

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Kristijan NIKL

**LEZENJE TENZIJSKEGA IN NORMALNEGA
LESA BUKOVINE**

DIPLOMSKO DELO
VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ

Ljubljana, 2006



UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Kristijan NIKL

LEZENJE TENZIJSKEGA IN NORMALNEGA LESA BUKOVINE

DIPLOMSKO DELO
Visokošolski strokovni študij

CREEP OF TENSION AND NORMAL BEECH WOOD

GRADUATION THESIS
Higher professional studies

Ljubljana, 2006

Popravki:

»Verjemi tistemu, ki je to dokazal. Verjemi strokovnjaku.«

(Virgil, 70 – 19 pr. n. št.)

Diplomsko delo je zaključek Visokošolskega strokovnega študija lesarstva, opravljeno na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani. Priprava in tudi preizkusi vzorcev, so bili opravljeni v delavnicah in merilnih laboratorijih Oddelka za lesarstvo v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval doc. dr. Bojana Bučarja, za so mentorja prof. dr. Željka Goriška in za recenzenta doc. dr. Mladena Houška.

Mentor: doc. dr. Bojan Bučar

Somentor: prof. dr. Željko Gorišek

Recenzent: doc. dr. Mladen Houška

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Diplomska naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Kristijan Nikl

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Vs
DK	UDK 630*811.22
KG	bukev/reakcijski les/tenzijski les/lezenje/tenzija/viskoelastičnost
AV	NIKL, Kristijan
SA	BUČAR, Bojan (mentor)/GORIŠEK, Željko (somentor)/HOUŠKA, Mladen (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2006
IN	LEZENJE TENZIJSKEGA IN NORMALNEGA LESA BUKOVINE
TD	Diplomsko delo (Visokošolski strokovni študij)
OP	XI, 48 str., 8 pregl., 42 sl., 11 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Predstavili smo dela na pridobitvi, pripravi, raziskavi in analizi tenzijskega lesa bukovine (<i>Fagus sylvatica</i>) in njegovega lezenja ob konstantni obremenitvi v primerjavi z normalnim lesom. Vzorci tenzijskega in normalnega lesa so bili skrbno izbrani in izrezani ter počasi osušeni do točke nasičenosti celičnih sten. S tem smo zagotovili, da v mikrostrukturi ni prišlo do sprememb tkiva, povezanih s spremembo vsebnosti vlage. Vzorci (220 mm x 10 mm x 5 mm) so bili upogibno obremenjeni v napravi za 4 točkovni upogib, s silo 20 N, pri temperaturi 22 °C in kontrolirani visoki relativni zračni vlažnosti 98 %. Preizkusi so trajali od 3 dni do več tednov, odvisno od namena preizkusa. V grobem lahko rečemo, da so vsi preizkušanci imeli približno identično elastično deformacijo, vendar so vzorci z vsebnostjo tenzijskega tkiva ob nastopu lezenja krepko odstopali od normalnih. Pridobljene podatke smo ovrednotili z obstoječim 4 parametričnim Burgersovim modelom. Ugotovili smo, da tenzijsko tkivo omogoča lezenje lesa že ob minimalnih obremenitvah; glede meje elastičnosti normalnega lesa, saj je navedena sila predstavljala komaj slabih 50 % obremenitve. Takšna sila pri normalnem tkivu ni povzročila omembe vrednega lezenja, medtem ko je tenzijsko tkivo prikazalo izrazito primarno in sekundarno lezenje, ki jasno potrjuje odziv na natezno oziroma tlačno obremenitev želatinastega sloja v strukturi tenzijskega lesa.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Vs
DC UDC 630*811.22
CX beech wood/creep/tension wood/tension/reaction wood/viscoelastics
AU NIKL, Kristijan
AA BUČAR, Bojan (supervisor)/GORIŠEK, Željko (co-advisor)/HOUŠKA, Mladen (reviewer)
PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
PY 2006
TI CREEP OF TENSION AND NORMAL BEECH WOOD
DT Graduation Thesis (Higher professional studies)
NO XI, 48 p., 8 tab., 42 fig., 11 ref.
LA sl
AL sl/en
AB Thesis reflects the work of collecting, preparing and researching the specimens of normal and tension beech wood (*Fagus sylvatica*) and compares their creep on specified force appliance within controlled environment. The wood specimens (220 mm x 10 mm x 5 mm) were selected carefully and extra slowly dried to retain 30 % of wood moisture. Within this moisture range, the microstructure of the specimens was not changed and stayed the same as it was when growing in nature environment. The experiment was conducted in a 4 point bending device, with the force of 20 N, the environment temperature was 22 °C, and the relative air moisture 98 %. Experiments were conducted from 3 days up to 2 or more weeks. In a wide range, all the specimens had almost the same elastic bend as a result to the applied force, although the creep from tension wood increased extremely, which was not the case with normal wood. The collected data have been described using the 4 parametric Burgers model. In a small force of 50 % magnitude from the elastic bend force at normal wood is enough to trigger the creep in tension wood. That kind of force did not cause any mentionable creep in normal wood. The gelatinous layer in cell walls from tension tissue clearly reflects its reaction to the force, especially the compression component.

KAZALO VSEBINE

	Str.
Ključna dokumentacijska informacija	III
Key words documentation	IV
Kazalo vsebine	V
Kazalo preglednic	VII
Kazalo slik	VIII
Okrajšave in simboli	X
Slovarček	XI
1 UVOD	1
2 PREGLED OBJAV	2
2.1 TENZIJSKI LES IN NJEGOVE ZNAČILNOSTI	2
2.2 REAKCIJSKI LES IN NJEGOVA MEHANIKA	4
2.2.1 Celulozna tenzijska teorija izvora rastnih napetosti	4
2.3 LES KOT VISKOELASTIČEN MATERIAL	5
2.3.1 Lezenje	6
2.3.2 Reološka interpretacija viskoelastičnega lezenja	6
2.3.2.1 Maxwellovo telo	7
2.3.2.2 Kelvinovo telo	9
2.3.2.3 Štiri parametrični Burgersov model	10
3 MATERIAL IN METODE	12
3.1 MATERIAL	12
3.1.1 Označevanje vzorcev	13
3.1.2 Razrez in pridobivanje	13
3.1.3 Sušenje	15
3.1.4 Končni razrez vzorcev	16
3.2 METODE	18
3.2.1 Določitev sile obremenjevanja	18
3.2.2 Merilna veriga	20

3.2.2.1	Testirna naprava	20
3.2.2.2	Merilnik pomika	22
3.2.2.3	Pretvornik signala	22
3.2.2.4	Program za zajemanje meritev	23
3.2.3	Določitev vsebnosti tenzijskega tkiva	24
3.2.3.1	Priprava vzorcev	24
3.2.3.2	Analiza mikroskopskih slik	25
3.2.4	Izračuni	25
4	REZULTATI	28
4.1	LEZENJE NORMALNEGA IN TENZIJSKEGA LESA	28
4.1.1	Vzorec D1-K1	28
4.1.2	Vzorec D1-K2	29
4.1.3	Vzorec D1-K3	31
4.1.4	Vzorec D1-K4	32
4.1.5	Vzorec D3-K0	34
4.1.6	Vzorec D3-K2	35
4.1.7	Lezenje vzorca D1-K1-04b (daljši preizkus)	37
4.2	VSEBNOST TENZIJSKEGA TKIVA	38
4.2.1	Velika vsebnost tenzijskega tkiva	38
4.2.2	Srednja vsebnost tenzijskega tkiva	40
4.2.3	Zelo majhna vsebnost tenzijskega tkiva	41
5	RAZPRAVA IN SKLEPI	43
6	POVZETEK	46
7	VIRI	48
8	ZAHVALA	
9	PRILOGE	

KAZALO PREGLEDNIC

	Str.
Pregl. 1 Rezultati meritev vzorcev iz koluta D1-K1	29
Pregl. 2 Rezultati meritev vzorcev iz koluta D1-K2	31
Pregl. 3 Rezultati meritev vzorcev iz koluta D1-K3	32
Pregl. 4 Rezultati meritev vzorcev iz koluta D1-K4	33
Pregl. 5 Rezultati meritev vzorcev iz koluta D3-K0	35
Pregl. 6 Rezultati meritev vzorcev iz koluta D3-K2	37
Pregl. 7 Povprečne lastnosti tenzijskega tkiva	43
Pregl. 8 Povprečne lastnosti normalnega tkiva	43

KAZALO SLIK

		Str.
Sl. 1	Anatomska zgradba želatinastih vlaken pri listavcih...	2
Sl. 2	Zgradbe celičnih sten z želatinastim slojem	3
Sl. 3	Tenzijski les v ekscentričnem deblu listavca	4
Sl. 4	Ponazorjeno lezenje z Burgersovim modelom	10
Sl. 5	Drevo D1 z označenimi prerezi kolotov	12
Sl. 6	Shema prereza koluta D1-K1	13
Sl. 7	Kolut D3-K0, vidno območje tenzijskega lesa (spodnja stran)	14
Sl. 8	Končna shema in prvotno izrisane pozicije vzorcev koluta D3-K0	15
Sl. 9	Izguba teže(g) vzorcev (od 16.09.2005 do 29.09.2005)	16
Sl. 10	Vzorec/preizkušanec	16
Sl. 11	Shema pozicije končnih vzorcev, kolut D1-K1	17
Sl. 12	Celotna napetostna krivulja	18
Sl. 13	Izsek linearnega območja napetostne krivulje	19
Sl. 14	Shema merilne verige	20
Sl. 15	Risba testne naprave	20
Sl. 16	Testna naprava v zaprtem prostoru (razbremenjen vzorec)	21
Sl. 17	Shema merilnika pomika LVDT	22
Sl. 18	I/O naprava, NI USB-6009	23
Sl. 19	Vezna plošča programa	24
Sl. 20	Pozicija izbranih vzorcev v deblu in v prerezu koluta D1-K1	28
Sl. 21	Lezenje vzorcev D1-K1	29
Sl. 22	Pozicija izbranih vzorcev v deblu in v prerezu koluta D1-K2	30
Sl. 23	Lezenje vzorcev D1-K2	30
Sl. 24	Pozicija izbranih vzorcev v deblu in v prerezu koluta D1-K3	31
Sl. 25	Lezenje vzorcev D1-K3	32
Sl. 26	Pozicija izbranih vzorcev v deblu in v prerezu koluta D1-K4	33
Sl. 27	Lezenje vzorcev D1-K4	33

Sl. 28	Pozicija izbranih vzorcev v deblu in v prerezu koluta D3-K0	34
Sl. 29	Lezenje vzorcev D3-K0	35
Sl. 30	Pozicija izbranih vzorcev v deblu in v prerezu koluta D3-K2	36
Sl. 31	Lezenje vzorcev D3-K2	36
Sl. 32	Lezenje vzorca D1-K1-04b	37
Sl. 33	Lezna krivulja vzorca z veliko vsebnostjo tenzijskega tkiva	38
Sl. 34	Velika vsebnost tenzijskega tkiva, 10x in 20x povečava	39
Sl. 35	Velika vsebnost tenzijskega tkiva, 40x povečava	39
Sl. 36	Lezna krivulja vzorca s srednjo vsebnostjo tenzijskega tkiva	40
Sl. 37	Srednja vsebnost tenzijskega tkiva, 10x in 20x povečava	41
Sl. 38	Lezna krivulja vzorca z zelo majhno vsebnostjo tenzijskega tkiva	41
Sl. 39	Zelo majhna vsebnost tenzijskega tkiva, 10x in 20x povečava	42
Sl. 40	Zelo majhna vsebnost tenzijskega tkiva, 40x povečava	42
Sl. 41	Pojav napetosti v prerezu obremenjenega nosilca	44
Sl. 42	Porazdelitev napetosti v prerezu tenzijskega lesa	45

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

E	Elastični modul materiala, enota MPa
η	Viskoznost materiala/tekočine, enota Ns/mm^2
φ	Relativno lezenje, lezna podajnost, nima enote
σ	Napetost materiala, enota N/m^2 , N/mm^2
ε	Relativni raztezek/skrčček, nima enote

SLOVARČEK

Lezenje	Je časovno odvisna deformacija, ki nastane ob vplivu konstantne tlačne ali natezne napetosti v viskozno elastičnih materialih.
Tenzijski les	Sodi v skupino reakcijskega lesa, ki nastane v živem drevesu listavca v področjih debla ali veje, povezanih z vplivom zunanjih sil. Tenzijsko tkivo se nahaja na notranji strani krivine debla in na zgornji strani vej, z nalogo da deblo oz. veje podpira v naravno lego, torej deblo v navpično smer.
Viskoelastičnost	Je lastnost materiala, ki se na delovanje zunanje sile odziva z elastično, kot tudi viskozno deformacijo.
LabVIEW	Programski paket orodij za izdelavo individualnega avtomatiziranega programa, za zajemanje, obdelavo in shranjevanje meritev eksperimentov.
LVDT	(Linear Variable Differential Transformer), električni merilnik pomika visoke občutljivosti.
I/O, NI USB	Input/Output USB vmesnik za sprejem električnega signala merilnika pomika.

1 UVOD

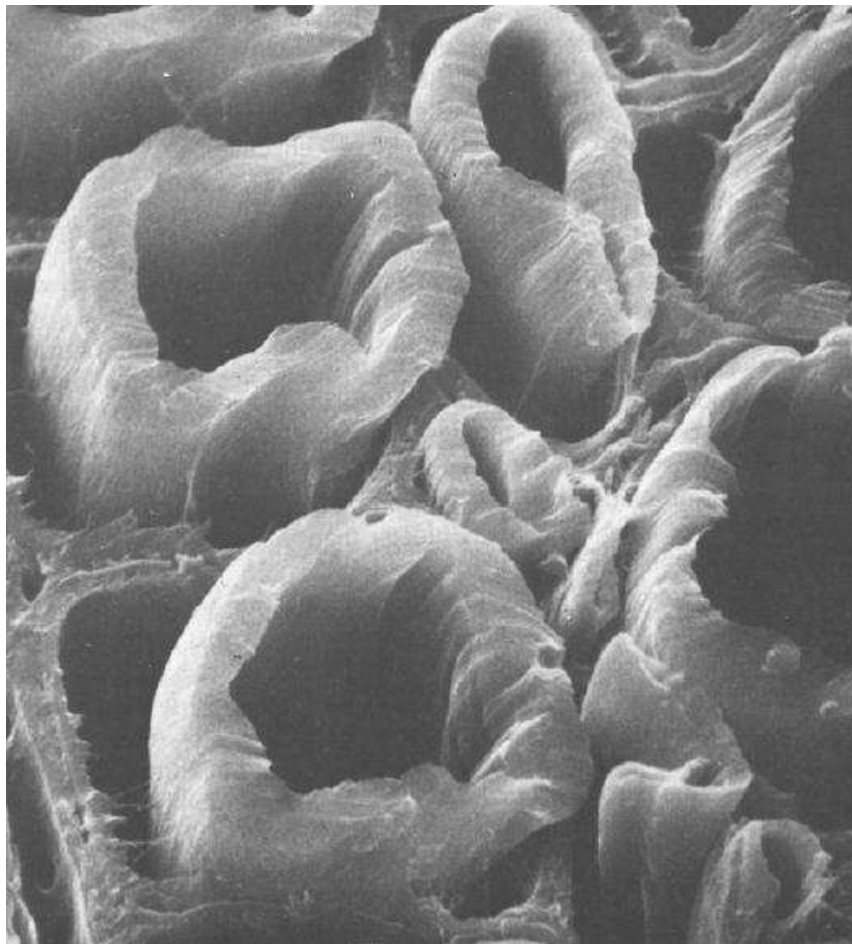
Namen diplomske naloge je raziskati vpliv deleža tenzijskega tkiva na lezenje v območju nasičenosti in sobni temperaturi (22 °C). Cilj je ugotovitev obnašanja tenzijskega tkiva bukovine v naravnem stanju na fizično obremenjevanje v primerjavi z normalnim tkivom. Na časovni odziv lesnega tkiva poleg temperature in vlažnosti, vpliva predvsem kategorija tkiva in pri tem je pomembno dejstvo, da dokler vlažnost lesa ne pade pod točko nasičenosti, v mikrostrukturi ne pride do sprememb tkiva, kar nam daje priložnost raziskave lesa v stanju, kot se nahaja med rastjo v naravi. Glavna naloga tenzijskega tkiva je usmerjevanje debla v čim bolj navpično lego, prav tako se tenzijsko tkivo pojavlja porazdeljeno na zgornji, natezni strani vej.

2 PREGLED OBJAV

2.1 TENZIJSKI LES IN NJEGOVE ZNAČILNOSTI

Tenzijski les se od normalnega razlikuje predvsem zaradi prisotnosti želatinastega G sloja (sl. 1), ki je večinoma sestavljen iz celuloznih mikrofibril, pod majhnim kotom.

Deblo oziroma veja, je na mestu prisotnosti tenzijskega tkiva ekscentrične oblike z zamaknjenim strženom s povečano cono tenzijskega lesa. Vizualno se loči od normalnega tkiva po svetlem lesku na sveže skobljani površini, prav tako je površina na otip kosmata. (Kollman F. & Cote W., 1968)



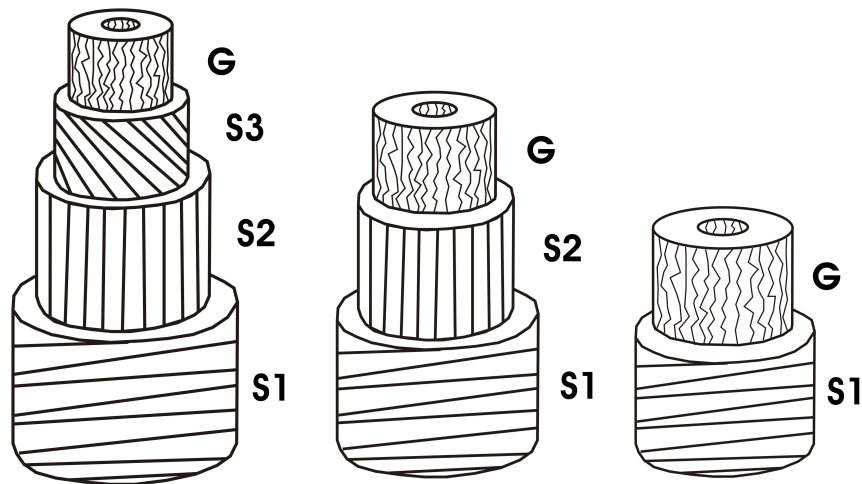
Slika 1: Anatomska zgradba želatinastih vlaken pri listavcih z odstopanjem G-sloja
(Isebrands, Parham, 1974)

G sloj je lahko prisoten v celični steni v različnih zaporedjih (sl. 2):

S1, S2, S3, G; S1, S2, G; S1, G.

Vsebuje izjemno veliko celuloze in zelo malo lignina, več je galaktana in manj ksilana.

(Kollman F. & Cote W., 1968)



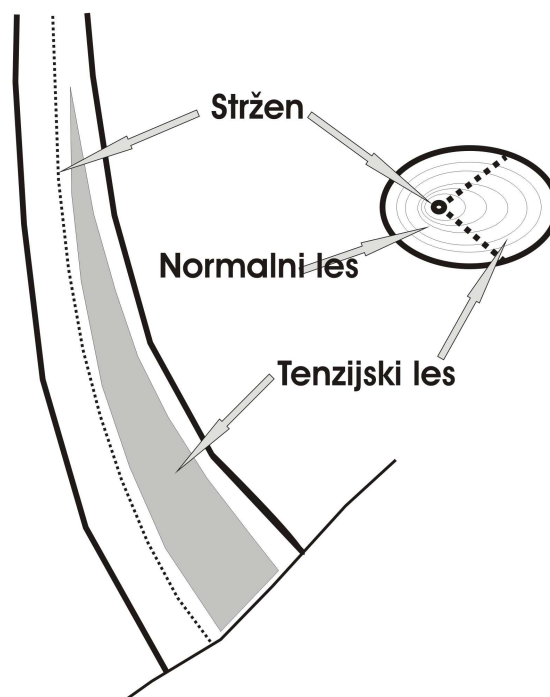
Slika 2: Zgradbe celičnih sten z želatinastim slojem (Risba po Dadswellu, Wardropu in Watsonu, 1964)

Značilnosti tenzijskega lesa v primerjavi z normalnim:

- deblo je ovalne oblike in ekscentrično
- osušen les ima svilnat videz, pri nekaterih tropskih vrstah je temnejši
- vsebuje želatinasta vlakna
- mikrofibrilna usmerjenost vzporedna z osjo vlakna
- povečan delež celuloze in galaktana, manj lignina in ksilana
- gostota je večja za 10%
- obdelana površina je volnata
- manjša tlačna trdnost

2.2 REAKCIJSKI LES IN NJEGOVA MEHANIKA

Tenzijsko tkivo se pri lesu listavcev nahaja na notranji strani krivine debla ali veje (sl. 3), ter je obremenjen tenzijsko oz. natežno, od tod tudi ime. Sodi v skupino reakcijskega lesa, kot tudi les iglavcev, ki se v tem primeru imenuje kompresijski les.



Slika 3: Tenzijski les v ekscentričnem deblu listavca

2.2.1 Celulozna tenzijska teorija izvora rastnih napetosti

Lignin v tenzijskem lesu naj ne bi imel nikakršne vloge pri generiranju napetosti. Natezne napetosti naj bi izvirale iz krčitvene narave celuloznih kristalitev. Lignin naj bi edinole vezal mikrofibrile in celice v kohezivno maso, ki omogoča porazdeljevanje napetosti po lesu.

Pri listavcih naj bi se celulozne mikrofibrile odlagale v obliki »raztegnjenih vzdolžno usmerjenih vzmeti«, ki tako generirajo natezne napetosti. Te naj bi dvigovale deblo ali ga stabilizirale. Lignin ne bi le »cementiral« celulozni skelet v celoto in tako zagotovil porazdelitev napetosti v lesu. Nižja vsebnost lignina in prisotnost želatinskih vlaken naj bi olajšali kontrakcijo mikrofibril in »maksimirala« vzdolžne natezne napetosti.

Bamber (2001) priznava, da obstaja tesna korelacija med koncentracijo lignina in napetostjo v kompresijskem lesu, vendar meni, da ni povsem jasno, kako se razvijejo napetosti. Po nabrekovalni teoriji naj bi napetosti bile odvisne od fibrilarnega kota.

Iz geometrijskih razlogov bi lahko tlačne napetosti nastale šele pri kotih, večjih od 40 °.

Bamberjevo celuložno tenzijsko hipotezo podpirajo raziskave Japoncev. Yamamoto et al. (1992) je pri nagnjenem ekscentričnem tulipanovcu (*Liriodendron tulipifera*) ugotovil negativno korelacijo med mikrofibrilarnim kotom in sproščeno deformacijo. Po večih raziskavah rezultati kažejo na vlogo celuloze pri nateznih napetostih. (Bamber, 2001)

2.3 LES KOT VISKOELASTIČEN MATERIAL

V praksi predstavlja časovno odvisno deformacijo večinoma le neznamen del celotne deformacije in jo zato lahko zanemarimo. Tedaj je linearni elastični model povsem ustrezen. V resnici pa les poleg elastičnosti izkazuje še viskoznost in sodi skupaj z bitumnom, betonom in termoplastičnimi snovmi v skupino viskoelastičnih materialov (Dinwodie 1994,2000). Lastnost viskoelastičnosti nakazuje časovno odvisnost in se odraža kot lezenje, relaksacija, dušenje in kot odvisnost nosilnosti od časa obremenitve. Ko les ali lesni kompozit obremenimo s konstantno silo, se les v trenutku elastično deformira. Ne da bi obremenitev oz. napetost stopnjevali, se deformacija s časom povečuje in to imenujemo lezenje.

Pri majhnih napetostih je lezenje manj izrazito, deformacija pa po 2-3 letih doseže navidezno ravnovesje. Ob razbremenitvi se deformacija zmanjša približno za toliko, kolikor je znašala elastična deformacija v trenutku obremenitve.

Lezna deformacija sestoji iz dveh delov: reverzibilnega v obliki zadržane elastične deformacije in ireverzibilnega v obliki linearno naraščajoče viskozne deformacije, kar velja predvsem za sekundarno lezenje. Pri visokih napetostih velja omeniti, da se po

določenem času lezna hitrost poveča (infleksija na lezni krivulji), kar je posledica porušitve materiala. Pri viskoelastičnih materialih teoretično določa prehod iz elastičnega v viskozno stanje temperatura steklastega prehoda. Steklast prehod je prehod iz viskoznega/plastičnega oz. gumskega stanja v steklasto ali krhko stanje. Značilen je za posamezne lesne sestavine in za les kot celoto. Adsorbirana vlaga deluje kot mehčalec (plastifikator) in znižuje temperaturo steklastega prehoda. (Boyd, 1982)

2.3.1 Lezenje

Lezenje je časovno odvisna deformacija, ki nastane v materialu ob prisotnosti določene napetosti. Lahko ga izrazimo z leznim številom (φ , relativno lezenje), ki je razmerje med lezno in elastično deformacijo. Na splošno velja, da lahko relativno lezenje pri zmerni obremenitvi v daljšem obdobju doseže vrednost 1,0 in je vrednost začetne elastične deformacije. Lezenje je anizotropno in je praviloma večje v prečni smeri in večje pri tlaku kot pri nategu. Relativno lezenje se lahko definira tudi kot sprememba podajnosti med preizkusom glede na prvotno podajnost.

Les se v pogojih normalne temperature in vlažnosti ter minimalne napetosti obnaša kot linearno viskozno elastičen material. (Boyd, 1982)

2.3.2 Reološka interpretacija viskoelastičnega lezenja

Reološke lastnosti lesa lahko opišemo z dvema osnovnima modeloma, ki sta idealno Hookovo telo (vzmet) in Newtonovo telo (dušilka). Obnašanje idealnega Hookovega telesa je opisano z konstanto k , napetostjo P_e in deformacijo u_c (1), vendar nikjer ni prisoten vpliv časa, saj ta model opisuje trenutno elastično obremenitev. (Bodig, 1982)

$$P_e = k \cdot u_c \quad \dots(1)$$

Newtonovo telo oz. dušilka, opisuje časovno vedenje materiala na obremenitev in je opisano z diferencialno enačbo (2).

$$P_v = r \left(\frac{du_v}{dt} \right) \quad \dots(2)$$

Pri tem je z r označena vlažnostna konstanta, z u pa viskozna deformacija. V primeru ko je sila konstantna, velja sledeča integrirana enačba (3) iz enačbe (2).

$$u_v = u_0 + \left(\frac{P_0}{r} \right) t \quad \dots(3)$$

Po razbremenitvi se viskozna deformacija ne povrne popolnoma v prvotno stanje, kar je enako deformaciji Newtonove dušilke. Pri tem je z u_v označena viskozna deformacija in z u_0 začetna deformacija, P_0 pa ima pogosto vrednost 0.

2.3.2.1 Maxwellovo telo

Pri maxwelowem telesu govorimo o zaporedno povezani vzmeti in dušilki.

Celotna deformacija u je vsota elastične in viskozne deformacije v času t (4), medtem ko je sila enaka v obeh telesih.

$$\frac{du}{dt} = \frac{du_e}{dt} + \frac{du_v}{dt} \quad \dots(4)$$

Če pa odvajamo enačbo (1) po času in zamenjamo dobljeno diferencialno enačbo z enačbo (2) in vstavimo v enačbo (4), pa dobimo sledeče:

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{k} \frac{dP}{dt} + \frac{P}{r} \quad \dots(5)$$

Ker je sila pri lezenju konstantna, pomeni daje $dP/dt = 0$ in iz enačbe (5) pridobimo sledečo enačbo:

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{r} P_0 \quad \dots(6)$$

ki integrirana zgleda takole:

$$u = u_0 + \frac{1}{r} P_0 t \quad \dots(7)$$

sedaj lahko odziv Maxwellovega telesa na delovanje konstantne sile zapišemo kot:

$$u_M = \frac{P_0}{k} + \frac{P_0}{r} t \quad \dots(8)$$

Ta sistem opisuje dva dela krivulje lezenja, kjer je prvi del trenutna deformacija, ki je sorazmerna obremenitvi in jo opisuje vzmet, medtem ko je drugi del viskozna deformacija, ki je sorazmerna obremenitvi in času in jo opisuje dušilka. (Bodig, 1982)

2.3.2.2 Kelvinovo telo

Kelvinovo telo se največkrat uporablja za predstavitev zakasnele elastične komponente materialov. Sestavlja ga vzporedno vezana dušilka in vzmet. Ko na Kelvinovo telo delujemo z natezno silo (9), se pojavi upor v dušilki in posledično je začetna deformacija neopazna. Sčasoma začne dušilka popuščati in upor se začne prenašati na vzmet, ki na koncu prenaša celotno silo. Ko napetost popustimo, začne vzmet delovati v nasprotni smeri in s seboj počasi povleče dušilko, saj je zaradi vzporedne vezave obema elementoma vsiljena enaka deformacija (10). (Bodig, 1982)

$$P_k = P_e + P_v \quad \dots(9)$$

$$u_k = u_e = u_v \quad \dots(10)$$

Z zamenjavo izrazov (1) in (2) v enačbi (9) dobimo:

$$P_k = k_u + r \frac{du}{dt} \quad \dots(11)$$

Če delimo enačbo (11) z r in uporabimo relaksacijsko časovno konstanto τ , dobimo sledečo diferencialno enačbo:

$$\frac{du}{dt} + \frac{u}{\tau} = \frac{P}{r} \quad \dots(12)$$

Rešitev te homogene diferencialne enačbe prvega reda:

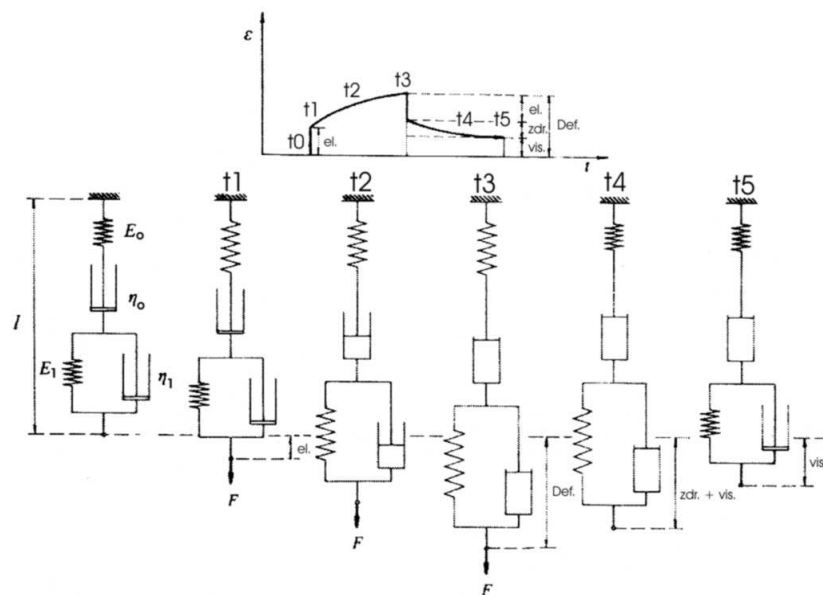
$$u_K = \frac{P_0}{k}(1 - e^{-t_1}) \quad \dots(13)$$

Navedena razbremenitvena enačba (14) za lezenje je dobljena po odstranitvi obremenitve P_0 v času t_1 , kjer je čas t merjen od prekinitve obremenitve.

$$u_K = \frac{P_0}{k}(1 - e^{-t_1})e^{-t/\tau} \quad \dots(14)$$

2.3.2.3 Štiri parametrični Burgersov model

Najenostavnejši linearni model, ki zadovoljivo opisuje časovno obnašanje lesa pri konstantni vlažnosti in temperaturi ter kratkotrajni obremenitvi, je štiri-parametrski Burgersov model viskoelastičnega telesa s časovno odvisno deformacijo in predstavlja zaporedno vezano Maxwellovo telo in Kelvinovo telo. (sl. 4)



Slika 4: Ponazorjeno lezenje z Burgersovim modelom, (Bodig, 1982, s. 212)

V času t_0 je telo neobremenjeno. V trenutku t_1 material obremenimo s konstantno silo in nanjo reagira z elastično deformacijo, v času do t_3 , ko na material še deluje konstantna sila, se deformacija poveča do meje, ki pa je odvisna od lastnosti materiala.

Po razbremenitvi se elastična komponenta materiala vrne v začetno pozicijo, do časa t_5 pa še zadržana. Permanentna deformacija na koncu je zgolj redko prisotna. Burgersov model ne opisuje terciarnega lezenja ali porušitve (sl. 4).

Enačba (15), podaja deformacijo v času t (s) ob konstantni obremenitvi.

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma}{E_0} \cdot (1 - \varphi \cdot n) + \frac{1}{\eta_0} \cdot \sigma \cdot t \quad \dots(15)$$

Enačbi (16) in (17) sta nanizani za dopolnitev prve enačbe. Pri tem je E_0 (MPa) elastični modul prve vzmeti kot označeno zgoraj (sl. 4), E_1 (MPa) je pa elastični modul druge vzmeti, ki je element zadržane deformacije.

$$\varphi = \frac{E_0}{E_1} \quad \dots(16)$$

$$n = \frac{1 - \frac{\varepsilon_t \cdot E_0}{\sigma}}{\varphi} \quad \dots(17)$$

$$\eta_1 = \frac{E_1 \cdot t}{\ln(1 - n)} \quad \dots(18)$$

Viskoznost materiala je prikazana z dvema viskoznima dušilkama, kjer je prvi označen z η_0 (Ns/mm²) (1), drugi viskozni modul, torej η_1 (Ns/mm²), pa se izračuna po enačbi (18). (Domke Ruebben,)

3. MATERIAL IN METODE

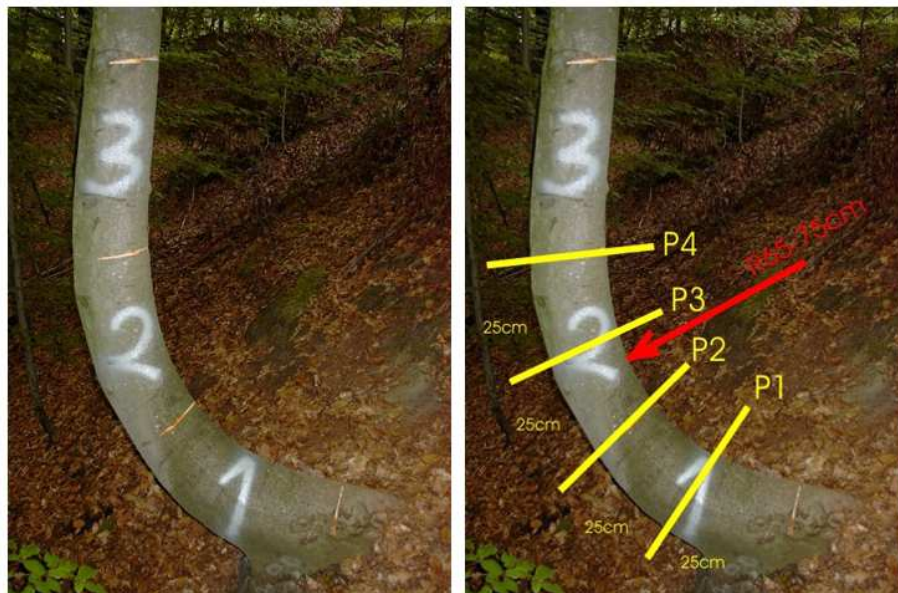
3.1 MATERIAL

Za preizkuse smo uporabljali tenzijski in normalni les bukovine.

Tenzijski les spada med reakcijske lesove in se nahaja na notranjem delu krivine debla ali veje listavca. Da smo pridobili kakovostne vzorce, smo iskali vzorčna drevesa na strmih pobočjih gozdov, saj so nekatera drevesa lahko bila izpostavljena plazom ali snegu, kar bi lahko povzročilo uklon debla in s tem nastanek reakcijskega lesa, vendar pa je najpogostejši vzrok sama sila teže drevesa, ki raste na strmem terenu.

Slika prikazuje drevo *D1*, stoječe na precej strmem pobočju (sl. 5), označeno s številom dolgega koluta, ki se je ob nadaljnjem razrezu še razpolovil. Ukrivljenost je bila zelo izrazita, vsebnost tenzijskega lesa pa je izpolnila naša pričakovanja.

Za preizkusne namene smo izbrali vsega tri vzorčna drevesa. Drevesi *D2* in *D3* sta prav tako bila posekana, vendar je drevo *D2* vsebovalo zelo malo vidnega tenzijskega lesa, medtem ko je drevo *D3* presenetilo z izjemno velikim deležem vidnega tenzijskega lesa, kljub manjši ukrivljenosti.



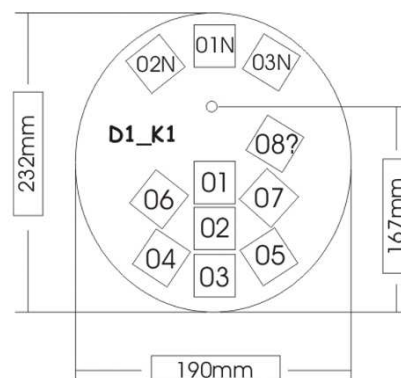
Slika 5: Drevo *D1* z označenimi prerezi kolotov

3.1.1 Označevanje vzorcev

Vsak vzorec je označen po sistemu izvora, kar pomeni, da lahko iz njegovega imena in pomočjo priloženih shem prerezov kolotov dreves (sl. 6), (glej prilogo A), točno določimo njegovo pozicijo v še stoječem drevesu. Ime vzorca je število, zapisano po sledečem zaporedju: drevo(*D*) -kolut(*K*) -vzorec(*00*). Koluti se štejejo od panja navzgor, medtem ko je panj označen s *K0*, vzorci pa s števili, katerim se je v primeru normalnega lesa dodala še črka *N*.

Primer označevanja:

- tenzijski les: (D1-K1-01)
- normalni les: (D1-K1-01N)



Slika 6: Shema prereza koluta D1-K1

3.1.2 Razrez in pridobivanje

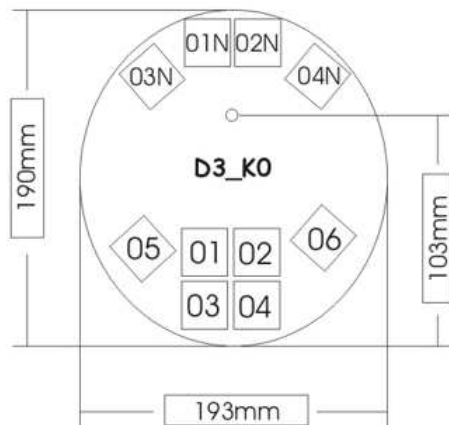
Sveže kolute dolžine 50 cm, smo takoj hermetično zaprli v nepredušne vreče, kar je upočasnilo izhajanje proste vode. Vsak kolut smo najprej razpolovili po dolžini in ga čelno poskobljali, šele potem smo pod določenim kotom svetlobe lahko jasno določili območja tenzijskega in normalnega lesa. (glej prilogo B)

Na čelo koluta smo narisali prvotno pozicijo vzorcev, pri čemer smo izločili vsaj 20 let juvenilnega lesa, da smo se izognili morebitnim anomalijam. Vsi vzorci so morali biti čim bolj radialno orientirani, kar smo dosegli z obračanjem pozicije vzorcev v smeri letnic.

Na shemah (sl. 8), so izrisane končne pozicije vzorcev mere so podane brez skorje in služijo za boljšo predstavo odmika stržena drevesa od geometričnega središča debla, dimenzije vzorcev pa so bile okoli 250 mm x 32 mm x 32 mm. Vzorce z vizualno težko prepoznavnim tenzijskim lesom smo dodatno označili.



Slika 7: Kolut D3-K0, vidno območje tenzijskega lesa (spodnja stran)



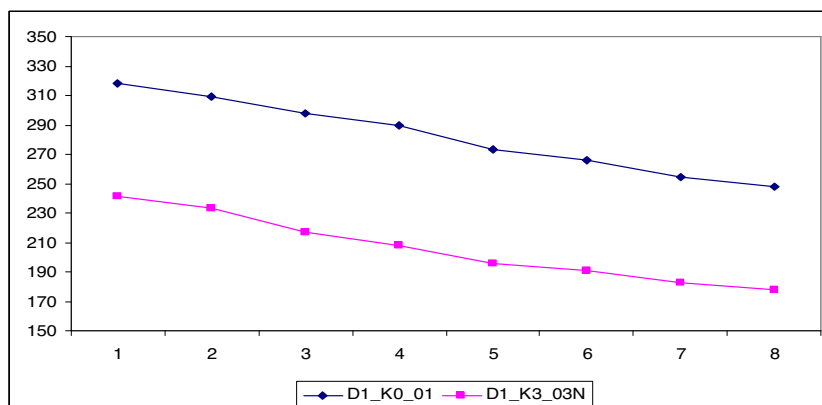
Slika 8: Končna shema in prvotno izrisane pozicije vzorcev koluta D3-K0

Tako označene kolute (sl. 8) smo razrezali s tračnim žagalnim strojem, vzorce pa vsakega posebej še enkrat označili na stranicah, saj smo čela premazali s pasto »Stipol«, ki je preprečila izsuševanje lesa na čelih.

3.1.3 Sušenje

Vzorci smo zložili na zložaj v prostoru s sobno temperaturo, ter tako omogočili počasno in čim manj stresno izhajanje proste vode, s ciljem da se čimbolj približamo točki nasičenja.

Število vseh vzorcev je presegalo 120 kosov, zato smo za spremljanje izgube teže iz vsakega koluta naključno izbrali po 2 kosa tenzijskega in po 1 kos normalnega lesa, kar je predstavljalo 36 kontrolnih kosov. Sprva smo meritve teže izvajali vsak dan, kasneje pa vsake 3 dni, saj se je teža manjšala za vedno manjši delež, nakar lahko sklepamo, da smo se približali točki nasičenja. Kot vidimo, je izsuševanje vzorcev obeh tipov lesa potekalo skladno in enakomerno (sl. 9), ob koncu pa smo z gravimetrično metodo določili vlažnost vzorcev pri masi 190 g (normalni les) oziroma pri 260 g (tenzijski les) in ugotovili, da smo se res približali točki nasičenja.



Slika 9: Izguba teže(g) vzorcev (od 16.09.2005 do 29.09.2005)

3.1.4 Končni razrez vzorcev

Iz osušenih vzorcev smo izdelali pravilno orientirane končne vzorce, tako da so letnice obrnjene v smeri obremenitve, torej je vsak vzorec radialno usmerjen. (sl. 10).



Slika 10: Vzorec/preizkušane

Uspelo nam je pridobiti vsega skupaj 44 uporabnih, pravilno orientiranih vzorcev, končnih dimenzij, 220 mm x 10 mm x 5 mm.

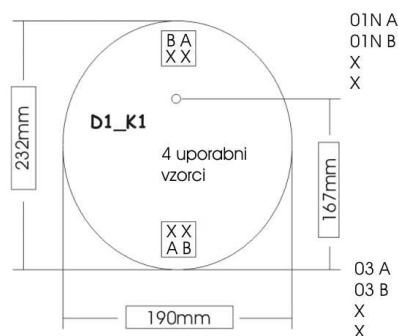
Pri izboru končnih vzorcev smo upoštevali lego v prerezu, torej smo iz sledečih kolotov izbrali po dva vzorca, kjer je vsak bil predstavnik tenzijskega in normalnega lesa, oba sta pa se nahajala na perifernem delu koluta, v medsebojni relaciji preko središča.

Izbrani vzorci:

- D1-K1-01N in 03
- D1-K2-03N in 03
- D1-K3-01N in 04
- D1-K4-01N in 03
- D1-K6-01N in 02
- D3-K0-01N in 04
- D3-K1-01N in 04
- D3-K2-02N in 04

Sprva so se vzorci shranjevali v zaprti stekleni posodi v prisotnosti destilirane vode, kar je zagotavljalo kontrolirano vlažno klimo in so vzorci ohranjali konstantno nasičenje, kasneje pa so se nahajali v zaprtem prostoru samega eksperimenta. Z izdelavo končnih vzorcev (sl. 11), se je dopolnil tudi sistem označevanja, saj je lahko iz enega večjega kosa nastalo do 4 končnih vzorcev.

Uporabni vzorci so na koncu imena pridobili še oznako *A*, *B*, *C* ali *D*, z znakom *X* pa smo označili za preskuse neuporabne vzorce, vendar so še vedno lahko služili za sledenje raznih ostalih lastnosti. (glej prilogo A)



Slika 11: Shema pozicije končnih vzorcev, kolut D1-K1

3.2 METODE

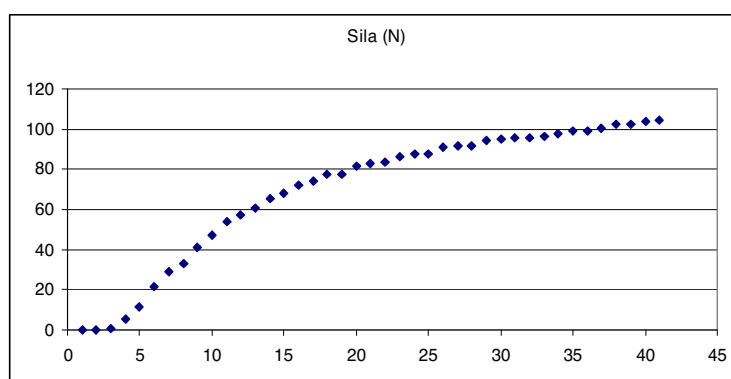
Tenzijski les ima zaradi svoje kemične sestave drugačne reološke lastnosti kot normalni les. S poskusi upogibne obremenitve s konstantno silo, smo prikazali razlike v lezenju teh dveh tipov lesa.

Lezenje smo povzročali s konstantno silo s pomočjo testne naprave, merjenje pa smo izvajali z LVDT merilnikom pomika, na osnovi spremembe napetosti glede pomika jedra. Spremljanje in zapisovanje meritev smo izvajali s programom (DAQ sistem). Merjenje obremenitve in lezenja je potekalo vsaj 3 do 4 dni in tudi do več tednov, prav tako tudi razbremenitev. V tem časovnem obdobju so se meritve zapisovale vsako minuto.

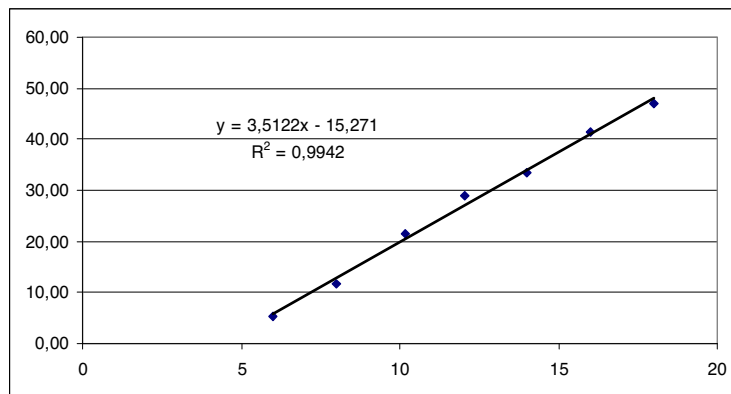
3.2.1 Določitev sile obremenjevanja

Da smo lahko določili silo s katero bomo obremenjevali vse vzorce, je bilo potrebno določiti mejo elastičnosti tenzijskega lesa. To smo storili s testi lomljenja.

Izbrali smo tri vzorce in jih v testirnem stroju izpostavili destruktivnim silam, ter tako pridobili napetostno krivuljo (sl. 12), na kateri smo določili linearno območje (sl. 13).



Slika 12: Celotna napetostna krivulja



Slika 13: Izsek linearnega območja napetostne krivulje

Za ta preizkus, smo uporabili naslednje vzorce:

- D1-K3-04X
- D3-K2-04D
- D3-K2-02ND

Zgornjo mejo linearnosti smo določili pri sili 47 N.

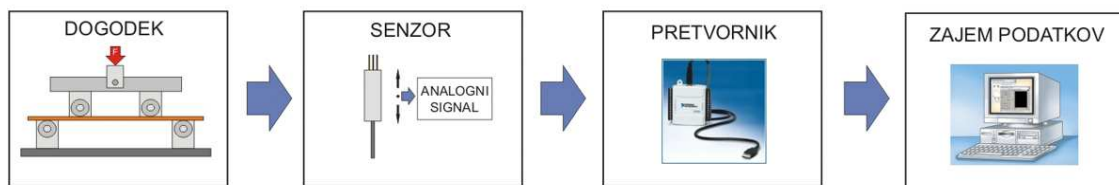
Preliminarne teste smo izvajali z 15 % obremenitvijo glede določene meje elastičnosti, vendar ni prišlo do lezenja, prav tako smo preizkuse ponovili s 25 % obremenitvijo, kar tudi ni prikazalo želenih rezultatov.

Po začetnih neuspešnih poizkusih smo se odločili, da bomo vzorce obremenjevali s 50 % silo meje elastičnosti, kar smo zaokrožili na silo 20 N.

3.2.2 Merilna veriga

Merilna veriga (sl. 14) je bila sestavljena iz štirih poglavitnih sestavnih delov:

- fizikalni dogodek (obremenjevanje v testni napravi)
- senzor (električni merilnik pomika, nameščen na testni napravi)
- pretvornik signala (*USB*, večkanalni vmesnik)
- programska oprema za zajem podatkov (individualni program: *LabVIEW*)

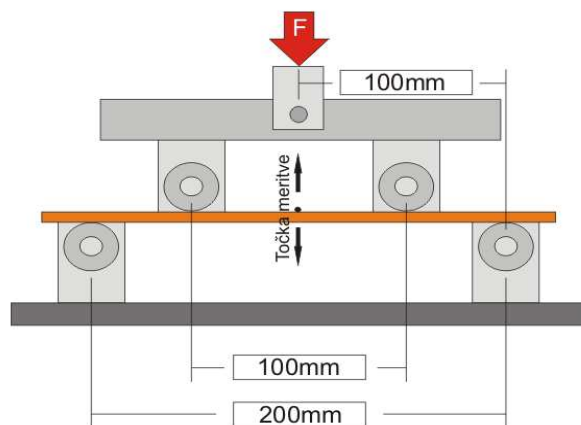


Slika 14: Shema merilne verige

Končna obdelava podatkov se je vršila v programu *MS Excel*.

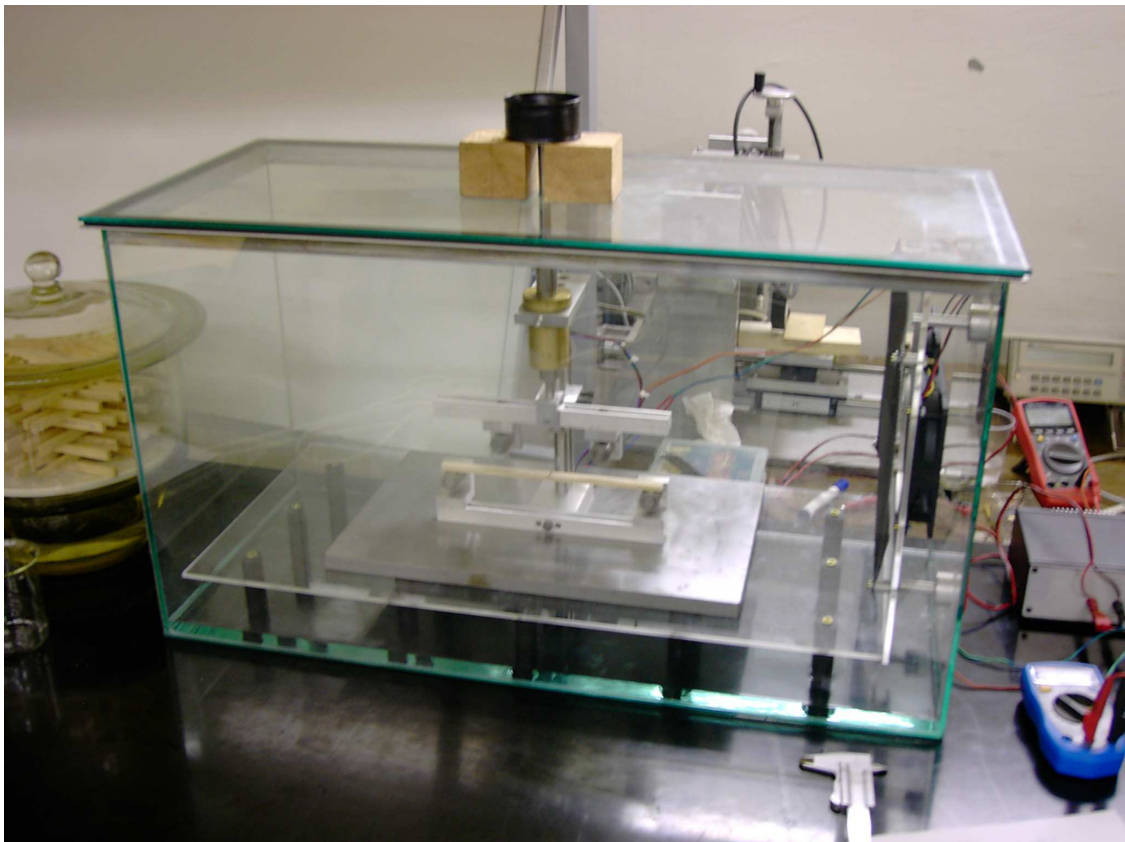
3.2.2.1 Testirna naprava

Poizkuse smo izvajali na testni napravi za 4 točkovni upogib (sl. 15).



Slika 15: Risba testne naprave

Ker so preizkusi trajali dalj časa, smo morali poskrbeti za vzdrževanje konstantne klime v celotnem obdobju preizkusa, da ne bi prišlo do spremembe vlažnosti vzorca, kar bi zagotovo negativno vplivalo na meritve. To smo zagotovili s postavitvijo testne naprave v nepredušno zaprt steklen prostor (sl. 16), ki je vseboval sistem za kroženje vlažnega zraka, ter s tem ustvaril in vzdrževal 98 % relativno zračno vlažnost zraka, pri sobni temperaturi (22 °C do 23 °C).



Slika 16: Testna naprava v zaprtem prostoru (razbremenjen vzorec)

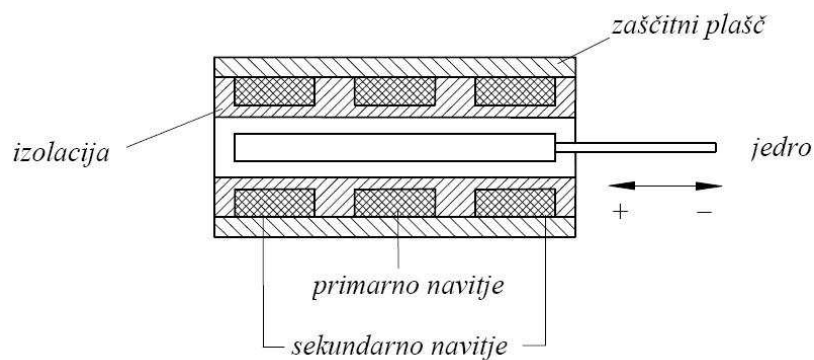
Na dno testnega prostora smo dolili destilirano vodo, dva ventilatorja pa sta omogočala krožno gibanje zraka, ki se je ob stiku s površino vode stalno vlažil.

Testna naprava se nahaja na dvignjeni trdni ravnini, konica le-te pa sega izven prostora skozi odprtino na vrhnjem steklu, na katerem je montirana posodica za uteži.

Odprtina vsebuje tudi gumijasto tesnilo, ki hkrati omogoča pomik mehanizma testne naprave. Vzorci so se zaradi zagotavljanja stalne lastne vlažnosti, kasneje shranjevali v prostoru eksperimenta neposredno pri testni napravi, vendar niso motili poteka poizkusa.

3.2.2.2 Merilnik pomika

Uporabljali smo merilnik pomika *LVDT* (Linear Variable Differential Transformer), tipa *DC-DC* serija 240, proizvajalca *Transtek* (sl. 17).



Slika 17: Shema merilnika pomika LVDT

3.2.2.3 Pretvornik signala

Za sprejemanje električnega signala od senzorja in pretvorbo le-tega v digitalni signal in pošiljanje v računalnik, smo uporabili digitalni USB vmesnik, tipa NI USB-6009, ki premore več digitalnih I/O linij, na računalnik pa se priključi preko USB vrat (sl. 18).



Slika 18: I/O naprava, NI USB-6009

3.2.2.4 Program za zajemanje meritev

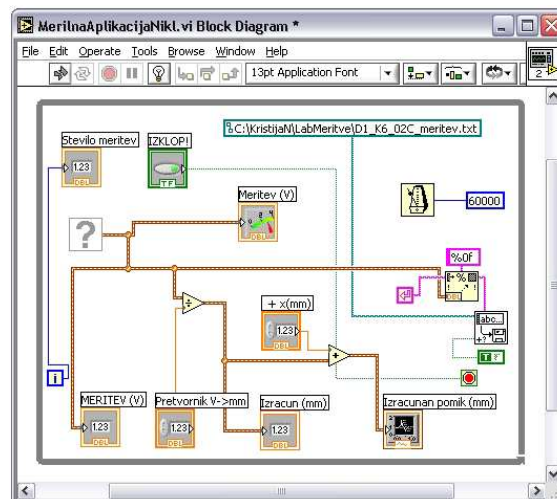
Da smo lahko zagotovili merjenje in zapisovanje meritev v tako kratkih časovnih intervalih, torej vsako minuto, smo posebej za ta eksperiment izdelali merilno aplikacijo v računalniškem programu *LabVIEW*.

Glavna funkcija tega programa je torej zajemanje signala/napetosti merilnika pomika testirne naprave v določenem časovnem intervalu, ter zapis zajete vrednosti na določen medij, v tem primeru trdi disk računalnika.

Program omogoča variiranje časovnega intervala merjenja, zapisuje vsako vrednost sproti, kar pomeni da ob primeru prekinitve ne izgubimo vseh podatkov, shranjuje podatke v mapo, ki smo mu jo sami določili, prav tako omogoča spreminjanje imena datotek, ki se v našem primeru nanašajo na vsak vzorec posebej.

Na komandni plošči prevladujejo predvsem razni grafični prikazovalniki informativnega značaja, ter stikalo za vklop zajemanja meritev, vezna plošča pa prikazuje vezave med komponentami programa. V polju na vezni plošči (sl. 19), označenem z vprašajem, se nahaja naprava za zajemanje vhodnega signala. Pri tem govorimo o digitalnem pretvorniku. Okoli tega polja se nahajajo barvne ikone, ki imajo predvsem informativni pomen in predstavljajo vidno polje komandne plošče.

Večji poudarek gre na desno stran vezne plošče, kjer se na vrhu nahaja naslov in lokacija trenutne datoteke, kjer se shranjujejo izmerjene vrednosti, v (.txt) obliki zapisa.



Slika 19: Vezna plošča programa

3.2.3 Določitev vsebnosti tenzijskega tkiva

Med potekom eksperimentov se je kmalu pokazalo, da so pridobljene meritve precej variirale od pričakovanj. S tem je prišlo do suma, da tudi po sveži izbiri in vizualnem sortiranju normalnega in tenzijskega lesa, pričakovano tkivo ni bilo popolnoma prisotno v obsegu celega vzorca. Da smo se lahko o tej trditvi prepričali, smo izvedli analizo vsebnosti tenzijskega tkiva na izbranih vzorcih, ki so med meritvami pokazali pričakovane, kot tudi nepričakovane meritve lezenja.

3.2.3.1 Priprava vzorcev

Izbrali smo tri vzorce, ki so bili preizkušeni in označeni kot tenzijski:

- D3-K2-04c (pravilna krivulja lezenja)
- D1-K2-03a (delno zadržana krivulja lezenja)
- D1-K3-04b (neobičajno zadržana krivulja lezenja)

Dva sta bila predstavnika ekstremov, torej idealnega pričakovanega lezenja in obratno, med tem ko je en vzorec po meritvah sodeč prikazal vmesne rezultate.

Vzorci smo prerezali na polovici dolžine in izrezali kos dolžine 1,5 cm za kasnejšo izdelavo mikroskopskih rezin. Rezine smo diferencialno obarvali v 95 % alkoholni raztopini v barvi (safranin) rdeče in (astra) modre.

3.2.3.2 Analiza mikroskopskih slik

Safranin rdeča obarva predvsem celulozo in lignin, medtem ko Astra modra obarva samo čisto celulozo, torej želatinasti sloj v celični steni tenzijskega tkiva. Tako smo na podlagi obarvanja in števila branik, lahko določili vsebnost tenzijskega kakor tudi normalnega tkiva v prerezu izbranega vzorca, ter jo povezali s prikazano krivuljo lezenja.

3.2.4 Izračuni

Preizkuse smo izvajali na testni napravi za štiri točkovni upogib, kjer za tako obremenjene »nosilce« veljajo sledeče enačbe: (Domke Ruebben,), (Krautov strojniški priročnik, 2000)

$$y = \frac{11 \cdot F \cdot l^3}{384 \cdot E \cdot I} \quad \dots(19)$$

Pri tem je konstantna sila (10 N) označena z F (sila je polovična zaradi dveh opornih točk v testni napravi), dolžina med oporišči je znašala 200 mm in je označena z l , trenutna elastična deformacija je označena kot y (mm), vztrajnostni moment označen z I (mm⁴), je izražen z enačbo (20).

$$I = \frac{a \cdot b^3}{12} \quad \dots(20)$$

Pri izračunu vztrajnostnega momenta I ($104,16 \text{ mm}^4$) velja a (10 mm) za širino preizkušanca, medtem ko b (5 mm) predstavlja višino preizkušanca.

Napetost v preizkušancu je konstantna ($11,7 \text{ N/mm}^2$) in je izražena z enačbo (21), pri tem je moment označen z M , ki je znašal $490,5 \text{ Nmm}$.

$$\sigma = \frac{M}{I} \cdot \frac{b}{2} \quad \dots(21)$$

Za izračun iskanih modulov, smo uporabili sledeče enačbe:

$$E_0 = \frac{11 \cdot F \cdot l^3}{384 \cdot y_0 \cdot I} \quad \dots(22)$$

$$E_1 = \frac{11 \cdot F \cdot l^3}{384 \cdot (y_{\max} - y_0) \cdot I} \quad \dots(23)$$

Pri tem je v enačbah (22) in (23) kot $y_{\max}$ (mm) označena največja deformacija vzorca, dosežena ob koncu obremenjevanja, kot y_0 (mm) pa je označena začetna elastična deformacija.

$$\eta_0 = \frac{\sigma \cdot t}{\varepsilon_t} \quad \dots(24)$$

$$\eta_1 = \frac{E_1 \cdot t}{\ln(1 - n)} \quad \dots(25)$$

Viskozni modul η_0 (Ns/mm^2) pri enačbi (24), je izražen iz zadnjega člena enačbe (15), prikazanega štiri parametričnega Burgersovega modela, enačba (25) je pa enaka enačbi (18).

Lezno število φ , ki je prav tako podano v tabelah rezultatov, je razmerje med končno deformacijo in začetno elastično deformacijo (26). Ko lezno število doseže vrednost 1, je viskozna deformacija enaka začetni elastični deformaciji, kar pomeni da je končna deformacija dvakratnik elastične deformacije.

$$\varphi = \frac{y_{\max} - y_0}{y_0} \quad \dots(26)$$

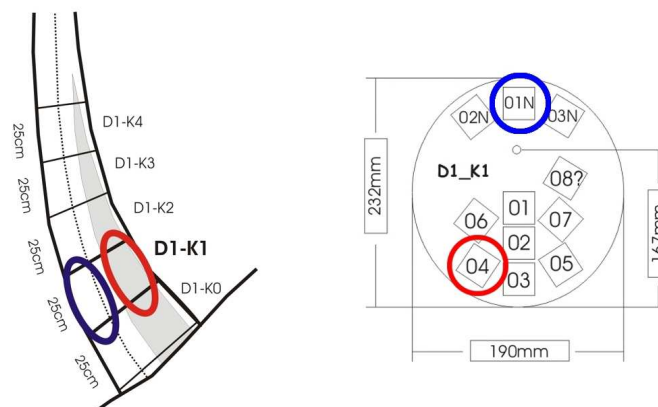
4 REZULTATI

Navedeni so vsi rezultati pridobljenih meritev izbranih vzorcev v preizkusih lezenja, pri štiri točkovnem upogibu pri sili 20 N, kar je znašalo 50 % obremenitve glede meje elastičnosti lesa. Dodatno so prikazane in analizirane vsebnosti želatinastega *G* sloja pri treh različnih vzorcih v povezavi s pridobljenimi meritvami lezenja.

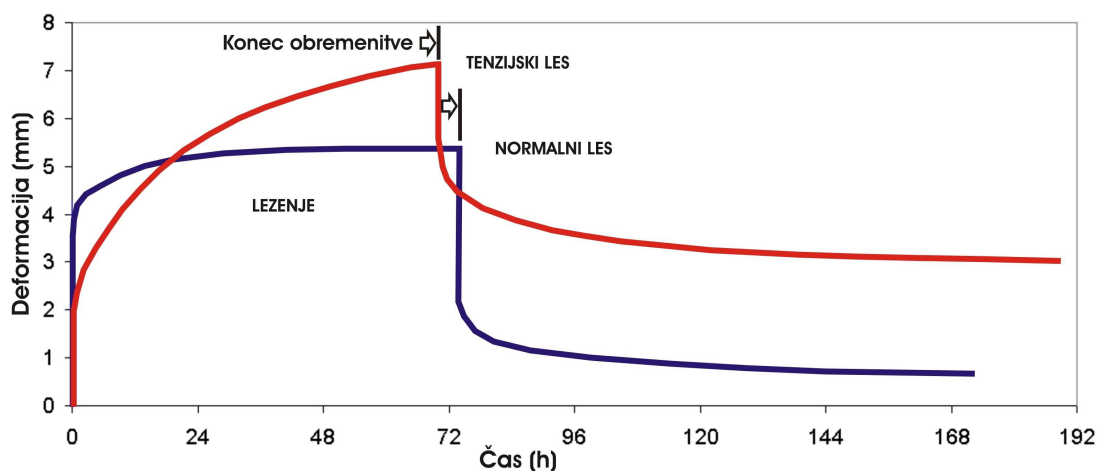
4.1 LEZENJE NORMALNEGA IN TENZIJSKEGA LESA

4.1.1 Vzorec D1-K1

Vzorec D1-K1 je bil lociran v začetku krivine spodaj pri panju debela (sl. 20), kar se pozna v visoki vsebnosti tenzijskega tkiva. Vidimo obratno sorazmerje med elastičnimi moduli tenzijskega in normalnega lesa. Tenzijski les je pokazatelj veliko manjše elastične obremenitve, med tem ko je lezenje toliko bolj izrazito, ravno obratno se pa pokaže pri normalnem lesu (pregl. 1). Viskozni moduli tenzijskega lesa so v povprečju velikosti ene tretjine viskoznih modulov normalnega lesa, kar se vidi tudi v samem grafu (sl. 21).



Slika 20: Pozicija izbranih vzorcev v deblu in v prerezu koluta D1-K1



Slika 21: Lezenje vzorcev D1-K1

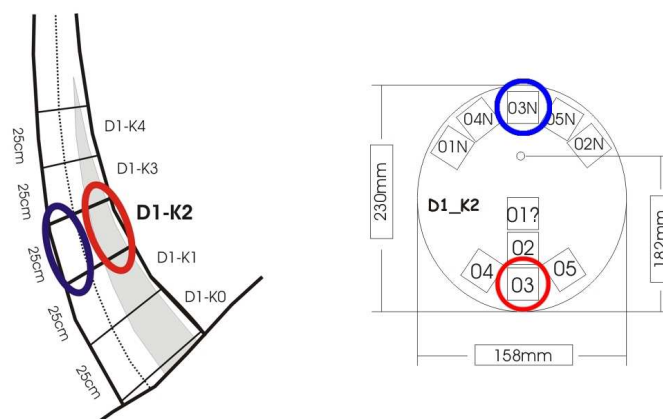
Preglednica 1: Rezultati meritev vzorcev iz koluta D1-K1

	<i>Tenzijski les</i>	<i>Normalni les</i>
Največji pomik (mm)	7,2	5,3
Elastični modul E_0 (MPa)	13323,0749	6348,0533
Elastični modul E_1 (MPa)	3867,9895	11359,6744
Viskoz. mod. η_0 (Ns/mm ²)	105480	299530
Viskoz. mod. η_1 (Ns/mm ²)	70807	203980
Lezno število	2,78	0,47

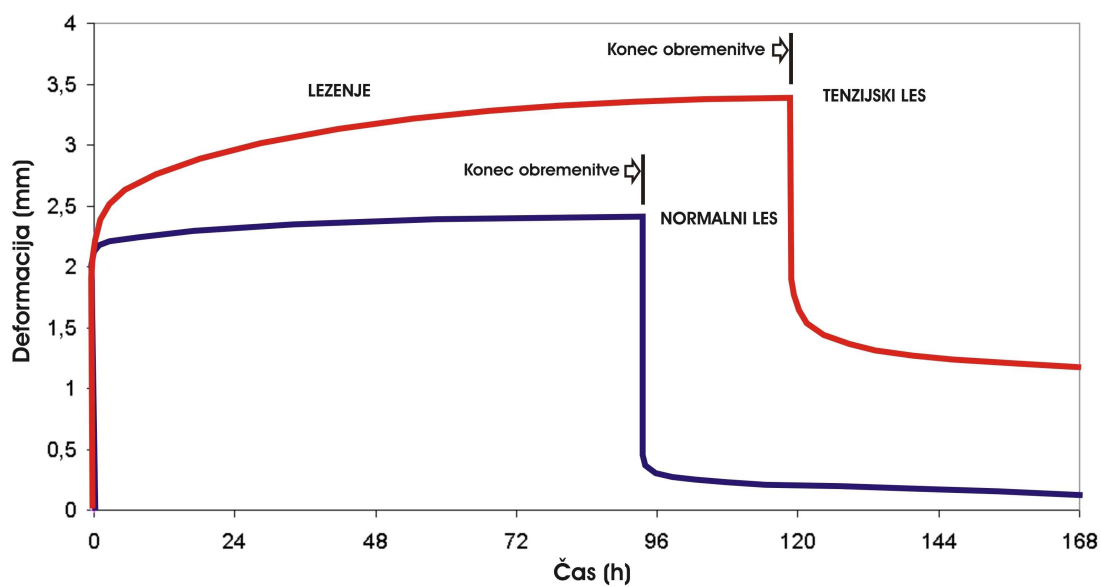
4.1.2 Vzorec D1-K2

Vzorec D1-K2 je pokazatelj lezenja tenzijskega lesa, vendar ne tako izrazito kot njegov predhodnik, ki se je nahajal pod njim v debilu (sl. 22). Vidimo lahko, da sta elastični deformaciji obeh vzorcev identični, med tem ko je lezenje tenzijskega vzorca izrazitejše (sl. 23). To potrjujejo tudi podatki iz preglednice (pregl. 2), kjer je drugi modul elastičnosti normalnega lesa, štirikratnik tenzijskega lesa.

Razlika lezenja se vidi predvsem v drugem viskoznem modulu, ki je 7 krat večji pri normalnem lesu, kar razlaga njegovo zadržano lezenje v primerjavi z lezenjem tenzijskega lesa.



Slika 22: Pozicija izbranih vzorcev v deblu in v prerezu koluta D1-K2



Slika 23: Lezenje vzorcev D1-K2

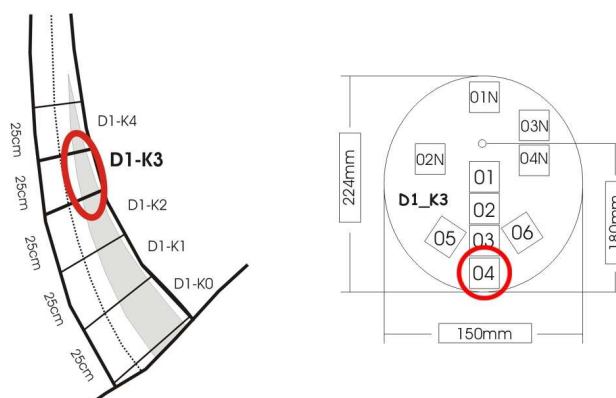
Preglednica 2: Rezultati meritev vzorcev iz koluta D1-K2

	<i>Tenzijski les</i>	<i>Normalni les</i>
Največji pomik (mm)	3,4	2,5
Elastični modul E0 (MPa)	11603,9685	10180,8403
Elastični modul E1 (MPa)	14015,1827	56798,3719
Viskoz. mod. η_0 (Ns/mm ²)	328777	1483094
Viskoz. mod. η_1 (Ns/mm ²)	128957	917392
Lezno število	0,7	0,47

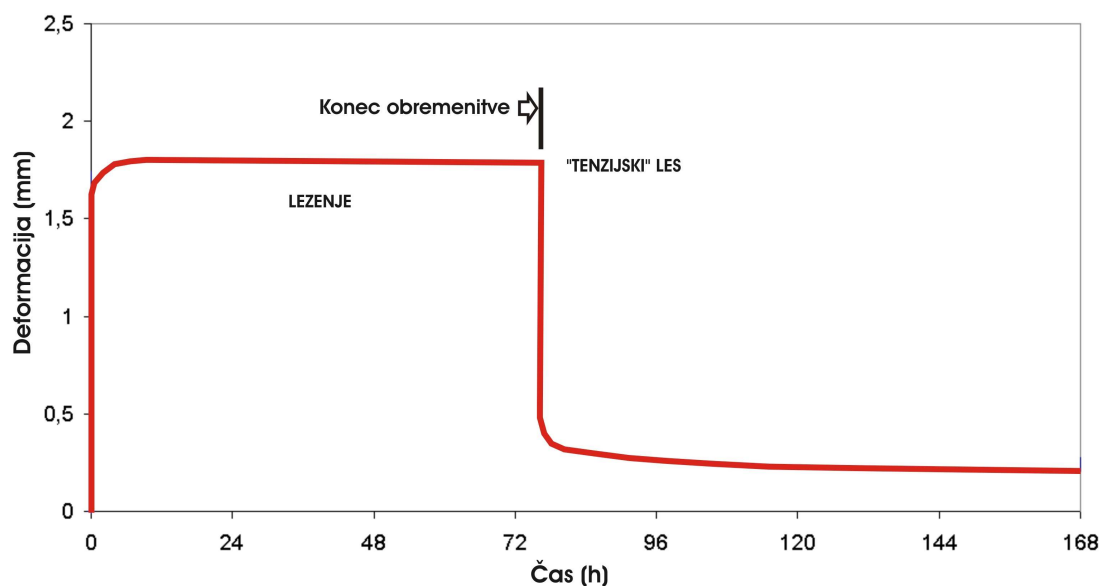
4.1.3 Vzorec D1-K3

Pri sledečem vzorcu vidimo krivuljo lezenja, ki ni značilna za lezenje tenzijskega lesa pri naših preizkusnih pogojih. Čeprav se je vzorec nahajal na notranji strani krivine debla, se je pokazalo, da višje kot se gibljemo po deblu navzgor, manjša je vsebnost tenzijskega tkiva v obsegu izbranega vzorca (sl. 24).

Najverjetneje je prisotnost tenzijskega tkiva tako majhna, da so meritve pokazale samo del primarnega lezenja, medtem ko do sekundarnega ni prišlo (sl. 25).



Slika 24: Pozicija izbranih vzorcev v deblu in v prerezu koluta D1-K3



Slika 25: Lezenje vzorca D1-K3

Preglednica 3: Rezultati meritev vzorcev iz koluta D1-K3

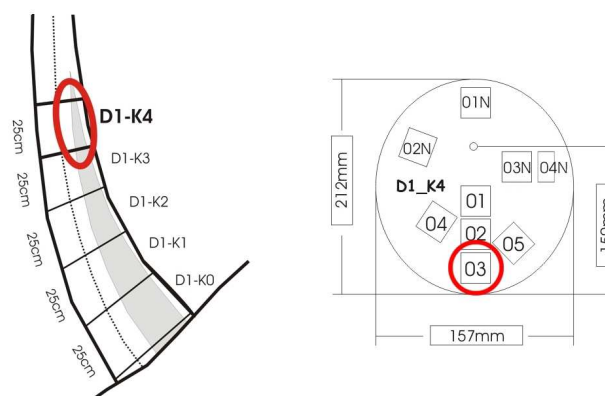
	<i>Tenzijski les</i>
Največji pomik (mm)	1,8
Elastični modul E0 (MPa)	13747,3766
Elastični modul E1 (MPa)	93840,7884
Viskoz. mod. η_0 (Ns/mm ²)	2124142
Viskoz. mod. η_1 (Ns/mm ²)	1374984
Lezno število	0,12

4.1.4 Vzorec D1-K4

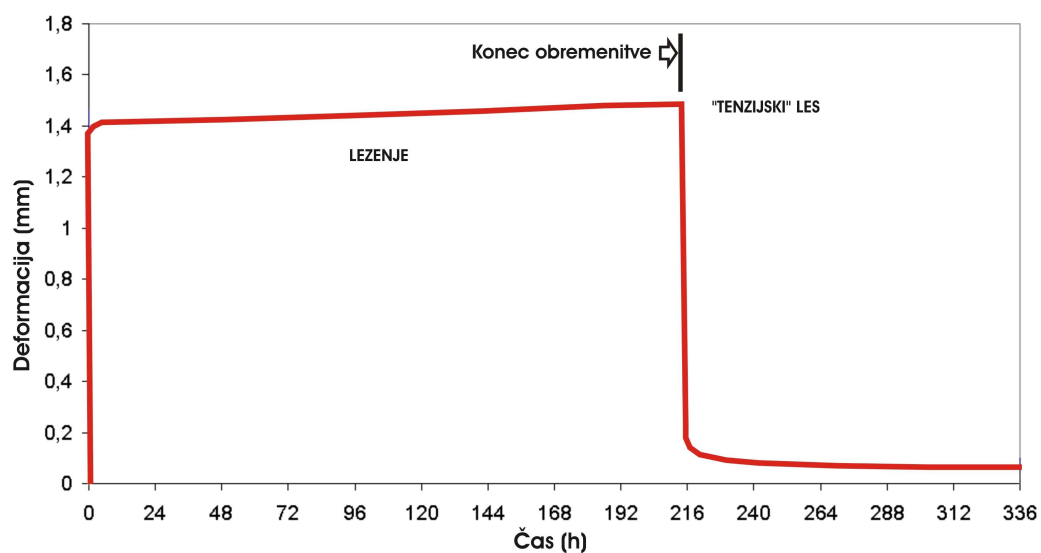
Kljub temu, da se ta vzorec nahaja na notranji strani krivine debla (sl. 26) in da je ob svežem razrezu pri vizualni izbiri dajal videz tenzijskega lesa, se je pravo dejstvo pokazalo šele pri izvajanju meritev.

Najverjetneje je vsebnost tenzijskega tkiva tako majhna, da so prevladale lastnosti normalnega tkiva, saj je vzorec pokazal samo trenutno elastično deformacijo (sl. 27).

Po razbremenitvi se je skoraj popolnoma vrnil v prvotno stanje.



Slika 26: Pozicija izbranih vzorcev v deblu in v prerezu koluta D1-K4



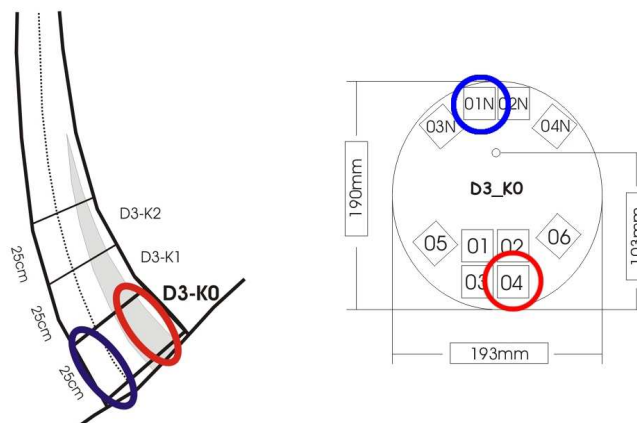
Slika 27: Lezenje vzorca D1-K4

Preglednica 4: Rezultati meritev vzorcev iz koluta D1-K4

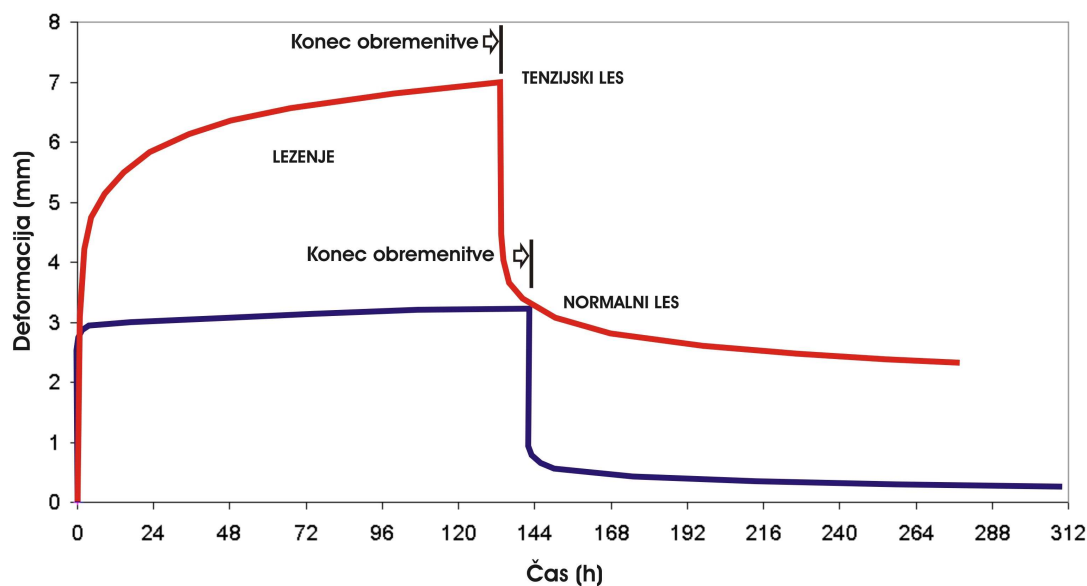
	<i>Tenzijski les</i>
Največji pomik (mm)	1,5
Elastični modul E0 (MPa)	15416,7010
Elastični modul E1 (MPa)	215833,8134
Viskoz. mod. η_0 (Ns/mm ²)	10146882
Viskoz. mod. η_1 (Ns/mm ²)	5620157
Lezno število	0,07

4.1.5 Vzorec D3-K0

Vzorec D3-K0 je bil izbran iz koluta panja drevesa (sl. 28). Čeprav za panj velja, da je struktura rasti precej valovita in nehomogena, je le ta bil kljub temu primeren za preizkuse, saj je pokazal homogeno in ravno strukturo v izrezanem vzorcu. Opažamo izrazito razliko med končno deformacijo vzorcev. Tenzijski les ima okoli 10 % manjšo elastično deformacijo, ampak veliko bolj izrazito primarno lezno deformacijo, kakor tudi sekundarno (pregl. 5). Normalni les v tem primeru pokaže minimalno primarno lezenje, medtem ko je sekundarno skoraj neopazno, kar se vidi po vodoravni krivulji (sl. 29). Normalni les po razbremenitvi stopi v fazo relaksacije in se skoraj popolnoma vrne v prvotno stanje, kar pri tenzijskem lesu v tem primeru ne moremo trditi.



Slika 28: Pozicija izbranih vzorcev v deblu in v prerezu koluta D3-K0



Slika 29: Lezenje vzorcev D3-K0

Preglednica 5: Rezultati meritev vzorcev iz koluta D3-K0

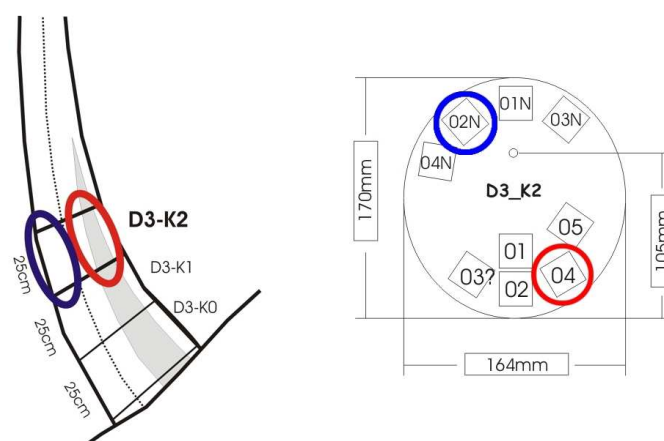
	<i>Tenzijski les</i>	<i>Normalni les</i>
Največji pomik (mm)	7	3,2
Elastični modul E0 (MPa)	10038,7820	8530,9808
Elastični modul E1 (MPa)	4450,1817	32214,0020
Viskoz. mod. η_0 (Ns/mm ²)	181547	1504470
Viskoz. mod. η_1 (Ns/mm ²)	106580	996823
Lezno število	2,18	0,28

4.1.6 Vzorec D3-K2

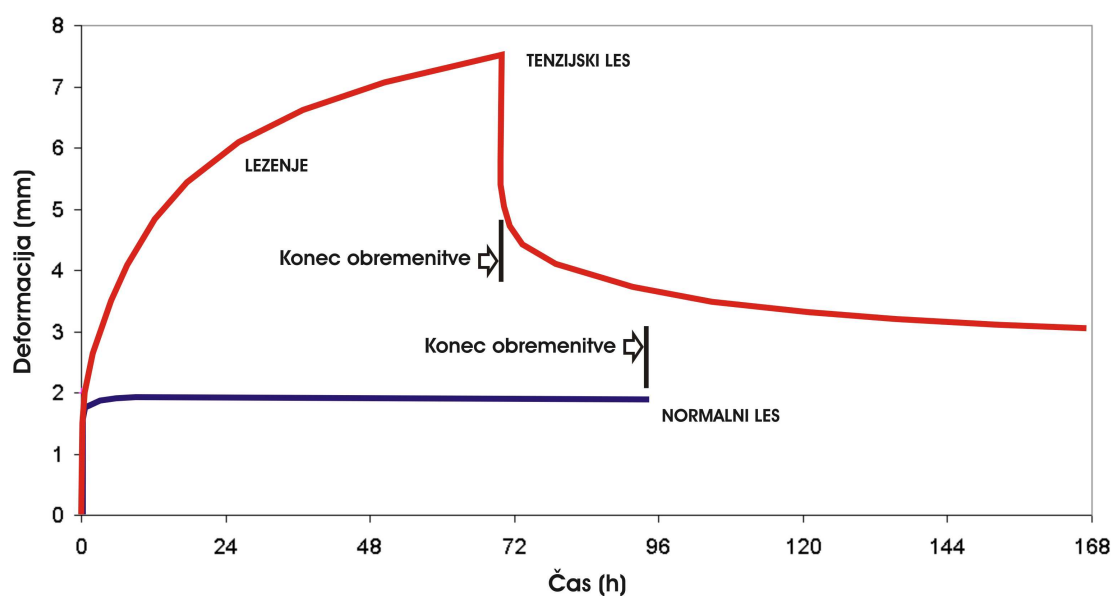
Zadnji vzorec je bil izbran iz tretjega koluta, medtem ko smo kolut D3-K1 ohranili za rezervne namene (sl. 30). Tudi tu je opazna približna enakost obeh vzorcev do trenutne elastične obremenitve, kar je razvidno iz identičnih vrednosti prvega elastičnega modula. Potem se deformacija drastično spremeni.

Normalni les kot pričakovano pokaže komaj opazno primarno lezenje, medtem ko do sekundarnega sploh ne pride, tenzijski les pa prikaže izrazito primarno lezenje, kakor tudi izraziti začetek sekundarnega lezenja (sl. 31).

To potrjujejo tudi podatki iz preglednice (pregl. 6), kjer so viskozni moduli ekstremno različni, lezno število pa prav tako potrjuje večkratno večjo viskozno deformacijo tenzijskega lesa proti prvotni elastični deformaciji.



Slika 30: Pozicija izbranih vzorcev v deblu in v prerezu koluta D3-K2



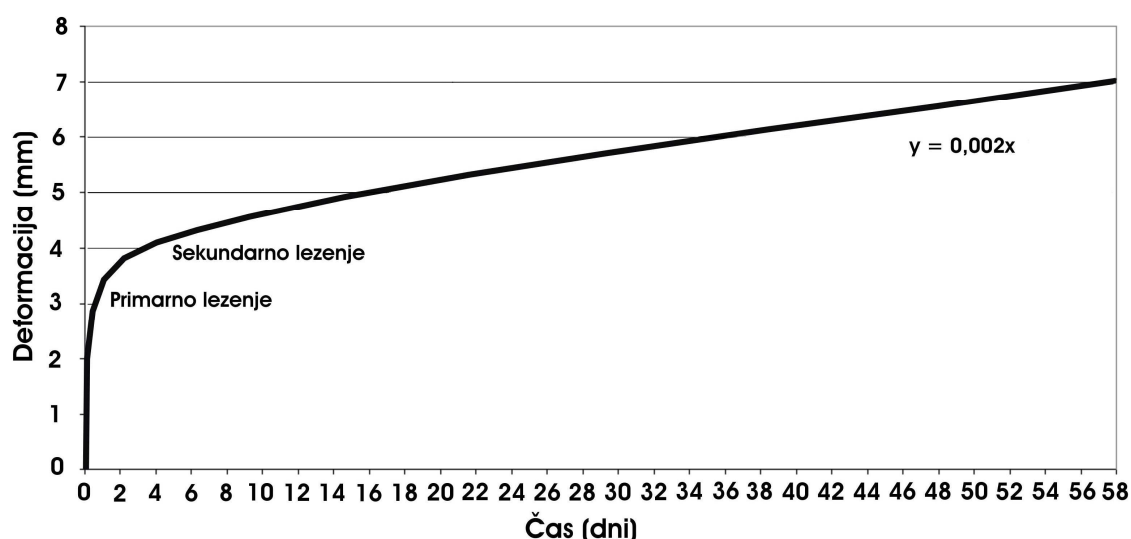
Slika 31: Lezenje vzorca D3-K2

Preglednica 6: Rezultati meritev vzorcev iz koluta D3-K2

	<i>Tenzijski les</i>	<i>Normalni les</i>
Največji pomik (mm)	7,6	1,9
Elastični modul E0 (MPa)	13241,3382	12696,1067
Elastični modul E1 (MPa)	3615,3068	107916,9067
Viskoz. mod. η_0 (Ns/mm ²)	88573	4263076
Viskoz. mod. η_1 (Ns/mm ²)	54896	3221927
Lezno število	3,75	0,11

4.1.7 Lezenje vzorca D1-K1-04b (daljši preizkus)

Tukaj lahko vidimo, da se pri vzorcu tenzijskega lesa izpostavljenemu obremenitvi v daljšem časovnem obdobju, lezenje ne ustavlja. V času slabih dveh mesecev je primarno lezenje prešlo v sekundarno že po dveh do treh dneh, potem je nastopilo sekundarno lezenje, ki je bilo vseskozi prisotno z majhnim a konstantnim kotom krivulje, ki je znašal 0.12° , ter s tem prikazalo linearno povezavo med deformacijo in časom (sl. 32).



Slika 32: Lezenje vzorca D1-K1-04b

4.2 VSEBNOST TENZIJSKEGA TKIVA

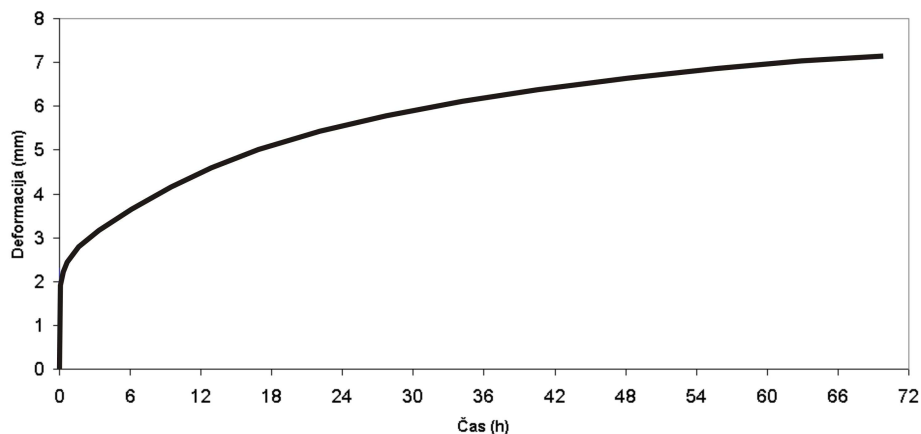
4.2.1 Velika vsebnost tenzijskega tkiva

Vzorec D3-K2-04c, je po preizkusih pokazal izrazite kazalnike tenzijskega lesa.

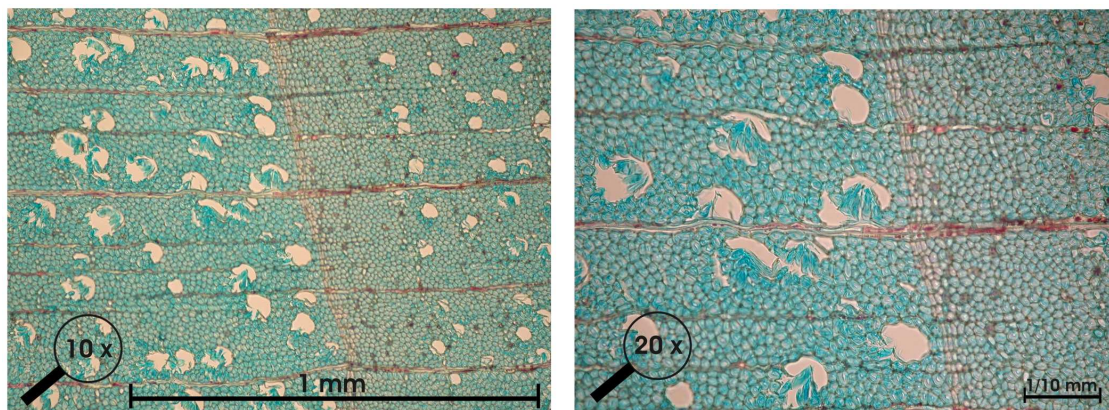
Tenzijsko tkivo je pri tem vzorcu prisotno skoraj po celotni strukturi vzorca, kar potrjuje krivulja lezenja (sl. 33), kot tudi mikroskopske slike (sl. 34, 35).

Modra barva prevladuje nad rdečo v celotnem obsegu prereza vzorca, kar dokazuje intenzivno prisotnost tenzijskega tkiva, medtem ko je normalno tkivo je bolj opazno v kasnem lesu ob letnici. Izbran vzorec že ob vizualnem pregledu vidno odstopa od tistih z manjšo koncentracijo tenzijskega tkiva, premore pa vsega 4 branike po prerezu.

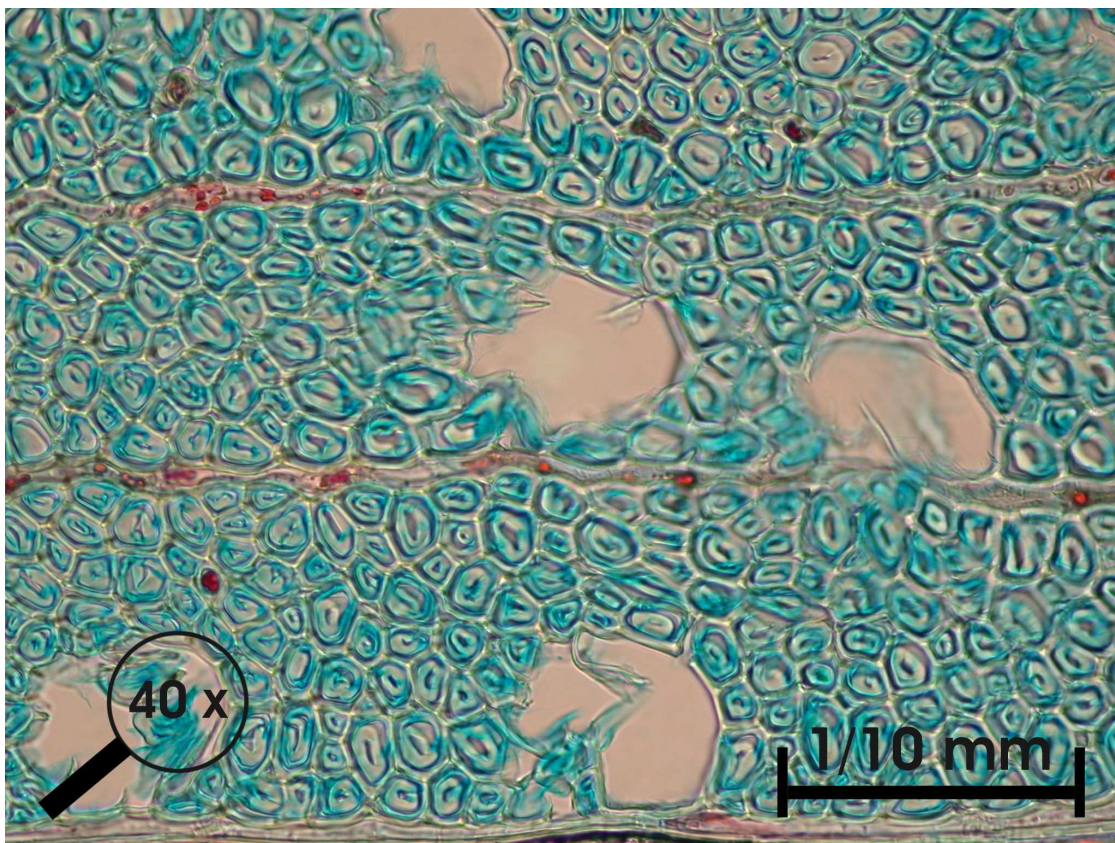
Na slikah je zelo dobro vidno natrganje želatinastiega sloja v lesnem tkivu, saj se ta ob rezanju rezin zelo težko gladko odreže. Vsekakor je ta vzorec jasni pokazatelj visoke prisotnosti tenzijskega tkiva in njegovega vpliva na pojav lezenja.



Slika 33: Lezna krivulja vzorca z veliko vsebnostjo tenzijskega tkiva



Slika 34: Velika vsebnost tenzijskega tkiva, 10x in 20x povečava



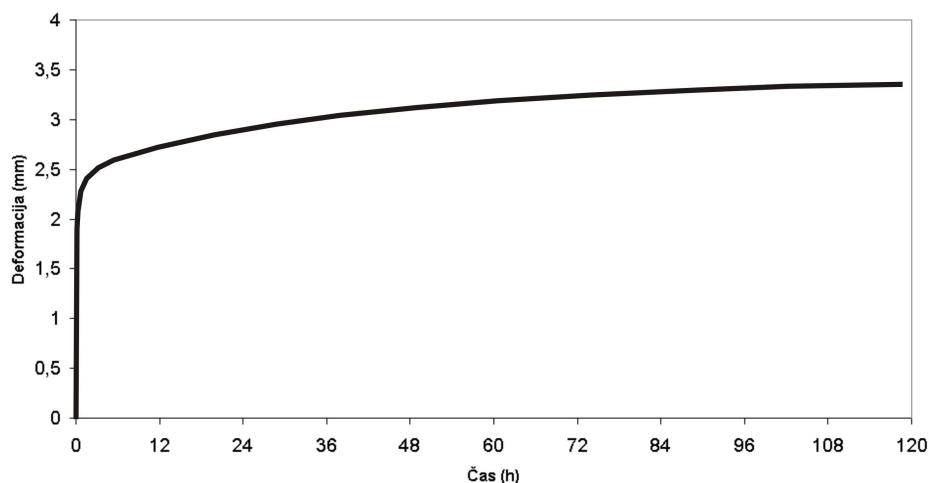
Slika 35: Velika vsebnost tenzijskega tkiva, 40x povečava

4.2.2 Srednja vsebnost tenzijskega tkiva

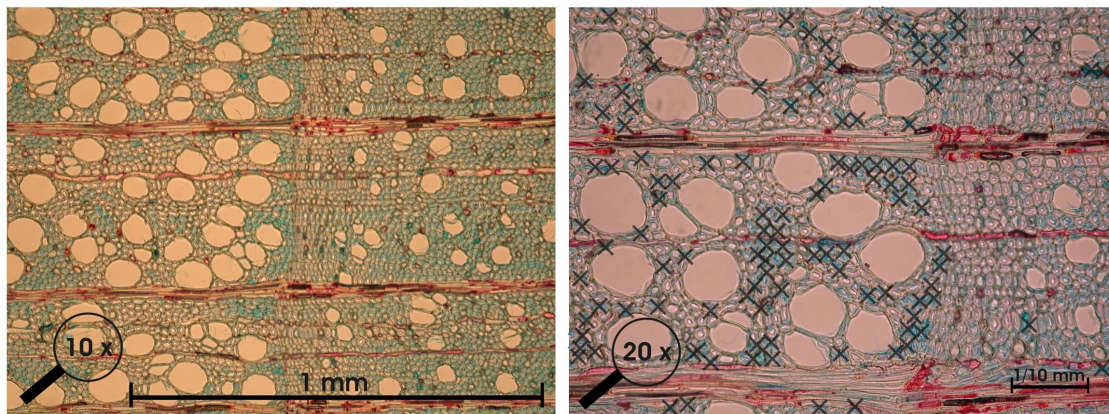
Sledeči vzorec je prikazal delno zadržano lezenje, kar je vidno na krivulji lezenja (sl. 36), kakor tudi na mikroskopskih slikah. Vsekakor je lezenje tega vzorca izrazitejše kot lezenje normalnega lesa, vendar še vedno ne tako intenzivno kot pri čistem tenzijskem lesu. To se potrjuje na mikroskopskih slikah, kjer so vidni večji skupki tenzijskega tkiva, kot otočki med normalnim tkivom (sl. 37).

Razlika vsebnosti tenzijskega tkiva se prikazuje tudi med samimi branikami, saj v eni prevladuje normalno tkivo medtem ko v drugi opazimo vidno povečanje vsebnosti tenzijskega tkiva. Po celotnem prerezu vzorca smo našli 4 branike.

Tenzijsko tkivo v sami braniki se torej nahaja v večjih skupkih v normalnem tkivu, kot na sliki označeno z križci (sl. 37), v približnem razmerju 40:60, kar se posledično odraža v zadržanem lezenju.



Slika 36: Lezna krivulja vzorca s srednjo vsebnostjo tenzijskega tkiva

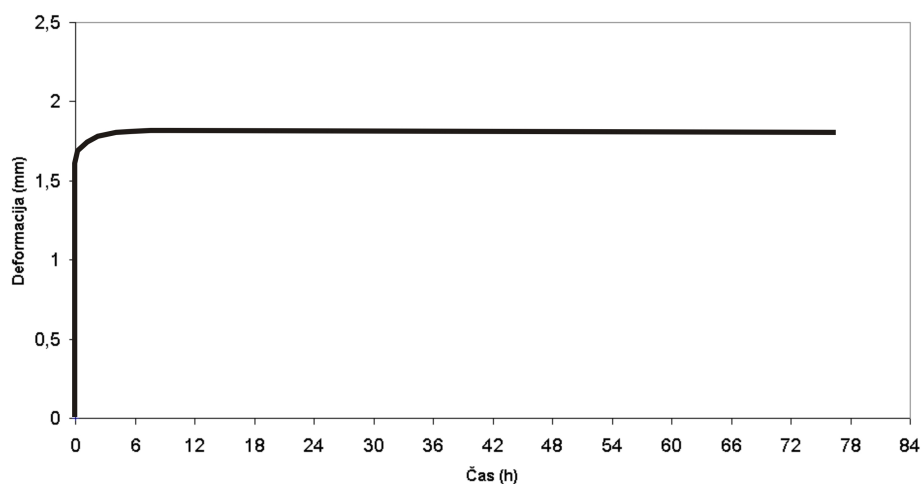


Slika 37: Srednja vsebnost tenzijskega tkiva, 10x in 20x povečava

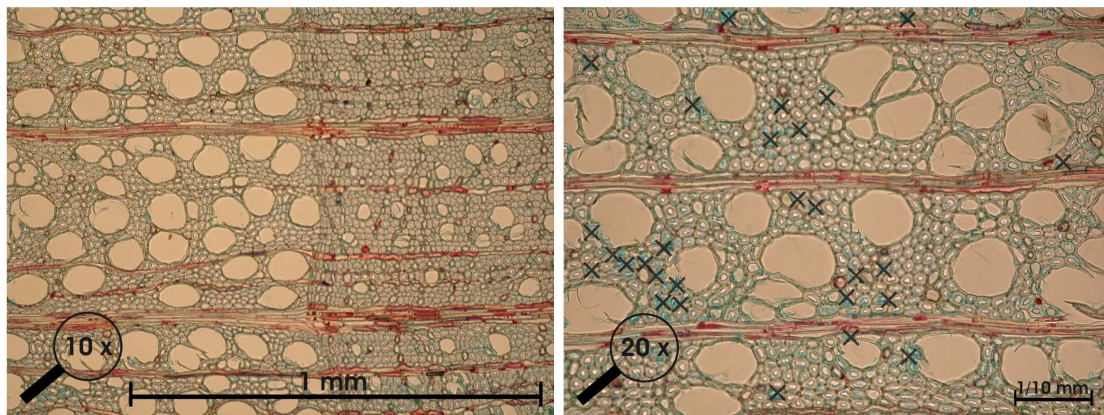
4.2.3 Zelo majhna vsebnost tenzijskega tkiva

Vzorec D1-K3-04b, je bil pokazatelj leznih lastnosti normalnega lesa. Kljub prvotni vizualni razvrstitvi v skupino tenzijskega lesa, se je ta vzorec na obremenitev odzival kot normalni les (sl. 38). Ob mikroskopskem pregledu, se je pokazalo, da dejansko vsebuje zelo malo tenzijskega tkiva (sl. 39, 40).

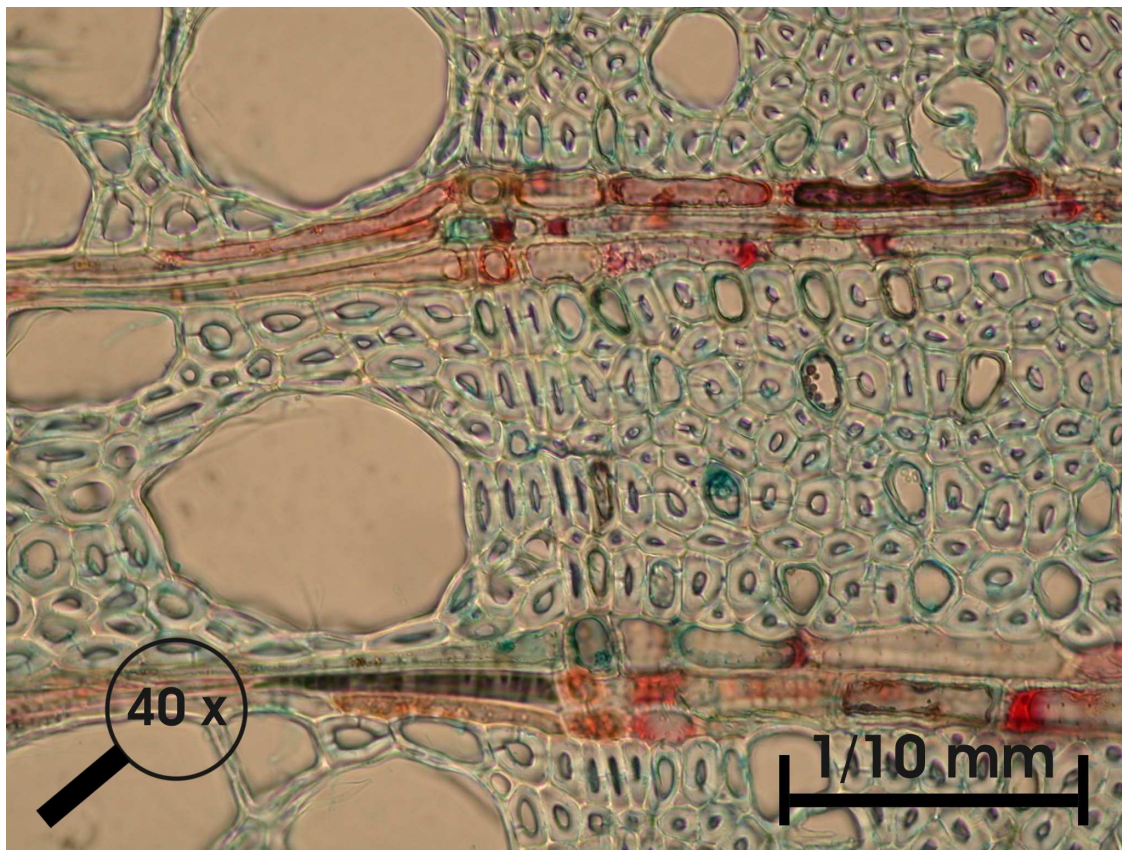
Na slikah jasno prevladuje rdeča barva, medtem ko je modra le redko prisotna, kot označeno s križci (sl. 39). Tenzijski les sicer je prisoten, vendar raztreseno po celem prerezu in le v posameznih celičnih stenah. Prevladovanje normalnega tkiva se tako odraža v ustavljeni krivulji lezenja.



Slika 38: Lezna krivulja vzorca z zelo majhno vsebnostjo tenzijskega tkiva



Slika 39: Zelo majhna vsebnost tenzijskega tkiva, 10x in 20x povečava



Slika 40: Zelo majhna vsebnost tenzijskega tkiva, 40x povečava

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

Pridobljeni rezultati nam jasno prikazujejo lezenje tenzijskega lesa v primerjavi z normalnim. Vidimo, da tenzijsko tkivo na lezenje vpliva ugodno saj omogoča lezenje pri minimalnih silah, kjer normalno tkivo reagira le z elastično deformacijo. Te razlike lahko še enkrat primerjamo v preglednicah (pregl. 7, 8).

Preglednica 7: Povprečne lastnosti tenzijskega tkiva

	Lezno število	E0 (Mpa)	E1 (Mpa)	$\eta_0(\text{Ns/mm}^2)$	$\eta_1(\text{Ns/mm}^2)$	y _{max}
D1-K1	2,78	13323	3867	105480	70807	7,2
D1-K2	0,7	11603	14015	328777	1483094	3,4
D3-K0	2,18	10038	4450	181547	106580	7
D3-K2	3,75	13241	3615	88573	54896	7,6
Povprečje	2,3525	12051,25	6486,75	176094,3	428844,3	6,3
Mediana	2,48	12422	4158,5	143513,5	88693,5	7,1

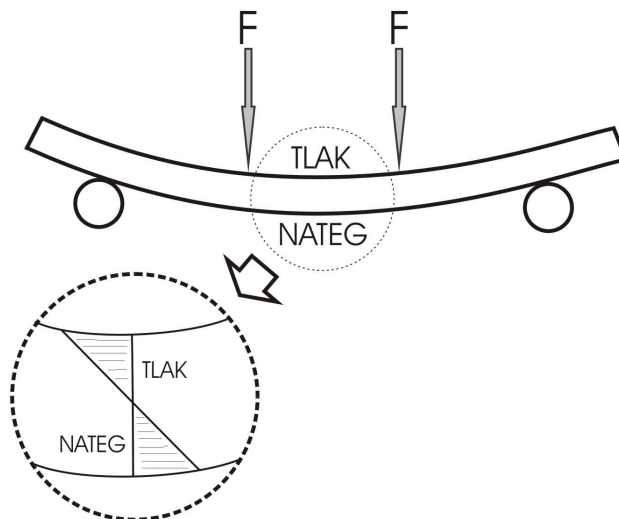
Preglednica 8: Povprečne lastnosti normalnega tkiva

	Lezno število	E0 (Mpa)	E1 (Mpa)	$\eta_0(\text{Ns/mm}^2)$	$\eta_1(\text{Ns/mm}^2)$	y _{max}
D1-K1	0,47	6348	11359	299530	203980	5,3
D1-K2	0,47	10180	56798	1483094	917392	2,5
D3-K0	0,28	8530	32214	1504470	996823	3,2
D3-K2	0,11	12696	107916	4263076	3221927	1,9
Povprečje	0,3325	9438,5	52071,75	1887543	1335031	3,225
Mediana	0,375	9355	44506	1493782	957107,5	2,85

V tej primerjavi smo izpustili vzorca D1-K3 in D1-K4, saj sta pokazala lastnosti normalnega lesa, kar lahko povežemo z šibko prisotnostjo tenzijskega tkiva v vzorcu. Četudi se zdi, da smo preizkusili premalo količino vzorcev, lahko z gotovostjo zatrdimo, da so pridobljeni rezultati realni in merodajni, saj nam dajejo jasne podatke za razpravo. Kot vidimo v preglednicah (pregl. 7, 8), je izrazita razlika v leznem številu, ki je pri tenzijskem tkivu kar 2,5 krat večja glede elastične deformacije. Za oba tipa vzorcev lahko rečemo, da imata identično elastično deformacijo (modul E_0), kar pa v primeru drugega elastičnega modula (modul E_1) ne moremo trditi, ker je ta pri normalnem tkivu 10 krat večji in to se nadaljuje v kombinaciji z viskozniimi moduli, ter odločilno vpliva na lezenje lesa.

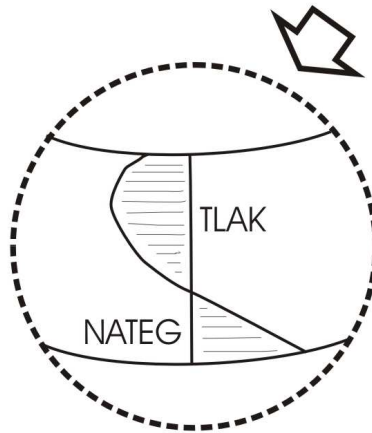
Ugotavljamo, da ima tenzijsko tkivo ugoden vpliv na lezenje lesa, prav zaradi svojih specifičnih značilnosti pri delovanju zunanjih napetosti, ki še zdaleč ne dosegajo kritičnih vrednosti.

Tenzijsko tkivo je v naravi stalno natezno obremenjeno, kar pomeni da se v njem generirajo natezne napetosti, ki so nagnjene k vzdolžnem krčenju tkiva. Tukaj spoznamo, da je tenzijsko tkivo izredno konsistentno ko je natezno obremenjeno, ampak ko nanj deluje tlačna obremenitev, se pa situacija drastično spremeni. Pri upogibnih preizkusih se v preseku preizkušanca pojavijo natezne, kot tudi tlačne napetosti (sl. 41). Vendar v takšni obliki kot jih vidimo na tej sliki, se napetosti simetrično porazdelijo v primeru materiala, ki ima identično natezno, kot tudi tlačno trdnost.



Slika 41: Pojav napetosti v prerezu obremenjenega nosilca v primeru, ko je tlačna napetost enaka natezni

Pri tenzijskem tkivu pa o identični porazdelitvi napetosti po prerezu ne moremo govoriti. Ker je tenzijsko tkivo manj odporno na tlak, se tlačna komponenta napetosti s trajanjem obremenitve počasi večja in izpodriva prehod na natezno napetost nižje pod geometrično simetralo vzorca, posledično z večanjem deformacije (sl. 42).



Slika 42: Porazdelitev napetosti v prerezu tenzijskega lesa

Dejansko lahko rečemo, da ima slaba tlačna trdnost tenzijskega tkiva oziroma želatinastega *G* sloja, največji vpliv na lezenje tenzijskega lesa.

6 POVZETEK

Cilj diplomske naloge je bil raziskati vpliv tenzijskega tkiva na pojav lezenja bukovine, ki je v Sloveniji med najbolj razširjenimi drevesnimi vrstami. Najprej je bilo potrebno pridobiti vzorce, ki so ustrezali zahtevanim pogojem. Potrebovali smo tenzijski les z enakomerno strukturo in veliko vsebnostjo tenzijskega tkiva v čim večjem obsegu celotnega izrezanega vzorca končnih dimenzij 220 mm x 10 mm x 5 mm.

To prvo nalogo smo odgovorno sprejeli in poiskali primerna drevesa, ki so bila na mestu poseka razžagana na kolute primerne za transport, katere smo hermetično zaprli v nepredušne plastične vrečke, da smo omejili izhajanje proste vode, še preden to lahko storimo kontrolirano. Za raziskavo smo potrebovali les, ki je v stanju v katerem se med rastjo nahaja v naravi, to pa smo dosegli z kontroliranim počasnim sušenjem do območja nasičenja. Tako smo pridobili vzorce vlažnosti okoli 30 % s prvotno nespremenjeno mikrostrukturo.

Izžagali smo veliko količino vzorcev, za preizkuse pa smo uporabili le najboljše, ki so ustrezali našim zahtevam glede homogenosti, ravnosti branik in pravilne orientiranosti.

Izbrali smo vzorce v parih, to pomeni da je vsak tenzijski vzorec, ki se je nahajal na zgornji strani krivine debla, pridobil še vzorec normalnega lesa, ki se je nahajal v istem kolutu le na »normalni«, torej spodnji strani krivine debla. Pričelo se je preizkušanje v napravi za štiri točkovni upogib, s spodnjimi oporišči razdalje 200 mm in zgornjimi v razdalji 100 mm. Sila je ustrezala teži 2 kg, kar je ustrezalo za slabih 50 % napetosti, potrebne za trenutno elastično deformacijo vzorca normalnega lesa. Deformacijo smo spremljali z električnim senzorjem, t.i. *LVDT* merilnikom pomika, njegov signal pa je preko *USB* vmesnika sprejemal osebni računalnik, s posebej za ta preizkus izdelanim programom iz programskega paketa *LabVIEW*. Aplikacija je bila sposobna sprejemati signal v določenem časovnem intervalu, ki je znašal točno 1 minuto in ga sproti varno zapisati na trdi disk računalnika. Med eksperimenti se je porodil sum, da nekateri vzorci nimajo velike vsebnosti tenzijskega tkiva, saj so prikazali zelo zadržano lezenje ali do lezenja sploh ni prišlo. To smo preverili z razrezom v mikroskopske rezine, izbrali pa smo tri tipe vzorcev, glede pričakovanega ali zadržanega lezenja in jih diferencialno obarvali, ter določili vsebnost tenzijskega tkiva v prerezu vzorca.

Rezultati so bili v obsegu pričakovanj, saj je vzorec s pravilno in izrazito krivuljo lezenja pokazal tudi izrazito vsebnost tenzijskega tkiva in obratno. Tako smo na dva načina prikazali vpliv tenzijskega tkiva na pojav lezenja lesa.

Drugi način je bilo ovrednotenje pridobljenih meritev z obstoječim reološkim modelom, za kar smo v našem primeru uporabili Burgesov model viskozne tekočine.

Sedaj smo lahko prikazali lastnosti tenzijskega in normalnega lesa s pomočjo štirih parametrov, torej dva elastična in dva viskozna modula. Iz preračunanih modulov, prikazanih krivulj lezenja in določene vsebnosti tenzijskega tkiva smo ugotovili, da je poglavitna anatomska značilnost tenzijskega lesa odločilna za izrazitejše lezenje in to je slaba odpornost želatinastega G sloja na tlačno obremenitev.

7 VIRI

- Bamber R.K. 2001. A general theory for the origin of growth stresses in reaction wood: How trees stay upright. IAWA Journal, 22, 3: 205-212
- Bengsston C. 1999. Mechano-sorptive Creep in Wood – Experimental Studies of the Influence of Material Properties. Sweden., Dep. of Structural Engineering, Div. of Steel and Timber Structures, Chalmers University of Technology: 8-12
- Bodik J. 1982. Mechanics of Wood and Wood composites, New York, Van Nostrand Reinhold Company: 711
- Boyd J.D. 1982. An anatomical explanation for visco-elastic and mechano-sorptive creep in wood, and effects of loading rate on strenght. V:Bass (izd.), New perspectives in wood anatomy: 171-222
- Domke R. Bemessungsvervaren von Kunststoffkonstruktionen: 50-52
- Kollman F.,Cote W. 1968, New York. Principles of wood science technology: 591
- Lakes R. Viscoelasticity notes adapted from viscoelastic fluids
<http://silver.neep.wisc.edu/~lakes/VEnotes.html> (28.06.2006)
- Laufenberg L. T., Palka C. L., McNatt J. D., 1999. Creep and Creep-Rupture Behavior of Wood-Based Structural Panels
- Panshin, A. J. 1980, Textbook of Wood Technology, New York. Mc Graw-Hill: 722
- Torelli N. 2002. Reakcijski les in njegova mehanika. Les, 54, 5: 140-147
- Torelli N. 2003. Les kot viskoelastičen material. Les, 55, 3: 48-58

8 ZAHVALA

Zahvala gre mentorju, doc. dr. Bojanu BUČARJU, za izdatno pomoč pri delu z eksperimenti in oblikovanju diplomske naloge ter seveda za izredno potrpežljivost ob končnih fazah diplomskega dela. Prav tako se zahvaljujem somentorju, prof. dr. Željku GORIŠKU, ki me je z prijaznim odnosom vodil od začetka te diplomske naloge in bil vedno pri volji za razne zanimive debate. Zahvaljujem se tudi recenzentu, doc. dr. Mladenu HOUŠKI, za korekten in jasen pogled v diplomsko nalogo in nasploh odličen odnos že od začetka študija.

Posebej se moram zahvalit našemu strokovnemu sodelavcu, ki se je sedaj že upokojil in mi je bilo v čast delati z njim v delavnicah ob pripravi vzorcev, to je g. Peter CUNDER. Zahvaljujem se tudi ostalim tehničnim sodelavcem merilnega laboratorija, za strokovno in tehnično pomoč ob vzpostavitvi eksperimenta.

Zahvaljujem se tudi naši prijazni knjižničarki Darji VRANJEK in vsem sodelavcem na Oddelku za lesarstvu, za stalno pripravljenost pomaganja.

Zahvaljujem se tudi študijskim kolegom, predvsem Darku KARLU in Branku GOLEŽU, za timska dela skozi celoten potek študija. Skupaj nam je uspelo!

Prav tako mi je pomoč skozi cel študij vedno nudil moj prijatelj Jože RIHTARŠIČ, kakor tudi njegov brat Janez, ki sta vedno postregla z znanstvenim pogledom na probleme.

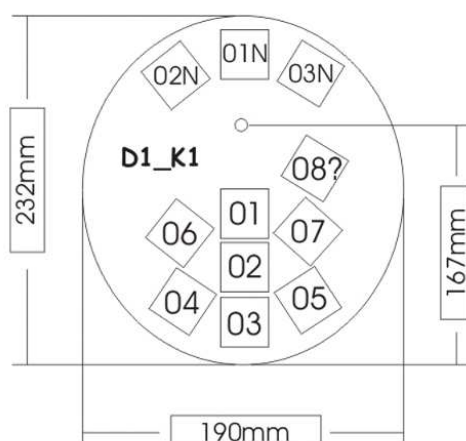
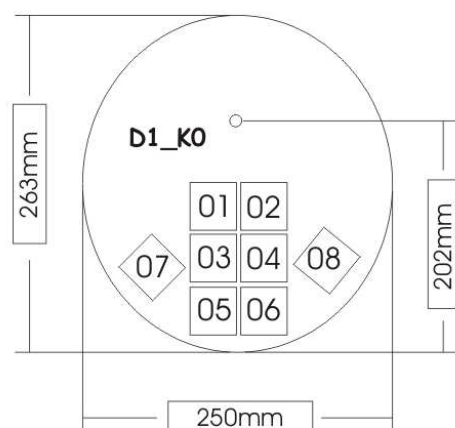
Zahvala gre seveda tudi staršem in ožjim družinskim članom, ki so mi vedno stali ob strani s spodbudo, zaupanjem in ponosom. Hvala.

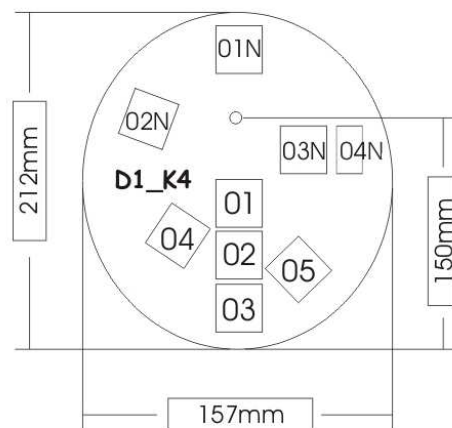
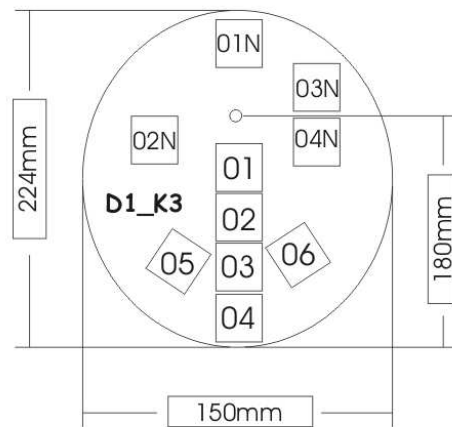
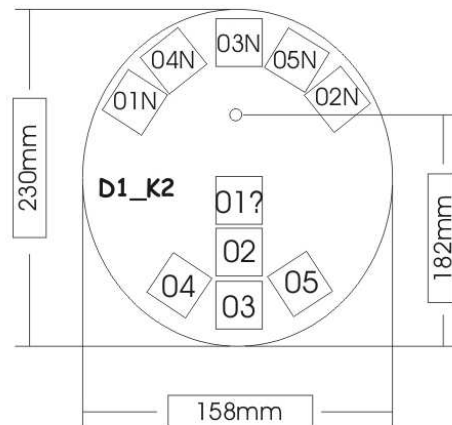
9 PRILOGE

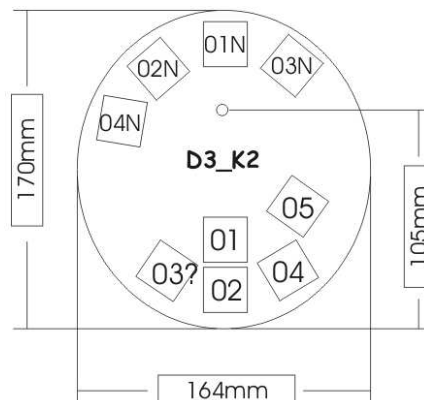
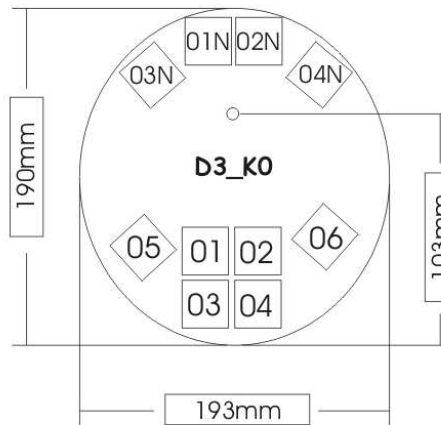
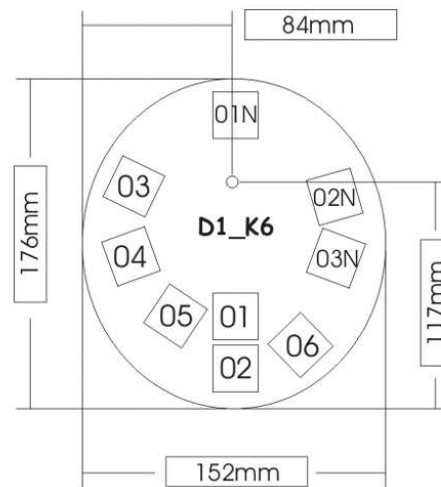
PRILOGA A

Za preizkusne namene smo posekali 3 drevesa premera od 20 do 25 cm, iz katerih smo pridobili 12 kolotov dolžine 25 cm. Uporabni so bili samo določeni koluti iz drevesa D1 in D3. Število izrezanih vzorcev preseka 30 mm x 30 mm je preseglo 100 kosov, število uporabnih končnih vzorcev pa je bilo 44.

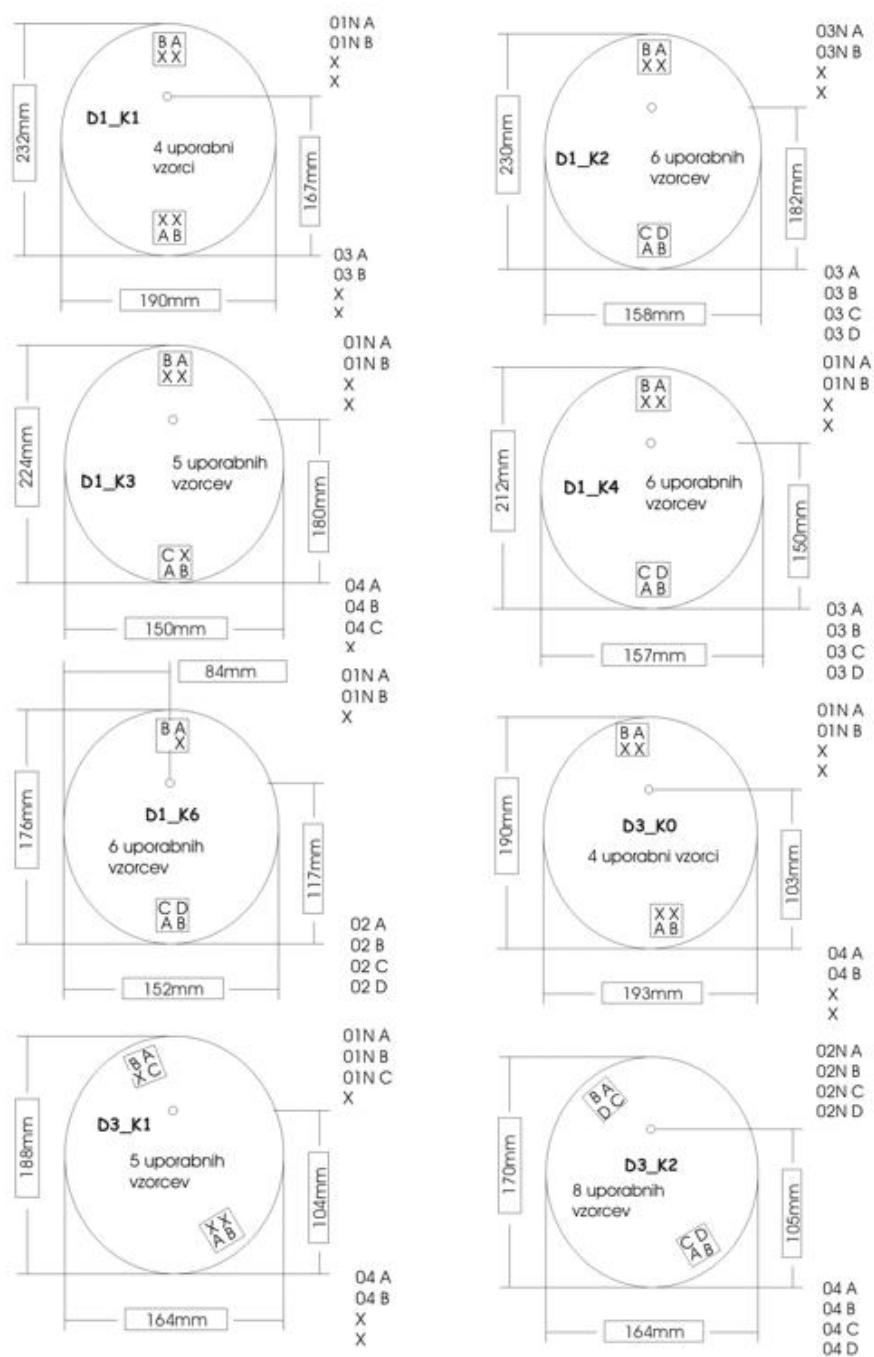
Sheme vseh izrezanih kolotov





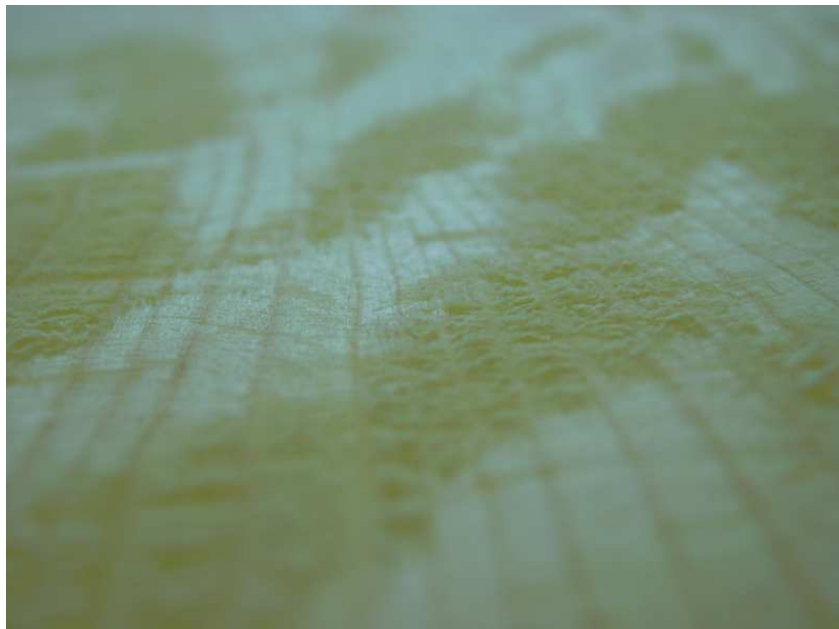
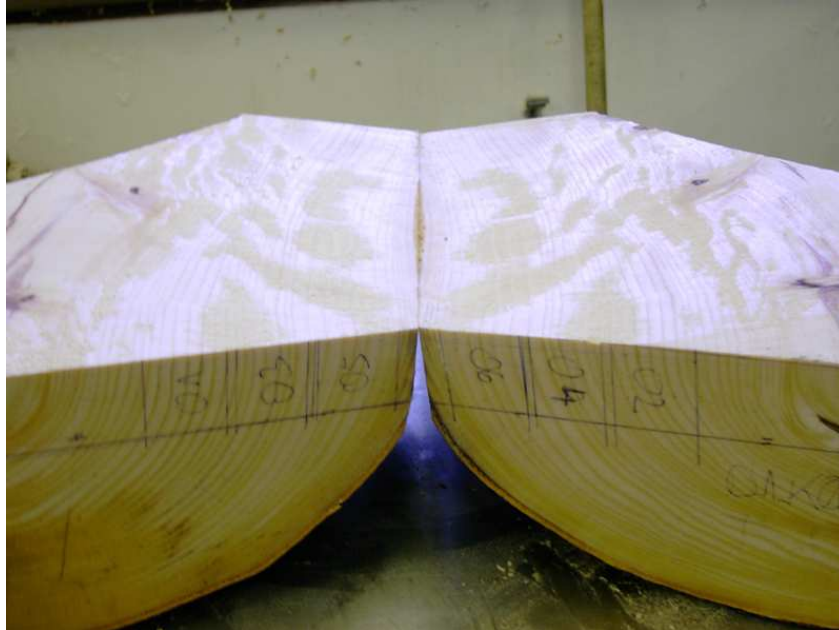


Sheme končnih pozicij vzorcev



PRILOGA B

Slike tenzijskega lesa



Nikl K. Lezenje tenzijskega in normalnega lesa bukovine.

Dipl. delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za lesarstvo, 2006



