torej izračunamo tako, da prilagodimo premico linearному delu krivulje povprečnega potenciala, ki ga lahko izrazimo masno ali pa z vlažnostmi (Slika 12). Smerni koeficient dobljene premice potem uporabimo za izračun difuzijskega koeficienta D .

Potek poizkusa

Za določevanje difuzijskih koeficientov adsorpcije in desorpcije smo vzorce najprej uravnovesili v normalni klimi z vlažnostjo $\varphi = 65\%$ in s temperaturo $T = 20 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$. Uravnovešanje je potekalo do dosežene konstantne mase. Po uravnovešanju smo vzorce stehtali in jim izmerili dimenzije ter jih razdelili na dva dela. Prvo skupino smo izpostavili klimi z nižjo vlažnostjo ($\varphi = 35\%$, $T = 20 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$), drugo skupino pa klimi z višjo vlažnostjo ($\varphi = 85\%$, $T = 20 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$). Uravnovešanje na omenjenih klimah je potekalo do dosežene konstantne mase. Nato smo vse vzorce trikrat premazali z epoksi smolo po petih ploskvah, z namenom, da omogočimo izhlapevanje oz. navlaževanje samo skozi tangencialno ravnino, tako da je potekal difuzijski tok v radialni smeri. Vzorce smo ponovno izpostavili isti klimi do uravnovešenja, jih stehtali ter izpostavili novim klimatskim pogojem. Vzorce, kjer je potekal proces adsorpcije in so bili prej izpostavljeni klimi z nižjo vlažnostjo ($\varphi = 35\%$), smo izpostavili klimi z višjo vlažnostjo ($\varphi = 85\%$), in obratno z vzorce, kjer je potekal proces desorpcije. V postopku uravnovešanja smo vzorce tehtali v postopno podaljšanih časovnih intervalih. Izpostavitev je trajala do doseženega ravnovesja, nato je sledilo tehtanje vzorcev.

Na koncu smo sušili vzorce v sušilniku. Sušenje je potekalo postopno, vzorce smo prvi dan sušili pri temperaturi $T = 65 \pm 1^\circ\text{C}$, drugi dan pa smo temperaturo dvignili na $T = 103 \pm 2^\circ\text{C}$, ter vzorce sušili še dva dni. V času sušenja smo opravili še kontrolna merjenja.

Ohlajenim vzorcem smo nato še zadnjič določili maso. Iz dobljenih podatkov celotnega postopka ugotavljanja dimenzijske stabilnosti lesa smo izračunali čase uravnovešanje in posledično difuzijske koeficiente po nestacionarni metodi

4 REZULTATI

Primerjava osnovnih fizikalnih lastnosti normalnega in kompresijskega lesa je predstavljena v preglednici 6 ter prilogah A, B, C in D. Primerjava sušilnih lastnosti normalnega in kompresijskega lesa pa v preglednici 7 ter prilogah E, F, G in H.

4.1 OSNOVNE FIZIKALNE LASTNOSTI

Razvidno je, da je gostota (ρ_0) normalnega lesa nižja od gostote kompresijskega lesa. Ravno tako je radialno in tangencialno krčenje (β_R , β_T) za polovico manjše pri kompresijskem lesu. Pri vzdolžnem krčenju (β_L) se kompresijski les za 6,5-krat bolj krči kot normalni les.

Radialni in tangencialni diferencialni nabrek (q_R , q_T) ter radialni in tangencialni koeficient nabrekanja so pri kompresijskem lesu manjši kot pri normalnem lesu, sorpcijski kvocient (s) pa je večji pri kompresijskem lesu.

Preglednica 6: Primerjava osnovnih fizikalnih lastnosti normalnega in kompresijskega lesa navadne smreke (ρ_0 – gostota v absolutnem suhem stanju, β_R , β_T , β_L – radialno, tangencialno in vzdolžno krčenje, q_R , q_T – radialni, tangencialni diferencialni nabrek, h_R , h_T – radialni, tangencialni koeficient nabrekanja, s – sorpcijski kvocient).

Fizikalne lastnosti		Normalen les		Kompresijski les		Razlika (p=0.05)
		x-pov.	KV%	x-pov.	KV%	
ρ_0	[kg/m ³]	443,0	12,5	543,9	3,6	*
β_R	[%]	4,67	17,8	2,19	15,3	*
β_T	[%]	9,33	5,2	4,59	13,2	*
β_L	[%]	0,14	33,4	0,91	32,8	*
q_T	[%/%)	0,42	7,2	0,21	22,8	*
q_R	[%/%)	0,22	23,2	0,10	16,9	*
h_T	[%/%)	0,070	8,1	0,036	22,0	*
h_R	[%/%)	0,036	20,0	0,018	16,9	*
s	[%/%)	0,167	8,5	0,174	1,5	*

4.2 SUŠILNE LASTNOSTI

Rezultati plinske permeabilnosti v radialni in tangencialni smeri (k_{gR} , k_{gT}) so pokazali, da je le-ta nekoliko večja pri normalnem lesu. Plinska permeabilnost normalnega lesa je v vzdolžni smeri (k_{gL}) za 6,6-krat večja kot pri kompresijskem lesu. Difuzijski koeficient v radialni smeri pri desorpciji (D_R) je bil nekoliko večji pri normalnem lesu.

Preglednica 7: Primerjava sušilnih lastnosti normalnega in kompresijskega lesa navadne smreke (k_{gR} , k_{gT} , k_{gL} – plinska permeabilnost v radialni, tangencialni in vzdolžni smeri, D_R – difuzijski koeficient v radialni smeri pri desorpciji).

Sušilne lastnosti	Normalen les		Kompresijski les		Razlika (p=0.05)
	x-pov.	KV%	x-pov.	KV%	
k_{gR}	[m ³ /m Pa s]	2,43E-11	67,2	1,72E-11	35,9
k_{gT}	[m ³ /m Pa s]	2,39E-11	22,9	1,50E-11	24,0 *
k_{gL}	[m ³ /m Pa s]	30,23E-09	46,2	4,55E-09	46,4 *
D_R	[m ² /s]	1,905E-10	35,5	1,3557E-10	8,0

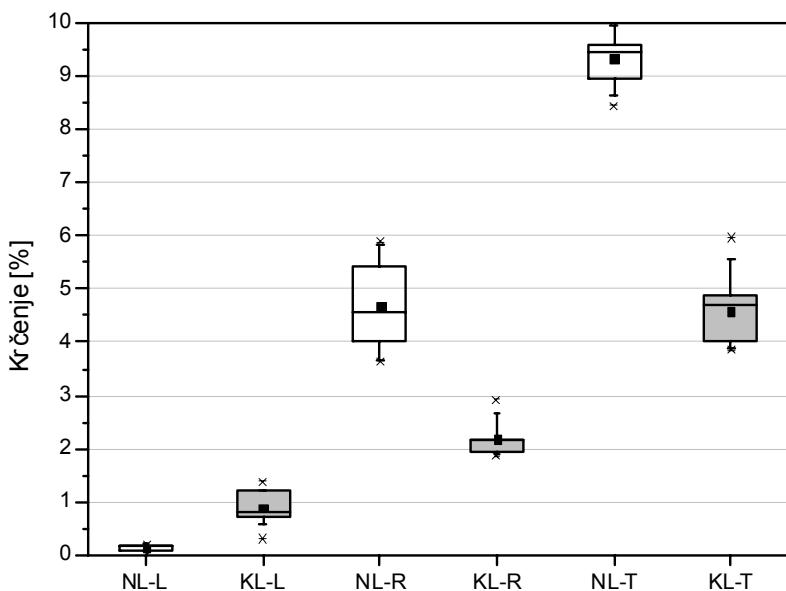
* - označuje statistično razliko med povprečji (Anova, p=0.05)

5 RAZPRAVA

5.1 OSNOVNE FIZIKALNE LASTNOSTI

Gostota kompresijskega lesa je statistično značilno ($p = 0,05$) višja kot gostota normalnega lesa (Preglednica 6). To potrjuje rezultate iz literature, ki pravijo, da so v kompresijskem lesu celične stene trahed v splošnem debelejše od sten normalnega lesa ter vsebujejo približno tretjino več celičnega materiala. To se kaže v večji gostoti kompresijskega lesa (Panshin in de Zeeuw, 1980).

Razlika v krčenju normalnega in kompresijskega lesa (Preglednica 6) je statistično značilna ($p = 0,05$) v vseh anatomskeh smereh. Dolžinsko krčenje (Slika 13) normalnega lesa je nepomembno (0,14 %), česar pa ne moremo trditi za kompresijski les (0,91 %).



Slika 13: Primerjava radialnega (β_R), tangencialnega (β_T) in vzdolžnega krčenja (β_L) adultnega (NL) in kompresijskega (KL) smrekovega lesa.

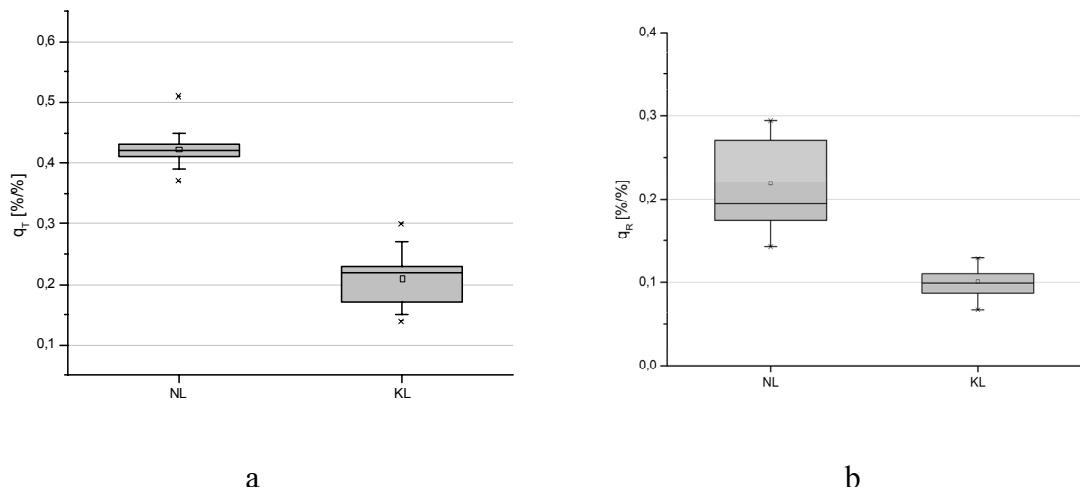
Vzdolžni skrček kompresijskega lesa ($\beta_L=0,91\%$) je bistveno večji od skrčka normalnega lesa (6-krat), kar je problematično z vidika uporabe lesa zaradi efekta »bimetalnosti«. Ugotovljeni skrček je sicer še vedno manjši, kot se maksimalno navaja v literaturi, da so lahko aksialni skrčki tudi do 7% pri kompresijskem lesu, pri normalnem lesu pa 0,1 do 0,2% (Torelli, 1986). Težave so bile morda pri izbiri materiala, kjer se kompresijski les pojavlja po braniki raztreseno in ne po celotni braniki, tako da niso v celoti izražene lastnosti kompresijskega lesa. Tudi vse traheide niso izrazito izkazovale značaja kompresijskih traheid.

Radialno krčenje (Slika 13) normalnega lesa znaša 4,67%, vrednost za kompresijski les pa je samo 2,1%. V tangencialni smeri (Slika 13) je krčenje največje. Vrednost za normalen les je 9,33%, za kompresijskega pa 4,59%.

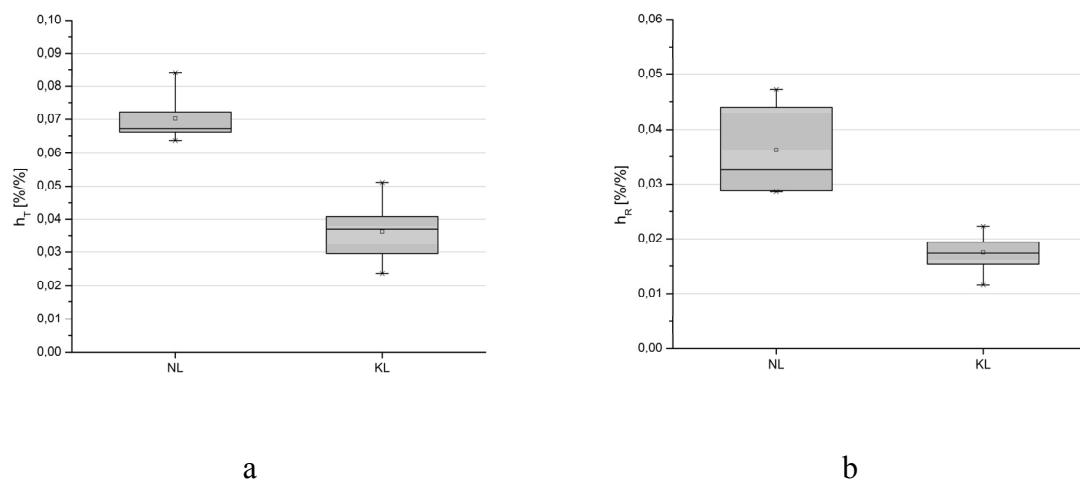
Volumenski skrček kompresijskega lesa (7,43%) je v primerjavi s skrčkom normalnega lesa (13,62%) skoraj še enkrat manjši. Iz tega je razvidno, da imata največji pomen za volumensko krčenje ravno radialno in tangencialno krčenje.

Vzrok za skoraj polovico manjše krčenje kompresijskega lesa v radialni in tangencialni smeri pripisujemo zavirальнemu vplivu mikrofibrilnega kota v S2 (MFA, mikrofibrilen kot je do 45°) ter dodaten lignin v celičnih stenah. Pri dolžinskem krčenju pa imamo pozitiven vpliv večjega naklona mikrofibril. Dodatno vplivajo tudi helikalne razpoke, ki naredijo strukturo bolj »gibljivo«, le-te pa nastanejo med oblikovanjem sloja S2.

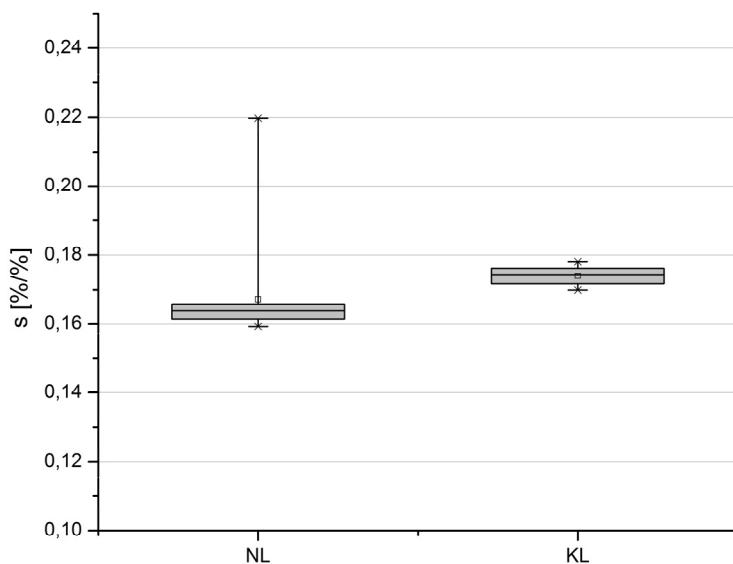
Iz slik o tangencialnem (Slika 14a) in radialnem (Slika 14b) nabreku ter tangencialnem (Slika 15a) in radialnem (Slika 15b) koeficientu nabrekanja je razvidno, da so vrednosti kompresijskega lesa za polovico manjše.



Slika 14: Primerjava diferencialnega nabreka v tangencialni (14a) in radialni (14b) smeri adultnega (NL) in kompresijskega (KL) smrekovega lesa.



Slika 15: Primerjava koeficiente nabrekanja v tangencialni (15a) in radialni (15b) smeri adultnega (NL) in kompresijskega (KL) smrekovega lesa.



Slika 16: Primerjava sorpcijskega kvocienta (s) adultnega (NL) in kompresijskega (KL) smrekovega lesa.

Tako kot pri tangencialnem in radialnem krčenju lahko tudi tukaj najdemo vzrok za skoraj polovico manjše nabrekanje kompresijskega lesa v radialnem in tangencialnem zavirальнem učinku spremenjenega mikrofibrilnega kota v S2 ter odebujene celične stene z ligninom. Edino sorpcijski kvocient (Slika 16) je za malenkost višji kot za normalen les. To dejstvo pa lahko pripisujemo povečani možni kapilarni kondenzaciji v mikro razpokah.

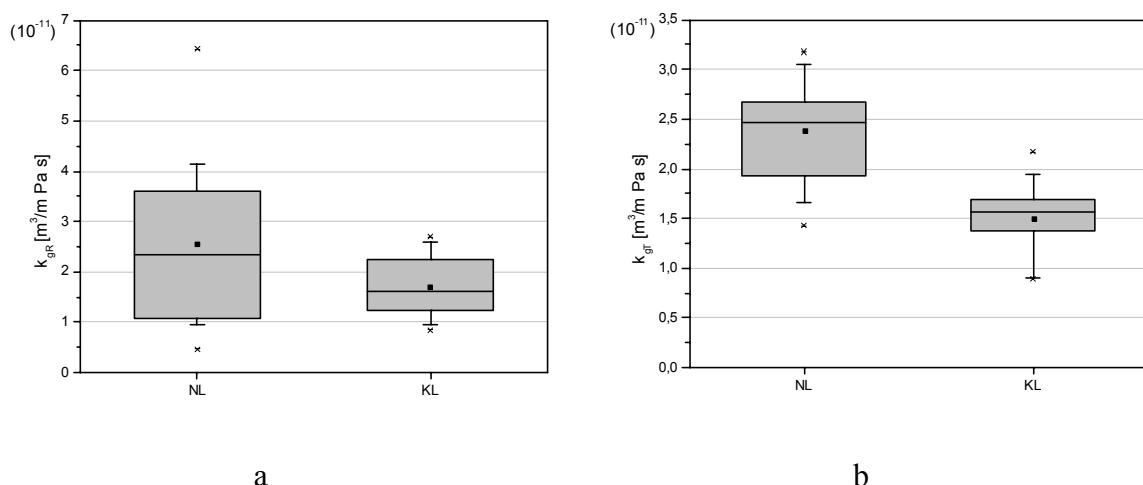
Iz preglednice 8 je razvidno, da lahko kompresijskemu lesu pripisemo zelo ugodne lastnostni glede dimenzijske stabilnosti lesa z izjemo vrednosti qT/qR in sorpcijskega kvocienta. Na vse ponovno vpliva spremenjen mikrofibrilni kot v S2.

Preglednica 8: Ovrednotenje kriterijev za ocenitev dimenzijske stabilnosti lesa (po Torelliju s sodelavci, 1983).

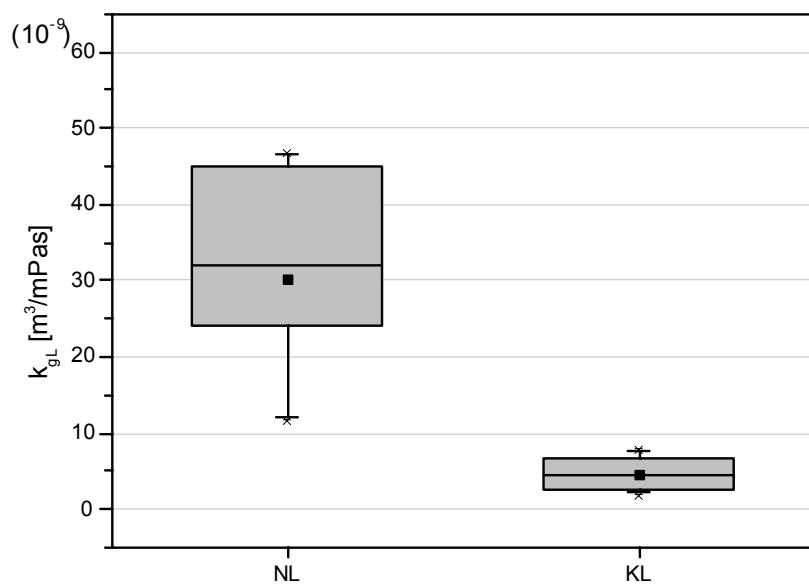
Kazalnik	Normalen les	Kompresijski les
$q_T [\% / \%]$	0,42 – neugodno	0,021 – zelo ugodno
$q_T - q_R [\% / \%]$	0,2 – normalno	0,011 – zelo ugodno
$h_T [\% / \%]$	0,070 – neugodno	0,036 – zelo ugodno
$h_T - h_R [\% / \%]$	0,034 – normalno	0,018 – zelo ugodno
q_T / q_R	1,91 – normalno	2,1 – neugodno
$s [\% / \%]$	0,167 – neugodno	0,174 – neugodno

5.2 SUŠILNE LASTOSTI

Plinska permeabilnost v radialni (Slika 17a), tangencialni (Slika 17b) in vzdolžni smeri (Slika 18) je pri kompresijskem lesu manjša kot pri normalnem lesu.



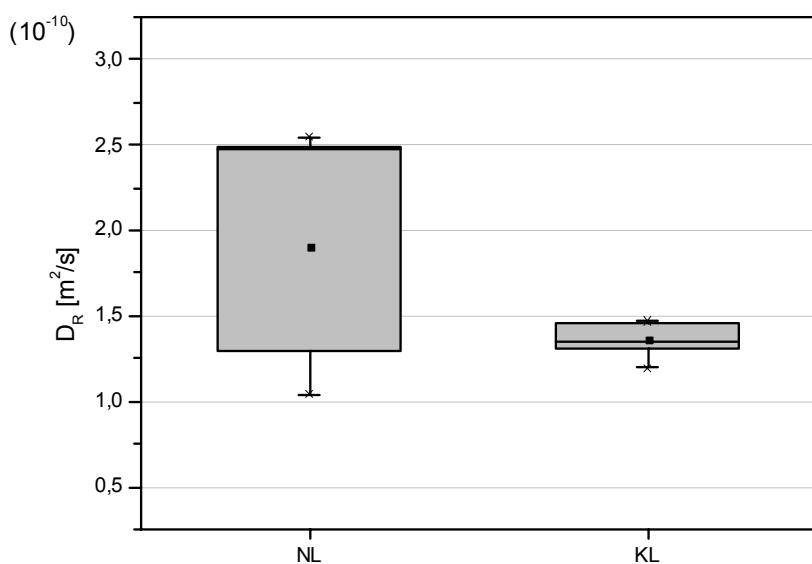
Slika 17: Primerjava radialne (17a) in tangencialne (17b) plinske permeabilnosti adultnega (NL) in kompresijskega (KL) smrekovega lesa.



Slika 18: Primerjava vzdolžne plinske permeabilnosti (k_{gl}) adultnega (NL) in kompresijskega (KL) smrekovega lesa.

Pri formirjanju srednjega sloja sekundarne stene pride do spremembe oblik oz. redukcije obokanih pikenj, katere preprečujejo radialni in tangencialni tok proste vode. Delno se ta vpliv pozna tudi pri vzdolžni permeabilnosti.

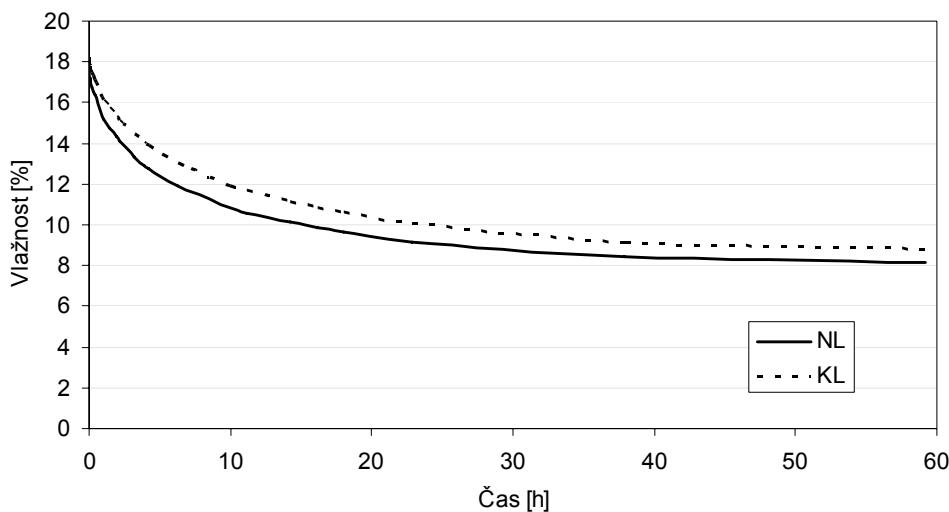
To pomeni, da je kompresijski les manj permeabilen, kar nam potrjuje tudi literatura: permeabilnost v vzdolžni smeri je pri kompresijskem lesu zmanjšana verjetno zaradi manjših lumnov ter manjših pikenj (Panshin in de Zeeuw, 1980).



Slika 19: Primerjava radialne difuzivnosti (D_R) adultnega (NL) in kompresijskega (KL) smrekovega lesa.

Difuzijski koeficient (Slika 19) je pri kompresijskem lesu nekoliko manjši kot pri normalnem lesu, vendar med njima ni statistično značilne razlike. Tako lahko trdimo, da struktura tkiva ne vpliva na razlike v difuzivnosti. Večje mikro razpoke bi sicer povečale možnost difuzivnosti, ampak zaradi manjše higroskopnosti tkiva, ki je bolj lignificirano, predpostavljamo, da se vpliva nekako izenačita.

Iz slike 20 je razvidno, da je sušenje normalnega lesa v primerjavi s sušenjem kompresijskega lesa hitrejše, ter da normalen les doseže nižjo ravnovesno vlažnost pri konstantni klimi.



Slika 20: Sušilna krivulja za tangencialne smrekove žaganice iz adultnega (NL) in kompresijskega (KL) smrekovega lesa, sušenega v konstantni klimi ($\varphi = 35\%$, $T = 20^{\circ}\text{C}$).

Kompresijski les je manj difuziven, kar je posledica večje vsebnosti lignina v sekundarni celičnin steni. Večja vsebnost lignina naredi tkivo manj higroskopno.

Iz literature je razvidno (Panshin in de Zeeuw, 1980), da je ravnovesna vlažnost kompresijskega lesa pri istih pogojih (relativna zračna vlažnost, temperatura) nekoliko višja kot pri normalnem lesu. Razlog za to gre lahko iskati v mikro razpokah celične stene in močni kapilarni kondenzaciji. V medceličnih prostorih kondenzira voda, katera se smatra kot vezana voda. Le ta prispeva k povečani vlažnosti lesa in ne vpliva na nabrek.

Točka nasičenja celičnih sten kompresijskega lesa je nižja kot pri normalnem lesu, ki je zaradi povišane vsebnosti lignina manj higroskopen.

6 SKLEPI

Primerjalno proučevanje normalnega in kompresijskega lesa smreke je pokazalo naslednje:

- > volumensko krčenje kompresijskega lesa je bilo za polovico manjše od normalnega lesa, zaradi približno polovico manjšega krčenja v radialni in tangencialni smeri. Bolj kot zmanjšane volumenskih in prečnih skrčkov pa je za uporabo pomembnejše bistveno večje krčenje v vzdolžni smeri (normalni les 0,14%, kompresijski les 0,91%);
- > izkazalo se je, da ima kompresijski les zelo ugodne kazalnike dimenzijske stabilnosti, predvsem diferencialni nabrek ter koeficient nabrekanja v radialni in tangencialni smeri, ki sta za polovico manjša od normalnega lesa, kar pa zaradi izrazitega vzdolžnega delovanja kompresijskega lesa ne predstavlja nikakršne ugodnosti;
- > izkazalo se je, da je sorpcijski kvocient kompresijskega lesa zelo neugoden, ter da presega vrednost normalnega lesa;
- > ugotovili smo, da je permeabilnost kompresijskega lesa v vseh anatomskeih smereh nekoliko slabša, kar gre pripisati močnejši redukciji obokanih pikenj ter zmanjšanju in stanjšanju prehodov. Posledično se srečujemo z daljšimi časi sušenja;
- > ugotovili smo, da je difuzivnost kompresijskega lesa nekoliko manjša, kar gre pripisati povečani lignifikaciji ter manjši higroskopnosti lignina. Posledično se kompresijski les nekoliko počasneje uravnoveša.

7 POVZETEK

Kompresijski les je značilen za iglavce. Nastaja na spodnji, tlačni strani ukrivljenih vej ali debel. Njegova gostota je večja od normalnega lesa, je rdečkasto-rjave barve in brez leska. Traheide kompresijskega lesa smreke so v primerjavi z traheidami normalnega lesa krajše, imajo povečano vsebnost lignina in zmanjšano vsebnost celuloze. Mikrofibilarni kot v sloju S2, kjer so prisotne tudi helikalne razpoke, znaša približno 45 stopinj, in je večji kot pri normalnem lesu.

Zaradi omenjenih posebnosti v kemijski zgradbi kompresijskega lesa so spremenjene tudi njegove sorpcijske karakteristike, posledično pa tudi krčitvene in nabrekovalne lastnosti. »Negativne« karakteristike kompresijskega lesa se najbolj odražajo pri sušenju lesa, kjer se srečujemo z daljšimi časi sušenja. Podvrženost kompresijskega lesa zvijanju in veženju zmanjšuje njegovo kvaliteto in uporabnost za gradbene ali konstrukcijske namene.

V nalogi smo primerjalno ovrednotili volumenske in linearne skrčke kompresijskega in normalnega lesa z znanimi vrednostmi iz literature ter se osredotočili na permeabilnost lesnega tkiva kot najpomembnejši dejavnik pretoka proste vode v lesu in difuzivnosti lesnega tkiva, kot najpomembnejši dejavnik pretoka vezane vode v lesu.

Za določitev osnovnih fizikalnih lastnosti - kazalnikov krčenja in dimenzijske stabilnosti - smo uporabili metodo, pri kateri vzorce izpostavimo različnim klimam. V našem primeru smo imeli osemkrat po dva zaporedno pripravljena vzorca – za vsako anatomske smer. Polovico smo izpostavili višji klimi ($\phi = 85\%$, $T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$), drugo polovico nižji klimi ($\phi = 35\%$, $T = 20^\circ\text{C}$). Po uravnovešanju smo vzorce v klimah zamenjali. Na koncu smo vzorce prestavili v komoro z nižjo relativno zračno vlažnostjo, vse do absolutno suhega stanja.

Vrednosti volumenskega, radialnega in tangencialnega krčenja za kompresijski les so bile v meji pričakovanega ter v primerjavi z vrednostmi za normalni les za polovico manjše. Krčenje v smeri poteka vlaken je bilo več kot 6 krat večje, vendar še vedno manjše, od

maksimalnih vrednosti navedenih v literaturi. Zaradi večjega deleža lignina, so se sorpcijski lastnosti izkazale kot zelo ugodne, vrednosti kazalnikov pa so bile za polovico manjše kot pri normalnem lesu.

Določanje prevodnosti lesnega tkiva je potekalo na aparaturi za merjenje permeabilnosti plinov. Uravnovešenim vzorcem pri normalni klimi ($\varphi = 65\%$, $T = 20^\circ\text{C}$) smo s pomočjo aparature izmerili pretok in razliko tlakov v vseh treh anatomskeih smereh. Ugotovili smo, da je permeabilnost kompresijskega lesa nekoliko slabša kot pri normalnem lesu. V praksi ima kompresijski les daljši čas sušenja, kajti pretok proste vode je med drugim oviran zaradi redukcije obokanih pikanj.

V procesu sušenja pripisujemo difuzijskemu gibanju vode v lesu velik pomen, saj kmalu po začetku sušenja nad masnim tokom prevlada difuzijsko gibanje. Z nestacionarno metodo uravnovešanja smo ugotovili, da je difuzivnost kompresijskega lesa nekoliko manjša kot pri normalnem lesu, kar lahko pripisujemo povečanemu deležu lignina, ki je manj higroskopen.

8 VIRI

1. Bodig J. in Jayne B.A. 1982. Mechanics of wood and wood composites. Van Nostrand, Reinhold Company: 712 s.
2. Crank, J. 1975. Mathematics of diffusion. Oxford, Clarendon Press: 414 s.
3. Dinwoodie J.M. 2000. Timber: Its nature and behaviour. London E & FN Spon: 257 s.
4. Gričar J. 2002. Reakcijski les. Seminarska naloga. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 21 s.
5. Houška M., Bučar B. 1996. Mechano sorptive creep in adult, juvenile and reaction wood. International COST 508 Wood Mechanics Conference. Stuttgart, Germany: 49-61
6. Keith C.T. 1974. Longitudinal compressive creep and failure development in white spruce compression wood. *Wood Science*, 7: 1-12
7. Panshin, A.J., DeZeeuw, C. 1980. Textbook of wood technology, structure, identification, properties and uses of the commercial woods. New York, McGraw-Hill: 722 s.
8. Plomion C., Leprovost G., Stokes A. 2001. Wood formation in trees. *Plant Physiology*, 127: 1513-1523
9. Siau, J.F. 1984. Transport processes in wood. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, Springer – Verlag: 245 s.
10. Timell, T. E. 1986. Compression wood in gymnosperms. Berlin, Springer Verlag: 2150 s.

11. Torelli, N., Čufar, K. 1983. Sorpcija in stabilnost lesa. Les 35, 5/6: 101-106
12. Torelli, N. 1989. Zgradba in lastnosti lesa. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 100 s.
13. Torelli N. 1998. Rastne napetosti v drevesu in lesu. Les, 50, 4: 91-95
14. Torelli N. 1990. Les in skorja. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 70 s.
15. Torelli N. 2002. Reakcijski les in njegova mehanika. Les, 54, 5: 140-147
16. Yoshizawa N., Toshinaga I. 1987. Some structural and evolutionary aspects of compression wood tracheids. Wood and Fiber Science, 19, 4: 343-352

ZAHVALA

Najprej bi se rad zahvalil prof. dr. Željku Gorišku za mentorstvo, njegovo strokovno pomoč, spodbujanje ter vztrajanje nad mojim dolgoletnim pisanjem diplomskega dela.

Posebna zahvala gre tudi prof. dr. Katarini Čufar za recenzijo.

Za nesebično pomoč se zahvaljujem asistentu mag. Alešu Stražetu.

Zahvaljujem se tudi ing. Petru Cundru, brez katerega ne bi bilo potrebnega materiala za izdelavo diplomskega dela.

Zahvala pa gre tudi moji družini, predvsem ženi, ki je verjela vame, da mi bo nekega dne uspelo.

Na koncu zahvala tudi Vsemogočnemu Stvarniku za milost, kajti dejstvo, da mi je uspelo dokončati diplomsko nalogu, presega mojo voljo.

PRILOGE

Priloga A: Izračuni osnovnih fizikalnih lastnosti normalnega lesa (ρ_0 – gostota v absolutnem suhem stanju, β_R , β_T , β_L , β_V – radialno, tangencialno, vzdolžno in volumensko krčenje)

Normalni les		ρ_0	β_R	β_T	β_L	β_V
Oznaka	smer	(kg/m ³)	(%)	(%)	(%)	(%)
1ANF	L1	504	5,26	8,44	0,100	13,254
1ANF	L2	504	5,41	8,61	0,139	13,546
2ANF	L1	514	5,84	8,83	0,110	14,155
2ANF	L2	511	5,89	8,86	0,160	14,168
3ANF	L1	415	4,54	9,44	0,140	13,671
3ANF	L2	416	4,60	9,43	0,190	13,821
4ANF	L1	517	5,72	9,49	0,020	14,614
4ANF	L2	515	5,75	8,93	0,160	13,938
5CNF	L1	396	3,67	9,44	0,110	13,046
5CNF	L2	393	3,64	9,22	0,110	12,471
6CNF	L1	382	3,83	9,90	0,170	13,912
6CNF	L2	383	4,03	9,95	0,160	13,581
7DNF	L1	404	4,18	9,33	0,150	13,120
7DNF	L2	406	4,01	9,58	0,210	13,261
8BNF	L1	415	4,08	9,91	0,170	13,588
8BNF	L2	413	4,26	9,99	0,220	13,766
		<i>n</i>	16	16	16	16
		<i>min</i>	381,631	3,644	8,438	0,020
		<i>max</i>	517,104	5,886	9,991	0,220
		<i>pov.</i>	442,959	4,669	9,334	0,145
		<i>st. odkl.</i>	55,358	0,833	0,488	0,048
		<i>KV%</i>	12,497	17,838	5,232	33,436
						3,790

Oznake

A, B, C, D - debla, koluti

N / K - normalen / kompresijski les

1...n - št. vzorca

F / M - Fizikalne / Mehanske lastnosti

L1/L2 - zunanji/notranji vzporedni vzorec

Priloga B: Izračuni osnovnih fizikalnih lastnosti kompresijskega lesa (ρ_0 – gostota v absolutnem suhem stanju, β_R , β_T , β_L , β_V – radialno, tangencialno, vzdolžno in volumensko krčenje)

Kompresijski les		ρ_0	β_R	β_T	β_L	β_V
Oznaka	smer	(kg/m ³)	(%)	(%)	(%)	(%)
1AKF	L1	530	2,16	4,62	0,740	7,352
1AKF	L2	549	1,93	4,91	0,810	7,479
2AKF	L1	540	1,85	4,88	0,700	7,381
2AKF	L2	537	1,88	4,86	0,729	7,570
3AKF	L1	556	2,18	4,64	0,639	7,455
3AKF	L2	548	2,11	4,76	0,820	7,561
4AKF	L1	509	2,67	5,96	0,570	8,537
4AKF	L2	509	2,92	5,54	0,320	8,479
5CKF	L1	533	1,91	3,89	1,219	6,763
5CKF	L2	533	1,93	3,98	1,239	6,869
6CKF	L1	538	1,96	3,93	1,378	7,287
6CKF	L2	540	1,90	3,85	1,199	6,480
7DKF	L1	572	2,67	4,72	0,829	7,809
7DKF	L2	568	2,52	4,78	1,118	7,907
8BKF	L1	571	2,19	4,03	1,059	6,927
8BKF	L2	567	2,19	4,09	1,229	6,989
<i>n</i>		16	16	16	16	16
<i>min</i>		508,768	1,854	3,846	0,320	6,480
<i>max</i>		572,436	2,924	5,963	1,378	8,537
<i>pov.</i>		543,859	2,187	4,590	0,912	7,428
<i>st. odkl.</i>		19,638	0,334	0,608	0,299	0,570
<i>KV%</i>		3,611	15,257	13,244	32,783	7,674

Priloga C: Izračuni osnovnih kazalnikov dimenzijske stabilnosti normalnega lesa (q_R , q_T – radialni, tangencialni diferencialni nabrek, h_R , h_T – radialni, tangencialni koeficient nabrekanja, s – sorpcijski kvocient)

Normalni les			q_R	q_T	q_T-q_R	q_T/q_R	h_R	h_T	h_T-h_R	s
Oznaka	Smer	Lokacija v drevesu	(%/%)	(%/%)	(%/%)	(%/%)	(%/%)	(%/%)	(%/%)	(%/%)
1ANF	P1	delno beljava, jedrovina v večini	0,2707	0,4070	0,1363	1,5037	0,0440	0,0662	0,0222	0,1626
1ANF	P2	delno beljava, jedrovina v večini	0,2448	0,4215	0,1767	1,7221	0,0391	0,0673	0,0282	0,1597
2ANF	P1	delno beljava, jedrovina v večini	0,2787	0,4083	0,1296	1,4649	0,0453	0,0663	0,0211	0,1625
2ANF	P2	delno beljava, jedrovina v večini	0,2945	0,4060	0,1115	1,3786	0,0473	0,0653	0,0179	0,1607
3ANF	P1	jedrovina - notranji del	0,1733	0,4353	0,2620	2,5116	0,0288	0,0722	0,0435	0,1659
3ANF	P2	jedrovina - notranji del	0,2154	0,4297	0,2143	1,9952	0,0357	0,0713	0,0356	0,1659
4ANF	P1	meja med beljavovo in jedrovino	0,2806	0,4150	0,1344	1,4789	0,0453	0,0670	0,0217	0,1614
4ANF	P2	meja med beljavovo in jedrovino	0,2845	0,4245	0,1400	1,4922	0,0453	0,0676	0,0223	0,1593
5CNF	P1	beljava - zunanji del (kambij)	0,1697	0,3980	0,2283	2,3455	0,0286	0,0670	0,0384	0,1683
5CNF	P2	beljava - zunanji del (kambij)	0,1766	0,3941	0,2175	2,2320	0,0286	0,0637	0,0352	0,1617
6CNF	P1	meja med beljavovo in jedrovino	0,1431	0,3686	0,2255	2,5756	0,0315	0,0810	0,0496	0,2198
6CNF	P2	meja med beljavovo in jedrovino	0,1766	0,4153	0,2387	2,3515	0,0296	0,0695	0,0399	0,1673
7DNF	P1	beljava - zunanji del (kambij)	0,2330	0,4423	0,2093	1,8985	0,0386	0,0732	0,0346	0,1655
7DNF	P2	beljava - zunanji del (kambij)	0,1865	0,4092	0,2227	2,1937	0,0306	0,0671	0,0365	0,1639
8BNF	P1	beljava - zunanji del (kambij)	0,1943	0,4456	0,2513	2,2932	0,0325	0,0746	0,0421	0,1674
8BNF	P2	beljava - zunanji del (kambij)	0,1732	0,5083	0,3352	2,9352	0,0287	0,0841	0,0554	0,1654
<i>n</i>										
<i>min</i>										
<i>max</i>										
<i>pov.</i>										
<i>st. odkl.</i>										
<i>KV%</i>										

Oznake

A, B, C, D - debla, koluti

N / K - normalen / kompresijski les

1...n - št. vzorca

F / M - Fizikalne / Mehanske lastnosti

P1/P2 - zunanji/notranji vzporedni vzorec

Priloga D: Izračuni osnovnih kazalnikov dimenzijske stabilnosti kompresijskega lesa (q_R , q_T – radialni, tangencialni diferencialni nabrek, h_R , h_T – radialni, tangencialni koeficient nabrekanja, s – sorpcijski kvocient)

Priloga E: Izračuni osnovnih kazalnikov sušilnih lastnosti normalnega lesa (k_{gR} , k_{gT} , k_{gL} – plinska permeabilnost v radialni, tangencialni in vzdolžni smeri, D_R – difuzijski koeficient v radialni smeri pri desorpciji)

Normalni les		K_{gR}	K_{gT}	K_{gL}	D_R
Oznaka	smer	($m^3/m\ Pa\ s$)	($m^3/m\ Pa\ s$)	($m^3/m\ Pa\ s$)	(m^2/s)
1ANF	L1	,960E-11	1,66115E-11	12,687E-09	1,09365E-10
1ANF	L2		2,464E-11	12,202E-09	
2ANF	L1	1,063E-11	1,9186E-11	34,463E-09	1,043E-10
2ANF	L2	1,010E-11	2,66577E-11	32,010E-09	
3ANF	L1	2,195E-11	1,67304E-11		1,8055E-10
3ANF	L2	3,318E-11	2,15215E-11		
4ANF	L1	,461E-11		11,658E-09	1,29298E-10
4ANF	L2				
5CNF	L1	1,650E-11	2,65838E-11	45,731E-09	2,54601E-10
5CNF	L2	3,773E-11	3,04624E-11	42,740E-09	
6CNF	L1	2,058E-11	2,56383E-11		2,494E-10
6CNF	L2	2,340E-11	1,93448E-11		
7DNF	L1	3,592E-11	2,33243E-11	45,128E-09	2,47769E-10
7DNF	L2	6,426E-11	2,98434E-11	46,646E-09	
8BNF	L1			24,990E-09	2,48341E-10
8BNF	L2	2,915E-11	3,03684E-11	24,255E-09	
<i>n</i>					
<i>min</i>					
<i>max</i>					
<i>pov.</i>					
<i>st. odkl.</i>					
<i>KV%</i>					
13					
1,661E-11					
11					
1,043E-10					
2,54601E-10					
30,228E-09					
1,90453E-10					
,677E-10					
35,535					
20,629					
46,198E+00					
67,162					

Oznake

A, B, C, D - debla, koluti

N / K - normalen / kompresijski les

1...n - št. vzorca

F / M - Fizikalne / Mehanske lastnosti

L1/L2 - zunanji/notranji vzporedni vzorec

Priloga F: Izračuni osnovnih kazalnikov sušilnih lastnosti kompresijskega lesa (k_{gR} , k_{gT} , k_{gL} – plinska permeabilnost v radialni, tangencialni in vzdolžni smeri, D_R – difuzijski koeficient v radialni smeri pri desorpciji)

Kompresijski les		K_{gR} ($m^3/m\ Pa\ s$)	K_{gT} ($m^3/m\ Pa\ s$)	K_{gL} ($m^3/m\ Pa\ s$)	D_R (m^2/s)
Oznaka	smer				
1AKF	L1	,843E-11	1,38105E-11	1,945E-09	1,447E-10
1AKF	L2	,968E-11	1,57777E-11	2,286E-09	
2AKF	L1	1,181E-11	1,69417E-11	4,745E-09	1,303E-10
2AKF	L2	1,364E-11	1,38932E-11	4,552E-09	
3AKF	L1	1,870E-11	1,93948E-11	4,442E-09	1,349E-10
3AKF	L2	1,231E-11	1,17536E-11	4,081E-09	
4AKF	L1				1,460E-10
4AKF	L2		1,55698E-11		
5CKF	L1	1,755E-11	1,47726E-11	7,601E-09	1,472E-10
5CKF	L2	2,250E-11	1,68678E-11	7,599E-09	
6CKF	L1	2,396E-11	1,58891E-11	7,846E-09	1,195E-10
6CKF	L2	2,603E-11	1,93955E-11	6,868E-09	
7DKF	L1			2,558E-09	1,263E-10
7DKF	L2	2,706E-11	1,51563E-11	2,559E-09	
8BKF	L1	1,621E-11	1,07985E-11	3,301E-09	1,356E-10
8BKF	L2	1,508E-11	,914E-11	3,326E-09	
		<i>n</i>	13	14	8
		<i>min</i>	,843E-11	,914E-11	1,945E-09
		<i>max</i>	2,706E-11	1,940E-11	7,846E-09
		<i>pov.</i>	1,715E-11	1,494E-11	4,551E-09
		<i>st. odkl.</i>	,616E-11	,295E-11	2,113E-09
		<i>KV%</i>	35,940	19,716	46,422
					7,367

Priloga G: Izračuni lesne vlažnosti normalnega lesa v odvisnosti od časa uravnovešanja sušenega v konstantni klimi ($\varphi = 35 \%$, $T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$)

Normalni les									Povprečje	Stdev
t [h]	u1ANF	u2ANF	u3ANF	u4ANF	u5CNF	u6CNF	u7DNF	u8BNF		
0,0	17,0	17,3	17,9	17,8	17,9	17,1	17,6	18,2	17,6	0,41
1,1	16,8	17,2	17,7	17,6	17,6	16,8	17,3	17,9	17,4	0,40
2,1	16,7	17,0	17,5	17,5	17,4	16,6	17,1	17,6	17,2	0,39
3,3	16,6	16,9	17,3	17,3	17,2	16,4	16,9	17,4	17,0	0,38
5,0	16,4	16,7	17,1	17,1	16,9	16,1	16,6	17,2	16,8	0,37
7,0	16,2	16,6	16,8	16,9	16,7	15,9	16,4	16,9	16,5	0,37
9,0	16,1	16,4	16,6	16,8	16,4	15,6	16,1	16,7	16,4	0,37
19,7	15,5	15,9	15,8	16,1	15,5	14,7	15,2	15,7	15,5	0,43
25,6	15,3	15,6	15,4	15,8	15,1	14,3	14,8	15,3	15,2	0,45
34,2	14,9	15,3	15,0	15,4	14,6	13,8	14,4	14,8	14,8	0,50
45,6	14,6	14,9	14,5	15,0	14,0	13,3	13,9	14,2	14,3	0,56
51,0	14,4	14,7	14,3	14,8	13,8	13,1	13,6	14,0	14,1	0,58
75,9	13,8	14,1	13,5	14,1	13,0	12,3	12,9	13,2	13,4	0,64
93,4	13,5	13,7	13,0	13,7	12,6	11,9	12,4	12,7	12,9	0,67
99,7	13,3	13,6	12,9	13,5	12,4	11,7	12,3	12,5	12,8	0,67
123,8	12,9	13,2	12,4	13,1	11,9	11,3	11,8	12,0	12,3	0,69
151,1	12,5	12,8	12,0	12,6	11,5	10,8	11,4	11,6	11,9	0,69
170,9	12,3	12,5	11,7	12,3	11,2	10,6	11,1	11,3	11,6	0,69
238,9	11,5	11,7	10,9	11,5	10,5	9,9	10,4	10,5	10,8	0,65
267,4	11,2	11,4	10,7	11,2	10,2	9,6	10,1	10,2	10,6	0,63
340,4	10,7	10,8	10,2	10,7	9,8	9,2	9,8	9,8	10,1	0,57
387,4	10,4	10,5	10,0	10,4	9,6	9,0	9,5	9,6	9,9	0,53
431,5	10,2	10,3	9,8	10,1	9,4	8,8	9,4	9,4	9,7	0,50
548,9	9,5	9,6	9,2	9,5	9,0	8,4	8,9	8,9	9,1	0,42
909,9	8,6	8,6	8,5	8,6	8,5	7,8	8,4	8,4	8,4	0,25
1419,9	8,0	8,0	8,3	8,1	8,4	7,6	8,3	8,3	8,1	0,23

Priloga H: Izračuni lesne vlažnosti kompresijskega lesa v odvisnosti od časa uravnovešanja sušenega v konstantni klimi ($\phi = 35\%$, $T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$)

Kompresijski les							Povprečje	Stdev	
t [h]	u1AKF	u2AKF	u4AKF	u5CKF	u6CKF	u7DKF	u8BKF		
0,0	17,8	18,2	17,9	18,2	18,5	18,6	18,3	18,2	0,30
1,1	17,5	18,0	17,7	18,0	18,2	18,4	18,0	18,0	0,31
2,1	17,3	17,8	17,5	17,8	18,0	18,3	17,9	17,8	0,31
3,3	17,2	17,7	17,4	17,7	17,9	18,1	17,7	17,7	0,31
5,0	17,0	17,5	17,2	17,5	17,7	17,9	17,6	17,5	0,32
7,0	16,8	17,3	17,0	17,3	17,5	17,8	17,4	17,3	0,32
9,0	16,6	17,1	16,8	17,1	17,3	17,6	17,2	17,1	0,32
19,7	15,9	16,4	16,1	16,3	16,6	16,9	16,5	16,4	0,33
25,6	15,6	16,1	15,8	16,1	16,3	16,6	16,2	16,1	0,33
34,2	15,2	15,8	15,5	15,6	15,9	16,3	15,8	15,7	0,34
45,6	14,8	15,3	15,1	15,2	15,4	15,9	15,4	15,3	0,34
51,0	14,6	15,2	14,9	15,0	15,3	15,7	15,2	15,1	0,34
75,9	13,9	14,5	14,2	14,3	14,5	15,0	14,6	14,4	0,34
93,4	13,5	14,1	13,8	13,9	14,1	14,6	14,2	14,0	0,34
99,7	13,4	14,0	13,7	13,8	14,0	14,5	14,1	13,9	0,34
123,8	13,0	13,5	13,3	13,3	13,5	14,0	13,6	13,5	0,33
151,1	12,6	13,1	12,9	12,9	13,1	13,6	13,2	13,0	0,32
170,9	12,3	12,8	12,6	12,6	12,8	13,3	12,9	12,8	0,31
238,9	11,5	12,0	11,8	11,8	12,0	12,4	12,1	11,9	0,28
267,4	11,3	11,7	11,5	11,5	11,7	12,1	11,8	11,7	0,26
340,4	10,8	11,2	11,0	11,0	11,2	11,5	11,3	11,2	0,23
387,4	10,6	10,9	10,8	10,7	10,9	11,2	11,0	10,9	0,21
431,5	10,3	10,7	10,5	10,5	10,7	11,0	10,7	10,6	0,20
548,9	9,8	10,1	10,0	9,9	10,1	10,3	10,1	10,0	0,16
909,9	9,0	9,2	9,1	9,1	9,2	9,3	9,3	9,2	0,11
1419,9	8,7	8,8	8,7	8,8	8,9	8,9	8,9	8,8	0,10