

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Miha KASTELIC

**SORPCIJSKE IN DIFUZIJSKE KARAKTERISTIKE
TENZIJSKEGA LESA**

DIPLOMSKO DELO

Visokošolski strokovni študij

Ljubljana, 2008

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Miha KASTELIC

**SORPCIJSKE IN DIFUZIJSKE KARAKTERISTIKE TENZIJSKEGA
LESA**

DIPLOMSKO DELO

Visokošolski strokovni študij

**SORPTION AND DIFFUSION CHARACTERISTICS OF TENSION
WOOD**

GRADUATION THESIS

Higher professional studies

Ljubljana, 2008

Diplomsko delo je zaključek Visokošolskega študija lesarstva. Opravljeno je bilo na Katedri za tehnologijo lesa Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval prof. dr. Željka Goriška, za somentorja doc. dr. Bojana Bučarja in za recenzenta prof. dr. Primoža Ovena.

Mentor: prof. dr. Željko Gorišek

Somentor: doc. dr. Bojan Bučar

Recenzent: prof. dr. Primož Oven

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Naloga je bila rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Miha Kastelic

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

- ŠD Vs
- DK UDK 630*852.16
- KG tenzijski les/krčenje/dimenzijska stabilnost/sorpcijske lastnosti/difuzijski koeficient/*Fagus sylvatica* L.
- AV KASTELIC, Miha
- SA GORIŠEK, Željko (mentor)/BUČAR, Bojan (somentor)/OVEN, Primož (recenzent)
- KZ SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, C. VIII/34
- ZA Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
- LI 2008
- IN SORPCIJSKE IN DIFUZIJSKE KARAKTERISTIKE TENZIJSKEGA LESA
- TD Diplomsko delo (visokošolski strokovni študij)
- OP X, 42 str., 8 pregl., 25 sl., 8 vir.
- IJ sl
- JI sl/en
- AI Tenzijski les (TL) je reakcijsko tkivo listavcev, ki se od normalnega lesa (NL) razlikuje v anatomskih, kemijskih, fizikalnih in mehanskih lastnostih. Večji delež tenzijskega tkiva s svojim specifičnim obnašanjem zmanjšuje kakovost lesa in povzroča težave pri obdelavi. Preučevali smo razlike v nekaterih fizikalnih lastnostih med tenzijskim in normalnim lesom bukovine (*Fagus sylvatica* L.) in ugotovili, da je pri TL v primerjavi z NL krčenje v vzdolžni smeri izrazito večje, manjši pa so volumenski ter radialni in tangencialni skrčki. Nekoliko večja gostota ni statistično značilna. Diferencialna nabreka v radialni (q_R) in tangencialni (q_T) smeri ne kažeta razlik med kategorijama lesa. Koeficienta nabrekanja v radialni (h_R) in tangencialni (h_T) smeri ter sorpcijski kvocient (s) so značilno manjši pri TL. Ravnovesne vlažnosti TL so v vsem higroskopnem področju nižje kot pri NL. Tudi povprečna vlažnost točke nasičenja celičnih sten (TNCS) je pri TL za 1,9 % nižja. Difuzijski koeficient TL je neznačilno manjši od difuzijskega koeficienta NL.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Vs

DC UDC 630*852.16

CX tension wood/shrinkage/dimensional stability/sorption characteristics/diffusion coefficient/*Fagus sylvatica* L .

AU KASTELIC, Miha

AA GORIŠEK, Željko (supervisor)/BUČAR, Bojan (co-supervisor)/OVEN, Primož (reviewer)

PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34

PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology

PY 2008

TI SORPTION AND DIFFUSION CHARACTERISTICS OF TENSION WOOD

DT Graduation Thesis (Higher professional studies)

NO X, 42 p., 8 tab., 25 fig., 8 ref.

LA sl

AL sl/en

AB Tension wood (TW) is a reaction tissue of hardwood, differing from normal wood (NW) by its anatomical, chemical, physical and mechanical properties. The presence of high proportion of tension tissue with its specific behaviour lessens the quality of wood, and causes difficulties manufacturing it. We investigated differences among the same physical properties between tension and normal beech wood (*Fagus sylvatica* L.). We detected explicitly large longitudinal shrinkage in TW distinguishing it from NW. Volumetric, radial and tangential shrinkage in TW were smaller than those in NW. A little greater density in TW was not statistically significant. Differential swelling in radial (q_R) and tangential (q_T) directions did not show differences between TW and NW. Coefficients of swelling in radial (h_R), tangential (h_T) directions as well as sorption coefficient (s) were significantly reduced in TW. Equilibrium moisture content of TW in all hygroscopic ranges was lower in comparison to that of NW. Average fibre saturation point (FSP) was lower in TW for 1.9 % than in NW. Diffusion coefficient in TW was smaller than in NW, but the difference was statistically not significant.

KAZALO VSEBINE

	KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
	KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
	KAZALO VSEBINE	V
	KAZALO PREGLEDNIC	VII
	KAZALO SLIK	VIII
	KAZALO PRILOG	X
1	UVOD	1
1.1	OPREDELITEV PROBLEMA	1
1.2	DELOVNE HIPOTEZE	1
1.3	CILJI NALOGE	2
2	PREGLED LITERATURE	3
2.1	ANATOMSKA ZGRADBA TENZIJSKEGA LESA	6
2.2	KEMIJSKA SESTAVA TENZIJSKEGA LESA	9
2.3	FIZIKALNE LASTNOSTI	10
3	MATERIAL IN METODA	12
3.1	MATERIAL	12
3.1.1	Izdelava vzorcev	12
3.1.1.1	Vzorci za določanje sorpcijskih in krčitvenih lastnosti	14
3.1.1.2	Vzorci za določanje difuzijskega koeficienta	14
3.2	METODE	15
3.2.1	Krčitvene in sorpcijske lastnosti	15
3.2.1.1	Gostota	16
3.2.1.2	Krčenje in nabrekanje	16
3.2.1.3	Kazalniki dimenzijske stabilnosti	17
3.2.1.4	Ravnovesna vlažnost	18
3.2.1.5	Vlažnost točke nasičenja celičnih sten	19
3.2.2	Difuzivnost	19
4	REZULTATI	21
4.1	GOSTOTA IN KRČENJE	21
4.2	SORPCIJSKE LASTNOSTI	24
4.2.1	Kazalniki dimenzijske stabilnosti	24
4.2.2	Ravnovesna vlažnost	26

4.2.3	Vlažnost točke nasičenja celičnih sten	28
4.3	DIFUZIVNOST	30
5	RAZPRAVA	31
5.1	GOSTOTA IN KRČENJE	31
5.1.1	Gostota	31
5.1.2	Vzdolžno krčenje	31
5.1.3	Prečno krčenje	31
5.2	SORPCIJSKE LASTNOSTI	34
5.2.1	Kazalniki dimenzijske stabilnosti	34
5.2.2	Ravnovesna vlažnost	34
5.2.3	Vlažnost točke nasičenja celičnih sten	36
5.3	DIFUZIVNOST	37
6	SKLEPI	38
7	POVZETEK	39
8	VIRI	41
	ZAHVALA	
	PRILOGE	

KAZALO PREGLEDNIC

	str.
Preglednica 1: Relativna zračna vlažnost v kontejnerjih z nasičeno vodno raztopino soli.	16
Preglednica 2: Povprečna gostota v absolutno suhem stanju (ρ), longitudinalno (β_L), radialno (β_R) in tangencialno (β_T) krčenje normalnega (NL) in tenzijskega lesa (TL), z osnovno statistiko.	21
Preglednica 3: Volumsko krčenje normalnega in tenzijskega lesa z osnovno statistiko.	23
Preglednica 4: Kazalniki dimenzijske stabilnosti za normalni (NL) in tenzijski (TL) les. Diferencialno nabrekanje v radialni (q_R) in tangencialni (q_T) smeri; koeficient nabrekanja v radialni (h_R) in tangencialni (h_T) smeri ter sorpcijski kvocient (s) z osnovno statistiko.	24
Preglednica 5: Ravnovesna vlažnost normalnega (NL) in tenzijskega (TL) lesa (pri desorpciji) v sedmih stopnjah relativne zračne vlažnosti v povprečju in ostalo osnovno statistiko.	27
Preglednica 6: Konstante Dent-ovega (b_L , b_2 in u_0) in Hailwood-Horrobin-ovega (K_d , K_h in u_0) modela sorpcijskih izoterm. Določene so iz eksperimentalnih podatkov normalnega (NL) in tenzijskega (TL) lesa.	28
Preglednica 7: Vlažnost točke nasičenja celičnih sten (U_{TNCS}) določena z metodo ekstrapolacije sorpcijske izoterme do 100% relativne zračne vlage, iz razmerja med volumskim skrčkom in osnovno gostoto ob korekciji gostote absorbirane vode in z določitvijo začetka krčenja v procesu sušenja (metoda intersekcijske točke) v povprečju in z ostalo osnovno statistiko.	28
Preglednica 8: Povprečni difuzijski koeficient (D) normalnega (NL) in tenzijskega (TL) bukovega lesa izračunan iz polovičnega uravnovesnega časa in s spremembo brezdimenzijske mase proti kvadratnemu korenu časa med 86% in 37% relativno zračno vlažnostjo z osnovno statistiko.	30

KAZALO SLIK

	str.
Slika 1: Večja koncentracija tenzijskih vlaken (modro obarvana) pri bukovini	5
Slika 2: Posamezna tenzijska vlakna (modro obarvana) pri bukovini	5
Slika 3: Pogled prečnega prereza vlaken tenzijskega lesa pri topolu (<i>Populus</i> sp.) z ohlapnim štrlečim želatinskim slojem. Posnet je z rasterskim elektronskim mikroskopom (Panshin in de Zeeuw, 1980).	7
Slika 4: Primer hlodiča z označenimi predvidenimi lokacijami za odvzem vzorcev.	13
Slika 5: Krojenje vzorcev za določanje sorpcijskih in krčitvenih lastnosti (Ad 1) in za določitev difuzijskega koeficienta (Ad 2).	14
Slika 6: Porazdelitev in razlika gostote med normalnim (T_N) in tenzijskim (T_T) lesom.	21
Slika 7: Porazdelitev in razlika vzdolžnega skrčka med normalnim (L_N) in tenzijskim (L_T) lesom.	22
Slika 8: Porazdelitev in razlika radialnega skrčka med normalnim (R_N) in tenzijskim (R_T) lesom.	22
Slika 9: Porazdelitev in razlika tangencialnega skrčka med normalnim (T_N) in tenzijskim (T_T) lesom.	23
Slika 10: Porazdelitev in razlika volumskega skrčka med normalnim (V_N) in tenzijskim (V_T) lesom.	23
Slika 11: Porazdelitev in razlika diferencialnega nabrekanja v radialni smeri med normalnim (qR_N) in tenzijskim (qR_T) lesom.	25
Slika 12: Porazdelitev in razlika diferencialnega nabrekanja v tangencialni smeri med normalnim (qT_N) in tenzijskim (qT_T) lesom.	25
Slika 13: Porazdelitev in razlika koeficienta nabrekanja v radialni smeri med normalnim (hR_N) in tenzijskim (hR_T) lesom.	25
Slika 14: Porazdelitev in razlika koeficienta nabrekanja v tangencialni smeri med normalnim (hT_N) in tenzijskim (hT_T) lesom.	26
Slika 15: Porazdelitev in razlika sorpcijskega koeficienta med normalnim (s_N) in tenzijskim (s_T) lesom.	26
Slika 16: Ravnovesna vlažnost normalnega (A) in tenzijskega (B) lesa (pri desorpciji) v sedmih stopnjah relativne zračne vlažnosti v povprečju in z območjem standardnega odklona.	27

- Slika 17: Porazdelitev in razlika vlažnosti TNCS (iz razmerja med volumskim skrčkom in osnovno gostoto ob korekciji gostote absorbirane vode) med normalnim (TNCS_N) in tenzijskim (TNCS_T) lesom. 29
- Slika 18: Porazdelitev in razlika vlažnosti TNCS (z metodo interseksijske točke) med normalnim (TNCSi_N) in tenzijskim (TNCSi_T) lesom. 29
- Slika 19: Radialno krčenje normalnega (♦) in tenzijskega (□) lesa v odvisnosti od gostote. 32
- Slika 20: Tangencialno krčenje normalnega (♦) in tenzijskega (□) lesa v odvisnosti od gostote. 33
- Slika 21: Razmerje med tangencialnim in radialnim krčenjem (prečna krčitvena anizotropija) normalnega (♦) in tenzijskega (□) lesa v odvisnosti od gostote. 33
- Slika 22: Primarna, sekundarna (prekinjena črta) in skupna (neprekinjena črta) sorpcijska izoterma normalnega (tanka črta) in tenzijskega (debela črta) lesa določena s pomočjo Dent-ovega modela. 35
- Slika 23: Dimenzije v radialni smeri v procesu desorpcije normalnega (♦) in tenzijskega (□) lesa. 36
- Slika 24: Difuzijski koeficient (D) normalnega (♦) in tenzijskega (□) bukovega lesa iz polovičnega uravnovesnega časa v odvisnosti od gostote. 37
- Slika 25: Difuzijski koeficient (D) normalnega (♦) in tenzijskega (□) bukovega lesa iz brezdimenzijske spremembe mase proti kvadratnemu korenu časa v odvisnosti od gostote. 37

KAZALO PRILOG

- Priloga A1: Začetne dimenzije in masa vzorcev za določanje krčitvenih lastnosti v prečni smeri in sorpcijskih karakteristik
- Priloga A2: Dimenzije in masa uravnovešenih vzorcev za določanje krčitvenih lastnosti v prečni smeri in sorpcijskih karakteristik pri 86% relativne zračne vlažnosti
- Priloga A3: Dimenzije in masa uravnovešenih vzorcev za določanje krčitvenih lastnosti v prečni smeri in sorpcijskih karakteristik pri 75% relativne zračne vlažnosti
- Priloga A4: Dimenzije in masa uravnovešenih vzorcev za določanje krčitvenih lastnosti v prečni smeri in sorpcijskih karakteristik pri 65% relativne zračne vlažnosti
- Priloga A5: Dimenzije in masa uravnovešenih vzorcev za določanje krčitvenih lastnosti v prečni smeri in sorpcijskih karakteristik pri 47% relativne zračne vlažnosti
- Priloga A6: Dimenzije in masa uravnovešenih vzorcev za določanje krčitvenih lastnosti v prečni smeri in sorpcijskih karakteristik pri 37% relativne zračne vlažnosti
- Priloga A7: Dimenzije in masa uravnovešenih vzorcev za določanje krčitvenih lastnosti v prečni smeri in sorpcijskih karakteristik pri 19% relativne zračne vlažnosti
- Priloga A8: Dimenzije in masa vzorcev za določanje krčitvenih lastnosti v prečni smeri in sorpcijskih karakteristik v absolutno suhem stanju
- Priloga B: Dolžina in masa uravnovešenih vzorcev za določanje krčitvenih lastnosti v vzdolžni smeri v svežem stanju in sedmih stopnjah relativne zračne vlažnosti
- Priloga C: Mase vzorcev v procesu uravnovešanja iz vlažnega stanja na 37% relativno zračno vlažnost

1 UVOD

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Pri obdelavi bukovine pogosto naletimo na težave, ki so posledica prisotnosti tenzijskega lesa. Eden večjih problemov je aksialni skrčec tenzijskega lesa, ki je znatno večji od zanemarljivega aksialnega skrčka normalnega lesa listavcev. Negativni učinek znatnega vzdolžnega krčenja tenzijskega lesa se izrazi že v postopku sušenja. Elementi, ki vsebujejo tenzijski les, se močneje vežijo, pogosto pa na meji z normalnim lesom prihaja tudi do večjih vzdolžnih rež. Tenzijski les se od normalnega razlikuje po: makroskopskih in fizikalnih lastnostih, anatomskih značilnostih, mikrostrukturi, ultrastrukturi in kemični zgradbi. Značilnost tenzijskega lesa so t.i. želatinska vlakna, ki vsebuje v celični steni »želatinski« sloj oz. G sloj. Zaradi manjšega deleža lignina so spremenjene tudi sorpcijske karakteristike tenzijskega lesa, kar naj bi vplivalo na ravnovesna stanja in hitrost uravnovešanja. Tenzijski les v fizikalnih in mehanskih lastnostih odstopa od normalnega lesa, vendar v primeru, ko so tenzijska vlakna relativno maloštevilna in enakomerno razporejena v normalnem tkivu bistveno ne vplivajo na kvaliteto obdelave in predelave. Kritično pa vpliva na obdelavo večji delež tenzijskega lesa (nad 10%), oz. kadar pride do njegove koncentracije, kar pa je pogosto. Med odrezovanjem tenzijskega lesa opazimo izrazito povečano specifično rezalno silo in hitrejšo otopitev orodja. Žagane sveže deske s tenzijskim lesom imajo volnato površino. Vlakna se pri tem ne odrežejo, pač pa trgajo iz površine v svežnjih, ki polnijo pazdušne prostore žaginih listov. Med lesom in orodjem se poveča trenje ter posledično segrevanje orodja, ki ga lahko v ekstremnih primerih pregrejejo. Suh skobljan tenzijski les se srebrnkasto lesketa.

1.2 DELOVNE HIPOTEZE

Zaradi značilne anatomske in kemijske zgradbe pričakujemo spremenjene različne fizikalne lastnosti tenzijskega lesa v primerjavi z normalnim lesom. Predvidevamo, da spremenjena zgradba celične stene pomembno vpliva predvsem na spremembo krčitvene anizotropije. Poleg znatno povečanega aksialnega krčenja tenzijskega lesa lahko pričakujemo tudi manjše krčenje v prečni smeri. Pričakujemo, da specifična kemijska zgradba tenzijskega lesa vpliva na nekoliko spremenjene sorpcijske karakteristike kar naj bi vplivalo tudi na hitrost uravnovešanja.

1.3 CILJI NALOGE

Glede na odstopajočo in specifično kemijsko in anatomsko zgradbo tenzijskega lesa je cilj naloge ugotoviti razlike v nekaterih fizikalnih lastnosti v primerjavi z normalnim lesom. Primerjava bo osredotočena na sorpcijske karakteristike, ki se odražajo tudi v neugodnem krčenju. Primerjavo med tenezijskim in normalnim lesom smo izvedli z določitvijo naslednjih lastnosti, ki relevantno vplivajo na sorpcijske karakteristike:

- gostoto v absolutno suhem stanju;
- volumensko in linearna krčenja;
- sorpcijske lastnosti, kot se odražajo v ravnovesnih stanjih pri različnih relativnih zračnih vlažnostih (86%, 75%, 65%, 47%, 37% in 19%);
- kazalniki delovanja lesa (q , h , s);
- točko nasičenja celičnih sten in
- čas uravnovešanja in difuzijske karakteristike.

2 PREGLED LITERATURE

Tenzijski les se običajno pojavi na zgornji strani poševnih debel ali vej listavcev, je pa tudi nekaj izjemnih vrst listavcev, ki tvorijo tenzijski les na spodnji strani (Panshin in de Zeeuw, 1980). Prečni prerez nagnjenih debel ali vej je v večini primerov ekscentričen z večjim polmerom na zgornji (tenzijski) strani debla in z manjšim polmerom na spodnji strani debla ali veje. V ekscentričnem deblu ali veji je tenzijski les običajno v območjih hitrejše rasti. Na nasprotni strani v prečnem prerezu debla ali veje listavca, kjer je polmer manjši in je rast nekoliko zavrta, je les normalen. Lokacija tenzijskega lesa ni vedno na področju hitrejše rasti. Lahko se zgodi, da se pojavi na strani zavrtne rasti, kot je primer v vejah vrste *Sassafras albidum* in v deblu *Tilia americana*. V mnogih lesnih vrstah se tenzijski les tvori z malenkostno ali skoraj neznatno razvidnostjo ekscentričnosti v adultnem deblu. Zato iz nepravilnega prereza še ne moremo zanesljivo sklepati na prisotnost reakcijskega lesa. Še zlasti je to očitno pri nekaj vrstah kot je *Pavlonia* in *Catalpa* in pri koreninah, ki kažejo znake tenzijskega lesa brez kakršnekoli jasne orientiranosti glede na navpično os (Patel, 1964, cit. po Panshin in de Zeeuw, 1980).

Tenzijski les se tvori kot mehanizem, ki korigira naklon debla in ima verjetno tudi nalogo obdržati naklon vej. Vendar se v tropskih drevesnih vrstah lahko tvori tenzijski les tudi v zelo navpičnih deblih, ki imajo nesimetrično razraščeno krošnjo s katero poskuša drevo doseči zadostno svetlobo v gosto zaraščenem gozdu (Panshin in de Zeeuw, 1980). Asimetrična krošnja bo s svojo težo pomembno vplivala na potek in velikost rastnih napetosti v prerezu debla.

Tvorba tenzijskega lesa je povezana s celičnimi spremembami, ki so vključene v nastanek rastnih napetosti v drevesu. Velikost vzdolžnih nateznih napetosti okoli celega obsega nagnjenih debel listavcev kaže, da so napetosti na različnih krajih različno velike in sicer so največje natezne napetosti prav na lokaciji tvorbe tenzijskega lesa (Trenard in Gueneau, 1975, cit. po Panshin in de Zeeuw, 1980). Povečane rastne napetosti tako v poševnih kot v navpičnih deblih dreves so posledica vzdolžnega krčenja vlaken. Panshin in de Zeeuw (1980) meni, da si lahko gradient napetosti po obsegu debla razlagamo tako, da je tvorba tenzijskega lesa skrajna posledica tistega vzdolžnega krčenja vlaken, ki povzroča rastne napetosti. Čufar (2001) pa navaja, da tvorba tenzijskega lesa ni odziv na povečano natezno napetost, pač pa

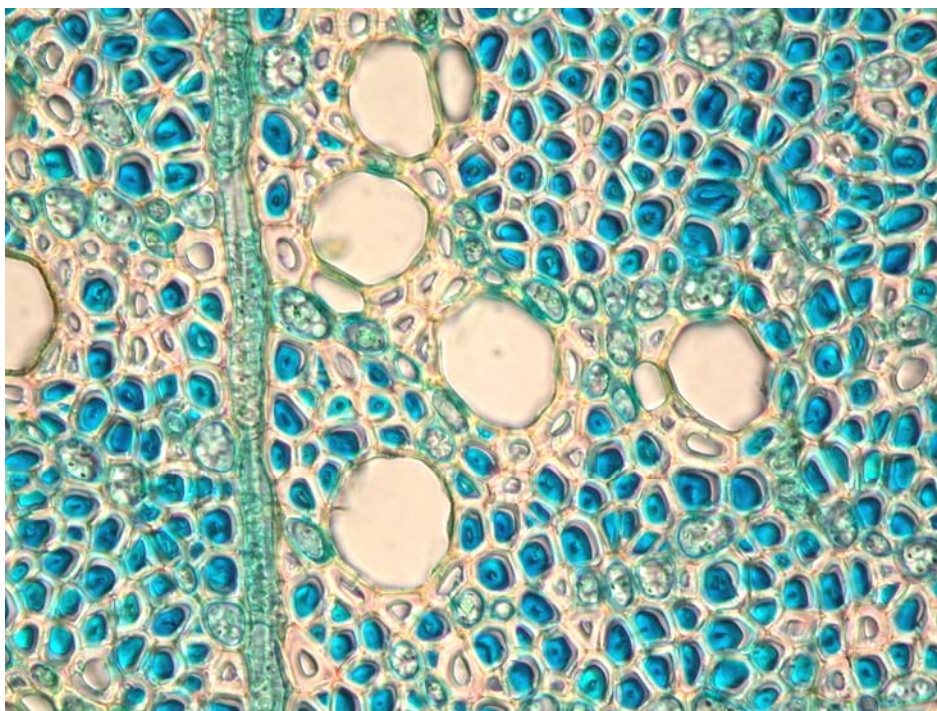
nastanek tenzijskega lesa uravnavajo rastni hormoni posredno pa tudi težnost, ki vpliva na razporeditev hormonov.

Pojav tenzijskega lesa je danes veliko bolj poznan kot je bil v preteklosti, ko je bilo nasplošno težje prepoznati ta tip tkiva in spremenljivost njegovega pojava v deblu (Panshin in de Zeeuw, 1980).

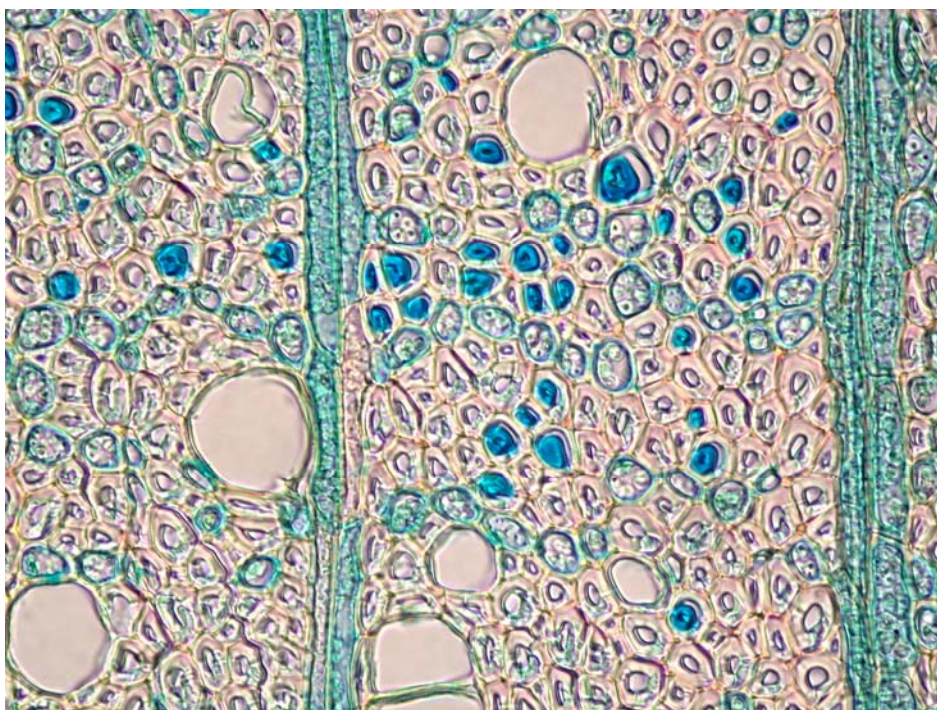
Prisotnost tenzijskega lesa pokaže veliko različnih značilnosti površinskega izgleda lesa. Pri razžagovanju svežega tenzijskega lesa imajo deske volnato površino. Vlakna se pri tem ne odrežejo, pač pa trgajo iz površine v svežnjih, ki polnijo pazdušne prostore žaginih listov. Med lesom in orodjem se poveča trenje ter posledično segrevanje orodja, ki ga lahko v ekstremnih primerih pregrejejo. Volnatost je posledica slabe adhezije med želatinskim slojem ter ostalimi sloji celične stene. Izrazita je pri obdelovanju s topimi rezili, popolnoma pa se ji ne moremo izogniti tudi ob uporabi ostrih rezil. Volnatost se zmanjša pri obdelovanju suhega lesa. Suh skobljan tenzijski les se srebrnkasto lesketa (Torelli, 1986). Med obdelavo tenzijskega lesa opazimo izrazito povečane obremenitve in hitrejšo otopitev orodja. Furnir, ki vsebuje tenzijski les se zvije, površina pa je hrapava. Pri nekaterih drevesnih vrstah dobimo volnato površino tudi pri prečnem rezu. Lep primer je bukovina, kjer konci vlaken tenzijskega lesa niso gladko odrezani in se kažejo na površini s srebrnim sijajem z razliko od ostalega tkiva, ki je temnejše barve in brez leska. Pri nekaterih drugih drevesnih vrstah se pokaže tenzijski les v prečnem prerezu kot lepo gladka lisa, ki je temnejše barve kot ostali normalni les (Wardrop in Dedswell, 1955, cit. po Panshin in de Zeeuw, 1980).

Prepoznavanje tenzijskega lesa poteka z mikroskopsko preiskavo preparatov, kjer zaznavamo večje količine celuloze in majhen delež lignina. Najboljši pokazatelj vseh tipov tenzijskega lesa in v vseh stopnjah natančnosti je diferencialno obarvanje. Z uporabo »safranin-fast green« dobimo normalno lignificirano celično steno obarvano temno rdeče, del celične stene tenzijskega lesa, ki ima zelo malo lignina pa se obarva svetlo zeleno. Ta kombinacija barvila ima to prednost, da omogoča zelo jasno prepoznavanje tako posameznih kot tudi večje skupke tenzijskih vlaken (Panshin in de Zeeuw, 1980). Podobno lahko safranin kombiniramo z astra modro. Safranin obarva lignificirane celične stene rdeče, astra modro pa obarva nelignificirane celične stene v modro (Čufar, 2001). Naslednje barvilo, ki je široko uporabno je klor-cink-jod. Uporaben je za barvanje mikroskopskih preparatov kot tudi za obarvanje gladke površine večjih vzorcev. S klor-cink-jodom se obarva tenzijski les sivo-modro ali

modrikasto vilično in normalni les rumenkasto rjavo (Panshin in de Zeeuw, 1980). Na sliki 1 in 2 je prikazan diferencialno obarvan preparat bukovine z vključenimi tenzijskimi vlakni.



Slika 1: Večja koncentracija tenzijskih vlaken (modro obarvana) pri bukovini



Slika 2: Posamezna tenzijska vlakna (modro obarvana) pri bukovini

2.1 ANATOMSKA ZGRADBA TENZIJSKEGA LESA

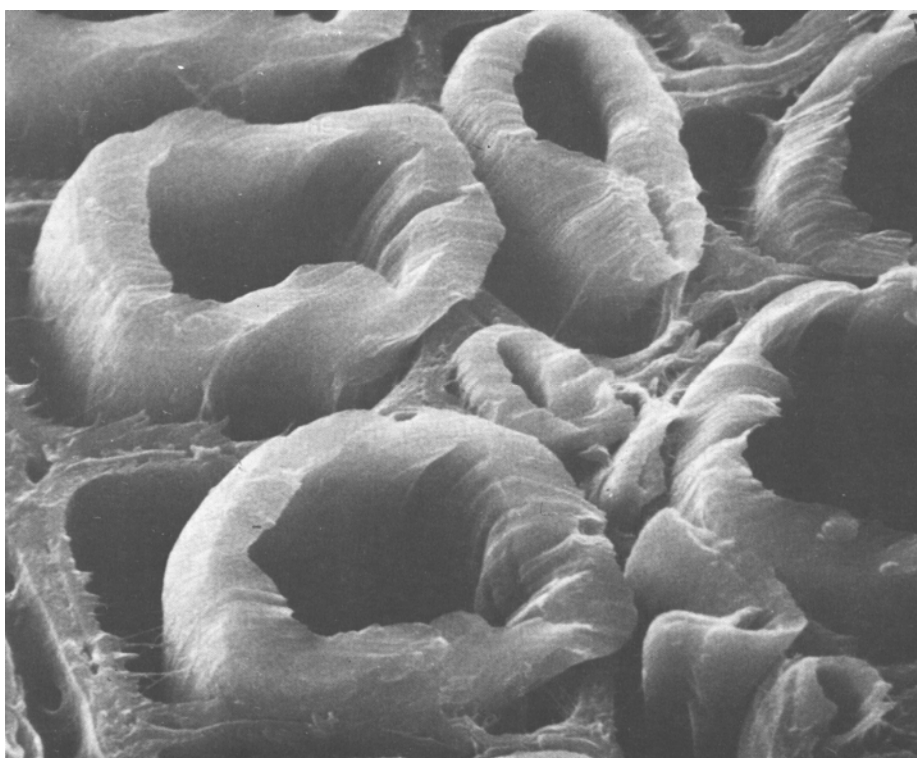
Osnovne anatomske razlike tenzijskega in normalnega lesa se nanašajo v glavnem na vlakna. Karakteristike trahej se v tenzijskem in normalnem lesu ne razlikujejo, so pa traheje v tenzijskem lesu manjše in manj številne. Trakovi naj bi bili v tenzijskem lesu manjši, aksialnega parenhima je manj tako po številu kot po količini (Panshin in de Zeeuw, 1980).

Območja tenzijskega lesa so pri listavcih navadano omejena na rani les, vendar se lahko v nekaterih primerih (zimzeleni listavci kot npr. *Eucalyptus*) pojavljajo po celi braniki (Panshin in de Zeeuw, 1980). V splošnem je delež vlaken pri tenzijskem lesu višji kot pri normalnem lesu, le-ta pa so manjših premerov, skorajda okrogla ali ovalna v prečnem prerezu in so daljša. Celične stene vlaken so debelejšje in imajo manj pikenj (Bodig in Jayne, 1982). Les nasproti tenzijskemu, to je na spodnji strani s krajšim polmerom vsebuje manj vlaken kot normalni les, ki vsebuje krajša in bolj lignificirana vlakna (Panshin in de Zeeuw, 1980).

Glavna značilna modifikacija vlaken tenzijskega lesa je razvoj »želatinskega« sloja (G-sloja) v celični steni. Večina definicij tenzijskega lesa temelji prav na prisotnosti G-sloja v celični steni vlaken. G-sloj je sestavljen iz celuloznih mikrofibril, ki oklepajo kót z vzdolžno osjo približno 5° (Onaka, 1949, cit. po Panshin in de Zeeuw, 1980; Wardrop in Dedswell, 1955, cit. po Panshin in de Zeeuw, 1980). Ta želatinski oz. G-sloj je običajno malo debelejši ali enako debel kot sloj S2 normalne celične stene. Vedno se pojavi na notranji strani celične stene, na strani lumna. Pogosto je nabreklega videza z delnim odleplenjem od ostalih plasti sekundarne celične stene (Panshin in de Zeeuw, 1980).

Celična stena je pri želatinskih vlaknih lahko organizirana na tri načine: (a) Želatinski sloj je lahko prisoten v vlaknih tenzijskega lesa kot dodatek vsem trem slojem normalno lignificirane sekundarne celične stene (S1+S2+S3+G). (b) G-sloj zamenja S3 sloj sekundarne celične stene v vlaknu tenzijskega lesa. S1 in S2 ostaneta nespremenjena (S1+S2+G). (c) Celično steno lahko nadomesti debelejši G-sloj s plastjo, ki je skladna sloju S1 celične stene vlakna normalnega lesa (S1+G) (Panshin in de Zeeuw, 1980). Primarna celična stena je normalna, sloj S1 je lahko tanjši kot sicer (Torelli, 1986).

Rezultat prisotnosti G-sloja (»želatinastega« sloja), v kateremkoli prej omenjenem razporedu, je skoraj vedno debelejša celična stena. Razen pri nekaterih izjemah se G-sloj pod mikroskopom vidi kot upognjen in ohlapno pritrjen ali pa je celo brez povezave z ostalo celično steno. Kemijska barvila pa ne pokažejo prisotnosti lignina. Ali je zmečkan videz nastal pri pripravljanju preparata ali iz drugih razlogov, kot so rastne napetosti ni popolno jasno. V vsakem primeru ima »želatinski« sloj oz. G-sloj obliko bolj ali manj ohlapnega rokava znotraj celice, kot je vidno na sliki 3 (Panshin in de Zeeuw, 1980).



Slika 3: Pogled prečnega prereza vlaken tenzijskega lesa pri topolu (*Populus* sp.) z ohlapnim štrlečim želatinskim slojem. Posnet je z rasterskim elektronskim mikroskopom (Panshin in de Zeeuw, 1980).

Nagnjenost debela je najpomembnejši dejavnik, ki vpliva na število želatinskih vlaken pri rodovih kot so javor (*Acer*), topol (*Populus*) in vrba (*Salix*). Naklon debela kot tudi stopnja pospešene radialne rasti na »tenzijski« strani sta v pozitivni korelaciji s številom želatinskih vlaken, kar nakazuje, da se učinek tenzijskega lesa s povečano nagnjenostjo debela ter ekscentričnostjo poveča (Panshin in de Zeeuw, 1980).

Znan je obstoj modificiranih želatinskih vlaken v listavcih, ki tvorijo tenzijski les z značilnim prečnim prerezom vendar želatinastih vlaken ne kažejo z običajnimi preiskovalnimi

metodami. Tak primer je hrast dob, ki ima v svojih želatinskih vlaknih G-sloj z zadostno količino lignina da z običajnim diferencialnim barvanjem teh vlaken ne ločimo od normalnih. Izjemi sta tudi rodova jesen (*Fraxinus*) in lipa (*Tilia*) in nekateri primeri *Liriodendron*, ki ne kažejo prisotnosti G-sloja vendar imajo vlakna kljub temu pomanjkanje lignina (Panshin in de Zeeuw, 1980).

Modifikacija lesnega tkiva ni omejena samo na cono tenzijskega lesa v nagnjenih deblih. Na nasprotni strani tenzijskega lesa oz. na spodnji strani poševnih debel so bila najdena krajša vlakna od normalnih. Ravno obratno, kot so modificirana vlakna tenzijskega lesa daljša od normalnih vlaken. V tenzijskem lesu imajo spremenjeno obliko in število tako vlakna kot tudi traheje. Vendar v lesu na nasprotni strani tenzijskega so modificirana le vlakna ne pa tudi traheje. Na tenzijski strani imajo mnoge vrste debelejšo skorjo z neobičajno debelostenimi vlakni ličja, kjer je prav tako prisoten želatinski sloj (Panshin in de Zeeuw, 1980).

2.2 KEMIJSKA SESTAVA TENZIJSKEGA LESA

Mnoge kemijske analize tenzijskega lesa so pokazale, da vsebuje tenzijski les večji delež celuloze, manjši delež lignina in manjšo količino polioz kot pri normalnem lesu, če pri obdelavi podatkov računamo z maso lesa v absolutno suhem stanju (Panshin in de Zeeuw, 1980).

Delež celuloze normalnega lesa je približno 40%. Delež celuloze tenzijskega lesa pa je povečana na približno 50%, odvisno od debeline želatinskega sloja, ki je razlog za povečan delež celuloze. Želatinski sloj vsebuje več kot 98% celuloze z zelo majhno količino ostalih polisaharidov in približno enako ali malo večjo količino anorganskih sestavin kot v celični steni normalnega lesa. Celuloza v G-sloju je večinoma visoko kristalizirana (Panshin in de Zeeuw, 1980).

Vsebnost lignina v vlaknih tenzijskega lesa je nižja kot v normalnih vlaknih, vendar le če ga izrazimo z odstotkom od celotnega lesa, vključno z dodano celulozo v želatinskem vlaknu tenzijskega lesa. Lignin je v vlaknu tenzijskega lesa prisoten v sloju S1 in S2 v enaki absolutni količini kot v enakem sloju normalnega vlakna. Toda, ker sta sloja S1 in S2 v vlaknu tenzijskega lesa tanjša, je koncentracija lignina v teh slojih »tenzijskega« vlakna dejansko večja kot pri normalnem vlaknu.

Skladiščenje škroba in sladkorjev v tenzijskem lesu je prisotno v manjših količinah kot pri lesu, ki je v prečnem prerezu na nasprotni strani tenzijskega. To lahko vpliva na zmanjšanje delovanja mikroorganizmov, ki te substance potrebujejo za lasten razvoj in preživetje (Panshin in de Zeeuw, 1980).

Tenzijski les se mehansko lažje razvlaknjuje kot normalen les, poleg tega vsebuje nizek delež lignina ter lignokarbonatnih kompleksov, vendar ima papir izdelan iz tenzijskih vlaken nižjo natezno trdnost kot papir iz vlaken normalnega lesa. Tenzijski les je primernejši v primerih kemijske predelave, ko je količinski izkoristek pomembnejši od mehanskih lastnosti predelanega lesa (Panshin in de Zeeuw, 1980).

2.3 FIZIKALNE LASTNOSTI

Tenzijski les se razlikuje od normalnega lesa v mnogih fizikalnih karakteristikah. Vendar so te razlike manjše kot jih lahko opazimo med normalnim lesom in reakcijskim lesom iglavcev (Panshin in de Zeeuw, 1980).

Razlika med gostoto tenzijskega in normalnega lesa je odvisna od zgradbe celične stene »tenzijskih« celic. Pri najdebelejših vlaknih tenzijskega lesa je lahko zaradi prisotnega debelega želatinskega sloja gostota do 30% večja, kot pri normalnih vlaknih. Povečanje gostote pri tvorjenju tenzijskega lesa je običajno veliko manjše in sicer se giblje od 5% do 10% za les z relativno tankim želatinskim slojem. Ekstremni primer lahko najdemo pri lipi (*Tilia*), ki tvori tenzijski les z nižjo gostoto kot jo ima normalen les (Panshin in de Zeeuw, 1980).

Vzdolžno krčenje tenzijskega lesa je le redko večje od 1% vendar je od zanemarljivega vzdolžnega krčenja navadnega lesa občutno večje. Običajno je vzdolžno krčenje tenzijskega lesa enkrat do dvakrat večje kot pri normalnem lesu. Pri izjemah krčenje tenzijskega lesa preseže krčenje normalnega lesa 3-krat pri hrastu (*Quercus*) in do 5-krat pri *Populus deltoides* Bartr. Stopnja povečanja krčenja v vzdolžni smeri je neposredno povezana s številom prisotnih tenzijskih vlaken oz. »želatinastih« vlaken (Panshin in de Zeeuw, 1980).

Vzdolžnega krčenja G-sloja v celični steni tenzijskega lesa skoraj ni, ker so celulozne mikrofibrile v G-sloju približno vzporedne z vzdolžno osjo vlakna. Glavni vzrok za povečano vzdolžno krčenje sta S1 in S2 sloja sekundarne celične stene vlakna tenzijskega lesa, ki imata običajen mikrofibrilaren kot, ki je dokaj velik. G-sloj je le ohlapno vezan na ostali del celične stene in tako ne ovira velikega krčenja S1 in S2 sloja celične stene »želatinastega« vlakna (Panshin in de Zeeuw, 1980).

Tangencialno in radialno krčenje tenzijskega lesa bi teoretično moralo biti manjše od krčenja normalnega lesa, ker je longitudinalno krčenje večje pri tenzijskem lesu. Praktični primeri pa ne potrjujejo teorije. Za razjasnitev koncepta so potrebna dodatna raziskovanja (Panshin in de Zeeuw, 1980).

Dokazano je, da se ravnovesna vlažnost tenzijskega lesa pri *Acer saccharum* Marsh. obnaša zelo podobno kot ravnovesna vlažnost kompresijskega lesa in ima nekoliko višje vrednosti kot jih najdemo pri normalnem lesu pri enaki temperaturi in relativni zračni vlažnosti (Panshin in de Zeeuw, 1980).

Informacije o mehanskih lastnostih tenzijskega lesa so dokaj nepopolne (Panshin in de Zeeuw, 1980). Tlačna trdnost vzporedno z vlakni je pri tenzijskem lesu nižja kot pri normalnem lesu v vseh stopnjah vlažnosti, tudi z upoštevanjem enake gostote. Podobno lahko trdimo za tlačno trdnost pravokotno na vlakna in modul elastičnosti pri upogibu (Panshin in de Zeeuw, 1980).

3 MATERIAL IN METODA

3.1 MATERIAL

Pri eksperimentalnem delu smo uporabili bukovino (*Fagus sylvatica* L.) dveh virov. Vzorce iz prvega vira smo priskrbeli iz že posekanih dreves, tako da pri teh vzorcih ni znan naklon debela ali neenakomerno razraščena krošnja. Na hlokih, ki so kazali ekscentrični prečni prerez in nekateri tudi ukrivljenost vzdolžne osi debela, smo predvidevali prisotnost tenzijskega lesa. Vzorci iz prvega vira so bili z manj izrazitimi razlikami med tenzijskim in normalnim lesom, kar potrjuje, da izrazit ekscentrični prečni prerez in tudi ukrivljenost vzdolžne osi niso zadosten pokazatelj prisotnosti večje koncentracije tenzijskega lesa.

Pri pripravi skupine vzorcev iz drugega vira smo poiskali rastoča bukova drevesa z razvidnimi vzroki za nastanek tenzijskega lesa in z jasno in razločno prisotnostjo tenzijskega lesa. Tudi med pripravljanjem vzorcev smo skrbno izbrali lokacije s pričakovanim večjim deležem tenzijskih vlaken. Pri nekaterih primerih smo prisotnost tenzijskega lesa potrdili tudi z mikroskopsko preiskavo diferencialno obarvanih vzorcev. Kot je razvidno iz slike 1 in slike 2 so se tenzijska vlakna pojavljala posamično ali v večji koncentraciji kot snopi v večjih skupkih ali v širših ali ožjih pasovih. Vzorci iz drugega vira izrazitejše kažejo prisotnost koncentriranega tenzijskega lesa in predstavljajo glavni vir zaneslivejših eksperimentalnih podatkov. Vzorce smo odvzeli na prsni višini drevesa, kjer je prepletenost vlaken manjša in so aksialni elementi dovolj vzporedni.

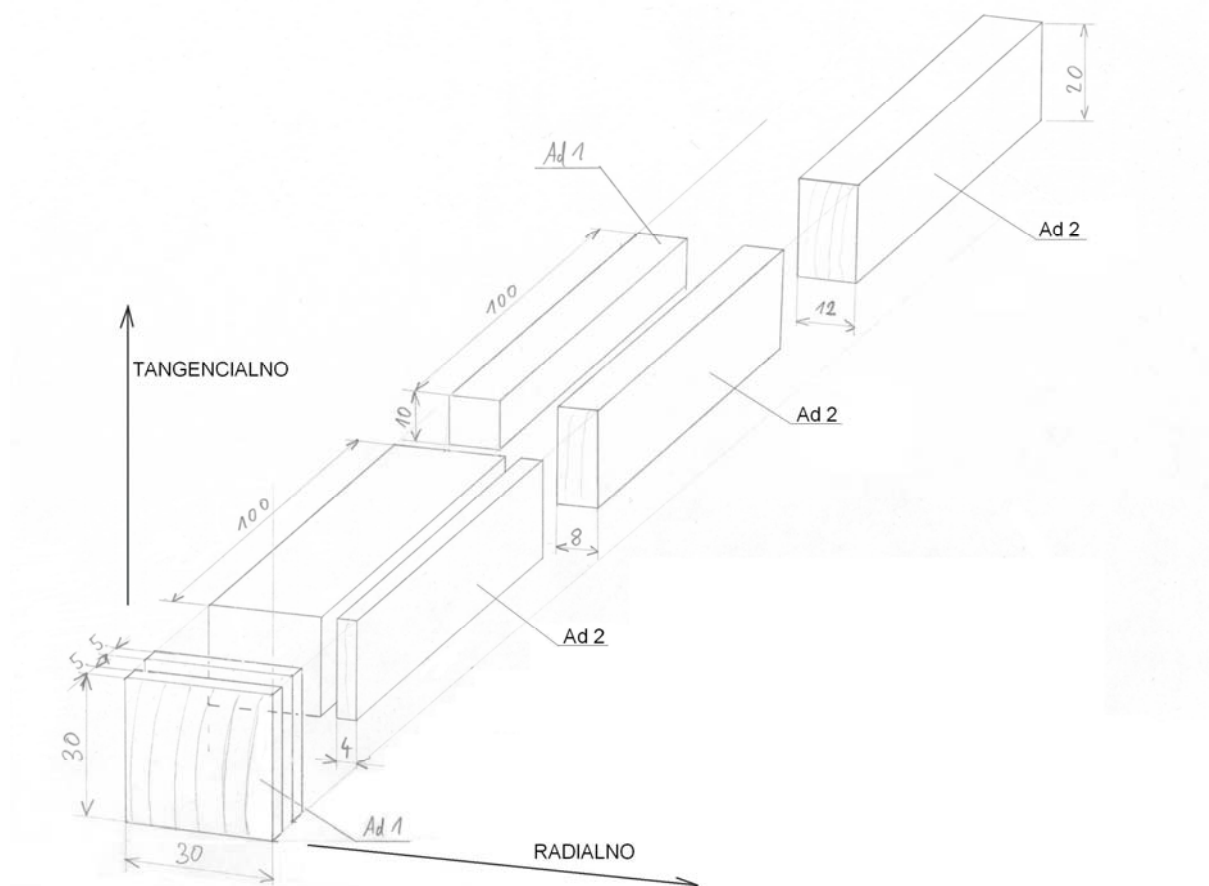
3.1.1 Izdelava vzorcev

Za odvzem vzorcev smo imeli na voljo osem debel iz katerih smo odžagali hlokiče dolžine približno 40cm. Čelno ploskev hlokiča smo očistili in poskobljali, da smo lažje določili lokacijo koncentriranega tenzijskega lesa. Na vsakem hloku smo določili več mest primernih lokacij tenzijskega lesa in eno ali več mest za izrez vzorca normalnega tkiva (slika 4). Izdelane vzorce dimenzij ($R \times T \times L = 30\text{mm} \times 30\text{mm} \times 350\text{mm}$) smo označili tako, da smo lahko sledili njihovu izvoru in kategoriji. Pri izdelavi vzorcev smo pazili na njihovo orientacijo, tako da so ravnine obdelave sovpadale z anatomske. Pri razrezu hloka smo odkrili nekaj preraslih grč, ki bi lahko moteče vplivale na potek vlaken v izrezanih vzorcih, zato smo nekatere predvidene lokacije za izrez naknadno spremenili.



Slika 4: Primer hlodiča z označenimi predvidenimi lokacijami za odvzem vzorcev.

Iz slike 5 je razvidno, kako smo velike izrezane vzorce v nadaljevanju krojili, da smo dobili vzorce za določanje sorpcijskih in krčitvenih lastnosti in vzorce za določitev difuzijskih koeficientov. Ves čas med pripravo vzorcev je bilo potrebno preprečiti nekontrolirano sušenje lesa zato smo ga po vsakem razrezu shranili v PVC folijo. Vzorci za določanje sorpcijskih in krčitvenih lastnosti in vzorci za določitev difuzijskega koeficienta so iz istega »velikega izrezanega vzorca«.



Slika 5: Krojenje vzorcev za določanje sorpcijskih in krčitvenih lastnosti (Ad 1) in za določitev difuzijskega koeficienta (Ad 2).

3.1.1.1 Vzorci za določanje sorpcijskih in krčitvenih lastnosti

Za določanje sorpcijskih in krčitvenih lastnosti smo izdelali vzoredna vzorca dim. $R \times T \times L = 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ za spremljanje krčenja v radialni in tangencialni smeri in dva vzorca dim. $R \times T \times L = 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ za spremljanje vzdolžnih skrčkov. Vsi vzorci so bili orientirani in natančno izdelani, da so zagotovili čim večjo natančnost meritev.

3.1.1.2 Vzorci za določanje difuzijskega koeficienta

Vzorci za določanje difuzijskega koeficienta smo vzeli iz istih hlodov. Izdelali smo tri zaporedne vzorce različnih debelin:

$$R \times T \times L = 4 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$$

$$R \times T \times L = 8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$$

$$R \times T \times L = 12 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$$

Na vsakem vzorcu za določitev difuzijskega koeficienta smo eno tangencialno ploskev pustili odprto, ostale pa smo premazali s paroneprepustnim slojem epoksidne smole, da bi dobili difuzijo vode samo v radialni smeri.

3.2 METODE

3.2.1 Krčitvene in sorpcijske lastnosti

Vzorci, s katerimi smo določali krčitvene in sorpcijske lastnosti, smo najprej stehali na 0,001g natančno in izmerili vse dimenzije na 0,01mm natančno v vlažnem stanju. Nato smo jih sušili v več stopnjah relativnih zračnih vlažnosti. Vzorce smo sušili v zaprtih kontejnerjih s kontrolirano temperaturo in relativno zračno vlažnostjo. Kontejnerje smo opremili z radialnim ventilatorjem, ki omogoča s prisilnim gibanjem zraka hitrejšo izhlapevanje vode oz. hitrejšo izmenjavo vlage in enakomerne pogoje po celotnem kontejnerju tudi v manjših prostorih med posameznimi vzorci. Pri sušenju na prvi stopnji smo izpostavili vzorce v zatesnjenem kontejnerju z relativno zračno vlažnostjo 86%, ki smo jo dosegli z nasičeno vodno raztopino ZnSO_4 pri 20°C. Pri omenjenih pogojih smo vzorce obdržali toliko časa, da smo pri dveh zaporednih tehtanjih ugotovili zanemarljivo majhno razliko v masi, kar pomeni, da se je vzorec uravnovesil izpostavljenim zračnim pogojem. Uravnovešenim vzorcem smo izmerili dimenzije na 0,01mm natančno in maso na 0,001g natančno. Postopek smo ponovili v več klimah pri konstantni temperaturi 20 ± 0.2 °C. Vsaka naslednja je bila z nižjo relativno zračno vlažnostjo (86%, 75%, 65%, 47%, 37%, 19%), ki smo jih dosegli z nasičeno raztopino soli (pregl. 1). Na koncu smo vzorce posušili pri temperaturi 103°C na absolutno suho stanje. Pred tehtanjem in merjenjem dimenzij absolutno suhih vzorcev smo vzorce ohladili v eksikatorju.

Preglednica 1: Relativna zračna vlažnost v kontejnerjih z nasičeno vodno raztopino soli.

Sol	Relativna zračna vlažnost $\varphi_{T=20^{\circ}\text{C}}$
ZnSO ₄	86 %
NaCl	75%
NaNO ₂	65%
K ₂ CO ₃	47%
MgCl ₂	37%
CH ₃ COOK	19%

3.2.1.1 Gostota

Gostoto vzorca smo izračunali tako, da smo maso absolutno suhega vzorca delili s prostornino, ki jo je vzorec zavzel v absolutno suhem stanju.

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} \quad \dots (1)$$

ρ_0 ... gostota absolutno suhega vzorca

m_0 ... masa absolutno suhega vzorca

V_0 ... volumen absolutno suhega vzorca

3.2.1.2 Krčenje in nabrekanje

Totalni skrček v longitudinalni smeri smo določili kot odstotek razlike v dolžini (med svežim in absolutno suhim vzorcem) od dolžine vlažnega vzorca. Analogno dobimo totalni skrček v radialni in tangencialni smeri.

$$\beta_L = \frac{\Delta L}{L_{vl}} \times 100 \text{ [%]} \quad \Delta L = L_{vl} - L_0$$

$$\beta_T = \frac{\Delta T}{L_{vl}} \times 100 \text{ [%]} \quad \Delta T = T_{vl} - T_0 \quad \dots (2)$$

$$\beta_R = \frac{\Delta R}{L_{vl}} \times 100 \text{ [%]} \quad \Delta R = R_{vl} - R_0$$

β_L ... totalni skrček v longitudinalni smeri

β_T ... totalni skrček v tangencialni smeri

β_R ... totalni skrček v radialni smeri

$L_{vl}, T_{vl}, R_{vl} \dots$ longitudinalna, tangencialna in radialna dimenzija vlažnega vzorca

$L_0, T_0, R_0 \dots$ longitudinalna, tangencialna in radialna dimenzija absolutno suhega vzorca

Podobno smo izračunali totalni nabrek kot odstotek razlike v dolžini (med svežim in absolutno suhim vzorcem) od dolžine absolutno suhega vzorca.

$$\begin{aligned}\alpha_L &= \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \text{ [%]} & \Delta L &= L_{vl} - L_0 \\ \alpha_T &= \frac{\Delta T}{L_0} \times 100 \text{ [%]} & \Delta T &= T_{vl} - T_0 \\ \alpha_R &= \frac{\Delta R}{L_0} \times 100 \text{ [%]} & \Delta R &= R_{vl} - R_0\end{aligned} \quad \dots (3)$$

$\alpha_L \dots$ totalni nabrek v longitudinalni smeri

$\alpha_T \dots$ totalni nabrek v tangencialni smeri

$\alpha_R \dots$ totalni nabrek v radialni smeri

$L_{vl}, T_{vl}, R_{vl} \dots$ longitudinalna, tangencialna in radialna dimenzija vlažnega vzorca

$L_0, T_0, R_0 \dots$ longitudinalna, tangencialna in radialna dimenzija absolutno suhega vzorca

Približno volumensko krčenje smo izračunali iz linearnih skrčkov.

$$\beta_V \approx \beta_L + \beta_T + \beta_R \quad \dots(4)$$

Prečno krčitveno anizotropijo smo izračunali iz razmerja tangencialnega in radialnega totalnega skrčka.

$$A_n = \beta_T / \beta_R \quad \dots(5)$$

3.2.1.3 Kazalniki dimenzijske stabilnosti

Kazalnike dimenzijske stabilnosti smo določili na podlagi sprememb dimenzij vzorca in spremembe ravnovesne vlažnosti med izpostavitvijo 75% in 37% zračni vlažnosti. Diferencialno nabrekanje v radialni (q_r) in tangencialni (q_t) smeri podaja spremembo prečnih dimenzij lesa, če se lesna vlažnost spremeni za 1%.

$$q_{R,T} = \frac{\Delta \alpha}{\Delta u} = \frac{\left\{ \frac{L_{R,T(\varphi=75\%)} - L_{R,T(\varphi=37\%)}}{L_{R,T(\varphi=0\%)}} \right\}}{u_{(\varphi=75\%)} - u_{(\varphi=37\%)}} \quad \dots(6)$$

Koeficient nabrekanja v radialni (h_r) in tangencialni (h_t) smeri smo določili s spremembo dimenzije, če se relativna zračna vlažnost spremeni za 1%:

$$h_{r,T} = \frac{\Delta \alpha}{\Delta \varphi} = \frac{\left\{ \frac{l_{R,T(\varphi=75\%)} - l_{R,T(\varphi=37\%)}}{l_{R,T(\varphi=0\%)}} \right\}}{\varphi_2 - \varphi_1} \quad \dots(7)$$

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

$$s = \frac{\Delta u}{\Delta \varphi} = \frac{u_{(\varphi=75\%)} - u_{(\varphi=37\%)}}{\varphi_2 - \varphi_1} \quad \dots(8)$$

3.2.1.4 Ravnovesna vlažnost

Ravnovesno vlažnost smo določili vzorcem, ki so se uravnovesili v več komorah. V vsaki na drugačno relativno zračno vlažnostjo. Ravnovesno vlažnost lesa smo izračunali za vsako relativno zračno vlažnost posebej. Ravnovesno vlažnost smo določili kot odstotek razlike v masi (med vlažnim in absolutno suhim vzorcem) od mase absolutno suhega vzorca.

$$u_r(\varphi) = \frac{m_\varphi - m_0}{m_0} \times 100 \quad [\%] \quad \dots(9)$$

$u_r(\varphi)$... ravnovesna vlažnost lesa v odvisnosti od relativne zračne vlažnosti

m_φ ... masa vzorca, ki je uravnovešen na kontrolirano zračno vlažnost

m_0 ... masa absolutno suhega vzorca

Ravnovesne vlažnosti v odvisnosti od relativne zračne vlažnosti smo prilagodili Hailwood-Horobinovemu in Dentovemu modelu sorpcijske krivulje. Pri obdelavi podatkov smo najprej izračunali vrednosti h/u_r za razpoložljive zračne vlažnosti nato pa s primernim orodjem določili kvadratno krivuljo, ki se najboljše prilega izračunanim vrednostim. Krivulja ima obliko:

$$h / u_r = A + B h - C h^2 \quad \dots(10)$$

Z metodo najmanjših kvadratov smo določili konstante A , B in C . Omenjena krivulja je najpogostejši matematični zapis sorpcijskih izoterm, ki temelji na Hailwood-Horobinovi teoriji in Dentovi teoriji. Iz konstant A , B in C , ki smo jih določili na podlagi eksperimentalnih podatkov vsakega vzorca, smo lahko po naslednji zvezi določili konstante b_1 , b_2 in u_0 za Dentov model in K_d , K_h in u_0 za H-H model (Skaar, 1988).

$$\frac{h}{u_r} = \frac{1}{u_0 \cdot b_1} + \frac{b_1 - 2b_2}{u_0 \cdot b_1} \cdot h - \frac{b_1 \cdot b_2 - b_2^2}{u_0 \cdot b_1} \cdot h^2 \quad \dots(11)$$

$$\frac{h}{u_r} = \frac{1}{u_0 \cdot K_d \cdot (K_h + 1)} + \frac{K_h - 1}{u_0 \cdot (K_h + 1)} \cdot h - \frac{K_h \cdot K_d}{u_0 \cdot (K_h + 1)} \cdot h^2 \quad \dots(12)$$

Ravnovesna vlažnost lesa (u_r) je izračunana kot vsota primarne in sekundarne absorbirane vlage kot funkcija relativne zračne vlage (h):

Po Dent-ovem modelu
$$u_r = \frac{b_1 \cdot h}{1 - b_2 \cdot h + b_1 \cdot h} + \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot h^2}{(1 - b^2 \cdot h) \cdot (1 - b^2 \cdot h + b_1 \cdot h)} \quad \dots(13)$$

Po H-H modelu
$$u_r = \frac{u_0 \cdot K_h \cdot K_d \cdot h}{1 + K_d \cdot K_h \cdot h} + \frac{u_0 \cdot K_d \cdot h}{(1 - K_d \cdot h)} \quad \dots(14)$$

3.2.1.5 Vlažnost točke nasičenja celičnih sten

Vlažnost točke nasičenja celičnih sten (TNCS) smo določili na tri načine:

- z ekstrapolacijo sorpcijske izoterme do 100% relativne zračne vlage,
- z določitvijo začetka krčenja v procesu sušenja (metoda interseksijske točke),
- z računanjem razmerja med volumenskim skrčkom in osnovno gostoto ob korekciji gostote adsorbirane vode.

$$u_{TNCS} = \frac{\rho_{vv} \times \alpha_v \times V_{vl}}{m_0} \quad \dots(15)$$

ρ_{vv} ... gostota adsorbirane vode (1115 kg/m³)

3.2.2 Difuzivnost

Pripravljeni vzorci so imeli na začetku vlažnost nad TNCS. Enakomerno razporejene vzorce smo izpostavili konstantnim klimatskim pogojem in sicer v komoro, ki smo ji relativno zračno vlažnost 37% vzdrževali z nasičeno vodno raztopino MgCl₂ pri sobni temperaturi (20°C). Vzorce smo tehtali po v naprej določenem razporedu. Časovni intervali med tehtanjem so bili na začetku kratki zaradi hitrega začetnega izhlapevanja proste vode in s tem hitrega zniževanja mase. Po tem pa je bila dolžina vsakega naslednjega časovnega intervala dvakratna predhodnemu. Med tehtanjem smo morali vzorce čim manj časa zadrževali zunaj komore oz. so bili kako drugače zaščiteni pred nekontrolirano zračno vlažnostjo. Maso vzorcev smo

tehtali z natančnostjo enega miligrama. Natančnost je prišla bolj do izraza pri kasnejšem zelo počasnem sušenju oz. pri zelo majhni spremembi mase med zaporednim tehtanjem.

Difuzivnost je bila izračunana z dvema metodama, ki jih je predlagal Crank (1975).

A) Izračun difuzijskega koeficienta iz polovičnega uravnovesnega časa:

$$\frac{t_{1/2}}{l^2} = -\frac{1}{\pi^2 D} \cdot \ln \left[\frac{\pi^2}{16} - \frac{1}{9} \left(\frac{\pi^2}{16} \right)^9 \right] \quad \dots (16)$$

Od tu lahko izrazimo difuzijski koeficient D . Konstante lahko zapišemo krajše z manjšo napako okoli 0,001% in dobimo:

$$D = \frac{1}{\pi^2} \cdot \ln \frac{\pi^2}{16} \cdot \left(\frac{l^2}{t_{1/2}} \right) = 0,049 \cdot \left(\frac{l^2}{t_{1/2}} \right) \quad \dots (17)$$

B) Določitev difuzijskega koeficienta z brezdimenzijsko spremembo mase proti kvadratnemu korenu časa:

$$E = \frac{m_t}{m_\infty} = \frac{m(t) - m_0}{m_k - m_0} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{D \cdot t}{l^2}} \quad \dots (18)$$

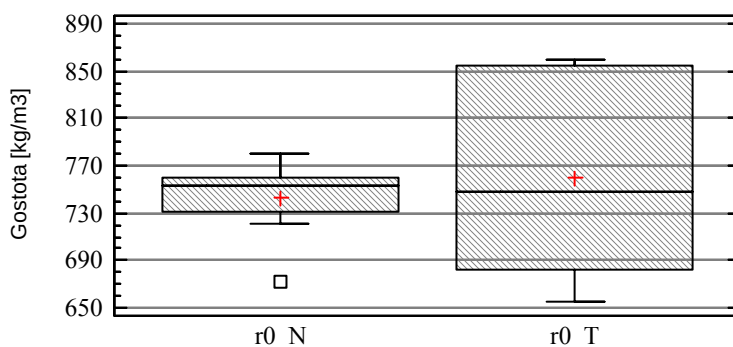
$$D = \frac{\pi \cdot l^2}{4} \cdot \left(\frac{dE}{d\sqrt{t}} \right)^2 \quad \dots (19)$$

D je difuzijski koeficient ali difuzivnost [m^2/s], l je debelina vzorca [m], t je čas [s], E je brezdimenzijska sprememba mase.

4 REZULTATI

4.1 GOSTOTA IN KRČENJE

Povprečna gostota tenzijskega lesa je nekaj več kot 2% večja kot pri normalnem lesu, vendar s statistično analizo ne moremo potrditi značilne razlike zaradi velike standardne deviacije izmerjenih vrednosti gostote tenzijskega lesa. Poleg tega ima normalni kot tudi tenzijski les v naših eksperimentih večjo gostoto v absolutno suhem stanju, kot je navedena običajna gostota v literaturi (Wagenführer in Scheiber, 1989) (sl. 6 in pregl. 1).

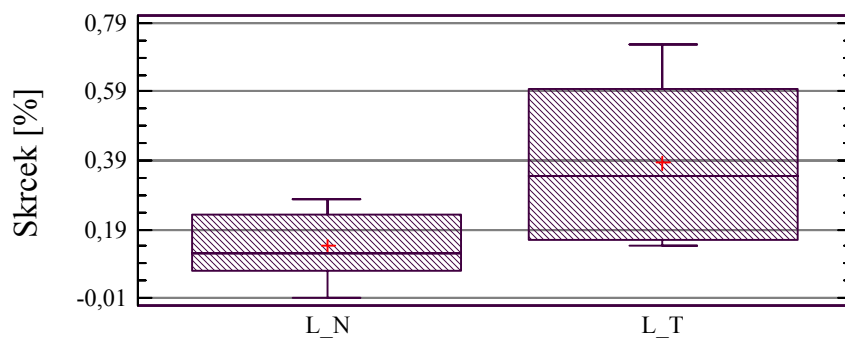


Slika 6: Porazdelitev in razlika gostote med normalnim (T_N) in tenzijskim (T_T) lesom.

Preglednica 2: Povprečna gostota v absolutno suhem stanju (ρ), longitudinalno (β_L), radialno (β_R) in tangencialno (β_T) krčenje normalnega (NL) in tenzijskega lesa (TL), z osnovno statistiko.

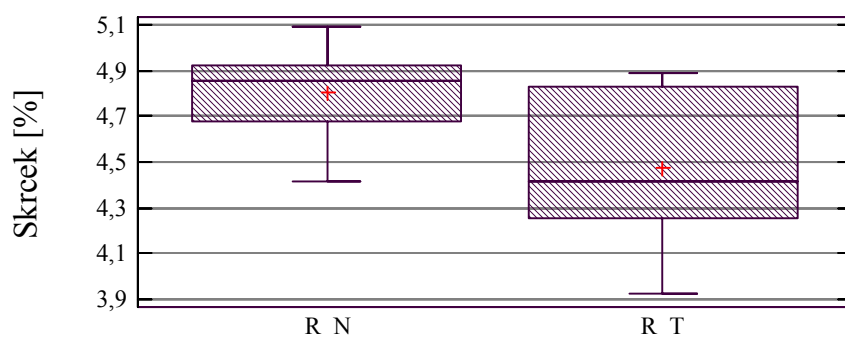
	Gostota v absolutno suhem stanju ρ [kg/m ³]		Longitudinalno krčenje β_L [%]		Radialno krčenje β_R [%]		Tangencialno krčenje β_T [%]	
	NL	TL	NL	TL	NL	TL	NL	TL
n	8	8	8	8	8	8	8	8
Povprečje	742	760	0,14	0,38	4,80	4,48	9,21	8,81
St.dev.	33,0	86,0	0,10	0,24	0,21	0,35	0,41	0,16
KV [%]	4,4	11,3	73,5	62,7	4,4	7,7	4,4	1,8
Min.	673	655	-0,01	0,14	4,41	3,93	8,63	8,65
Maks.	781	859	0,28	0,73	5,09	4,89	9,74	9,14
T-test	0,601		0,026		0,044		0,029	

Kot je bilo pričakovano je bilo longitudinalno krčenje tenzijskega lesa v povprečju 2,7 krat večje od normalnega lesa (sl. 7 in pregl. 2). Razlika je statistično značilna ($p < 0,03$). Te karakteristike so prepoznane kot najbolj vplivne fizikalne lastnosti tkiva tenzijskega lesa.

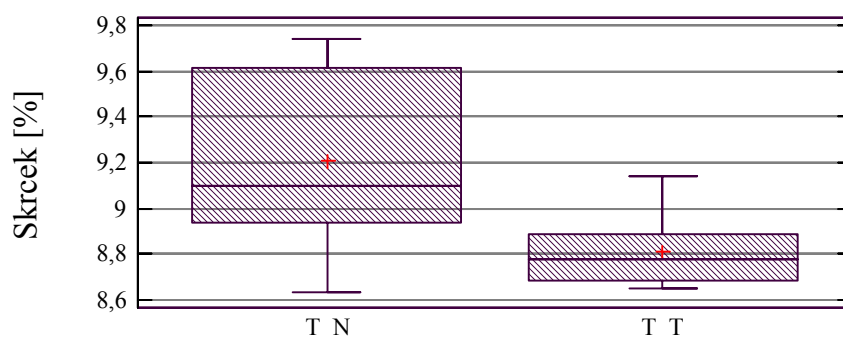


Slika 7: Porazdelitev in razlika vzdolžnega skrčka med normalnim (L_N) in tenzijskim (L_T) lesom.

V obeh prečnih smereh, tako radialni kot tangencialni je krčenje v povprečju manjše pri tenzijskem lesu kot pri normalnem lesu. Razlika krčenja v radialni smeri je statistično značilna s stopnjo zaupanja večjo od 95%. Razlika krčenja v tangencialni smeri pa je statistično značilna s stopnjo zaupanja večjo od 97%. (sl. 8, 9 in pregl. 2).



Slika 8: Porazdelitev in razlika radialnega skrčka med normalnim (R_N) in tenzijskim (R_T) lesom.

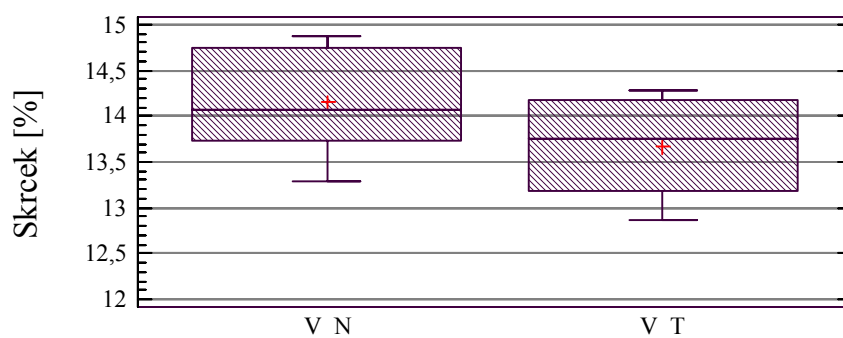


Slika 9: Porazdelitev in razlika tangencialnega skrčka med normalnim (T_N) in tenzijskim (T_T) lesom.

Volumsko krčenje je pri tenzijskem lesu v povprečju malo manjše. Vendar zaradi prevelike standardne deviacije dobljenih vrednosti volumskega krčenja razlika ni statistično značilna (sl. 10 in pregl. 3).

Preglednica 3: Volumsko krčenje normalnega in tenzijskega lesa z osnovno statistiko.

	Volumsko krčenje	
Les:	normalni	tenzijski
n	8	8
Povprečje	14,15	13,67
St.dev.	0,59	0,55
KV [%]	4,2	4,0
Min.	13,28	12,87
Maks.	14,86	14,28
T-test	0,117	



Slika 10: Porazdelitev in razlika volumskega skrčka med normalnim (V_N) in tenzijskim (V_T) lesom.

4.2 SORPCIJSKE LASTNOSTI

4.2.1 Kazalniki dimenzijske stabilnosti

Vsi kazalniki dimenzijske stabilnosti, še zlasti koeficienta nabrekanja in sorpcijski kvocient so tako v normalnem kot tenzijskem lesu nekoliko večji, kot so običajno navedeni v literaturi (Gorišek in sod., 1994).

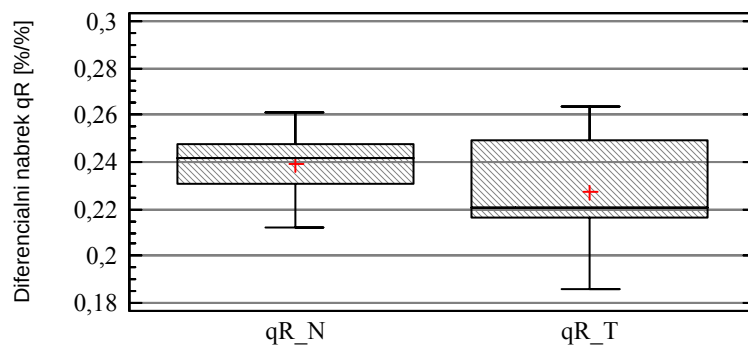
Diferencialno nabrekanje v radialni (q_R) in tangencialni (q_T) smeri ne kažeta razlik med tenzijskim in normalnim lesom (sl. 11, 12 in pregl. 4).

Koeficienta nabrekanja se tako v radialni (h_R) kot v tangencialni (h_T) smeri med normalnim in tenzijskim lesom jasno razlikujeta in sicer sta manjša pri tenzijskem lesu. Razlika koeficienta nabrekanja med tenzijskim in normalnim lesom je v tangencialni (h_T) smeri statistično značilna ($p < 0,05$). Razlika koeficienta nabrekanja med obema kategorijama lesa v radialni (h_R) smeri pa je še izrazitejša. Razlika je statistično značilna s stopnjo značilnosti pod 2% (sl. 13, 14 in pregl. 4).

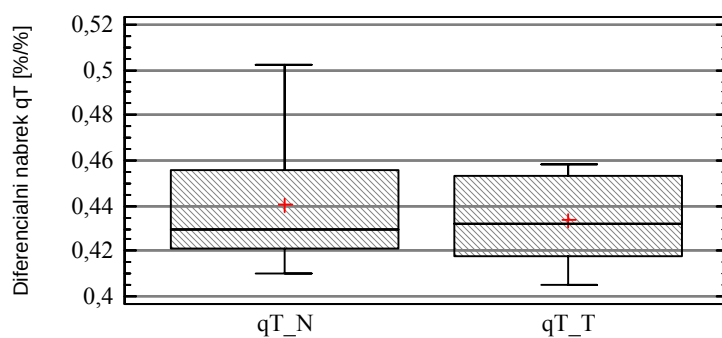
Razlika med sorpcijskim kvocientom (s) normalnega in tenzijskega lesa je zelo jasna in je statistično značilna ($p < 0,02$). Sorpcijski kvocient je pri tenzijskem lesu manjši kot pri normalnem lesu (sl. 15 in pregl. 4).

Preglednica 4: Kazalniki dimenzijske stabilnosti za normalni (NL) in tenzijski (TL) les. Diferencialno nabrekanje v radialni (q_R) in tangencialni (q_T) smeri; koeficient nabrekanja v radialni (h_R) in tangencialni (h_T) smeri ter sorpcijski kvocient (s) z osnovno statistiko.

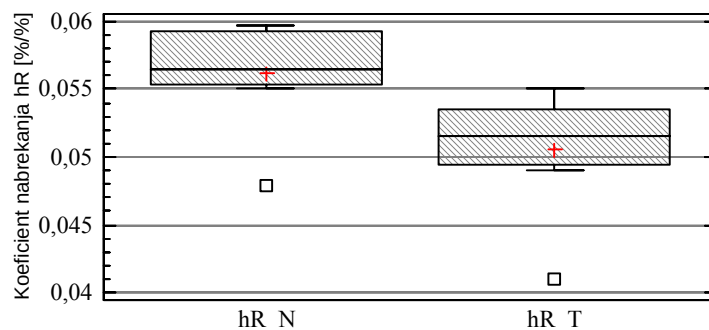
	q_R		q_T		h_R		h_T		s	
	NL	TL	NL	TL	NL	TL	NL	TL	NL	TL
n	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Povprečje	0,239	0,228	0,441	0,434	0,056	0,051	0,104	0,097	0,235	0,223
St. odklon	0,015	0,026	0,030	0,020	0,004	0,004	0,007	0,005	0,007	0,010
KV [%]	6,32	11,34	6,74	4,69	6,89	8,82	6,76	5,49	2,82	4,67
Min	0,212	0,186	0,410	0,405	0,048	0,041	0,093	0,092	0,226	0,206
Maks	0,261	0,264	0,502	0,458	0,060	0,055	0,113	0,107	0,244	0,235
p-vrednost	0,3031		0,5974		0,0182		0,0431		0,0152	



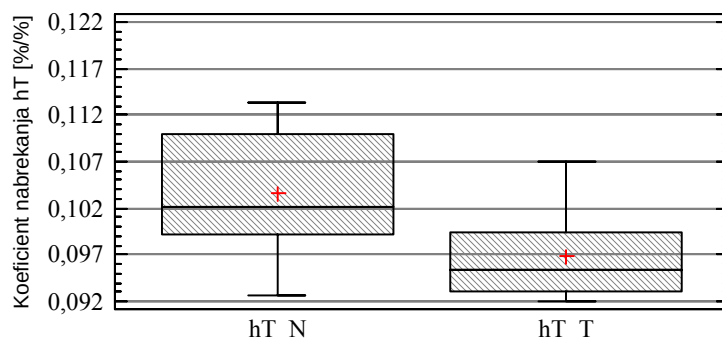
Slika 11: Porazdelitev in razlika diferencialnega nabrekanja v radialni smeri med normalnim (qR_N) in tenzijskim (qR_T) lesom.



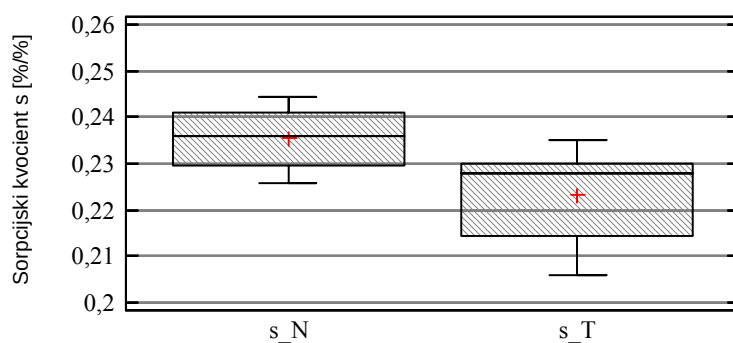
Slika 12: Porazdelitev in razlika diferencialnega nabrekanja v tangencialni smeri med normalnim (qT_N) in tenzijskim (qT_T) lesom.



Slika 13: Porazdelitev in razlika koeficienta nabrekanja v radialni smeri med normalnim (hR_N) in tenzijskim (hR_T) lesom.



Slika 14: Porazdelitev in razlika koeficienta nabrekanja v tangencialni smeri med normalnim (hT_N) in tenzijskim (hT_T) lesom.



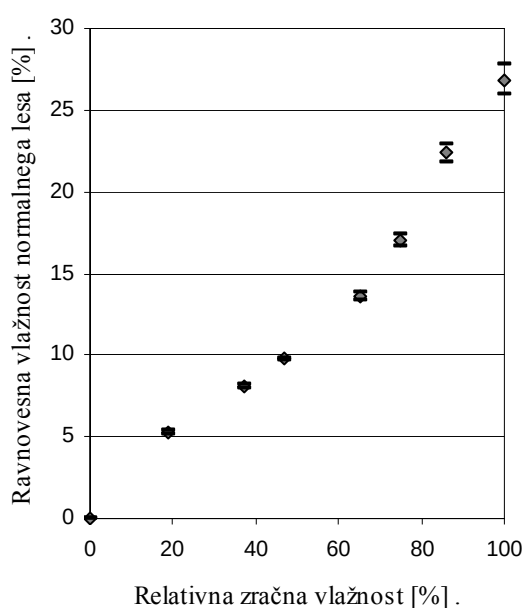
Slika 15: Porazdelitev in razlika sorpcijskega koeficienta med normalnim (s_N) in tenzijskim (s_T) lesom.

4.2.2 Ravnovesna vlažnost

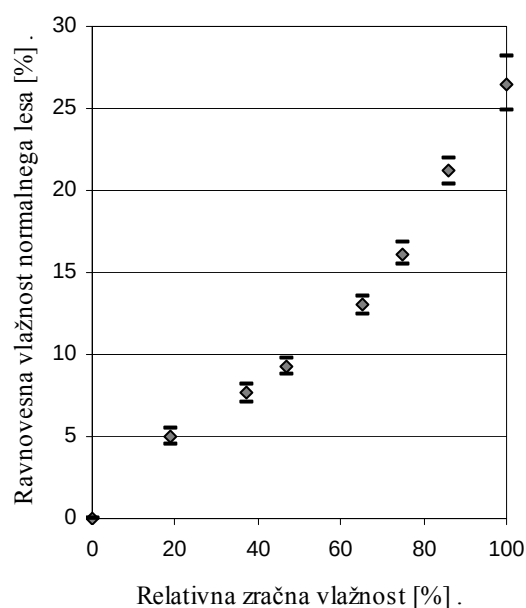
V desorpcijskem procesu so bile ravnovesne vlažnosti tenzijskega lesa v vsem higroskopnem področju nižje, a tudi bolj variabilne kot pri normalnem lesu. Pri začetni vlažnosti oz. v svežem stanju so bile razlike majhne. Največje razlike smo izmerili v komori z relativno zračno vlažnostjo 86% in sicer v povprečju za 1,2% ($p < 0,004$). Pri vsaki naslednji nižji relativni zračni vlažnosti so bile razlike med povprečno ravnovesno vlažnostjo tenzijskega in normalnega lesa manjše, vendar ravnovesne vlažnosti pri nižji relativni zračni vlažnosti tudi manj varirajo (sl. 16 in pregl. 5).

Preglednica 5: Ravnovesna vlažnost normalnega (NL) in tenzijskega (TL) lesa (pri desorpciji) v sedmih stopnjah relativne zračne vlažnosti v povprečju in ostalo osnovno statistiko.

Rel. zr. vl.	100%		86%		75%		65%		47%		37%		19%	
Les	NL	TL	NL	TL	NL	TL	NL	TL	NL	TL	NL	TL	NL	TL
n	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Povprečje	26,8	26,5	22,4	21,2	17,0	16,1	13,6	13,0	9,73	9,30	8,06	7,65	5,26	5,02
St. dev.	0,92	1,66	0,53	0,77	0,4	0,65	0,21	0,57	0,11	0,5	0,15	0,51	0,1	0,45
KV [%]	3,4	6,3	2,4	3,6	2,3	4,1	1,5	4,4	1,2	5,4	1,9	6,7	1,9	9
Min	25,8	24,4	21,3	20,3	16,5	15,3	13,2	12,2	9,59	8,49	7,89	6,75	5,1	4,18
Max	28,7	30	23,2	23,1	18,3	18,3	14	14,5	9,81	10,6	8,48	8,74	5,53	5,92
T-test	0,630		0,0034		0,0074		0,0171		0,0455		0,0574		0,177	



A



B

Slika 16: Ravnovesna vlažnost normalnega (A) in tenzijskega (B) lesa (pri desorpciji) v sedmih stopnjah relativne zračne vlažnosti v povprečju in z območjem standardnega odklona.

Sorpcijske izoterme so zelo podobne pri obeh sorpcijskih modelih (Dent in HH). Razlike med sorpcijskimi krivuljami med normalnim in tenzijskim lesom naraščajo z višjo ravnovesno vlažnostjo lesa. Tako je primarna sorpcijska izoterma, ki se ustali med 6% in 7% ravnovesne vlažnosti lesa za obe kategoriji podobna. Sekundarna sorpcijska izoterma pa je značilno različna in največ prispeva k razlikovanju skupne sorpcijske izoterme. Največja razlika med (povprečnima) sorpcijskima izotermama, ki prikazujeta vsoto primarne in sekundarne sorpcije normalnega in tenzijskega lesa je v območju nad 60% relativne zračne vlažnosti in proti nasičeni zračni vlažnosti narašča vse hitreje (slika. 22).

Preglednica 6: Konstante Dent-ovega (b_1 , b_2 in u_0) in Hailwood-Horrobin-ovega (K_d , K_h in u_0) modela sorpcijskih izoterm. Določene so iz eksperimentalnih podatkov normalnega (NL) in tenzijskega (TL) lesa.

	Den-ov model			H-H model		
	b_2	b_1	u_0	K_d	K_h	u_0
NL	0,811	7,738	7,083	0,811	8,502	7,083
TL	0,808	7,540	6,784	0,808	8,348	6,784

4.2.3 Vlažnost točke nasičenja celičnih sten

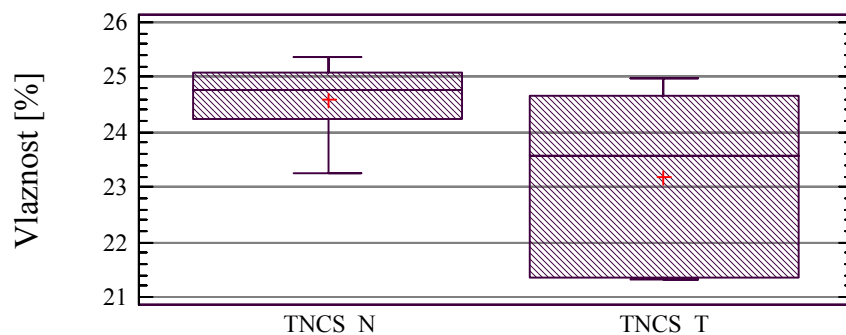
Vlažnost točke nasičenja celičnih sten (TNCS) smo določili s tremi različnimi metodami. Po vseh treh metodah smo pri tenzijskem lesu določili nižjo povprečno vlažnost TNCS kot pri normalnem lesu (sl. 17, 18 in pregl. 7).

Vrednost TNCS smo določili:

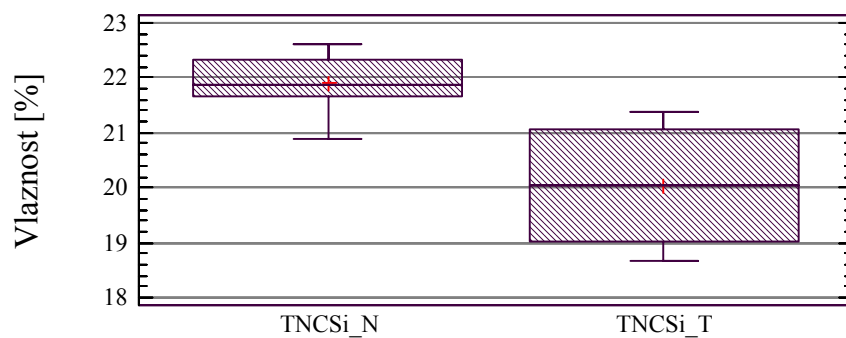
- z ekstrapolacijo sorpcijske izoterme do 100% relativne zračne vlage;
- iz razmerja med volumskim skrčkom in osnovno gostoto ob korekciji gostote absorbirane vode;
- z določitvijo začetka krčenja v procesu sušenja (metoda intersekcijske točke).

Preglednica 7: Vlažnost točke nasičenja celičnih sten (U_{TNCS}) določena z metodo ekstrapolacije sorpcijske izoterme do 100% relativne zračne vlage, iz razmerja med volumskim skrčkom in osnovno gostoto ob korekciji gostote absorbirane vode in z določitvijo začetka krčenja v procesu sušenja (metoda intersekcijske točke) v povprečju in z ostalo osnovno statistiko.

U_{TNCS}						
Metoda	intersekcijske točke		razmerja med skrčkom in osnovno gostoto		ekstrapolacije sorpcijske izoterme	
Les	normalni	tenzijski	normalni	tenzijski	normalni	tenzijski
n	8	8	8	8	8	8
Povprečje	21,90	20,03	24,60	23,19	36,42	34,88
St.dev.	0,56	1,09	0,69	1,63	2,81	2,31
KV [%]	2,6	5,4	2,8	7,0	7,7	6,6
Min.	20,89	18,66	23,25	21,33	29,04	30,12
Maks.	22,63	21,37	25,38	24,98	42,14	37,64
T-test	0,00135		0,0495		0,0993	



Slika 17: Porazdelitev in razlika vlažnosti TNCS (iz razmerja med volumskim skrčkom in osnovno gostoto ob korekciji gostote absorbirane vode) med normalnim (TNCS_N) in tenzijskim (TNCS_T) lesom.



Slika 18: Porazdelitev in razlika vlažnosti TNCS (z metodo interseksijske točke) med normalnim (TNCSi_N) in tenzijskim (TNCSi_T) lesom.

4.3 DIFUZIVNOST

Difuzijski koeficient merjen v radialni smeri je v tenzijskem lesu manjši kot pri normalnem lesu, ampak razlika ni statistično značilna (pregl. 8).

Preglednica 8: Povprečni difuzijski koeficient (D) normalnega (NL) in tenzijskega (TL) bukovega lesa izračunan iz polovičnega uravnovesnega časa in s spremembo brezdimenzijske mase proti kvadratnemu korenu časa med 86% in 37% relativno zračno vlažnostjo z osnovno statistiko.

	Difuzijski koeficient $D [m^2/s \cdot 10^{-10}]$			
	Iz polovičnega uravnovesnega časa		S spremembo brezdimenzijske mase proti kvadratnemu korenu časa	
	Normalen les	Tenzijski les	Normalen les	Tenzijski les
n	8	8	8	8
Povprečje	1,65	1,58	1,58	1,48
Min.	1,59	1,297	1,50	1,18
Maks.	1,83	1,82	1,78	1,77
St.dev.	0,079E-11	0,19E-11	0,95E-11	2,39E-11
CV [%]	4,8	12,2	6,03	16,2

5 RAZPRAVA

Skoraj vse preiskovane fizikalne lastnosti tenzijskega lesa so imele večjo variabilnost kot normalni les. Razlog je verjetno v težavnem odkrivanju in v določanju deleža tenzijskega lesa v vzorcu.

5.1 GOSTOTA IN KRČENJE

5.1.1 Gostota

Tenzijski les ima praviloma debelejšo celično steno. Trahej je manj poleg tega so manjše kot pri normalnem lesu zato smo pričakovali večje razlikovanje gostote med tenzijskim in normalnim lesom. Tako pa razlike niso statistično značilne (sl. 6).

5.1.2 Vz dolžno krčenje

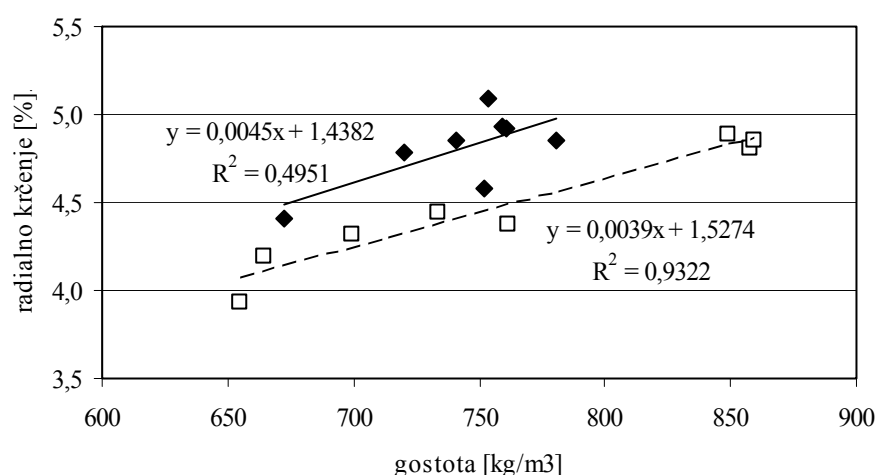
Vzrok povečanega longitudinalnega krčenja tenzijskega lesa je v razmeroma velikem mikrofibrilarnem kotu v S1 sloju celične stene z ustreznim večjim longitudinalnim krčenjem. Vez med želatinskim slojem in preostalim delom celične stene je prešibka, da bi »želatinski« G-sloj s svojimi z vzdolžno osjo vsporednimi mikrofibrilami, ki skoraj nimajo vzdolžnega krčenja, zaviral krčenje v longitudinalni smeri.

5.1.3 Prečno krčenje

Najvplivnejši vzrok manjšega prečnega krčenja se more odkriti v sekundarni celični steni in G-sloju. Sloj S1 z velikim mikrofibrilarnim kotom zavira krčenje v prečni smeri. Vz dolžno orientirane mikrofibrile v G-sloju povzročajo večje prečno krčenje, vendar je vez G-sloja na ostalo celično steno prešibka, da bi krčenje G-sloja vplivalo na večje prečno krčenje vlaken tenzijskega lesa. Zaradi večjega prečnega krčenja G-sloja v primerjavi od ostalih slojev sekundarne celične stene v tenzijskem vlaknu nastanejo med G- in ostalimi sloji velike natezne napetosti, ki so verjetno vzrok za razslojitev omenjenega G sloja od ostale sekundarne celične stene.

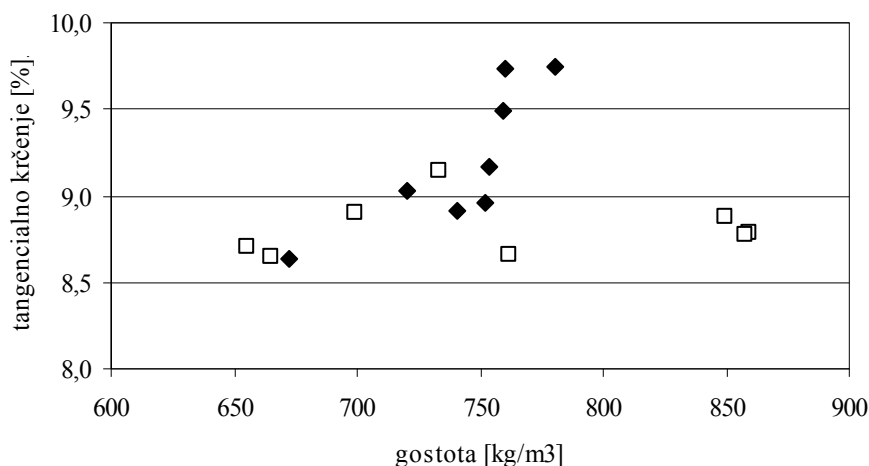
S povečano gostoto je bila ugotovljena linearna zveza z naraščajočim radialnim krčenjem tako pri normalnem kot tudi tenzijskim lesom. Pri obeh kategorijah lesa je naraščanje krčenja v radialni smeri z naraščajočo gostoto zelo podobno. To potrjuje, da je delovanje lesa v radialni

smeri v veliki meri odvisno od gostote lesa. Celotni skrček v radialni smeri je enak tehtani aritmetični sredini skrčkov posameznih plasti redkejšega ranega in gostejšega kasnega lesa (Gorišek in sod., 1994). Pri tem igra pomembno vlogo delež ranega lesa, ki zmanjšuje krčenje z razliko od krčenja v tangencialni smeri kjer delež ranega lesa nima velikega vpliva. V celotnem območju gostote, ki smo jo izmerili našim vzorcem, so vrednosti radialnega krčenja pri tenzijskem lesu nižje, kot pri normalnem lesu. Pri normalnem lesu so opazna večja odstopanja od linearno povezane naraščajoče srednje vrednosti ($R^2 = 0,5$), kot pri tenzijskem lesu ($R^2 = 0,93$) (sl. 19).



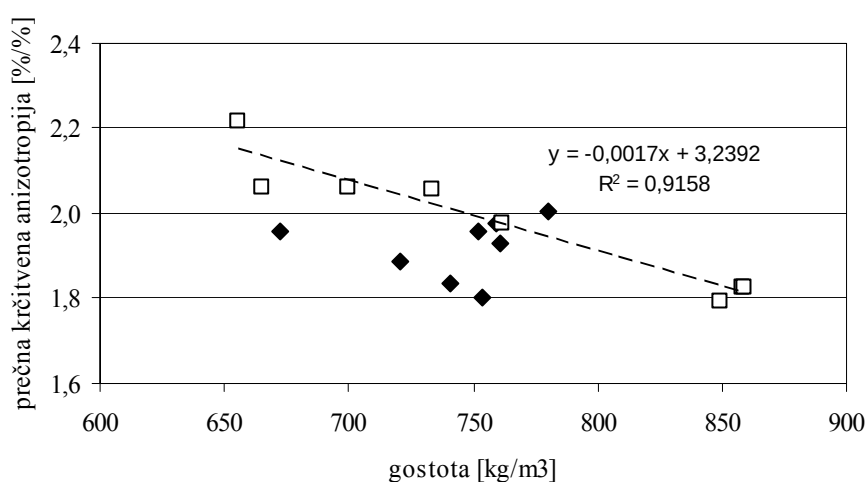
Slika 19: Radialno krčenje normalnega (♦) in tenzijskega (□) lesa v odvisnosti od gostote.

Kot navajajo Gorišek in sod. (1994) se gostejši kasni les bolj krči od ranega in je tudi bolj trden, zato je krčenje tangencialnih pasov kasnega lesa prevladujoče in prisili pasove redkejšega in šibkejšega ranega lesa, da se krčijo skupaj z njimi. Zato krčenje v tangencialni smeri nima razvidnega trenda naraščanja z naraščajočo gostoto in je v povprečju približno dvakrat večje kot v radialni smeri. Pri našem eksperimentu se je to zelo jasno pokazalo pri tenzijskem lesu. Pri normalnem lesu pa je razpon gostote vzorcev premajhen in ne kažejo zaneslivejših rezultatov. (sl. 20).



Slika 20: Tangencialno krčenje normalnega (♦) in tenzijskega (□) lesa v odvisnosti od gostote.

Ker se z večanjem gostote lesa povečuje le radialno krčenje, tangencialno pa ne, se z naraščajočo gostoto nakazuje trend padanja prečne krčitvene anizotropije (sl. 21). Korelacija ($R^2 \approx 0,92$) je še posebej razvidna pri tenzijskem lesu. Pri normalnem lesu je velik raztros podatkov. Predvsem tangencialno krčenje vzorca normalnega lesa z najnižjo gostoto najbolj odstopa od pričakovane vrednosti. Če le-tega v nadaljevanju ne upoštevamo, dobimo podobno padajoč trend prečne anizotropije tudi pri normalnem lesu. O razliki med trendoma prečne anizotropije tenzijskega in normalnega lesa pa zaradi premalo vzorcev in prevelikega standardnega odklona ne moremo govoriti.



Slika 21: Razmerje med tangencialnim in radialnim krčenjem (prečna krčitvena anizotropija) normalnega (♦) in tenzijskega (□) lesa v odvisnosti od gostote.

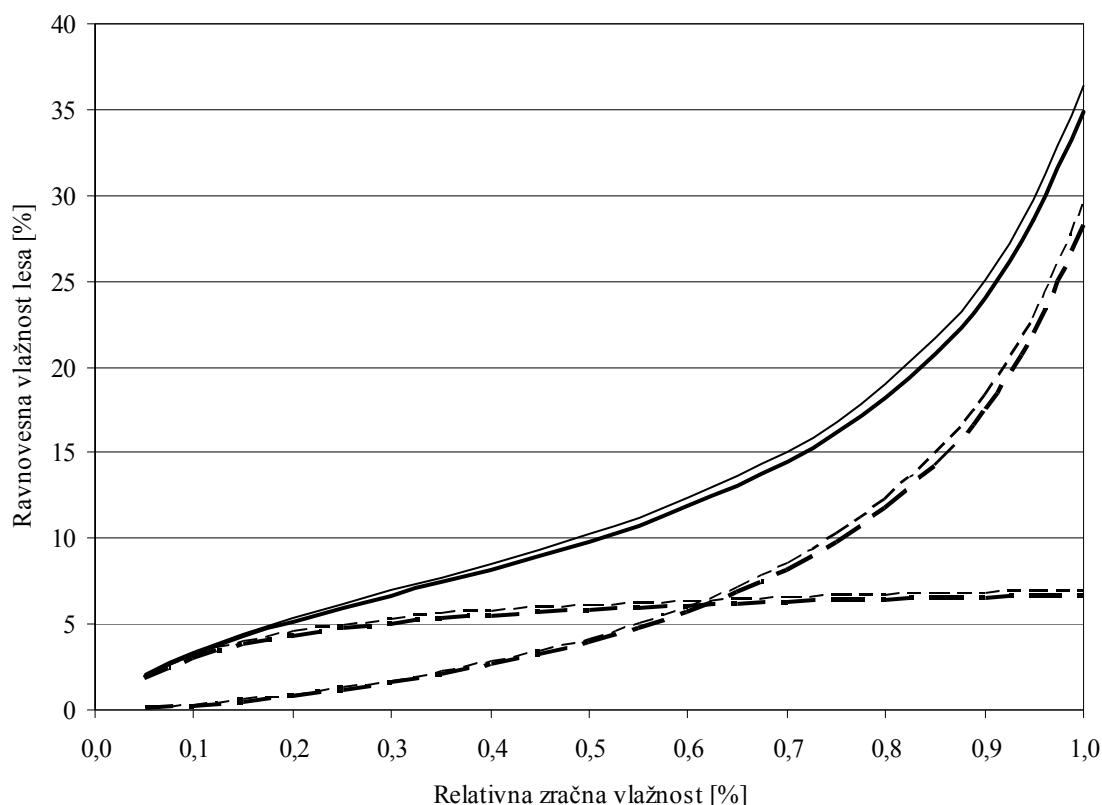
5.2 SORPCIJSKE LASTNOSTI

5.2.1 Kazalniki dimenzijske stabilnosti

Kljub upoštevanju, da je za bukovino značilna velika higroskopnost, so vrednosti sorpcijskega koeficienta pri normalnem lesu razmeroma visoke. Glavni vzrok za manjši koeficient nabrekanja (h) in manjši sorpcijski koeficient (s) tenzijskega lesa v primerjavi z normalnim lesom je verjetno spremenjena kemijska sestava celične stene, ki naj bi zmanjšala sorpcijsko kapaciteto. Lignina je v tenzijskem lesu zelo malo, manj je tudi polioz, ki so zelo higroskopne. Veliko več je celuloze, ki je večinoma visokokristalizirana.

5.2.2 Ravnovesna vlažnost

Razlike med sorpcijskimi krivuljami, ki so določene s pomočjo Dent-ovega modela, med normalnim in tenzijskim lesom naraščajo z višjo ravnovesno vlažnostjo lesa. Na sliki 22 sta nazorno prikazani krivulji povprečne primarne sorpcije, ki skoraj sovpadata. Krivulja povprečne primarne sorpcije tenzijskega lesa je nižja, razlika pa je majhna. Verjetno je v normalnem in tenzijskem lesu podobno število hidroskopskih mest ali hidriksilnih skupin, torej je kapaciteta primarne sorpcije približno podobna v obeh kategorijah lesa. V tenzijskem lesu vsebovana visokokristalizirana celuloza verjetno nima veliko sorpcijskih mest. Glavni vzrok za nekoliko nižje vrednosti primarne sorpcije tenzijskega lesa je verjetno manjši delež polioz, ki so veliko bolj higroskopna kot celuloza. Višja vsebnost celuloze z visoko stopnjo kristaliziranja potemtakem ne pomeni tudi višje sorpcijske kapacitete lesa.

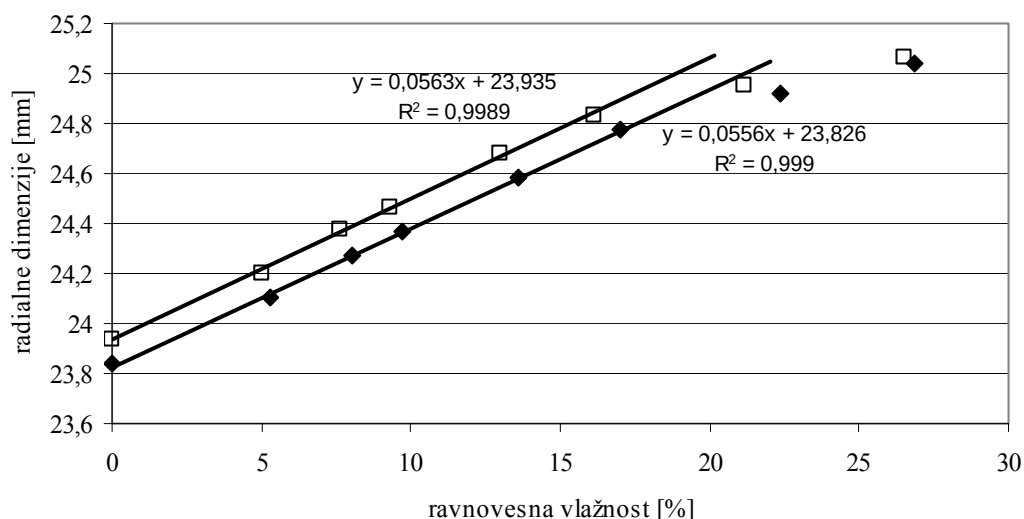


Slika 22: Primarna, sekundarna (prekinjena črta) in skupna (neprekinjena črta) sorpcijska izoterma normalnega (tanka črta) in tenzijskega (debela črta) lesa določena s pomočjo Dent-ovega modela.

Na isti sliki (sl. 22) sta prikazani tudi krivulji povprečne skupne sorpcije tenzijskega in normalnega lesa, ki predstavljata vsoto primarne in sekundarne sorpcije. Sorpcijska izoterma tenzijskega lesa nakazuje nekoliko nižje vrednosti. Razlika je večja v višje higroskopsnem območju, kjer je sekundarna sorpcija prevladujoča. Vendar pri relativni zračni vlagi nad 80% zelo hitro narašča tudi njen standardni odklon. Razlika je statistično značilna v območju od 60% do 90% relativne zračne vlage (s statističnim tveganjem pod 0,02). Pomembnejši vzrok za sekundarno sorpcijsko kapaciteto predstavljajo mikro prostori med mikrofibrilami. V celični steni tenzijskega lesa je manjši delež polioz in lignina ter veliko z vzdolžno osjo celice orientiranih mikrofibril, ki skoraj nimajo mikroprostorov. Tako ima celična stena tenzijskega lesa manj prostora za polimolekularno sorpcijo in kapilarno kondenzacijo, ki predstavljata sekundarno sorpcijo.

5.2.3 Vlažnost točke nasičenja celičnih sten

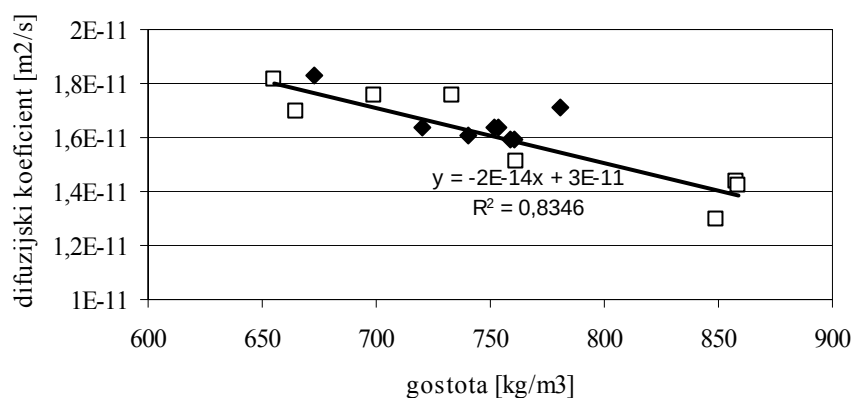
Pri določevanju območja nasičene celične stene smo v povprečju določili nižje vrednosti pri tenzijskem lesu. Uporabili smo tri različne metode med katerimi je tudi ekstrapolacija sorpcijske izoterme do 100% relativne zračne vlažnosti. S to metodo smo dobili nekoliko prevelike vrednosti, ker smo sorpcijsko izotermo dobili iz podatkov začetne desorpcije, ki je v višjem higroskopskem območju višja od dejanske sekundarne desorpcije. Poleg tega je razlika skupne sorpcijske izoterme Dent-ovega modela med tenzijskim in normalnim lesom v območju nasičenja celičnih sten precej neizrazita ($p \approx 0,1$). Precej bolj jasno razlikovanje TNCS med tenzijskim in normalnim lesom (s statističnim tveganjem pod 0,002) smo pokazali z metodo intersekcije točke. Kot je prikazano na sliki 23 se pod vlažnostjo TNCS linearna trendna črta zelo dobro prilega ($R^2 \approx 0,999$) k povprečnim radialnim dimenzijam v procesu desorpcije pri obeh kategorijah lesa. Glede na to, da je bila razlika v radialnih začetnih dimenzijah med obema kategorijama lesa zanemarljiva, verjetno obstajajo opazne razlike v ravnovesni vlažnosti med normalnim in tenzijskim lesom predvsem v višjem delu higroskopskega območja vključno s TNCS. To bi lahko pri sušenju vplivalo na zakasnitev krčenja tenzijskega lesa in bi lahko vsaj na vrhu higroskopskega območja vplivalo na manjše krčenje tenzijskega lesa v primerjavi z normalnim lesom.



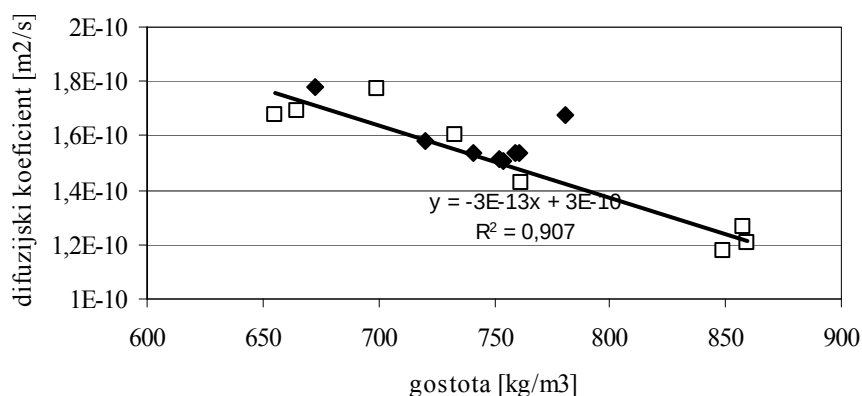
Slika 23: Dimenzije v radialni smeri v procesu desorpcije normalnega (♦) in tenzijskega (□) lesa.

5.3 DIFUZIVNOST

Difuzijski koeficient v radialni smeri je v tenzijskem lesu malo manjši. Rezultata obeh metod za določitev dif. koeficienta kažeta značilno odvisnost od gostote. Nekoliko hitrejšje zmanjševanje difuzijskega koeficienta tenzijskega lesa z naraščajočo gostoto kaže, da bi prišlo pri višji gostoti do večjih razlik v difuzivnosti. Vendar so te razlike majhne in statistično ne značilne. Verjetno kemijska sestava in sestava celične stene v tenzijskem lesu ni tako različna od normalnega lesa da bi to vplivalo na prevodnost vezane vode (sl. 24, 25).



Slika 24: Difuzijski koeficient (D) normalnega (♦) in tenzijskega (□) bukovega lesa iz polovičnega uravnovesnega časa v odvisnosti od gostote.



Slika 25: Difuzijski koeficient (D) normalnega (♦) in tenzijskega (□) bukovega lesa iz brezdimenzijske spremembe mase proti kvadratnemu korenu časa v odvisnosti od gostote.

6 SKLEPI

Višje gostote absolutno suhega tenzijskega lesa z našimi rezultati nismo potrdili. Vzrok vidimo v veliki varjabilnosti, vendar nakazujejo podobne vrednosti kot so navedene v literaturi (Panshin and De Zeeuw, 1980). Vzrok za povečano gostoto tenzijskega lesa so najverjetneje odebeljene celične stene in zmanjšani lumni.

Vzdolžno krčenje tenzijskega lesa, ki je 2,7 krat večje od normalnega, je prav tako primerljivo s podatki iz literature (Panshin in De Zeeuw, 1980). Rezultati prečnega krčenja pri tenzijskemu lesu so pokazali malo manjše vrednosti kot pri normalnem lesu. Verjetno je vzrok za različno prečno krčenje kot tudi za različno vzdolžno krčenje spremenjena ultra struktura in atomska zgradba tenzijskega lesa, predvsem z izrazitim G-slojem.

Kljub majhnemu deležu lignina v tenzijskem lesu je ravnovesna vlažnost nižja v primerjavi z normalnim lesom. Predvsem v višjem delu higroskopnega območja kaže, da vsaj pri bukovini obstajajo očitne razlike v ravnovesni vlažnosti. Razlog je verjetno v kemijski sestavi in zgradbi celične stene. Fenomen smo poskušali pojasniti z visokokristalizirano celulozo v G-sloju, manjšo vsebnostjo matriksa in manjšimi mikroprostori v celični steni tenzijskega lesa. Trditve bi lahko okrepili z nadaljnjimi kemijskimi in anatomskimi preiskavami.

Vsi kazalniki dimenzijske stabilnosti tako v normalnem kot tenzijskem lesu so večji kot so običajno navedeni v literaturi (Gorišek in sod., 1994). Diferencialno nabrekanje tenzijskega lesa ne kaže razlik v primerjavi z normalnim lesom. Koeficient nabrekanja v radialni in tangencialni smeri kot tudi sorpcijski kvocient je pri tenzijskemu lesu manjši kot pri normalnemu lesu. Glavni vzrok je verjetno spremenjena kemijska sestava celične stene.

S tremi metodami smo določili nižjo TNCS pri tenzijskem lesu, kar nakazuje, da bi lahko obstajal zamik krčenja tenzijskega lesa v procesu sušenja. Poleg tega kaže na verjetno razliko v ravnovesni vlažnosti med normalnim in tenzijskim lesom v višjem higroskopnem območju.

Opazne razlike med difuzijskima koeficientoma normalnega in tenzijskega lesa z našim eksperimentom nismo ugotovili. Verjetno spremenjena kemijska sestava in spremenjena sestava celične stene v tenzijskem lesu nima tako velikega vpliva na prevodnost vezane vode.

7 POVZETEK

Pri obdelavi bukovine pogosto naletimo na težave, ki so posledica prisotnosti tenzijskega lesa. Tenzijski les je reakcijski les pri listavcih in se od normalnega lesa razlikuje po: makroskopskih in fizikalnih lastnostih, anatomskih značilnostih, mikrostrukturi, ultrastrukturi in kemični sestavi. Zaradi spremenjene zgradbe celične stene se je nekoliko spremenila krčitvena anizotropija. Zaradi specifične kemijske sestave pa so spremenjene tudi sorpcijske in difuzijske karakteristike.

Skušali smo ugotoviti razlike v fizikalnih lastnostih med tenzijskim in normalnim lesom pri bukovini (*Fagus sylvatica* L.). Bukovino smo izbrali zaradi razširjenosti te drevesne vrste v proizvodnji in pogostih problematik pri obdelavi in predelavi, ki so povezane s prisotnostjo tenzijskega lesa.

Iz osmih dreves smo odvzeli po en vzorec tenzijskega in po en vzorec normalnega lesa. Za določanje sorpcijskih in krčitvenih lastnosti smo izdelali vzorce dimenzij $R \times T \times L = 30\text{mm} \times 30\text{mm} \times 5\text{mm}$ (za zaneslivejše podatke meritev so bili vzorci dvojni, izrezani zaporedno) za spremljanje krčenja v radialni in tangencialni smeri in vzorce dimenzij $R \times T \times L = 10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 100\text{mm}$ za spremljanje vzdolžnih skrčkov. Vsi vzorci so bili orientirani in natančno izdelani, da so zagotovili čim večjo natančnost meritev. Vzorce za določanje difuzijskega koeficienta smo vzeli iz istih hlodov. Iz vsakega debla smo izdelali po tri zaporedne vzorce tenzijskega lesa in po tri zaporedne vzorce normalnega lesa različnih debelin: $R \times T \times L = 4\text{mm} \times 20\text{mm} \times 100\text{mm}$, $R \times T \times L = 8\text{mm} \times 20\text{mm} \times 100\text{mm}$, $R \times T \times L = 12\text{mm} \times 20\text{mm} \times 100\text{mm}$.

Z uravnovešanjem vzorcev za določanje sorpcijskih in krčitvenih lastnosti v različnih klimah z relativno zračno vlažnostjo 86%, 75%, 65%, 47%, 37%, 19% pri konstantni temperaturi $20 \pm 0,2$ °C in sušenju do absolutno suhega stanja smo določili ravnovesne vlažnosti z gravimetrično metodo, kazalnike dimenzijske stabilnosti, volumensko in linearna krčenja. TNCS smo določili z ekstrapolacijo sorpcijske izoterme do 100% relativne zračne vlage, z določitvijo začetka krčenja v procesu sušenja (metoda intersekcijske točke) in z računanjem razmerja med volumenskim skrčkom in osnovno gostoto ob korekciji gostote adsorbirane vode. Difuzijski koeficient smo določili s spremljanjem hitrosti uravnovešanja.

V povprečju je razlika gostote med normalnim in tenzijskim lesom majhna. Višje gostote absolutno suhega tenzijskega lesa zaradi velike varjabilnosti s statistično analizo ne moremo potrditi, vendar nakazujejo podobne vrednosti kot so navedene v literaturi (Panshin and De Zeeuw, 1980).

Vzdolžno krčenje tenzijskega lesa se je izkazalo v povprečju 2,7 krat večje kot pri normalnem lesu. To je ena od najbolj značilnih lastnosti tenzijskega lesa in je primerljivo z navedeno v literaturi (Panshin and De Zeeuw, 1980). Rezultati prečnega krčenja pri tenzijskem lesu so v povprečju pokazali malo manjše vrednosti kot pri normalnem lesu. Vzrok za različno prečno krčenje kot tudi za različno vzdolžno krčenje je verjetno spremenjena ultra struktura in anatomsko zgradbo tenzijskega lesa.

Ravnovesna vlažnost tenzijskega lesa se je izkazala, da je v primerjavi z normalnim lesom nižja. Predvsem v višjem delu higroskopskega območja so razlike v ravnovesni vlažnosti očitne. Razlog je verjetno v kemijski sestavi in zgradbi celične stene. Vzrok za ta fenomen je verjetno velika vsebnost visokokristalizirane celuloze v G-sloju, manjša vsebnost polioz in lignina ter manjši mikroprostorji v celični steni tenzijskega lesa.

Diferencialno nabrekanje tenzijskega lesa ne kaže razlik v primerjavi z normalnim lesom. Koeficient nabrekanja v radialni in tangencialni smeri kot tudi sorpcijski kvocient pa je pri tenzijskem lesu manjši kot pri normalnem lesu. Razlika je statistično značilna ($p < 0,05$). Glavni vzrok je verjetno spremenjena kemijska sestava celične stene.

Z vsemi tremi uporabljenimi metodami smo določili nižjo TNCS pri tenzijskem lesu. Naj zaneslivejša metoda je z določitvijo začetka krčenja v procesu sušenja (metoda intersekcijske točke). S to metodo smo pokazali razlikovanje TNCS v povprečju za več kot 1,8 odstotne točke. Da je razlika statistično značilna pa trdimo s tveganjem manjšim od 0,002, kar nakazuje da bi lahko obstajal opazen zamik krčenja tenzijskega lesa v procesu sušenja.

Razlike med difuzijskima koeficientoma normalnega in tenzijskega lesa z našim eksperimentom nismo ugotovili. Verjetno spremenjena kemijska sestava in spremenjena sestava celične stene v tenzijskem lesu nima tako velikega vpliva na prevodnost vezane vode.

8 VIRI

Bodig J., Jayne B. A. 1982. Mechanics of wood and wood composites. New York, Van Nostrand Reinhold: 712 str.

Crank J. 1986. The mathematics of diffusion. 2nd edition. Oxford, Clarendon Press: 414 str.

Čufar K. 2001. Anatomija lesa. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 124 str.

Gorišek Ž., Geršak M., Velušček V., Čop T., Mrak C. 1994. Sušenje lesa. Priročnik za pouk in delo. 1. natis. Ljubljana, Lesarska založba: 235 str.

Panshin A.J., De Zeeuw C. 1980. Textbook of wood technology. Vol. 1. Structure, identification, properties and uses of the commercial woods of the United States and Canada. 4th edition. New York, McGraw- Hill Book Company: 722 str.

Skaar C. 1988. Wood-water relations. Berlin, Springer-Verlag: 283 str.

Torelli N. 1986. Zgradba lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 52 str.

Wagenführer R., Scheiber C. 1989. Holzatlas. Leipzig, VEB Fachbuchverlag: 720 str.

ZAHVALA

Ob koncu študija bi se zahvalil svojemu mentorju prof. dr. Željku Gorišku za koristne nasvete, usmeritve in pomoč pri oblikovanju in izdelavi te diplomske naloge kakor tudi somentorju prof. dr. Bojanu Bučarju in recenzentu prof. dr. Primožu Ovnu.

Zahvaljujem se asistentu mag. Alešu Stražetu za pomoč pri eksperimentalnem delu in Martinu Zupančiču za anatomske slike.

Kristijanu Niklu se zahvaljujem za les, ki mi ga je odstopil za izdelavo vzorcev ter Petru Cundru za izdelavo vzorcev in tudi vsem ostalim, ki so mi na kakršenkoli način pomagali pri izdelavi diplomske naloge.

PRILOGE**Priloga A1**

Začetne dimenzije in masa vzorcev za določanje krčitvenih lastnosti v prečni smeri in sorpcijskih karakteristik

v svežem stanju	zaporedni vzorec (a)				zaporedni vzorec (b)			
	dimenzija [mm]			masa [g]	dimenzija [mm]			masa [g]
vzorec	R	T	L		R	T	L	
D1-K1-normalen	25,00	25,02	5,06	2,624	25,01	24,99	5,10	2,644
D1-K1-tenzijski	24,68	24,6	5,06	2,661	24,66	24,61	5,11	2,656
D1-K2-normalen	25,08	25,01	5,08	2,500	25,11	25,06	5,05	2,505
D1-K2-tenzijski	25,08	25,05	5,03	2,546	25,08	25,04	5,05	2,564
D1-K3-normalen	25,12	25,05	5,07	2,605	25,13	25,07	5,03	2,585
D1-K3-tenzijski	25,11	25,12	5,07	2,435	25,12	25,12	5,03	2,403
D1-K4-normalen	24,96	24,81	5,04	2,622	24,96	24,81	5,12	2,636
D1-K4-tenzijski	25,01	25,09	5,06	2,294	25,02	25,09	5,04	2,293
D1-K6-normalen	25,02	25	5,07	2,342	25,04	25,03	5,16	2,391
D1-K6-tenzijski	25,06	25,09	5,08	2,300	25,07	25,08	5,09	2,318
D3-K0-normalen	25,04	25,06	5,07	2,704	25,06	25,08	5,12	2,723
D3-K0-tenzijski	25,17	25,16	5,06	3,054	25,16	25,14	5,11	3,086
D3-K1-normalen	25,03	25,16	5,11	2,658	24,99	25,18	5,08	2,621
D3-K1-tenzijski	25,22	24,87	5,13	3,045	25,23	24,92	5,09	3,036
D3-K2-normalen	25,07	24,98	5,07	2,620	25,07	25,02	5,15	2,670
D3-K2-tenzijski	25,14	25,26	5,09	3,023	25,16	25,26	5,04	2,989

Priloga A2

Dimenzije in masa uravnovešenih vzorcev za določanje krčitvenih lastnosti v prečni smeri in sorpcijskih karakteristik pri 86% relativne zračne vlažnosti.

86% rel. zr. vlažnost	zaporedni vzorec (a)			zaporedni vzorec (b)		
	dimenzija [mm]		masa [g]	dimenzija [mm]		masa [g]
vzorec	R	T		R	T	
D1-K1-normalen	24,86	24,70	2,547	24,89	24,70	2,562
D1-K1-tenzijski	24,56	24,19	2,506	24,53	24,22	2,507
D1-K2-normalen	24,92	24,69	2,428	24,96	24,72	2,436
D1-K2-tenzijski	25,02	24,70	2,456	24,97	24,68	2,476
D1-K3-normalen	24,98	24,74	2,513	25,03	24,72	2,492
D1-K3-tenzijski	25,01	24,83	2,371	25,00	24,84	2,328
D1-K4-normalen	24,81	24,43	2,501	24,81	24,44	2,515
D1-K4-tenzijski	24,91	24,81	2,226	24,93	24,80	2,221
D1-K6-normalen	24,92	24,73	2,317	24,92	24,73	2,273
D1-K6-tenzijski	24,97	24,79	2,213	24,96	24,78	2,229
D3-K0-normalen	24,93	24,76	2,616	24,93	24,76	2,63
D3-K0-tenzijski	25,03	24,72	2,876	25,05	24,73	2,90
D3-K1-normalen	24,90	24,89	2,587	24,90	24,92	2,547
D3-K1-tenzijski	25,13	24,53	2,889	25,12	24,60	2,860
D3-K2-normalen	24,99	24,71	2,539	24,99	24,74	2,574
D3-K2-tenzijski	25,05	24,91	2,881	25,03	24,88	2,841

Priloga A3

Dimenzije in masa uravnovešenih vzorcev za določanje krčitvenih lastnosti v prečni smeri in sorpcijskih karakteristik pri 75% relativne zračne vlažnosti.

75% rel. zr. vlažnost	zaporedni vzorec (a)			zaporedni vzorec (b)		
	dimenzija [mm]		masa	dimenzija [mm]		masa
vzorec	R	T	[g]	R	T	[g]
D1-K1-normalen	24,75	24,29	2,431	24,76	24,33	2,445
D1-K1-tenzijski	24,47	23,91	2,399	24,44	23,92	2,397
D1-K2-normalen	24,78	24,27	2,320	24,80	24,28	2,326
D1-K2-tenzijski	24,83	24,34	2,351	24,85	24,27	2,363
D1-K3-normalen	24,84	24,33	2,396	24,85	24,32	2,377
D1-K3-tenzijski	24,86	24,42	2,275	24,88	24,41	2,249
D1-K4-normalen	24,66	24,02	2,380	24,65	24,04	2,396
D1-K4-tenzijski	24,77	24,37	2,132	24,78	24,36	2,125
D1-K6-normalen	24,76	24,31	2,171	24,76	24,31	2,212
D1-K6-tenzijski	24,87	24,36	2,112	24,82	24,35	2,124
D3-K0-normalen	24,81	24,30	2,508	24,83	24,24	2,530
D3-K0-tenzijski	24,92	24,43	2,760	24,92	24,42	2,791
D3-K1-normalen	24,78	24,41	2,480	24,77	24,42	2,452
D3-K1-tenzijski	25,02	24,22	2,772	25,02	24,27	2,763
D3-K2-normalen	24,83	24,22	2,426	24,81	24,21	2,468
D3-K2-tenzijski	24,93	24,61	2,759	24,97	24,57	2,727

Priloga A4

Dimenzije in masa uravnovešenih vzorcev za določanje krčitvenih lastnosti v prečni smeri in sorpcijskih karakteristik pri 65% relativne zračne vlažnosti.

65% rel. zr. vlažnost	zaporedni vzorec (a)			zaporedni vzorec (b)		
	dimenzija [mm]		masa [g]	dimenzija [mm]		masa [g]
	R	T		R	T	
vzorec						
D1-K1-normalen	24,55	23,95	2,356	24,57	23,97	2,371
D1-K1-tenzijski	24,32	23,62	2,332	24,29	23,61	2,333
D1-K2-normalen	24,61	23,94	2,254	24,64	23,96	2,262
D1-K2-tenzijski	24,68	23,95	2,283	24,70	23,93	2,299
D1-K3-normalen	24,66	23,99	2,329	24,66	23,98	2,312
D1-K3-tenzijski	24,70	24,03	2,213	24,70	24,04	2,187
D1-K4-normalen	24,47	23,67	2,314	24,50	23,69	2,329
D1-K4-tenzijski	24,60	24,08	2,072	24,64	24,07	2,066
D1-K6-normalen	24,63	24,04	2,114	24,62	24,01	2,157
D1-K6-tenzijski	24,75	24,09	2,056	24,71	24,05	2,070
D3-K0-normalen	24,59	23,84	2,430	24,60	23,82	2,448
D3-K0-tenzijski	24,79	24,14	2,690	24,77	24,11	2,717
D3-K1-normalen	24,54	24,01	2,403	24,56	24,00	2,373
D3-K1-tenzijski	24,85	23,91	2,702	24,83	23,94	2,693
D3-K2-normalen	24,60	23,80	2,348	24,59	23,81	2,392
D3-K2-tenzijski	24,74	24,28	2,686	24,75	24,24	2,658

Priloga A5

Dimenzije in masa uravnovešenih vzorcev za določanje krčitvenih lastnosti v prečni smeri in sorpcijskih karakteristik pri 47% relativne zračne vlažnosti.

47% rel. zr. vlažnost	zaporedni vzorec (a)			zaporedni vzorec (b)		
	dimenzija [mm]		masa [g]	dimenzija [mm]		masa [g]
vzorec	R	T		R	T	
D1-K1-normalen	24,35	23,59	2,274	24,36	23,54	2,289
D1-K1-tenzijski	24,10	23,24	2,254	24,08	23,26	2,253
D1-K2-normalen	24,41	23,55	2,175	24,41	23,56	2,183
D1-K2-tenzijski	24,47	23,54	2,205	24,47	23,54	2,218
D1-K3-normalen	24,44	23,62	2,248	24,46	23,63	2,231
D1-K3-tenzijski	23,67	24,51	2,139	24,50	23,68	2,113
D1-K4-normalen	24,24	23,32	2,250	24,22	23,34	2,236
D1-K4-tenzijski	24,41	23,67	2,003	24,44	23,67	1,998
D1-K6-normalen	24,42	23,62	2,043	24,40	23,62	2,083
D1-K6-tenzijski	24,55	23,73	1,988	24,51	23,70	2,002
D3-K0-normalen	24,34	23,46	2,348	24,34	23,46	2,365
D3-K0-tenzijski	24,55	23,79	2,609	24,52	23,78	2,640
D3-K1-normalen	24,33	23,61	2,315	24,35	23,61	2,293
D3-K1-tenzijski	24,63	23,53	2,615	24,61	23,55	2,609
D3-K2-normalen	24,39	23,41	2,267	24,39	23,44	2,311
D3-K2-tenzijski	24,55	23,94	2,606	24,55	23,92	2,580

Priloga A6

Dimenzije in masa uravnovešenih vzorcev za določanje krčitvenih lastnosti v prečni smeri in sorpcijskih karakteristik pri 37% relativne zračne vlažnosti.

37% rel. zr. vlažnost	zaporedni vzorec (a)			zaporedni vzorec (b)		
	dimenzija [mm]		masa [g]	dimenzija [mm]		masa [g]
	R	T		R	T	
D1-K1-normalen	24,24	23,41	2,240	24,26	23,41	2,251
D1-K1-tenzijski	24,02	23,10	2,220	24,00	23,08	2,219
D1-K2-normalen	24,28	23,39	2,142	24,30	23,44	2,147
D1-K2-tenzijski	24,34	23,39	2,171	24,38	23,37	2,184
D1-K3-normalen	24,32	23,46	2,213	24,36	23,47	2,195
D1-K3-tenzijski	24,42	23,51	2,105	24,41	23,54	2,078
D1-K4-normalen	24,15	23,16	2,201	24,13	23,18	2,215
D1-K4-tenzijski	24,33	23,55	1,972	24,32	23,53	1,965
D1-K6-normalen	24,33	23,51	2,010	24,32	23,50	2,050
D1-K6-tenzijski	24,49	23,56	1,958	24,45	23,54	1,971
D3-K0-normalen	24,27	23,30	2,308	24,30	23,29	2,330
D3-K0-tenzijski	24,45	23,64	2,569	24,42	23,61	2,599
D3-K1-normalen	24,22	23,45	2,286	24,25	23,47	2,261
D3-K1-tenzijski	24,52	23,40	2,580	24,52	23,44	2,575
D3-K2-normalen	24,28	23,26	2,234	24,28	23,29	2,278
D3-K2-tenzijski	24,46	23,79	2,570	24,45	23,76	2,544

Priloga A7

Dimenzije in masa uravnovešenih vzorcev za določanje krčitvenih lastnosti v prečni smeri in sorpcijskih karakteristik pri 19% relativne zračne vlažnosti.

19% rel. zr. vlažnost	zaporedni vzorec (a)			zaporedni vzorec (b)		
	dimenzija [mm]		masa	dimenzija [mm]		masa
vzorec	R	T	[g]	R	T	[g]
D1-K1-normalen	24,11	23,15	2,179	24,10	23,14	2,192
D1-K1-tenzijski	23,83	22,85	2,164	23,84	22,85	2,163
D1-K2-normalen	24,14	23,13	2,088	24,15	23,15	2,094
D1-K2-tenzijski	24,19	23,14	2,115	24,20	23,11	2,129
D1-K3-normalen	24,16	23,19	2,153	24,17	23,21	2,138
D1-K3-tenzijski	24,25	23,24	2,053	24,25	23,27	2,030
D1-K4-normalen	23,97	22,90	2,145	23,96	22,93	2,160
D1-K4-tenzijski	24,16	23,29	1,924	24,18	23,28	1,918
D1-K6-normalen	24,18	23,25	1,964	24,16	23,24	2,000
D1-K6-tenzijski	24,34	23,31	1,911	24,29	23,29	1,926
D3-K0-normalen	24,08	23,03	2,250	24,13	23,03	2,272
D3-K0-tenzijski	24,27	23,37	2,511	24,26	23,38	2,538
D3-K1-normalen	24,05	23,18	2,221	24,07	23,20	2,198
D3-K1-tenzijski	24,33	23,11	2,516	24,33	23,15	2,511
D3-K2-normalen	24,11	22,98	2,171	24,11	23,00	2,214
D3-K2-tenzijski	24,25	23,52	2,507	24,25	23,48	2,483

Priloga A8

Dimenzije in masa vzorcev za določanje krčitvenih lastnosti v prečni smeri in sorpcijskih karakteristik v absolutno suhem stanju.

absolutno suho stanje	zaporedni vzorec (a)			zaporedni vzorec (b)		
	dimenzija [mm]		masa [g]	dimenzija [mm]		masa [g]
	R	T		R	T	
D1-K1-normalen	24,11	23,15	2,179	24,10	23,14	2,192
D1-K1-tenzijski	23,83	22,85	2,164	23,84	22,85	2,163
D1-K2-normalen	24,14	23,13	2,088	24,15	23,15	2,094
D1-K2-tenzijski	24,19	23,14	2,115	24,20	23,11	2,129
D1-K3-normalen	24,16	23,19	2,153	24,17	23,21	2,138
D1-K3-tenzijski	24,25	23,24	2,053	24,25	23,27	2,030
D1-K4-normalen	23,97	22,90	2,145	23,96	22,93	2,160
D1-K4-tenzijski	24,16	23,29	1,924	24,18	23,28	1,918
D1-K6-normalen	24,18	23,25	1,964	24,16	23,24	2,000
D1-K6-tenzijski	24,34	23,31	1,911	24,29	23,29	1,926
D3-K0-normalen	24,08	23,03	2,250	24,13	23,03	2,272
D3-K0-tenzijski	24,27	23,37	2,511	24,26	23,38	2,538
D3-K1-normalen	24,05	23,18	2,221	24,07	23,20	2,198
D3-K1-tenzijski	24,33	23,11	2,516	24,33	23,15	2,511
D3-K2-normalen	24,11	22,98	2,171	24,11	23,00	2,214
D3-K2-tenzijski	24,25	23,52	2,507	24,25	23,48	2,483

Priloga B1

Dolžina in masa uravnoteženih vzorcev za določanje krčitvenih lastnosti v vzdolžni smeri v svežem stanju in sedmih stopnjah relativne zračne vlažnosti.

vzorec	sveže stanje				86% rel. zr. vlažnost		75% rel. zr. vlažnost	
	dimenzije [mm]			masa [g]	dolžina [mm]	masa [g]	dolžina [mm]	masa [g]
	R	T	L					
D1-K1-normalen	9,95	9,76	99,99	7,904	99,98	7,643	99,97	7,429
D1-K1-tenzijski	9,46	9,99	100,02	8,210	99,93	7,867	99,79	7,606
D1-K2-normalen	9,87	9,82	100,12	7,820	100,13	7,632	100,13	7,339
D1-K2-tenzijski	9,95	10,03	100,10	7,738	100,10	7,512	100,10	7,236
D1-K3-normalen	10,04	9,96	100,05	8,008	100,06	7,787	100,09	7,505
D1-K3-tenzijski	10,06	10,03	99,99	7,688	99,99	7,517	99,99	7,278
D1-K4-normalen	9,83	9,94	100,13	8,037	100,14	7,811	100,19	7,497
D1-K4-tenzijski	10,07	10,01	100,09	7,282	100,11	7,083	100,12	6,835
D1-K6-normalen	10,00	9,94	99,98	6,997	99,97	6,823	100,00	6,611
D1-K6-tenzijski	10,04	9,97	100,11	7,209	100,10	6,951	100,10	6,698
D3-K0-normalen	10,04	10,00	100,10	8,403	100,09	8,188	100,04	7,864
D3-K0-tenzijski	10,03	10,02	100,02	9,514	99,94	9,166	99,85	8,803
D3-K1-normalen	9,92	9,98	100,03	8,199	100,01	8,019	99,99	7,720
D3-K1-tenzijski	9,97	10,03	100,04	9,304	99,99	8,969	99,88	8,642
D3-K2-normalen	9,93	10,08	100,09	8,059	100,08	7,857	100,07	7,571
D3-K2-tenzijski	10,07	10,04	100,10	9,176	100,05	8,886	99,97	8,613

se nadaljuje

nadaljevanje

vzorec	65% rel. zr. vlažnost		47% rel. zr. vlažnost		37% rel. zr. vlažnost		19% rel. zr. vlažnost		absolutno suho stanje	
	dolžina [mm]	masa [g]	dolžina [mm]	masa [g]	dolžina [mm]	masa [g]	dolžina [mm]	masa [g]	dolžina [mm]	masa [g]
D1-K1-normalen	99,97	7,429	99,97	7,245	99,92	6,848	99,89	6,662	99,91	6,342
D1-K1-tenzijski	99,79	7,606	99,73	7,439	99,57	7,055	99,49	6,875	99,29	6,542
D1-K2-normalen	100,13	7,339	100,14	7,161	100,14	6,757	100,09	6,576	100,04	6,268
D1-K2-tenzijski	100,10	7,236	100,12	7,059	100,04	6,667	100,03	6,490	99,93	6,192
D1-K3-normalen	100,09	7,505	100,09	7,330	100,07	6,913	100,04	6,724	99,99	6,405
D1-K3-tenzijski	99,99	7,278	99,99	7,109	99,95	6,706	99,91	6,527	99,84	6,222
D1-K4-normalen	100,19	7,497	100,17	7,321	100,18	6,910	100,14	6,723	100,14	6,402
D1-K4-tenzijski	100,12	6,835	100,10	6,665	100,06	6,302	100,02	6,134	99,95	5,854
D1-K6-normalen	100,00	6,611	99,95	6,457	99,87	6,105	99,83	5,935	99,75	5,653
D1-K6-tenzijski	100,10	6,698	100,10	6,547	100,01	6,183	99,97	6,014	99,88	5,736
D3-K0-normalen	100,04	7,864	100,02	7,667	99,93	7,222	99,90	7,014	99,82	6,663
D3-K0-tenzijski	99,85	8,803	99,79	8,627	99,61	8,185	99,56	7,977	99,37	7,58
D3-K1-normalen	99,99	7,720	99,96	7,522	99,89	7,088	99,86	6,887	99,79	6,543
D3-K1-tenzijski	99,88	8,642	99,82	8,459	99,71	8,038	99,65	7,843	99,49	7,448
D3-K2-normalen	100,07	7,571	100,06	7,367	99,99	6,956	99,96	6,756	99,93	6,423
D3-K2-tenzijski	99,97	8,613	99,90	8,430	99,80	8,021	99,74	7,825	99,64	7,436

Priloga C

Mase vzorcev v procesu uravnovešanja iz vlažnega stanja na 37% relativno zračno vlažnost.

interval [ure]	1	2	4	8	16	24	28	20,5	69,5	54
čas [ure]	1	3	7	15	31	55	83	103,5	173	227
vzorec	masa vzorca [g]									
D1-K1-norm.	20,266	20,222	20,162	20,064	19,894	19,687	19,440	19,297	18,944	18,791
D1-K1-tenz.	20,325	20,290	20,238	20,148	19,983	19,781	19,531	19,377	18,984	18,809
D1-K2-norm.	19,220	19,189	19,149	19,074	18,910	18,738	18,521	18,390	18,076	17,941
D1-K2-tenz.	19,153	19,116	19,068	18,981	18,802	18,604	18,369	18,223	17,883	17,740
D1-K3-norm.	19,589	19,551	19,503	19,421	19,248	19,060	18,825	18,687	18,350	18,203
D1-K3-tenz.	18,448	18,409	18,361	18,282	18,140	17,972	17,756	17,635	17,338	17,215
D1-K4-norm.	19,969	19,926	19,868	19,783	19,614	19,404	19,165	19,028	18,692	18,543
D1-K4-tenz.	17,542	17,514	17,476	17,415	17,284	17,124	16,935	16,828	16,568	16,495
D1-K6-norm.	18,022	17,989	17,942	17,868	17,709	17,521	17,302	17,178	16,885	16,766
D1-K6-tenz.	17,910	17,870	17,819	17,729	17,562	17,360	17,130	17,000	16,685	16,554
D3-K0-norm.	20,218	20,170	20,104	20,017	19,839	19,610	19,339	19,183	18,808	18,647
D3-K0-tenz.	22,463	22,418	22,360	22,261	22,085	21,864	21,606	21,454	21,051	20,863
D3-K1-norm.	20,349	20,305	20,249	20,170	19,994	19,778	19,521	19,370	18,993	18,831
D3-K1-tenz.	22,762	22,716	22,660	22,573	22,382	22,155	21,897	21,735	21,322	21,134
D3-K2-norm.	19,778	19,738	19,700	19,626	19,462	19,257	19,021	18,877	18,544	18,395
D3-K2-tenz.	22,418	22,382	22,344	22,268	22,116	21,908	21,670	21,526	21,154	20,970

se nadaljuje

nadaljevanje

interval [ure]	38	77	47	44,5	75,5	69	95	79	191	67,5
čas [ure]	265	342	389	433,5	509	578	673	752	943	1010,5
vzorec	masa vzorca [g]									
D1-K1-norm.	18,692	18,562	18,499	18,447	18,379	18,328	18,280	18,248	18,183	18,165
D1-K1-tenz.	18,698	18,553	18,482	18,426	18,354	18,300	18,249	18,216	18,150	18,135
D1-K2-norm.	17,850	17,739	17,685	17,642	17,585	17,543	17,504	17,478	17,427	17,415
D1-K2-tenz.	17,646	17,531	17,476	17,433	17,376	17,335	17,298	17,272	17,222	17,213
D1-K3-norm.	18,104	17,981	17,920	17,870	17,804	17,759	17,713	17,681	17,620	17,606
D1-K3-tenz.	17,129	17,028	16,980	16,941	16,891	16,856	16,825	16,803	16,760	16,751
D1-K4-norm.	18,442	18,315	18,254	18,203	18,136	18,088	18,041	18,009	17,944	17,930
D1-K4-tenz.	16,380	16,290	16,246	16,209	16,163	16,129	16,098	16,076	16,034	16,023
D1-K6-norm.	16,680	16,582	16,535	16,497	16,448	16,413	16,380	16,357	16,312	16,303
D1-K6-tenz.	16,464	16,355	16,303	16,261	16,207	16,170	16,133	16,110	16,061	16,051
D3-K0-norm.	18,541	18,407	18,344	18,293	18,226	18,179	18,133	18,102	18,043	18,028
D3-K0-tenz.	20,737	20,571	20,488	20,421	20,333	20,269	20,206	20,163	20,080	20,060
D3-K1-norm.	18,725	18,588	18,521	18,466	18,395	18,345	18,297	18,264	18,198	18,180
D3-K1-tenz.	21,008	20,841	20,757	20,688	20,597	20,529	20,463	20,417	20,328	20,304
D3-K2-norm.	18,296	18,171	18,111	18,061	17,996	17,946	17,901	17,868	17,804	17,786
D3-K2-tenz.	20,848	20,685	20,602	20,531	20,437	20,367	20,297	20,247	20,150	20,124