

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Andreja DOVČ

**VPLIV KLIMATSKIH POGOJEV NA DELOVANJE
LESA**

DIPLOMSKO DELO

Visokošolski strokovni študij

Ljubljana, 2013

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Andreja DOVČ

VPLIV KLIMATSKIH POGOJEV NA DELOVANJE LESA

DIPLOMSKO DELO
Visokošolski strokovni študij

**INFLUENCE OF CLIMATIC CONDITIONS ON DIMENSIONAL
STABILITY OF WOOD**

GRADUATION THESIS
Higher professional studies

Ljubljana, 2013

Diplomsko delo je zaključek Visokošolskega strokovnega študija lesarstva. Opravljeno je bilo na Katedri za tehnologijo lesa na Oddelku za lesarstvo, Biotehniške fakultete v Ljubljani. Eksperiment je bil opravljen v laboratoriju Katedre za tehnologijo lesa.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja določil prof. dr. Željka Goriška in za recenzentko prof. dr. Katarino Čufar.

Mentor: prof. dr. Željko Gorišek

Recenzentka: prof. dr. Katarina Čufar

Komisija za zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Andreja Dovč

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

- ŠD Vs
- DK UDK 630*847
- KG les/ravnesna vlažnost/dimenzijska stabilnost/smrekovina/bukovina
- AV DOVČ, Andreja
- SA GORIŠEK, Željko (mentor)/ČUFAR, Katarina (recenzentka)
- KZ SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
- ZA Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
- LI 2013
- IN VPLIV KLIMATSKIH POGOJEV NA DELOVANJE LESA
- TD Diplomsko delo (visokošolski strokovni študij)
- OP VIII, 31 str., 7 pregl., 10 sl., 15 vir.
- IJ sl
- JI sl/en
- AI Preučevali smo dimenzijsko in oblikovno stabilnost smrekovine in bukovine pri izpostavitvi različnim vlažnostnim obremenitvam: nihajočim klimatskim razmeram med relativnima zračnima vlažnostma 33 % in 87 %, postopnim sušenjem iz svežega stanja do absolutno suhega stanja in različnim ostrinam uravnovešanja. Odzive lesa smo vrednotili z diferencialnim nabrekom in s koeficientom nabrekanja v radialni in tangencialni smeri ter s prečno krčitveno anizotropijo. Pri večkratnem navlaževanju in sušenju smo ugotovili zmanjševanje razlik ravnovesnih vlažnosti, posledično pa so bile vedno manjše tudi dimenzijske spremembe in prečna krčitvena anizotropija. Potrdili smo predpostavko, da nihajoče klimatske razmere nekoliko povečajo dimenzijsko in oblikovno stabilnost lesa.

KEY WORDS DOCUMENTATION

- DN Vs
- DC UDC 630*847
- CX wood/equilibrium moisture content/dimensional stability/spruce wood/ beech wood
- AU DOVČ, Andreja
- AA GORIŠEK, Željko (supervisor)/ČUFAR, Katarina (reviewer)
- PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
- PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
- PY 2013
- TI INFLUENCE OF CLIMATIC CONDITIONS ON DIMENSIONAL STABILITY OF WOOD
- DT Graduation Thesis (Higher professional studies)
- NO VIII, 31 p., 7 tab., 10 fig., 17 ref.
- LA sl
- AL sl/en
- AB We have studied the stability of shape and dimensions of spruce wood and beech wood when exposed to various humidity factors: changing climatic conditions with relative humidity ranging between 33 % and 87 %, gradual drying from fresh to completely dry state and different equilibrium parameters. The dimensional changes of wood were evaluated by means of differential swelling and swelling coefficient in radial and tangential direction, and with transverse shrinkage anisotropy. After several repeated wetting and drying procedures it was established that the differences in equilibrium moisture content were reduced, resulting also in smaller dimension alterations and transverse shrinkage anisotropy. We confirmed the assumption that changing climatic conditions somewhat increase the stability of wood in terms of shape and dimensions.

KAZALO

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO	V
KAZALO PREGLEDNIC	VII
KAZALO SLIK	VIII
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	1
1.2 DELOVNE HIPOTEZE	1
1.3 CILJI NALOGE	2
2 PREGLED LITERATURE	3
2.1 VODA V LESU	3
2.2 ZGRADBA LESA IN HIGROSKOPNOST	3
2.2.1 Zgradba in higroskopske značilnosti celuloze (po Tišler, 1986)	4
2.2.2 Zgradba in higroskopske značilnosti lignina	6
2.2.3 Zgradba in higroskopne lastnosti hemiceluloze (polioz)	6
2.3 SORPCIJA	7
2.3.1 Higroskopsko območje in točka nasičenja celičnih sten (TNCS)	8
2.4 DIMENZIJSKA IN OBLIKOVNA STABILNOST LESA	9
2.4.1 Vpliv časa sečnje na dimenzijsko stabilnost	10
3 MATERIAL IN METODE	11
3.1 MATERIAL	11
3.2 METODE	11
3.2.1 Ciklično navlaževanje in sušenje	12
3.2.2 Postopno uravnovešanje	12
3.2.3 Sušilni potencial	12
4 REZULTATI	13
4.1 VPLIV VEČKRATNEGA NAVLAŽEVANJA IN SUŠENJA NA DIMENZIJSKO STABILNOST	13
4.2 VPLIV POSTOPNEGA URAVNOVEŠANJA NA KRČENJE IN PREČNO KRČITVENO ANIZOTROPIJO	17
4.3 VPLIV SUŠILNEGA POTENCIALA NA KRČENJE IN PREČNO KRČITVENO ANIZOTROPIJO	19
5 RAZPRAVA	21

5.1	VPLIV VEČKRATNEGA NAVLAŽEVANJA IN SUŠENJA NA DIMENZIJSKO STABILNOST	21
5.2	PRIMERJAVA MED DIREKTNIM IN POSTOPNIM URAVNOVEŠANJEM LESA	24
6	SKLEPI	27
7	POVZETEK	28
8	VIRI	29
	ZAHVALA	31

KAZALO PREGLEDNIC

- Preglednica 1: Povprečne vrednosti in standardni odkloni za ravnovesne vlažnosti (u_r) ter za radialne (β_r) in tangencialne (β_t) skrčke smrekovine med cikličnim uravnovešanjem med relativnima zračnima vlažnostma 33 % in 87 %. 13
- Preglednica 2: Povprečne vrednosti in standardni odkloni za ravnovesne vlažnosti (u_r) ter za radialne (β_r) in tangencialne (β_t) skrčke bukovine med cikličnim uravnovešanjem med relativnima zračnima vlažnostma 33 % in 87 %. 14
- Preglednica 3: Kazalniki dimenzijske stabilnosti (diferencialni nabrek v radialni smeri – q_r , diferencialni nabrek v tangencialni smeri – q_t , njuna razlika ($q_t - q_r$) ter prečna krčitvena anizotropija – q_r/q_r) za smrekovino in bukovino v posameznih ponovitvah sušenja oz. navlaževanja. 16
- Preglednica 4: Ravnovesne vlažnosti (u_r) ter radialni (β_r) in tangencialni (β_t) skrčki smrekovine pri postopnem uravnovešanju iz svežega do absolutno suhega stanja. 17
- Preglednica 5: Ravnovesne vlažnosti (u_r) ter radialni (β_r) in tangencialni (β_t) skrčki bukovine pri postopnem uravnovešanju iz svežega do absolutno suhega stanja. 18
- Preglednica 6: Ravnovesne vlažnosti (u_r) ter radialni (β_r) in tangencialni (β_t) skrčki smrekovine pri neposrednem uravnovešanju iz svežega do uravnovešanja pri različnih relativnih zračnih vlažnostih. 19
- Preglednica 7: Ravnovesne vlažnosti (u_r) ter radialni (β_r) in tangencialni (β_t) skrčki bukovine pri neposrednem uravnovešanju iz svežega do uravnovešanja pri različnih relativnih zračnih vlažnostih. 20

KAZALO SLIK

Slika 1: Trend krčenja smrekovine v radialni smeri pri cikličnem sušenju in navlaževanju (med relativnima zračnima vlažnostma 33 % in 87 %).	21
Slika 2: Trend krčenja smrekovine v tangencialni smeri pri cikličnem sušenju in navlaževanju (med relativnima zračnima vlažnostma 33 % in 87 %).	22
Slika 3: Trend krčenja bukovine v radialni smeri pri cikličnem sušenju in navlaževanju (med relativnima zračnima vlažnostma 33 % in 87 %).	22
Slika 4: Trend krčenja bukovine v tangencialni smeri pri cikličnem sušenju in navlaževanju (med relativnima zračnima vlažnostma 33 % in 87 %).	23
Slika 5: Primerjava ravnovesnih vlažnosti smrekovine med postopnim in direktnim uravnovešanjem.	24
Slika 6: Primerjava ravnovesnih vlažnosti bukovine med postopnim in direktnim uravnovešanjem.	24
Slika 7: Primerjava radialnih skrčkov smrekovine med postopnim in direktnim uravnovešanjem.	25
Slika 8: Primerjava tangencialnih skrčkov smrekovine med postopnim in direktnim uravnovešanjem.	25
Slika 9: Primerjava radialnih skrčkov bukovine med postopnim in direktnim uravnovešanjem.	26
Slika 10: Primerjava tangencialnih skrčkov bukovine med postopnim in direktnim uravnovešanjem.	26

1 UVOD

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Les je naravni material, ki pričara toplino in ob dotiku daje poseben občutek. Vsak kos lesa je unikat, s svojim neponovljivim videzom, teksturo in ostalimi lastnostmi, tako pozitivnimi kot tudi negativnimi. Pri lesu lahko poudarimo tri lastnosti, ki mu dajejo konkurenčno prednost pred večino drugih materialov. Te so: obnovljivost, reciklažnost in biološka razgradljivost. Les je v nasprotju z ostalimi bolj homogenimi materiali nepredvidljiv, saj je zaradi biološkega izvora zelo heterogen in variabilen. Pri lesu lahko njegovo »obnašanje« le napovemo oz. vsaj približno vemo, kako se obnaša pri različnih obdelavah in klimah v katere je postavljen. Z različnimi postopki, predvsem s sušenjem, poskušamo čim bolj umiriti njegovo dimenzijsko nestabilnost in mu tako preprečiti prevelika nihanja.

Kljub natančnemu in previdnemu sušenju pa les še vedno obdrži higroskopske značilnosti, ki se s spreminjanjem dimenzij, kot negativne kažejo tudi pri uporabi lesenih izdelkov. Neželeno delovanje lesa je tem večje, čim večjim klimatskim nihanjem je les izpostavljen, v ostrejših pogojih uporabe se na lesu pojavijo tudi mehanske poškodbe, na čelnih površinah kot razpoke ali reže, na površini pa kot pokline. Poškodovana mesta predstavljajo tudi večjo nevarnost za biotske okužbe, ki se lahko nadaljujejo v razkroj lesa.

1.2 DELOVNE HIPOTEZE

Predvidevamo, da večkratno ali stopenjsko navlaževanje lesa vpliva tudi na njegovo sorpcijsko kapaciteto in higroskopsnost, zato se spremeni tudi intenzivnost delovanja lesa v spreminjajočih se klimatskih pogojih.

Menimo tudi, da ima v manj intenzivnih oscilacijah vpliv tudi sorpcijska histereza z nekoliko manjšimi dimenzijskimi spremembami.

Manjše delovanje lesa naj bi povzročalo tudi manjše napetosti med navlaževanjem oz. manjše reže med sušenjem.

1.3 CILJI NALOGE

Želeli smo ugotoviti dimenzijsko in oblikovno stabilnost lesa dveh najpogostejših domačih drevesnih vrst, smrekovine in bukovine. Z različnimi postopki uravnovešanja smo želeli ugotoviti, kako na delovanje lesa vpliva:

- postopno sušenje do različnih končnih vlažnosti,
- nihajoča klima oz. ciklično navlaževanje in sušenje, med relativnima zračnima vlažnostma 33 % in 87 %,
- sušilni potencial.

V nalogi želimo preveriti spreminjanje krčenja in nabrekanja lesa glede na število ponovitev navlaževanja in sušenja, ki jim bo les izpostavljen.

2 PREGLED LITERATURE

Svež les vsebuje različne količine vode, kar omejuje njegovo nadaljnjo predelavo, zato ga moramo tako predhodno posušiti na primerno vlažnost.

Količina in razporeditev vode v svežem lesu je zelo raznolika in se razlikuje med posameznimi drevesnimi vrstami in tudi v okviru iste drevesne vrste.

2.1 VODA V LESU

Voda se v lesu nahaja v vezani in prosti obliki. Tako razlikujemo med prosto ali kapilarno vodo in vezano ali higroskopno vodo.

Kapilarno vodo najdemo v lumnih celic, njena količina je odvisna od poroznosti lesa, fiziološke funkcije in stanja lesnega tkiva. Prosta voda vpliva le na njegovo maso. Higroskopno vodo najdemo v interkristalinih prostorih celične stene, kjer je z vodikovimi vezmi vezana na sorpcijska mesta, ki jih predstavljajo proste polarne skupine (večinoma hidroksilne) osnovnih lesnih komponent. V zgornjem delu higroskopskega območja se v mikro razpokah celične stene pojavi tudi kapilarna kondenzacija.

Les je vedno bolj ali manj vlažen, kar pripisujemo higroskopnosti lesa. Vzrok je v kemijski zgradbi in veliki notranji površini celičnih sten.

Ravnovesna lesna vlažnost (ur) je vlažnost lesa v stanju higroskopskega ravnovesja. Ravnovesna lesna vlažnost je odvisna od klimatskih pogojev (temperature in relativne zračne vlažnosti) ter od higroskopskega potenciala posameznih komponent lesa, kjer so pomembne predvsem proste hidroksilne skupine. Na ravnovesno vlažnost vpliva tudi sorpcijska zgodovina, napetostna stanja in predhodnji termični ali kemijski postopki obdelave lesa.

Kemijska sestava lesa je odvisna od vrste lesa, starosti, prehrabnih pogojev, rastišča, klime in podobno. To je tudi razlog, da kemijska sestava variira celo v istem deblu, različna je tudi med posameznimi debli (Tišler, 1986; Gorišek, 2009).

2.2 ZGRADBA LESA IN HIGROSKOPNOST

Lesno tkivo se je tekom evolucije spreminjalo, nastale so velike razlike med evolucijsko primitivnimi iglavci in naprednimi listavci. Evolucijski razvoj je privedel do velike biološke pestrosti med drevesnimi vrstami, ki se zrcali tudi v veliki variabilnosti in

heterogenosti zgradbe in lastnosti lesa. K veliki raznolikosti tekom rasti drevesa prispevajo še klimatske razmere, rastišče, oskrba z vodo, socialni položaj in še vrsta drugih.

Les je anizotropen zaradi različne usmerjenosti tkiv iz katerih je grajen. Osnovno vlakneno tkivo in trahejno omrežje potekata aksialno, trakovno tkivo pa radialno. Anizotropnost je tudi posledica značilnega priraščanja v plasteh. Pri lesovih zmernega pasu, so prirastne plasti vidne kot branike z letnicami med njimi. Posledica takšne zgradbe je ortotropnost, kar pomeni, da obravnavamo les kot material s tremi med seboj več ali manj pravokotnimi osmi. In sicer prečno, radialno in tangencialno os, v vsaki osi pa so zgradba lesa in njegove lastnosti drugačne.

Za les je značilna kompozitna oz. plastna struktura, kar lahko opazujemo na več nivojih zgradbe : makroskopskem, mikroskopskem, submikroskopskem in makromolekularnem.

Kompozitna zgradba celičnih sten se formira že v času diferenciacije celic, kar se običajno zgodi v približno treh tednih. Samo celično steno sestavljajo tri osnovne makromolekularne spojine: ogrodna celuloza, matriksne polioze (hemiceluloze) in inkrustriran lignin. Celulozo, polioze in lignin najdemo v različnih deležih po posameznih slojih celične stene. Ostali delež predstavljajo še pektin, beljakovine, škrob, ekstraktivi in mineralne snovi.

Pri iglavcih je lesno tkivo sestavljeno iz aksialnih traheid (do 95 %), trakovno tkivo (do 10 %) sestavljajo parenhimske celice (homocelularni trakovi) ali pa parenhimske celice in trakovne traheide (heterocelularni trakovi). Poleg njih so prisotni tudi smolni kanali, tako aksialni kot tudi radialni.

Ker so listavci evolucijsko naprednejši, je pri njih lesno tkivo bolj specializirano. Osnovno tkivo sestavljajo vlakna, aksialni parenhim in trahejni elementi. Vlakna, ki so odvisna od evolucijskega razvoja delimo na traheide, vlaknaste traheide in libriformska vlakna. Razlikujemo jih lahko le po stopnji redukcije obokanih pikenj, obstajajo pa tudi prehodne oblike (Čufar, 2006).

2.2.1 Zgradba in higroskopske značilnosti celuloze (po Tišler, 1986)

Količina celuloze v lesu je odvisna od drevesne vrste. Zgradba in konfiguracija celuloze nam pove, da je sestavljena iz anhidroglukopiranoznih enot, povezanih z β -1-4-glukozidnimi vezmi v linearni polimer gluklan.

V celulozni verigi imata krajni hidroksilni (OH) skupini različen značaj. Tista na prvem ogljikovem atomu je nastala iz aldehidne skupine, ko so se tvorile intramolekulske

hemiacetalne vezi, zato ima ta hidroksilna skupina reducirajoče lastnosti. Skupina na četrtem ogljikovem atomu ima nereducirajoči značaj alkoholne hidroksilne skupine.

Hidroksilne skupine so pri celulozi različno reaktivne. Proste anomerne hidroksilne skupine so najbolj reaktivne, manj reaktivne so primarne hidroksilne skupine, tem sledijo sekundarne hidroksilne skupine in pa končne hidroksilne skupine, tiste, ki so vezane na četrti ogljikov atom.

Celulozno ogrodje celične stene sestavlja sistem fibril, ki so v bližini lumna zložene najtesneje skupaj in tudi najbolj urejene. Ta struktura je v smeri proti zunanosti celice vedno bolj rahla. Tu so vmesni prostori med celuloznimi fibrilami zapolnjeni s hemicelulozami in ligninom.

Celulozne mikrofibrile so nanizane spiralno okoli lumna, kot lamele v posameznih stenah. Tako tvorijo orientiran in visoko kristaliničen sistem. Od lumna proti zunanosti celice se urejenost vedno bolj ruši, kar povzroči nastanek amorfnih struktur, vmesni prostori se zapolnijo z ligninom in hemicelulozami, katerih količina se navzven povečuje.

V notranjost urejene celulozne rešetke, v tako imenovana kristalizirana področja voda ne more prodirati. Kristalinično področje celuloze je hidrofobno, saj so sile med molekulami celuloze močnejše kot privlačne sile med molekulami celuloze in vode. Če te sile ne bi bile močnejše, bi celuloza neomejeno nabrekala in se na koncu raztopila.

Nasprotno, pa periferna amorfnost področja celuloze najprej vežejo vodo in nabrekajo. Tako stopnja kristaliničnosti celuloznih molekul odločilno vpliva na vpojnost vode.

Na amorfnih področjih najdemo veliko število OH-skupin, ki se lahko zaradi lastne polarnosti vežejo na neko drugo polarno skupino ali molekulo.

Tipičen primer vezave med molekulo vode in hidroksilno skupino je vodikova vez. Do katere pride, če je molekula vode bližje kot sosedna celulozna OH-skupina. Vodikova vez je prisotna med sosednjimi hidroksilnimi skupinami paralelnih celuloznih molekul v kristaliziranem področju, ter med hidroksilnimi skupinami in molekulami vode v amorfnih področjih.

Vodikova vez deluje na razdalji 0,26 nm, v celuloznem kristalitu, pa najdemo poleg vodikovih vezi tudi Van der Waalove sile, ki delujejo na razdalji 0,5 nm.

Hidrofilnost lesa ni odvisna le od celuloze, tu so prisotne še hemiceluloze in lignin, ki tudi znižujejo hidrofilnost lesa, vendar imajo različne sorpcijske potenciale (Tišler, 1986).

2.2.2 Zgradba in higroskopske značilnosti lignina

Lignin je polimerni material, aromatskega značaja, ki skupaj z ogljikovimi hidrati celične stene tvori oleseneli del rastline. Lignini niso kemijske spojine v klasičnem smislu, saj nimajo enotne strukture, ravno tako jim tudi ne moremo določiti relativne molekularne mase. Ko se odložijo celuloza in polioze, lignini prepojijo medcelične prostore in prostore v celični steni. Lignin je zgrajen iz treh vrst p-hidroksi-cinamil alkoholov: p-kumarilnega, koniferilnega in sinapilnega. Največjo koncentracijo lignina najdemo v srednji lameli. Na reaktivnost lignina najbolj vplivajo fenolne in benzilne hidroksilne skupine ter karbonilne skupine.

Vsebnost lignina v lesu je odvisna od drevesne vrste, starosti, dela drevesa, deleža reakcijskega lesa, itd. Vendar njegova pogostost lahko variira glede na to, kje se lignin nahaja (Tišler, 1986). Tudi različni avtorji navajajo različne vrednosti. Vsebnost lignina je višja pri iglavcih od 23 do 33 % in nižja pri listavcih do 16 do 25 % (Gorišek, 2009). Normalni zreli les iglavcev vsebuje 30 do 34 % lignina, les iglavcev zmernega pasu pa malce manj 25 % do 28 % (Čufar, 2006). Lignifikacijo nadzoruje posamezna celica, gre za intracelularni proces, s tem se pojasnijo tudi pojavi različnih tipov lignina v različnih celicah istega tkiva.

Najbolj higroskopske so polioze, nato celuloza, za njo lignin in določeni ekstraktivi.

Vsebnost lignina vpliva na volumensko krčenje lesa, zato se les listavca, ki ga vsebuje manj, na splošno bolj krči. Pri iglavcih radialne stene v lesu vsebujejo več lignina kot pa tangencialne stene.

Različna lignificiranost radialnih in tangencialnih sten vpliva tudi na prečno krčitveno anizotropijo. Les iz višjih nadmorskih višin, se praviloma manj krči, ker ima večjo vsebnost lignina. Ta se je vgradil zaradi močnega UV sevanja (Tišler, 1986).

2.2.3 Zgradba in higroskopske lastnosti hemiceluloz (polioz)

Polioze so heterogeni nizkomolekularni polisaharidi. Polioze vsebujejo različne monosaharide, njihove verige so krajše in bolj razvejane od celuloze. Tvorijo jih pentoze, heksoze, heksuronske kisline in deoksi heksoze. Osnovna veriga je lahko tako homopolimer kot tudi heteropolimer.

Količina hemiceluloze je v iglavcih in listavcih različna. Ravno tako tudi zgradba ni enaka. Les iglavcev vsebuje več manoznih in galaktoznih enot, les listavcev pa več ksiloznih enot

in acetilnih skupin. Polioze so s celulozo povezane preko vodikovih in van der Waalsovih vezi, močnejše kemijske vezi pa tvorijo z ligninom, preko vej arabinoze, ksiloze in galaktoze (Tišler, 1986).

2.3 SORPCIJA

Sorpcija je proces sprejemanja in oddajanja vezane vode v higroskopskih materialnih. K skupni sorpciji lesa največ doprinesejo hemiceluloze, pri celulozi so dostopne le polarne skupine na površini kristalitov in prehodna amorfna področja.

Proučevanje sorpcije z jedrsko magnetno resonanco (Hartley in sod., 1992) je omogočilo pojasniti sigmoidno obliko sorpcijske krivulje. Sorpcijsko izotermo so omenjeni avtorji razdelili v tri območja. V prvem območju od absolutne suhosti do ravnovesja z relativno zračno vlažnostjo ($\varphi = 30\%$) prevladuje mehanizem fizikalne privlačnosti z vodikovimi in Van der Waalsovimi vezmi, hitrost spremembe ravnovesne vlažnosti rahlo pada. V drugem delu, v ravnovesju s 30 % do 50 % relativne zračne vlažnosti, ki ga imenujemo organizacijsko območje (vodne molekule na hidratu lahko reagirajo med seboj in tvorijo skupine), je sprememba ravnovesne vlažnosti skoraj konstantna. Molekule so v dinamičnem stanju toliko časa, dokler se ne izenači vezalna energija med sorpcijskimi mesti, molekule pa preidejo v dinamično ravnovesje. Zaradi prevoja je krivulja raztegnjena, zato območje imenujemo tudi kvazi-linearno.

V zgornjem higroskopskem območju prevladuje mehanizem kapilarne kondenzacije. V mikro razpokah celične stene se pojavi kondenzacija, vodne molekule pa se združujejo v vse večje skupine. Zaradi tega združevanja slabi vez med hidroksilno skupino in prvo vezano vodno molekulo. Skupine vodnih molekul se premeščajo kot celote.

S sorpcijskimi krivuljami izražamo odvisnost ravnovesne vlažnosti od relativne zračne vlažnosti in temperature. Krivulje v procesu desorpcije (sušenje) in adsorpcije (navlaževanje) ustvarijo histerezno zanko.

Histerezo povzročajo različne energijske izgube pri navlaževanju in sušenju lesa. S temperaturo se histereza zmanjšuje.

Histerezo se pripisuje polarnim hidroksilnim skupinam celuloze, kjer se voda veže z vodikovo vezjo. V nasičenem stanju so vse hidroksilne skupine nasičene z vodo. Pri sušenju te skupine oddajajo vodo, posledično se zaradi krčenja celične stene zblížajo in medsebojno zasitijo. Pri naslednji navlažitvi vse hidroksilne skupine ne morejo takoj vezati vodo, zato je ravnovesna vlažnost v poteku navlažitve manjša. Gibljivost vode se povečuje pri temperaturi nad 70°C, ko začne celulozna kristalna rešetka vedno bolj nihati. Vezi med

molekulami slabijo, razlike med navlaževanjem in sušenjem pa se zmanjšujejo (Gorišek, 1992).

2.3.1 Higroskopsko območje in točka nasičenja celičnih sten (TNCS)

Prvi je točko nasičenja celičnih sten definiral Tiemann (1906, po Torelli, 2000), ko je preučeval odvisnost mehanskih lastnosti od vlažnosti. Ugotovil je, da v procesu sušenja mehanske lastnosti najprej ostajajo konstantne (in minimalne), pri določeni vlažnosti pa začno naraščati. Prelomno vlažnost je imenoval točko nasičenja celičnih vlaken. Leta 1944 jo je Tiemann ponovno definiral, tokrat kot vlažnost, pri kateri so teoretično celične stene nasičene z vezano ali higroskopsko vodo in pri kateri diferencialna sorpcijska toplota doseže vrednost 0 (Torelli, 2000).

Točka nasičenosti celičnih sten je s tehnološkega vidika pomembna zato, ker opisuje stanje, ko so celične stene nasičene z vezano vodo, v lumnih pa ni več prisotne proste vode. Ko pade vlažnost pod točko nasičenja celičnih sten, se les začne krčiti, značilno pa se spreminja tudi večina fizikalnih in mehanskih lastnosti lesa, kar ni primer pri vlažnostih nad TNCS.

Vlažnost točke nasičenja celičnih sten je približno enaka vlažnosti lesa pri 100 % relativni zračni vlažnosti. Predstavlja zgornjo mejo higroskopskega območja v katerem vlada močna odvisnost med fizikalnimi in mehanskimi lastnostmi in lesno vlažnostjo.

TNCS je odvisna od številnih dejavnikov, tako od anatomske kot tudi kemijske zgradbe. Ojedritveni proces znižuje TNCS in ravnovesno vlažnost oz. »potiska« adsorpcijske in desorpcijske izoterme navzdol v območje relativne zračne vlažnosti nad približno 70 %. Ravnovesna vlažnost in TNCS pada tudi z naraščajočo temperaturo. Na vlažnost TNCS vpliva tudi gostota lesa. Načeloma je višja pri lesovih z nižjo gostoto. Celice s tanjšimi stenami naj bi nudile manjši odpor nabrekanju kot tiste z debelimi stenami. Nižje vrednosti TNCS pri gostejših lesovih so lahko tudi posledica večje vsebnosti ekstraktivov, kar pogosto drži (Torelli, 2000).

Pri listavcih je točka nasičenja celičnih sten višja kot pri iglavcih, zato ker listavci vsebujejo večji delež polioz. Tudi točka nasičenja celičnih sten beljave je višja od točke nasičenja celičnih sten jedrovine, ker ekstraktivi znižujejo ravnovesno vlažnost, teh pa je več v jedrovini (Gorišek, 2009).

2.4 DIMENZIJSKA IN OBLIKOVNA STABILNOST LESA

Les se najmanj krči in nabreka v longitudinalni ali vzdolžni smeri, le 0,1 % do 0,3 %. Aksialno krčenje je lahko celo negativno. Vzrok za tako majhno krčenje oz. nabrekanje je v zavirajočem učinku mikrofibril, v najbolj masivnem srednjem sloju celične stene. Vlakna pri normalni rasti potekajo skoraj vzporedno z osjo drevesa. Obstajajo tudi izjeme. Večji skrček imata juvenilni in krošnjev les, zaradi večjega mikrofibrilnega kota v srednjem sloju sekundarne stene in spiralnega poteka vlaken. Večje neželene vzdolžno krčenje imata tudi kompresijski in tenzijski les. Pri kompresijskem lesu to pripisujemo velikemu mikrofibrilnemu kotu v srednjem sloju sekundarne stene, helikalnim razpokam in odsotnosti notranjega sloja (S3) sekundarne stene. Pri tenzijskemu lesu pa večjemu deležu zunanjega sloja srednje stene in slabim tlačnim trdnostim želatinoznega sloja. Med krčenjem tenzijskega lesa se lahko povečajo tudi lumni.

Pri krčenju in nabrekanju lesa v tangencialni in radialni smeri, so skrčki oz. nabreki precej večji. V higroskopnem območju so največji tangencialni skrčki (3,5 - 15 %), radialni skrčki so manjši (2,4 - 9,0 %) (Schniewind, 1989; Schroeder, 1972; Schwab, 1977; Tsoumis, 1991).

Prečna krčitvena anizotropija je količnik med tangencialnim in radialnim skrčkom oz. nabrekom. Pri oblikovno stabilnejših vrstah je količnik manjši do 2, pri oblikovno nestabilnih vrstah pa je večji od 2.

Razloge za prečno krčitveno anizotropijo, najdemo pri iglavcih pri vplivu anatomskih in kemijskih razlik med radialnimi in tangencialnimi stenami vlaknastih celic. Pri listavcih pa zaradi vpliva anatomskih, fizikalnih in kemičnih razlik med posameznimi tkivi oz. deli tkiv.

Prečna krčitvena anizotropija se povečuje z deležem kasnega lesa, ter večjim razmerjem med gostoto ranega in kasnega lesa. Z naraščajočo gostoto lesa se povečujeta tudi tangencialni in radialni skrček, vendar radialni skrček bolj, zaradi tega se prečna krčitvena anizotropija zmanjšuje.

Anizotropija tudi ni enaka po celotnem higroskopnem območju. Največja je na intervalu, tik pod točko nasičenja celičnih sten (Gorišek, 2009).

2.4.1 Vpliv časa sečnje na dimenzijsko stabilnost

Ljudsko izročilo pravi, da je pri poseku lesa pomembna tudi prava luna. Tako imenovani lunarni les, je les posekan v skladu s starodavnimi navodili, ti pa upoštevajo lunine mene, zodiakalna znamenja in natančno določene datume (Torelli, 2005). V skladu z ljudskim izročilom so v času od novembra do januarja sekali po deset dreves v terminih tri dni pred ščipom in tri dni pred mlajem (Torelli, 2002). Verjeli so, da je les posekan v času pojemajoče lune še posebej odporen. Ugodni termini so tudi med časom ko sovpadata mlaj in škorpion, pravi čas je tudi 26. februarja pri pojemajoči luni, še zlasti če je ta v znamenju raka (Valenčič, 2011). Na splošno lunarnemu lesu pripisujejo izjemne lastnosti, saj naj bi se manj krčil in ne nabrekal, naj bi bil trši in insekti ga »ne marajo« (Torelli, 2002).

Toda strokovnih dokazov o kakovosti lunarnega lesa ni, zimska sečnja pa je, ne glede na lunine mene, zodiakalna znamenja in morebitno nižjo lesno vlažnostjo, iz tehnoloških razlogov najprimernejša. Del skrivnosti lunarnega lesa se verjetno skriva v skrbnem izboru drevesa, ravnanju z njim in predelave lesa, ter dobre konstrukcijske zaščite. Sklepajo, da luna vsekakor ima nek vpliv, samo dokazati oz. razumeti ga za enkrat še ne znamo (Torelli, 2002; Valenčič, 2011).

3 MATERIAL IN METODE

3.1 MATERIAL

Raziskave dimenzijske in oblikovne stabilnosti lesa smo izvedli na dveh najpogosteje zastopanih drevesnih vrstah v naših gozdovih. Med iglavci smo izbrali smrekovino (*Picea abies* Karst.) in med listavci bukovino (*Fagus sylvatica* L.).

Slučajnostno smo izbrali deset surovcev sveže bukovine in devet surovcev sveže smrekovine, s homogenim videzom. Iz surovcev smo izdelali orientirane elemente z dimenzijami 50 (r) mm x 50 (t) mm x 300 (l) mm. Iz posameznega elementa smo izžagali osem vzporednih preizkušancev, z dimenzijami 50 (r) mm x 50 (t) mm x 5 (l) mm.

3.2 METODE

Dimenzijsko in oblikovno stabilnost smrekovine in bukovine smo proučevali s tremi različnimi metodami vlažnostnega obremenjevanja preizkušancev. Zaradi večjega vpliva heterogenosti lesa smo preizkuse izvedli na vzporednih preizkušancih. Delovanje lesa smo ugotavljali z naslednjimi načini obremenjevanja:

- s cikličnim navlaževanjem in sušenjem;
- s postopnim uravnovešanjem in
- z različnimi potenciali sušenja.

Načrtovane klimatske pogoje smo vzpostavili v komorah z avtomatsko vzdrževano stalno temperaturo, relativno zračno vlažnost (φ) pa smo kontrolirali z nasičenimi raztopinami naslednjih soli:

$\varphi = 20\%$	.....	CH ₃ COOK
$\varphi = 33\%$	.....	MgCl ₂
$\varphi = 44\%$	.....	K ₂ CO ₃
$\varphi = 65\%$	.....	NaNO ₂
$\varphi = 75\%$	.....	NaCl
$\varphi = 87\%$	.....	ZnSO ₄

Po vsakem uravnovešanju smo preizkušance stehali na 0,001 g natančno in jim izmerili dimenzije (radialno, tangencialno) na 0,01 mm natančno. Na koncu smo preizkušance previdno sušili na absolutno suho stanje, v sušilniku pri temperaturi 103 ± 2 °C.

3.2.1 Ciklično navlaževanje in sušenje

Vpliv cikličnega navlaževanja in sušenja na ravnovesno vlažnost in dimenzijsko stabilnost smo preizkušali tako, da smo sveže preizkušance najprej uravnovesili na normalni klimi, $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ in $\varphi = 65 \text{ } \%$. Preizkušancem smo nato ciklično izpostavljali relativnima zračnima vlažnostma $\varphi_1 = 33 \text{ } \%$ in $\varphi_2 = 87 \text{ } \%$. En cikel uravnovešanja je običajno trajal štirinajst dni oziroma toliko časa, da je bila masa kontrolnega preizkušanca v dveh zaporednih tehtanjih v razmiku enega dneva enaka.

Po doseženem ravnovesnem stanju smo preizkušance stehali in jim izmerili radialne ter tangencialne dimenzije.

3.2.2 Postopno uravnovešanje

Tudi pri eksperimentu »postopnega uravnovešanja« smo preizkušance izdelali v svežem stanju, nato pa smo jih v procesu desorpcije s postopnim uravnovešanjem osušili do absolutno suhega stanja. Začeli smo z zračno vlažnostjo $87 \text{ } \%$, nato pa postopno še z naslednjimi: $75 \text{ } \%$, $65 \text{ } \%$, $44 \text{ } \%$, $33 \text{ } \%$, $20 \text{ } \%$, ki smo jih prav tako dosegli z nasičenimi solnimi raztopinami. Do absolutno suhega stanja smo preizkušance osušili s previdnim sušenjem v vakuumu. Tudi v tem primeru smo preizkušance po vsakem uravnovešanju stehali in jim izmerili dimenzije. Tudi tu je posamezno uravnovešanje trajalo približno štirinajst dni.

3.2.3 Sušilni potencial

Za proučevanje učinka sušilnega gradienta oziroma sušilnega potenciala na intenzivnost dimenzijskih sprememb smo uporabili šest vzporednih podskupin preizkušancev. Vsako podskupino preizkušancev smo izpostavili eni izmed vnaprej izbranih relativnih zračnih vlažnosti. Po približno štirinajstih dneh, ko smo v dveh zaporednih merjenjih mase v razmaku dneva dobili enako maso, kar je pomenilo, da se je vsaka posamezna podskupina uravnovesila na izbrano relativno zračno vlažnost, smo preizkušance stehali in jim izmerili dimenzije. Po previdnem sušenju do absolutno suhega stanja smo meritve ponovili.

Prva podskupina preizkušancev se je uravnovešala na relativni zračni vlažnosti $20 \text{ } \%$, druga na $33 \text{ } \%$, tretja na $44 \text{ } \%$, četrta na $65 \text{ } \%$, peta na $75 \text{ } \%$ in zadnja podskupina na $87 \text{ } \%$ relativni zračni vlažnosti.

4 REZULTATI

4.1 VPLIV VEČKRATNEGA NAVLAŽEVANJA IN SUŠENJA NA DIMENZIJSKO STABILNOST

Pri cikličnem navlaževanju in sušenju med relativnima zračnima vlažnostma 33 % in 87 % je bilo nihanje ravnovesne vlažnosti smrekovine na spodnji meji uravnovešanja neznatno, med 8,4 % in 8,5 %. Pri zgornji meji je bilo bistveno večje, med 17,1 % in 18,6 %. Razlika ravnovesnih vlažnosti je bila največja v drugem ciklu ($\Delta u=10,2$ %), najmanjša pa v tretjem, ko je bila le 8,6 % (Preglednica 1).

Preglednica 1: Povprečne vrednosti in standardni odkloni za ravnovesne vlažnosti (u_r) ter za radialne (β_r) in tangencialne (β_t) skrčke smrekovine med cikličnim uravnovešanjem med relativnima zračnima vlažnostma 33 % in 87 %.

Smrekovina		u_r (%)		β_r (%)		β_t (%)	
		povp.	st. odklon	povp.	st. odklon	povp.	st. odklon
	sveže	90,9	56,54				
1 ponovitev	des 33 %	6,7	0,20	3,05	0,64	6,30	0,89
	ads 87 %	17,3	0,24	1,33	0,29	2,90	0,52
2 ponovitev	des 33 %	8,4	0,14	3,14	0,65	6,50	0,90
	ads 87 %	18,6	0,18	1,51	0,32	3,25	0,53
3 ponovitev	des 33 %	8,5	0,15	3,16	0,66	6,51	0,92
	ads 87 %	18,2	0,23	1,63	0,34	3,44	0,60
4 ponovitev	des 33 %	8,5	0,15	3,17	0,66	6,54	0,93
	ads 87 %	17,1	2,61	1,79	0,68	3,89	1,24
5 ponovitev	des 33 %	8,4	0,15	3,20	0,67	6,63	0,95
	ads 87 %	18,4	0,23	1,86	0,71	3,48	0,59
	0			5,19	1,84	9,12	1,18

Pri uravnovešanju smrekovine na spodnji vrednosti relativne zračne vlažnosti, se je radialni skrček pri vsakem naslednjem cikličnem sušenju nekoliko povečal. Skrček se je s 3,05 % povečal na 3,20 %. Najnižji skrček smo v procesu desorpcije izmerili pri prvem sušenju, nato so se skrčki v vsaki nadaljnji desorpciji navidezno linearno večali in dosegli največjo vrednost v zadnjem ciklu. Podobno se je povečal tudi skrček pri uravnovešanju na višji relativni zračni vlažnosti, v procesu adsorpcije. V prvi adsorpciji je bil skrček 1,33 %, kar je tudi najnižja vrednost. Najvišji skrček je bil dosežen v zadnjem ciklu adsorpcije z vrednostjo 1,86 %.

Tangencialni skrčki smrekovine so se pri uravnovešanju na nižji relativni zračni vlažnosti s ponavljanjem ciklov povečevali od 6,30 % do 6,63 %. Pri uravnovešanju na zgornji meji

relativne zračne vlažnosti, v procesu adsorpcije, so skrčki naraščali od 2,90 %, doseženi v prvi adsorpciji, do najvišje vrednosti, ki je bila dosežena v četrti ponovitvi 3,89 %.

Nihanje ravnovesne vlažnosti bukovine (Preglednica 2) pri cikličnem navlaževanju in sušenju med relativnima zračnima vlažnostma 33 % in 87 %, je bilo na spodnji meji izjemno majhno, med 7,6 % in 7,8 %, pri zgornji meji pa večje, med 16,7 % in 17,3 %. Sprememba vlažnosti je bila največja v prvem ciklu, kjer znaša 9,7 %, najmanjša 8,9 % pa v zadnjem ciklu.

Preglednica 2: Povprečne vrednosti in standardni odkloni za ravnovesne vlažnosti (u_r) ter za radialne (β_r) in tangencialne (β_t) skrčke bukovine med cikličnim uravnovešanjem med relativnima zračnima vlažnostma 33 % in 87 %.

Bukovina		u_r (%)		β_r (%)		β_t (%)	
		povp.	st. odklon	povp.	st. odklon	povp.	st. odklon
	sveže	64,1	5,89				
1 ponovitev	des 33 %	5,9	0,15	3,96	0,33	9,80	0,52
	ads 87 %	15,9	0,22	1,91	0,28	5,88	0,46
2 ponovitev	des 33 %	7,6	0,13	4,02	0,34	9,77	0,49
	ads 87 %	17,3	0,24	2,05	0,29	6,08	0,44
3 ponovitev	des 33 %	7,7	0,12	3,99	0,34	9,70	0,50
	ads 87 %	17	0,18	2,17	0,29	6,21	0,44
4 ponovitev	des 33 %	7,8	0,11	3,97	0,33	9,63	0,47
	ads 87 %	16,7	0,20	2,17	0,29	6,29	0,42
	0			5,30	0,39	11,94	0,53

Radialni skrček se je pri uravnovešanju bukovine na spodnji vrednosti relativne zračne vlažnosti, pri vsakem naslednjem cikličnem sušenju nekoliko zmanjšal. Vrednosti so iz 4,02 % postopno padale do 3,97 %. Najvišji radialni skrček smo dosegli v prvem ciklu in najmanjšega v zadnjem ciklu desorpcije. V procesu adsorpcije, pri uravnovešanju na višji relativni zračni vlažnosti, se je radialni skrček postopno zmanjševal. Najnižjo vrednost 2,17 % smo dosegli v zadnjih dveh procesih adsorpcije.

Pri uravnovešanju na nižji relativni zračni vlažnosti, se je tangencialni skrček postopoma zmanjševal od 9,77 %, vrednosti doseženi v prvi desorpciji, do 9,63 %, ki smo jo dosegli v zadnjem ciklu desorpcije. V procesu adsorpcije (zgornja vrednost relativne zračne vlažnosti) so skrčki naraščali od 6,08 % do 6,29 %. Najnižja vrednost je bila dosežena v prvem ciklu, ter najvišja v zadnjem ciklu adsorpcije.

Iz preglednice 2 kazalnikov dimenzijske stabilnosti za smrekovino razberemo, da je bil diferencialni nabrek v radialni smeri (q_r) največje v prvi ponovitvi 0,163 %/ % in najmanjši v zadnji ponovitvi 0,135 %/ %.

Diferencialni nabrek smrekovine v tangencialni smeri (q_t) je bil ravno tako največji v prvi ponovitvi 0,321 %/ % in je najmanjšo vrednost dosegel v tretji ponovitvi 0,308 %/ %. Vse vrednosti tega kazalnika dimenzijske stabilnosti, lahko po kriterijih kot jih predlagata Torelli in Čufar (1983), razvrstimo med normalne. Na splošno smo zaznali rahel trend padanja diferencialnih nabrekov v obeh anatomskih smereh.

Razlika med diferencialnim nabrekom v tangencialni in radialni smeri (q_t in q_r) je pri smrekovini najvišje v zadnji ponovitvi 0,183 %/ % in najmanjše v predzadnji ponovitvi 0,148 %/ %. Tudi tu so vse vrednosti kazalnika znotraj normalnih mej (Torelli, Čufar, 1983).

Anizotropija delovanja smrekovine je bila najbolj ugodna v prvi ponovitvi 1,968 in neugodna ter največja v zadnji ponovitvi z vrednostjo 2,4. Načeloma velja, da so vse vrednosti, ki so večje ali enake 2,0 neugodne.

Pri bukovini je bila najvišja vrednost diferencialnega nabreka v radialni smeri (q_r) v prvi ponovitvi 0,206 %/ % in najnižja 0,195 %/ % v predzadnji ponovitvi (Preglednica 3).

Diferencialni nabrek bukovine v tangencialni smeri (q_t) je bil največji v prvi ponovitvi z vrednostjo 0,393 %/ % in najmanjši v zadnjih dveh ponovitvah (0,375 %/ %). Vse vrednosti kazalnika so bile v normalnih mejah (Torelli, Čufar, 1983).

Pri razliki med diferencialnim nabrekom bukovine v tangencialni in radialni smeri (q_t - q_r) smo opazili, da so bile vrednosti vseskozi normalne, nihajo pa od največje razlike v prvi ponovitvi (0,187 %/ %) do najmanjše v zadnji ponovitvi (0,173 %/ %).

Anizotropija delovanja bukovine je bila vseskozi v mejah normalnih vrednosti. Najmanjšo vrednost 1,880 smo izmerili v zadnji ponovitvi in največjo v predzadnji ponovitvi (1,921).

Preglednica 3: Kazalniki dimenzijske stabilnosti (diferencialni nabrek v radialni smeri – q_r , diferencialni nabrek v tangencialni smeri – q_t , njuna razlika ($q_t - q_r$) ter prečna krčitvena anizotropija – q_t/q_r) za smrekovino in bukovino v posameznih ponovitvah sušenja oz. navlaževanja.

Smrekovina	q_r (%/ %)	q_t (%/ %)	$q_t - q_r$ (%/ %)	q_t/q_r
1 ponovitev	0,163	0,321	0,158	1,968
2 ponovitev	0,160	0,318	0,158	1,991
3 ponovitev	0,157	0,315	0,158	2,004
4 ponovitev	0,161	0,308	0,148	1,919
5 ponovitev	0,135	0,318	0,183	2,358
Bukovina	q_r (%/ %)	q_t (%/ %)	$q_t - q_r$ (%/ %)	q_t/q_r
1 ponovitev	0,206	0,393	0,187	1,909
2 ponovitev	0,203	0,382	0,179	1,880
3 ponovitev	0,195	0,375	0,180	1,921
4 ponovitev	0,201	0,375	0,173	1,860

4.2 VPLIV POSTOPNEGA URAVNOVEŠANJA NA KRČENJE IN PREČNO KRČITVENO ANIZOTROPIJO

Celotna skrčka smrekovine v radialni in tangencialni smeri sta bila pričakovanega velikostnega reda, kot jih poznamo tudi iz strokovne literature (Wagenführ, 2000).

S sušenjem pa se je spreminjala prečna krčitvena anizotropija. Najvišja je bila takoj po osušitvi pod točko nasičenja celičnih sten in se je postopoma zmanjševala v celotnem higroskopskem območju (Preglednica 4).

Anizotropija delovanja (q_t/q_r) se je navidezno zmanjševala z zmanjševanjem relativne zračne vlažnosti. Do relativne zračne vlažnosti 20 % so vrednosti neugodne (od 2,9 do 2,1), pod relativne zračne vlažnosti 44 % so vrednosti v normalnih mejah.

Rečemo lahko, da so naši preizkušanci bolj oblikovno stabilni pri nižjih relativnih zračnih vlažnostih, od relativne zračne vlažnosti 20 % navzdol, kar je razvidno tudi iz preglednice.

Preglednica 4: Ravnesne vlažnosti (u_r) ter radialni (β_r) in tangencialni (β_t) skrčki smrekovine pri postopnem uravnotežanju iz svežega do absolutno suhega stanja.

Relativna zračna vlažnost φ (%)	Ravnovesna vlažnost u_r (%)		Radialni skrček β_r (%)		Tangencialni skrček β_t (%)		Prečna krčitvena anizotropija q_t/q_r
	Povprečje	st. odklon	povprečje	st. odklon	povprečje	st. odklon	
0	0,0	0,00	4,2	0,85	8,5	1,18	2,0
20	2,9	0,21	3,8	0,77	7,8	1,08	2,1
33	7,0	0,12	3,0	0,65	6,5	0,98	2,2
44	7,2	0,15	2,7	0,60	5,9	0,91	2,2
65	9,9	0,17	2,2	0,49	4,9	0,83	2,2
75	16,9	0,36	1,1	0,24	2,8	0,58	2,5
87	19,4	0,80	0,7	0,27	2,0	0,47	2,9

Tudi pri bukovini sta bila radialni in tangencialni skrček v okviru pričakovanih vrednosti, prečna krčitvena anizotropija pa se je med procesom desorpcije zmanjševala. Najmanj ugodna (3,8) je bila pri osušitvi od svežega stanja do relativne zračne vlažnosti 87 %.

Prečna krčitvena anizotropija se je že pri relativni zračni vlažnosti 20 % bistveno zmanjšala (na 2,4) (Preglednica 5).

Preglednica 5: Ravnovesne vlažnosti (u_r) ter radialni (β_r) in tangencialni (β_t) skrčki bukovine pri postopnem uravnotežanju iz svežega do absolutno suhega stanja.

Relativna zračna vlažnost φ (%)	Ravnovesna vlažnost u_r (%)		Radialni skrček β_r (%)		Tangencialni skrček β_t (%)		Prečna krčitvena anizotropija q_t/q_r
	Povprečje	st. odklon	povprečje	st. odklon	povprečje	st. odklon	
0	0,0	0,00	5,3	0,35	12,6	0,58	2,4
20	2,6	0,09	4,9	0,37	11,9	0,61	2,4
33	5,9	0,69	4,2	0,34	10,7	0,62	2,5
44	6,2	0,07	3,8	0,31	10,1	0,59	2,6
65	8,9	0,06	3,2	0,29	9,1	0,56	2,8
75	15,6	0,05	1,9	0,23	6,3	0,64	3,3
87	18,3	0,23	1,4	0,20	5,3	0,57	3,8

4.3 VPLIV SUŠILNEGA POTENCIALA NA KRČENJE IN PREČNO KRČITVENO ANIZOTROPIJO

Tudi pri sušenju z različnimi ostrinami sušenja so bili celotni radialni in tangencialni skrčki smrekovine primerljivi s podatki iz literature (Wagenführ, 2000). Zaznali pa smo tudi odstopanja prečne krčitvene anizotropije (Preglednica 6).

Med desorpcijo je bila prečna krčitvena anizotropija smrekovine največja pri sušenju na relativni zračni vlažnosti 87 %, nato pa se je nekoliko zmanjšala (do 2,1 pri sušenju na 44 % zračni vlažnosti). Nižjo prečno krčitveno anizotropijo smo izmerili v spodnjem higroskopskem območju (2,0 pri sušenju na 20 % relativni zračni vlažnosti).

Preglednica 6: Ravnesne vlažnosti (u_r) ter radialni (β_r) in tangencialni (β_t) skrčki smrekovine pri neposrednem uravnovešanju iz svežega do uravnovešanja pri različnih relativnih zračnih vlažnostih.

Relativna zračna vlažnost φ (%)	Ravnesna vlažnost u_r (%)		Radialni skrček β_r (%)		Tangencialni skrček β_t (%)		Prečna krčitvena anizotropija q_t/q_r
	povprečje	st. odklon	povprečje	st. odklon	povprečje	st. odklon	
0							
20	6,5	0,30	3,4	0,80	6,9	1,03	2
33	8,9	0,22	2,8	0,66	6,1	0,86	2,2
44	11,2	0,32	2,4	0,50	5,1	0,82	2,1
65	14,9	0,21	1,7	0,40	3,8	0,60	2,2
75	18,5	0,43	1,1	0,33	2,7	0,46	2,4
87	21,2	0,38	0,8	0,22	2,0	0,39	2,5

Preglednica 7: Ravnovesne vlažnosti (u_r) ter radialni (β_r) in tangencialni (β_t) skrčki bukovine pri neposrednem uravnovešanju iz svežega do uravnovešanja pri različnih relativnih zračnih vlažnostih.

Relativna zračna vlažnost φ (%)	Ravnovesna vlažnost u_r (%)		Radialni skrček β_r (%)		Tangencialni skrček β_t (%)		Prečna krčitvena anizotropija q_t/q_r
	povprečje	st. odklon	povprečje	st. odklon	povprečje	st. odklon	
0	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	
20	5,1	0,21	4,7	0,33	10,5	0,43	2,2
33	7,9	0,25	4,0	0,30	9,7	0,44	2,4
44	10,2	0,14	3,4	0,32	8,8	0,49	2,6
65	14,0	0,07	2,5	0,22	7,6	0,53	3
75	17,6	0,17	1,9	0,25	6,2	0,50	3,2
87	20,0	0,35	1,5	0,19	5,0	0,87	3,3

Pri bukovini smo izmerili zelo veliko prečno krčitveno anizotropijo (od 3,3 do 2,4). Do absolutno suhega stanja se je nato zmanjševala in dosegla vrednost (2,2) v najbolj suhi klimi (Preglednica 7).

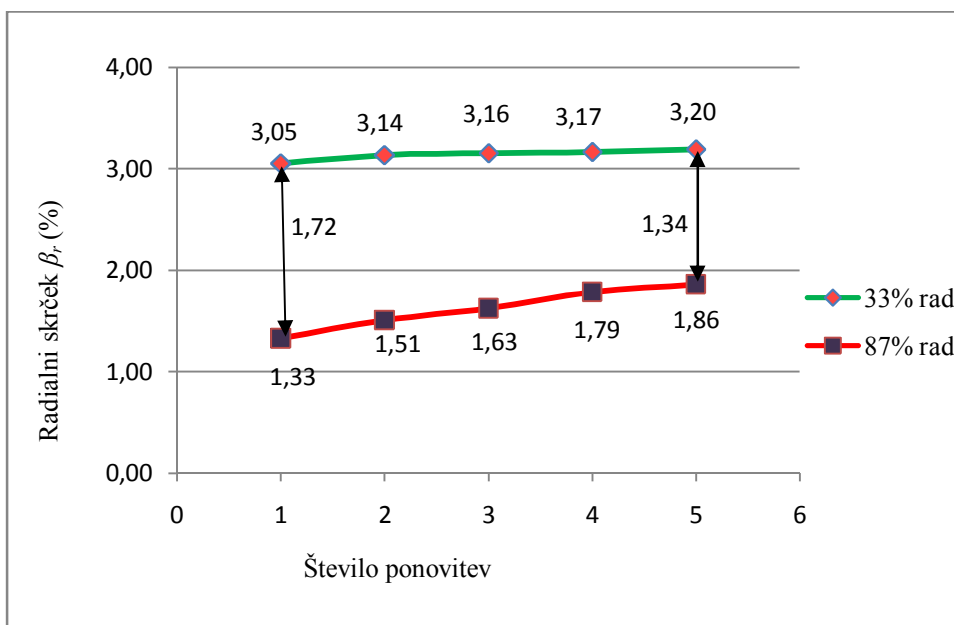
5 RAZPRAVA

5.1 VPLIV VEČKRATNEGA NAVLAŽEVANJA IN SUŠENJA NA DIMENZIJSKO STABILNOST

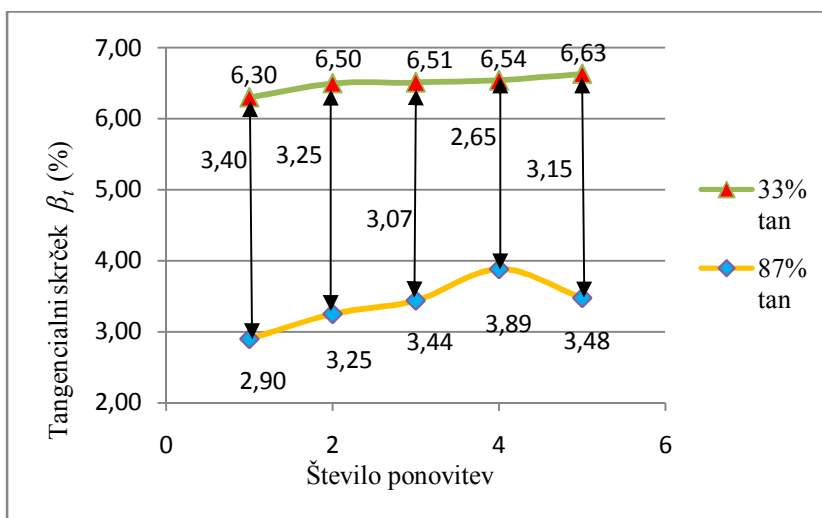
Rezultati ponavljajočega se sušenja in navlaževanja med relativnima zračnima vlažnostma kažejo, da se dimenzijske spremembe z večanjem ponovitev zmanjšujejo. Pri prvi ponovitvi je bila razlika krčenja v radialni smeri 1,72 % in se je konstantno zmanjševala do 1,34 % v peti ponovitvi (Slika 1).

Tudi spremembe dimenzij v tangencialni smeri so se s ponavljanjem vlažnostnih obremenitev zmanjševale. Pri prvi ponovitvi je bila razlika skrčkov 3,4 % in je v četrti ponovitvi celo padla na 2,65 % (Slika 2). Pri peti ponovitvi je bila sprememba dimenzij sicer nekoliko večja, vendar lahko odstopanje delno pripišemo tudi eksperimentalni napaki (vzdrževanje ustreznih relativni zračnih vlažnosti). Sklepamo lahko, da tudi ponavljajoče krčenje in navlaževanje predstavlja način obremenjevanja, ki vodi do zmanjševanja delovanja lesa.

Rezultat ima tudi praktični pomen, saj lahko potrdimo predpostavki, da postaja les s časom uporabe dimenzijsko stabilnejši.



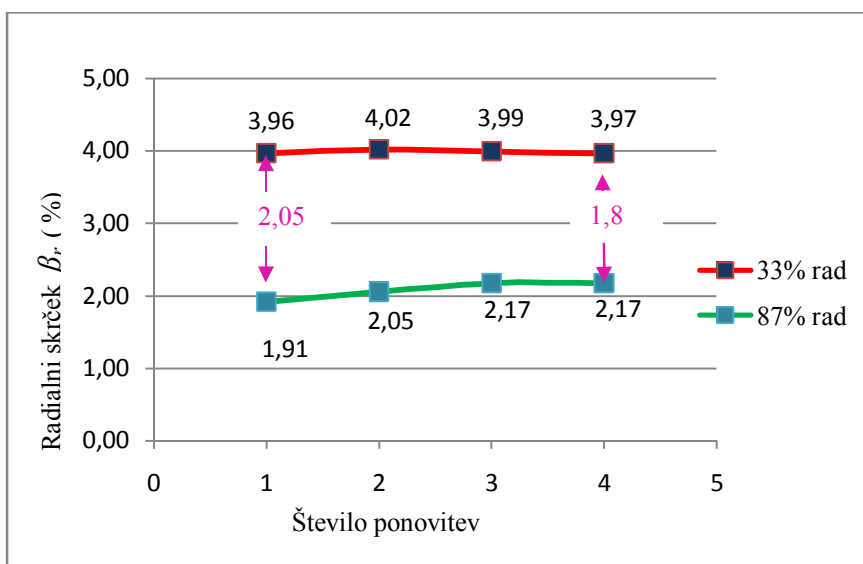
Slika 1: Trend krčenja smrekovine v radialni smeri pri cikličnem sušenju in navlaževanju (med relativnima zračnima vlažnostma 33 % in 87 %).



Slika 2: Trend krčenja smrekovine v tangencialni smeri pri cikličnem sušenju in navlaževanju (med relativnima zračnima vlažnostma 33 % in 87 %).

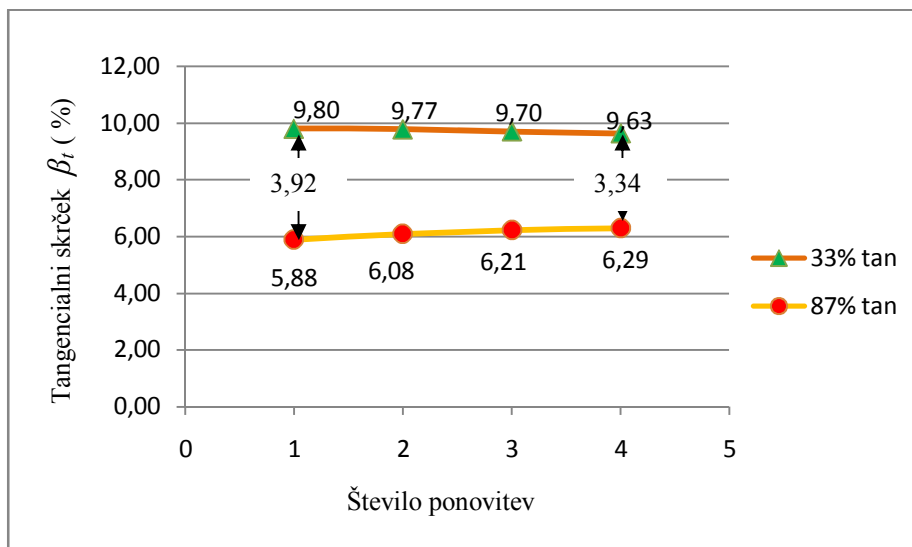
Pri večkratnem sušenju in navlaževanju med relativnima zračnima vlažnostma 33 % in 87 % so se dimenzijske spremembe bukovine z vsako naslednjo ponovitvijo navidezno linearno zmanjševale.

Pri krčenju v radialni smeri je v prvi ponovitvi razlika krčenja 2,05 % in v zadnji ponovitvi le še 1,8 % (Slika 3). Padec razlike je bistveno večji kot pri tangencialnemu skrčku.



Slika 3: Trend krčenja bukovine v radialni smeri pri cikličnem sušenju in navlaževanju (med relativnima zračnima vlažnostma 33 % in 87 %).

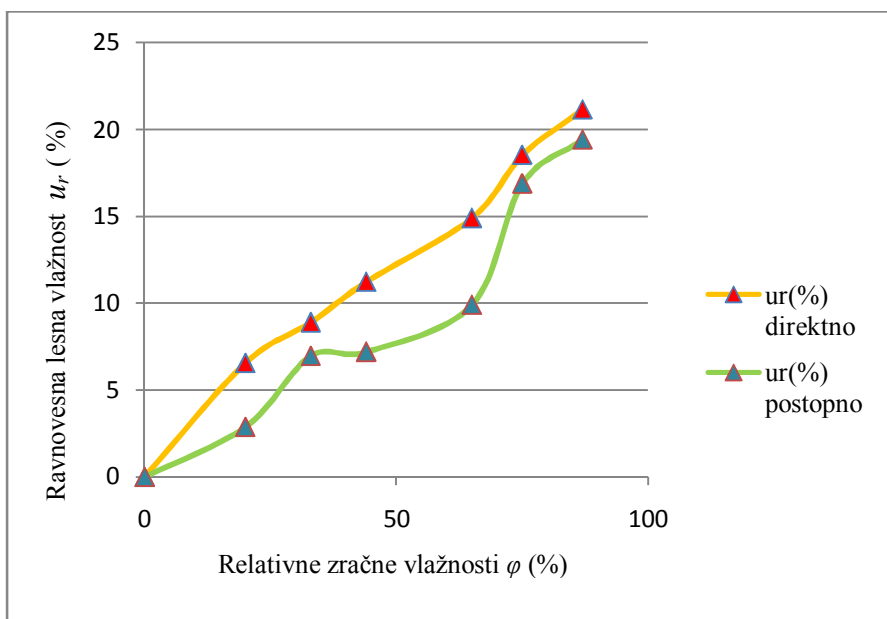
Tudi tangencialni skrček se je navidezno linearno zmanjševal, vendar z manjšo razliko v padcu le tega. V prvi ponovitvi znaša razlika tangencialnega skrčka 3,92 %, ter v zadnji ponovitvi 3,34 % (Slika 4).



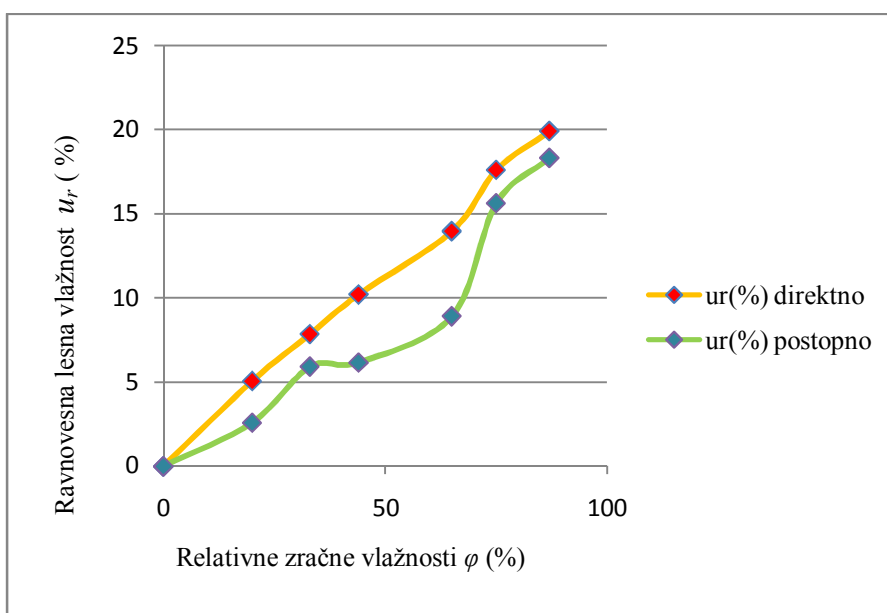
Slika 4: Trend krčenja bukovine v tangencialni smeri pri cikličnem sušenju in navlaževanju (med relativnima zračnima vlažnostma 33 % in 87 %).

5.2 PRIMERJAVA MED DIREKTNIM IN POSTOPNIM URAVNOVEŠANJEM LESA

Pri postopnem sušenju in uravnotežanju preizkušancev, so bile ravnovesne vlažnosti na vseh nivojih nekoliko nižje kot pri enkratnem sušenju lesa, kar velja tako za smrekovino (Slika 5) kot tudi za bukovino (Slika 6). Tekom procesa se je pojavila eksperimentalna napaka (krivulji postopnega uravnotežanja).



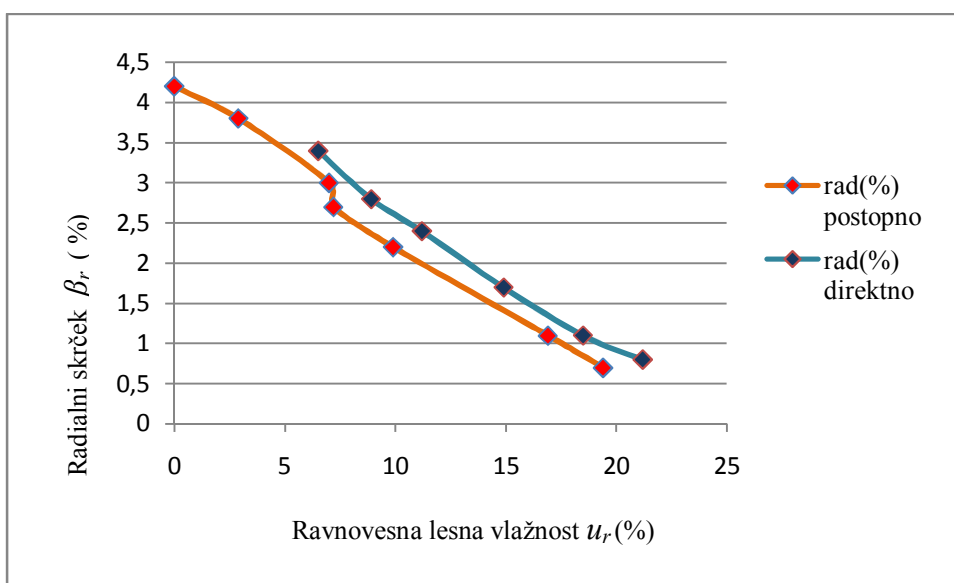
Slika 5: Primerjava ravnovesnih vlažnosti smrekovine med postopnim in direktnim uravnotežanjem.



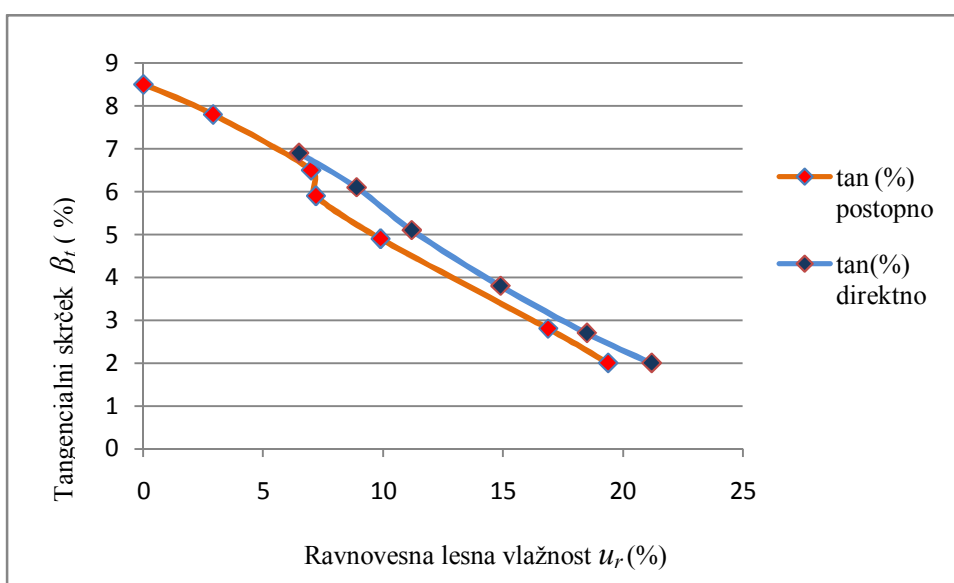
Slika 6: Primerjava ravnovesnih vlažnosti bukovine med postopnim in direktnim uravnotežanjem.

Rezultati so primerljivi z znanimi podatki iz literature. Razlog v nižjih ravnovesnih vlažnostih pri postopnem uravnovešanju je verjetno v sušilnih napetostih in lokalnih porušitvah preizkušancev. Sušilne napetosti se pojavijo zaradi vlažnostnega gradienta, ki je odvisen od difuzijskih karakteristik lesa ter od prečne krčitvene anizotropije. Ker ocenjujemo postopno sušenje kot blag režim sušenja, so bile tu posledično tudi manjše notranje napetosti in zato tudi nižja vlažnost vzorcev.

Pri postopnem uravnovešanju smrekovine imata tako radialni kot tangencialni skrček nižje vrednosti, kot pa radialni in tangencialni skrček smrekovine pri direktnem uravnovešanju (Sliki 7 in 8).

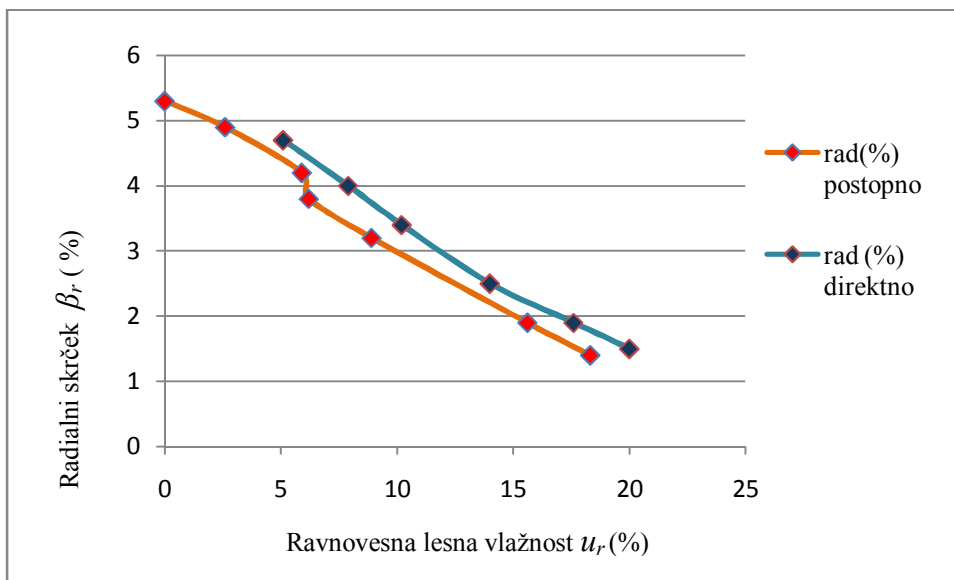


Slika 7: Primerjava radialnih skrčkov smrekovine med postopnim in direktnim uravnovešanjem.

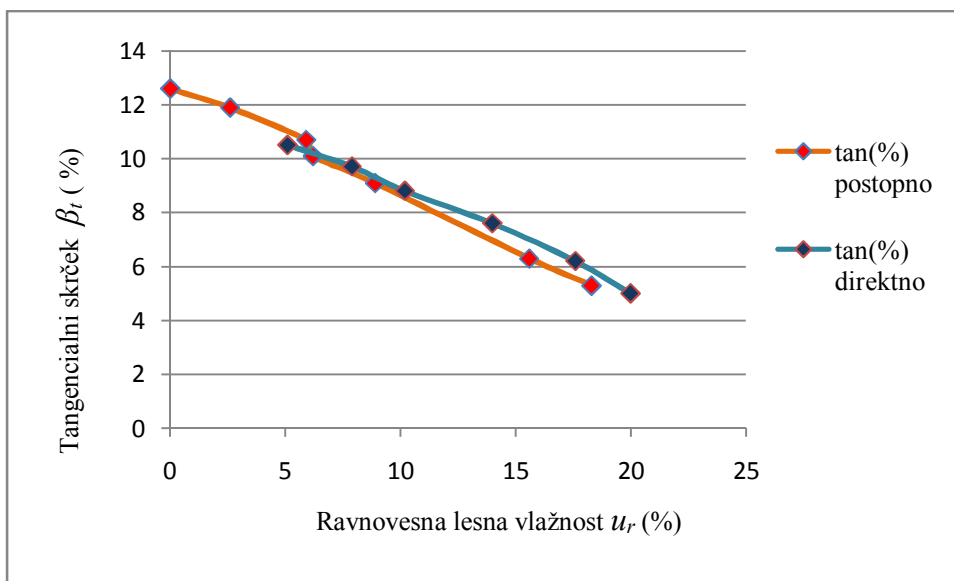


Slika 8: Primerjava tangencialnih skrčkov smrekovine med postopnim in direktnim uravnovešanjem.

Radialni in tangencialni skrček pri postopnem uravnešanju bukovine je bil tudi tu nižji, kot pa vrednosti obeh skrčkov (radialni in tangencialni) pri direktnem uravnešanju (Sliki 9 in 10).



Slika 9: Primerjava radialnih skrčkov bukovine med postopnim in direktnim uravnešanjem



Slika 10: Primerjava tangencialnih skrčkov bukovine med postopnim in direktnim uravnešanjem

6 SKLEPI

V nalogi smo se posvetili vplivu različnih klimatski pogojev na delovanje smrekovine in bukovine. Proučevali smo vpliv cikličnega menjavanja klime med 33 % in 87 % relativne zračne vlažnosti, postopnega navlaževanja in sušilnega potenciala oziroma ostrine sušenja, na ravnovesne vlažnosti in dimenzijsko stabilnost.

Prišli smo do naslednjih ugotovitev:

1. Pri cikličnemu navlaževanju in sušenju lahko pritrdimo predpostavki, da postaja les s časom uporabe dimenzijsko stabilnejši, saj se je razlika v dimenzijah tako radialnih kot tudi tangencialnih skrčkov s številom ponovitev zmanjševala.
2. Pri preizkušancih iz smrekovine, ki so bili izpostavljeni ciklični menjavi klime med 33 % in 87 %, smo prišli do naslednjih sklepov: nihanje ravnovesne vlažnosti smrekovine je bilo na spodnji meji relativne zračne vlažnosti komaj zaznavno, na zgornji meji relativne zračne vlažnosti je bilo nihanje bistveno večje. Razlika radialnega skrčka se je z vsako naslednjo ponovitvijo nekoliko zmanjšala. Ravno tako se je s ponovitvami ciklov navidezno linearno zmanjševala tudi razlika tangencialnega skrčka.
3. Pri preizkušancih iz bukovine, ki so bili izpostavljeni ciklični menjavi klime smo ugotovili, nihanje ravnovesne vlažnosti bukovine na spodnji vrednosti relativne zračne vlažnosti je izjemno majhno, večje je na zgornji meji relativne zračne vlažnosti. Razlika v radialnem skrčku se je s ponovitvami ciklov zmanjševala. Tudi razlika tangencialnega skrčka se je s ponovitvami ciklov postopoma zmanjševala.
4. Pri postopnem uravnovešanju smo dobili nižje vrednosti tako radialnih kot tudi tangencialnih skrčkov in ravnovesne lesne vlažnosti kot pri direktnem uravnovešanju. Razlog za nižje vrednosti lahko razložimo z blagim načinom sušenja, ki povzroča tudi manjše notranje napetosti in zato tudi nižje skrčke in vlažnost preizkušancev.

7 POVZETEK

Pri sušenju lesa imajo različni klimatski pogoji zelo velik vpliv na samo dimenzijsko stabilnost lesa. Ni namreč vseeno ali les osušujemo postopoma ali pa ga direktno osušimo na zeleno ravnovesno vlažnost. Zanimala nas je sprememba ravnovesnih vlažnosti in dimenzij v različnih klimah.

V naši nalogi smo preizkusili dve drevesni vrsti, ki sta v naših gozdovih močno prisotni, to sta bukev (*Fagus sylvatica* L) in smreka (*Picea abies* Karst.). Les obeh drevesnih vrst je zelo cenjen in relativno dobro poznan. Ravno zato ju tudi največkrat uporabljamo za stavbno pohištvo in tudi za zunanje elemente.

V nalogi smo želeli preveriti vpliv različnih umetno vzpostavljenih klimatskih pogojev in menjavanje le teh. Preučevali smo vpliv cikličnega navlaževanja in sušenja na ravnovesno lesno vlažnost in dimenzijsko stabilnost. Vpliv postopnega uravnovešanja preko različnih zračnih vlažnosti (87 %, 75 %, 65 %, 44 %, 33 %, 20 %) do absolutno suhega stanja, pa tudi učinek sušilnega potenciala na intenzivnost dimenzijskih sprememb.

Pri poskusu smo preizkušancem merili radialne in tangencialne dimenzije in jih tehtali. Iz podatkov smo izračunali ravnovesne vlažnosti lesa in radialne ter tangencialne skrčke.

Izračunali smo tudi diferencialne nabreke v radialni in tangencialni smeri in prečno krčitveno anizotropijo.

Preverili smo tudi trditev, ali lahko s postopnim sušenjem dosežemo nižje vrednosti tako radialnih kot tangencialnih skrčkov in ravnovesne lesne vlažnosti, kot pa pri preizkušancih, ki so bili izpostavljeni direktnemu sušenju.

Skozi eksperiment se je pokazalo, da trditev drži. Preizkušanci, ki so bili podvrženi postopnemu sušenju so dosegli nižje vrednosti tangencialnih in radialnih skrčkov ter nižjo ravnovesno lesno vlažnost, kot pa preizkušanci, ki smo jih izpostavili direktnemu sušenju. Tu so bili radialni in tangencialni skrčki višji. Ravno tako je bila višja tudi ravnovesna lesna vlažnost.

Lahko pritrdimo, da les s časom uporabe dejansko postaja dimenzijsko stabilnejši, saj se razlike skrčkov zmanjšujejo. Prišli smo do zaključka, da nihajoče klimatske razmere nekoliko povečajo dimenzijsko in oblikovno stabilnost lesa.

8 VIRI

Čufar K. 2006. Anatomija lesa, Ljubljana, Biotehniška fakulteta: 185

Gorišek Ž. 1992. Vpliv prečne krčivne anizotropije lesa na sušenje in stabilnost. Doktorska disertacija. Ljubljana, VDO Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

Gorišek Ž. 2009. Les zgradba in lastnosti, njegova variabilnost in heterogenost. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 178

Hartley I. D.; Kamke F. A.; Peemoeller H. 1992. Cluster theory for water sorption in wood. Wood Science and technology 26: 83-99

Schniewind A. P. 1989. Concise Encyclopedia of Wood & Wood-based Materials. Oxford, England and Cambridge, Mass. 1: 354

Schroeder H. A. 1972. Shrinking and swelling differences between hardwoods and softwoods. Wood and Fibre Science. 4, 1: 20-25

Schwab E. 1977. Ermittlung der Holzeigenschaften als Voraussetzung für eine Werkstoffgerechte Holzverwendung, Mitteilungen der BFK, Hamburg-Reinbek, 118: 197-204

Tišler V. 1986. Kemija lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

Torelli N., Čufar K. 1983. Sorpcija in stabilnost lesa. Les, 35, 4-5: 101-106

Torelli N. 2000. Točka nasičenja celičnih sten (TNCS). Les, 52, 5: 141-147

Torelli N. 2002. Lunarni les ali les posekan ob pravem času. Les, 54, 1-2: 19-20

Torelli N. 2005. Lunarni les – mit ali resničnost. Zbornik gozdarstva in lesarstva, 76: 71-101

Tsoumis G. 1991. Science and technology of wood. Structure, properties, utilization. VNR Van Nostrand Reinhold. New York: 494

Valenčič M. 2011. Strešne konstrukcije. Večerova priloga Kvadrati, (24.1.2011).<http://www.kvadrati.si/default.asp?kaj=1&id=2011012405613586&tab=ARH2011VEC> (15.9.2013)

Dovč A. Vpliv klimatskih pogojev na delovanje lesa.

Dipl. delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za lesarstvo, 2013

Wagenführ R. 2000. Holzatlas. Fachbuchverlag Leipzig, 5: 707

ZAHVALA

Zahvaljujem se prof. dr. Željku Gorišku, da me je sprejel pod svoje mentorstvo, za njegovo strokovno pomoč in za ves vloženi čas.

Hvala tudi doc. dr. Alešu Stražetu, ki je bedel nad izvedbo praktičnega dela moje diplomske naloge.

Prof. dr. Katarini Čufar se zahvaljujem za recenzijo diplomske naloge.

Posebej se zahvaljujem mami in očitu, ker sta mi omogočila študij in me pri tem ves čas podpirala. Hvala tudi tebi Klemen.

Hvala tudi vsem ostalim, ki so mi v času študija svetovali, pomagali in me podpirali.