

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Matej ROZMAN

**VPLIV TERMIČNE MODIFIKACIJE NA
OBSTOJNOST TLAČNE DEFORMACIJE
TOPLOTNO ZGOŠČENEGA LESA**

DIPLOMSKO DELO
Univerzitetni študij

Ljubljana, 2014

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Matej ROZMAN

**VPLIV TERMIČNE MODIFIKACIJE NA OBSTOJNOST TLAČNE
DEFORMACIJE TOPLOTNO ZGOŠČENEGA LESA**

DIPLOMSKO DELO
Univerzitetni študij

**INFLUENCE OF THERMAL MODIFICATION OF WOOD ON SET
RECOVERY OF COMPRESSIVE DEFORMATION OF
THERMAL COMPRESSED WOOD**

GRADUATION THESIS
University studies

Ljubljana, 2014

Diplomsko delo je zaključek univerzitetnega študija lesarstva. Opravljeno je bilo v laboratorijih Delovne skupine za patologijo in zaščito lesa Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval prof. dr. Miha Humarja, za somentorico doc. dr. Andrejo Kutnar in za recenzenta prof. dr. Marka Petriča.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Diplomska naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela. Podpisani se strinjam z objavo svoje naloge v polnem tekstu na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je naloga, ki sem jo oddal v elektronski obliki, identična tiskani verziji.

Matej ROZMAN

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Dn
DK	UDK 630*842
KG	les/termična modifikacija/ /toplotna zgostitev/tlačna deformacija
AV	ROZMAN, Matej
SA	HUMAR, Miha (mentor)/KUTNAR Andreja (somentorica)/PETRIČ, Marko (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, C. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2014
N	VPLIV TERMIČNE MODIFIKACIJE NA OBSTOJNOST TLAČNE DEFORMACIJE TOPLOTNO ZGOŠČENEGA LESA
TD	Diplomsko delo (univerzitetni študij)
OP	X, 43 str., 14 pregl., 24 sl., 5 pril., 28 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Viskoelastično toplotno zgoščen les (Viscoelastic Thermal Compressed wood, VTC les) ima zaradi visoke gostote in s tem izboljšanih mehanskih lastnosti velik potencial pri razvoju visokokakovostnih lesnih produktov. Širšo uporabo omejuje v največji meri povratek tlačne deformacije, do katerega pride ob izpostavitvi VTC lesa območjem s povišano vlažnostjo. Termična modifikacija pa je eden od načinov, s katerim lahko izboljšamo dimenzijsko obstojnost lesa in odpornost na lesne glive. V diplomski nalogi smo se osredotočili na dimenzijsko stabilnost tlačne deformacije VTC lesa. Vzorce smrekovega in bukovega lesa, ki so bili predhodno zgoščeni po postopku VTC, in kontrolne nezgoščene vzorce smo termično modificirali pri različnih temperaturah (190 °C, 200 °C, 210 °C in 220 °C). Obstojnost tlačne deformacije smo preverili z namakanjem v vodi. Postopek namakanja smo ponovili v petih ciklih, kjer smo ugotovili, da je povratek tlačne deformacije odvisen od temperature termične modifikacije in lesne vrste. Ugotovili smo, da je obstojnost VTC lesa neposredno povezana z izgubo mase, nastale med postopkom termične modifikacije. Pri termični modifikaciji pri najvišji uporabljeni temperaturi, t. j. 220 °C, pride do večje izgube mase lesa, pri čemer dosežemo boljšo obstojnost in zmanjšamo povratno tlačno deformacijo ter s tem izboljšamo dimenzijsko stabilnost VTC lesa.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Dn
DC UDC 630*842
CX wood /wood modification/thermal compression/compressive deformation
AU ROZMAN, Matej
AA HUMAR, Miha (supervisor)/KUTNAR Andreja (co- supervisor)/PETRIČ, Marko (reviewer)
PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, C. VIII/34
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
PY 2014
TI INFLUENCE OF THERMAL MODIFICATION OF WOOD ON SET RECOVERY OF COMPRESSIVE DEFORMATION OF THERMAL COMPRESSED WOOD
DT Graduation Thesis (University studies)
NO X, 43 p., 14 tab., 24 fig., 5 ann., 28 ref.
LA sl
AL sl/en
AB Viscoelastic thermal compressed (VTC) wood has due to the high wood density and thus improved mechanical properties great potential in the development of high-quality wood products. Its wider utilization is limited by set recovery of compressive deformation, which occurs when VTC wood is exposed to environment of increased humidity. Thermal modification is one of the process which can improve the dimensional stability of wood and resistance to fungal decay. In this thesis the problem of set recovery of compressive deformation was studied. Samples of spruce and beech wood, which were previously densified by the VTC process, were thermally modified with a thermal modification process at different temperatures (190 °C, 200 °C, 210 °C, and 220 °C). Set recovery of compressive deformation was examined after 5 water soaking cycles. It was found that set recovery of compressive deformation depended on the temperature of thermal modification and wood species. It was determined that stability of compression deformations of the VTC wood depends on the level of thermal modification. Thermal modification at temperature 220 °C caused significant mass loss, better stability, and reduced set recovery of compressive deformation, and thus improved the properties of VTC wood.

KAZALO VSEBINE

	str.
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO PREGLEDNIC	VII
KAZALO SLIK	VIII
KAZALO PRILOG	X
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	2
1.2 CILJI NALOGE.....	2
1.3 HIPOTEZE	2
2 PREGLED OBJAV	3
2.1 LESNA STRUKTURA	3
2.1.1 Bukev, <i>Fagus sylvatica</i> L.....	3
2.1.2 Smreka, <i>Picea abies</i> Karst.....	3
2.2 TERMIČNA MODIFIKACIJA	4
2.3 PARAMETRI TERMIČNE MODIFIKACIJE	5
2.3.1 Temperatura in trajanje postopka modifikacije	5
2.3.2 Lesna vrsta	5
2.4 RELAVANTNE LASTNOSTI TERMIČNO MODIFICIRANEGA LESA.....	6
2.4.1 Izguba mase.....	6
2.5 ZGOŠČEVANJE LESA	6
2.5.1 VTC postopek zgostitve	6
2.6 LASTNOSTI VTC LESA.....	8
3 MATERIAL IN METODE DELA.....	9
3.1 MATERIALI	9
3.1.1 Vzorci lesa	9
3.2 VTC POSTOPEK ZGOSTITVE	12
3.3 METODE	14
3.3.1 Opis termične modifikacije.....	14
3.3.2 Metoda določanja povratka tlačne deformacije	16
4 REZULTATI IN RAZPRAVA.....	18
4.1 VPLIV TERMIČNE MODIFIKACIJE NA LASTNOSTI LESA	18

4.2	IZGUBA MASE ZARADI TERMIČNE MODIFIKACIJE LESA	19
4.2.1	Izguba mase bukovih vzorcev.....	19
4.2.2	Izguba mase smrekovih vzorcev.....	20
4.3	POVRATEK TLAČNE DEFORMACIJE	22
4.3.1	Povratak tlačne deformacije pri bukovih vzorcih	23
4.3.2	Povratak tlačne deformacije pri smrekovih vzorcih	30
5	SKLEPI	39
6	POVZETEK.....	40
7	VIRI	41

ZAHVALA

PRILOGE

KAZALO PREGLEDNIC

str.

Preglednica 1: Število in oznake vzorcev kontrole ter zgoščenega lesa smrekovine in bukovine	11
Preglednica 2: Lastnosti VTC vzorcev in kontrolnih vzorcev bukovine in smrekovine.....	14
Preglednica 3: Izguba mase bukovih vzorcev v odvisnosti od temperature termične modifikacije.....	19
Preglednica 4: Izguba mase smrekovih vzorcev v odvisnosti od temperature termične modifikacije.....	20
Preglednica 5: Povratna tlačna deformacija za bukev, ki ni bila termično modificirana	23
Preglednica 6: Povratna tlačna deformacija za bukev, termično modificirano pri 190 °C .	24
Preglednica 7: Povratna tlačna deformacija za bukev, modificirano pri 200 °C.....	26
Preglednica 8: Povratna tlačna deformacija za bukev, termično modificirano pri 210 °C .	27
Preglednica 9: Povratna tlačna deformacija za bukev, termično modificirano pri 220 °C .	29
Preglednica 10: Povratna tlačna deformacija za termično nemodificirano smrekovino	30
Preglednica 11: Povratna tlačna deformacija za smrekovino, termično modificirano pri 190 °C	32
Preglednica 12: Povratna tlačna deformacija za smrekovino, termično modificirano pri 200 °C	33
Preglednica 13: Povratna tlačna deformacija za smrekovino, termično modificirano pri 210 °C	35
Preglednica 14: Povratna tlačna deformacija za smrekovino, termično modificirano pri 220 °C	36

KAZALO SLIK

	str.
Slika 1: 3-slojni VTC kompozit (Kutnar in Šernek, 2009)	8
Slika 2: Tehnica Sartorius (foto Matej Rozman).....	10
Slika 3: Elektronsko kljunasto merilo Sylvac (foto Matej Rozman).....	10
Slika 4: Videz oštevilčenih vzorcev pred termično modifikacijo (foto Matej Rozman).....	11
Slika 5: Sušilna komora Kambič (foto Matej Rozman)	12
Slika 6: Faze VTC procesa (Kutnar in sod., 2009).....	13
Slika 7: Komora za termično modifikacijo lesa (foto Matej Rozman).....	15
Slika 8: Proces namakanja v destilirani vodi (foto Matej Rozman)	16
Slika 9: Izgled vzorcev po namakanju v destilirani vodi (foto Matej Rozman).....	17
Slika 10: Izgled zgoščenih in modificiranih vzorcev po sušenju (foto Matej Rozman)	17
Slika 11: Prikaz barvne spremembe za vzorce smrekovine in bukovine po termični modifikaciji pri temperaturi 190 °C (na levi strani) in po modifikaciji pri 220 °C (na desni strani). (foto Matej Rozman).....	18
Slika 12: Izguba mase pri bukvi v odvisnosti od temperature termične modifikacije	19
Slika 13: Izguba mase pri smreki v odvisnosti od temperature termične modifikacije.....	21
Slika 14: Vzorci smrekovine in bukovine – povratna tlačna deformacija (foto Matej Rozman)	22
Slika 15: Grafični prikaz povratne tlačne deformacije (nabrek po namakanju) za bukev, ki ni bila termično modificirana	23

Slika 16: Grafični prikaz povratne tlačne deformacije (nabrek po namakanju) za bukev, termično modificirano pri 190 °C.....	25
Slika 17: Grafični prikaz povratne tlačne deformacije (nabrek po namakanju) za bukev, termično modificirano pri 200 °C.....	26
Slika 18: Grafični prikaz povratne tlačne deformacije (nabrek po namakanju) za bukev termično modificirani pri 210 °C	28
Slika 19: Grafični prikaz povratne tlačne deformacije (nabrek po namakanju) za bukev, termično modificirano pri 220°C.....	29
Slika 20: Grafični prikaz povratne tlačne deformacije (nabrek po namakanju) za termično nemodificirano smreko	31
Slika 21: Grafični prikaz povratne tlačne deformacije (nabrek po namakanju) za smrekovino, termično modificirano pri 190 °C.....	32
Slika 22: Grafični prikaz povratne tlačne deformacije (nabrek po namakanju) za smrekovino, termično modificirano pri 200 °C.....	34
Slika 23: Grafični prikaz povratne tlačne deformacije (nabrek po namakanju) za smrekovino, termično modificirano pri 210 °C.....	35
Slika 24: Grafični prikaz povratne tlačne deformacije (nabrek po namakanju) za smrekovino, termično modificirano pri 220 °C.....	37

KAZALO PRILOG

- Priloga 1: Povprečne vrednosti povratno tlačne deformacije modificiranih ter zgoščenih bukovih in smrekovih vzorcev
- Priloga 2: Podatki o povprečni masi in dimenzijah zgoščenih ter termično modificiranih vzorcev smrekovine in bukovine v suhem stanju
- Priloga 3: Podatki o povprečni masi in dimenzijah zgoščenih ter termično modificiranih vzorcev smrekovine in bukovine v vlažnem stanju
- Priloga 4: Standardni odkloni povratne tlačne deformacije modificiranih ter zgoščenih bukovih in smrekovih vzorcev
- Priloga 5: Standardni odkloni mas in dimenzij zgoščenih ter termično modificiranih vzorcev smrekovine in bukovine v vlažnem stanju

1 UVOD

Trajnostno gospodarjenje in racionalna raba lesa postajata vse pomembnejša, saj je zavedanje o razsežnosti okoljskih problemov vse večje. Les je naraven in obnovljiv material, kar povečuje njegovo okoljevarstveno vrednost in nas hkrati obvezuje k razvoju postopkov, ki nadgrajujejo možnost uporabe lesa. Prednosti lesa kot naravnega materiala poskušajmo izkoristiti, medtem ko je izziv zmanjšati pomanjkljivosti ali jih odpraviti z najrazličnejšimi tehnološkimi postopki.

Slovenija je gozdnata dežela, saj skoraj 60 % površine predstavljajo gozdovi. Največji odstotek predstavljajo manj odporne in manj uporabljane drevesne vrste, ki se v naši tradicionalni miselnosti in na podlagi dosedanjih znanj ne morejo v veliki meri uporabljati za izdelavo visokokakovostnih lesnih kompozitov. Srečujemo se s slabo trajnostjo nekaterih drevesnih vrst, slabšo odpornostjo, kot tudi z nizko gostoto in omejenimi mehanskimi lastnostmi. Zato stremimo k postopkom, s katerimi bi izboljšali lastnosti lesa in nadgradili dosedanje možnosti uporabe in zaščite.

V izogib uvozu večjih količin izbranega tropskega lesa, ki je v primerjavi z evropskimi vrstami bolj odporen in dosega večje gostote in možnosti uporabe, nas naše okolje sili k iskanju tehnik in postopkov, s katerimi bistveno izboljšamo lastnosti domačih lesnih vrst. Zaradi okoljevarstvene ozaveščenosti, se postopki zaščite lesa na osnovi tradicionalnih metod, ki temeljijo na zastrupljanju lesa za škodljivce, spreminjajo. Razvoj novih, okolju in človeku bolj prijaznih pristopov zaščite lesa je pomemben pri ohranjanju konkurenčnosti lesa z drugimi materiali. Novejše metode zaščite predstavljajo za okolje in ljudi prijaznejše načine pri uporabi zaščitenega lesa. Želja po dolgotrajni zaščiti brez izpiranja biocidov, izboljšanje mehanskih lastnosti in odpornost zaščitenega lesa pred atmosferilijami in UV sevanju so pripeljale do uporabe termične modifikacije lesa. Modificiranemu lesu znižamo vlažnost pod mejo, pri kateri lahko prihaja do okužbe in razkroja lesa. Zato je termična modifikacija eden od načinov, s katerim lahko izboljšamo dimenzijsko obstojnost lesa in odpornost na lesne glive. Ob tem je modificiran les mogoče reciklirati s postopki, ki so enostavnejši, cenejši in imajo manjši vpliv na onesnaženje okolja. Za izboljšanje mehanskih lastnosti lesa uporabljamo tudi postopke zgostitve, saj z naraščajočo gostoto lesa izboljšujemo njegove mehanske lastnosti (Kutnar, 2008).

VTC les ima zaradi dobrih mehanskih lastnosti in dobre dimenzijske stabilnosti velik pomen pri razvoju lesne industrije. Širšo uporabo omejuje v največji meri povratek tlačne deformacije, do katerega pride ob izpostavitvi VTC lesa območjem s povišano vlažnostjo (Kutnar in sod. 2008).

Namen naloge je bil preučiti možnosti uporabe termične modifikacije za povečanje dimenzijske stabilnosti zgoščenega lesa tudi v območjih s povišano relativno zračno vlago. Zato smo termično modificirali predhodno zgoščen les bukovine in smrekovine pri različnih temperaturah ter določili dimenzijsko stabilnost pri različnih temperaturah modificiranega zgoščenega lesa.

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

S postopkom viskoelastične toplotne zgostitve dosežemo spremembo lastnosti lesa. Predvsem je pri tem potrebno izpostaviti povečano gostoto lesa in s tem spremenjene anatomske, mehanske in fizikalne lastnosti (Kutnar in Šernek, 2009). Širšo uporabo lesa omejuje v največji meri povratek tlačne deformacije zgoščenega lesa v okolju s povišano relativno zračno vlago (Kutnar in sod. 2008).

Po drugi strani je termična modifikacija eden od načinov, s katerim lahko izboljšamo dimenzijsko stabilnost (Hill, 2006). Zato predvidevamo, da lahko z uporabo termične modifikacije na zgoščenem lesu dosežemo sinergijske učinke in proizvedemo visoko stabilen zgoščen les.

Viskoelastično toplotno zgoščen les (VTC les) ima zaradi visoke gostote in s tem izboljšanih mehanskih lastnosti velik potencial pri razvoju visoko kakovostnih lesnih produktov. Širšo uporabo omejuje v največji meri povratek tlačne deformacije, do katerega pride ob izpostavitvi VTC lesa območjem s povišano vlažnostjo. Termična modifikacija pa je eden od načinov, s katerim lahko izboljšamo dimenzijsko obstojnost lesa in odpornost na lesne glive, vendar po drugi strani negativno vpliva na mehanske lastnosti. Načrtujemo, da bomo s kombinacijo zgostitve in termične modifikacije lesa dosegli sinergijske učinke in pridobili material, ki bo ohranil pozitivne lastnosti obeh postopkov. V prvi stopnji smo se osredotočili na največjo pomanjkljivost, povratek tlačne deformacije.

1.2 CILJI NALOGE

Cilj naloge je:

- izvesti termično modifikacijo viskoelastično toplotno zgoščenega lesa in določiti vpliv temperature termične modifikacije na izgubo mase VTC lesa.
- določiti optimalno temperaturo, ki pri najmanjši izgubi mase med postopkom termične modifikacije VTC lesa zmanjša povratek tlačne deformacije VTC lesa.
- preveriti vpliv različne temperature termične modifikacije za različni drevesni vrsti, natančneje za vzorce smrekovine (*Picea abies*) in bukovine (*Fagus sylvatica*).

1.3 HIPOTEZE

Termična modifikacija lesa je že dolgo poznan postopek, s katerim izboljšamo dimenzijsko obstojnost lesa. Zato lahko hkrati zmanjšamo tudi povratek tlačne deformacije VTC lesa. Predvidevamo, da bo izguba mase VTC lesa po termični modifikaciji primerljiva z izgubo mase nezgoščenih vzorcev.

2 PREGLED OBJAV

2.1 LESNA STRUKTURA

2.1.1 Bukev, *Fagus sylvatica* L.

Bukev je naš najbolj razširjen listavec in naša najpomembnejša lesna vrsta. Razširjena je po vsej Sloveniji, ni je le v poplavnih nižinah in sušnih legah. Pojavlja se v številnih družbah in je z 32 % lesne zaloge (Brus, 2011) skupaj s smreko naša najpogostejša drevesna vrsta.

Bukev dosega višine do 30 m, pa tudi preko 40 m in premere 1 m do 1,5 m. Les je rdečkastobel, normalno brez obarvane jedrovine.

Branike so razločne. Kasni les z manj trahejami je nekoliko temnejši od ranega. Zelo značilni so številni široki trakovi, ki so na tangencialni površini vidni kot rdečkasta vretenca, na radialni pa kot očitna, do več milimetrov visoka zrcalca, ki zelo vplivajo na videz lesa. Plamenast (tangencialna površina) in progast (radialna površina) videz nista tako izrazita kot pri iglavcih. Bukovina nima specifičnega vonja ali okusa.

Les bukve je trd in gost les (gostota ρ_0 490...680...880 kg/m³) in se zelo krči in nabreka. Stabilnost je neugodna, trdnostne lastnosti so glede na gostoto nadpovprečno visoke (npr. dobra upogibna trdnost), elastičnost je nižja. Les je zelo žilav, malo elastičen in zelo trden. Dobro se cepi in predvsem po parjenju se dobro upogiba. Nezaščiten bukovina je podvržena okužbi z glivami ter insekti in ima slabo naravno odpornost, zato je potrebna hitra in pravilna manipulacija po poseku. Impregvirani bukovi železniški pragovi dosegajo srednjo življenjsko dobo najmanj 40 let. Delež juvenilnega lesa je zanemarljiv. Možen je obilnejši pojav tenzijskega lesa. Notranje napetosti so lahko znatne, kar ima za posledico zvijanje in pokanje lesa. Zaradi visoke gostote in nagnjenosti k distorzijam, zvijanju, pokanju in nastanku rjavordečih, rdečemu srcu podobnih obarvanj, se za sušenje bukovine priporoča blag režim sušenja. Bukovino parijo zaradi zmanjšanja notranjih napetosti in izenačenja barve. Tako se po parjenju zmanjša nevarnost pokanja in zvijanja, les pa dobi enakomerno rdečkasto barvo. Les mora biti pred parjenjem vlažen, sicer obstaja nevarnost pojava madežev. Ročno in strojno je bukovino mogoče lepo obdelati, vendar sta zaradi visoke gostote lesa krhanje orodij in poraba energije nekoliko večja. Površinsko se brez težav obdeluje z vsemi komercialnimi laki. Bukovino je mogoče izjemno dobro kriviti (Čufar, 2006).

2.1.2 Smreka, *Picea abies* Karst.

Smreka je najbolj številčna drevesna vrsta pri nas. Nekoč ni bila tako razširjena in je poraščala le gorske predele in hladne doline. V drugi polovici 19. stoletja so jo začeli masovno saditi tudi drugod in danes porašča skoraj vso Slovenijo, z izjemo suhega

obalnega dela in močvirnatih delov Panonske nižine. V lesni zalogi naših gozdov ima okoli 32-odstotni delež.

Za smreko je značilno ravno, vitko, polnolesno in dokaj cilindrično deblo z malo vejami. Maksimalne višine so 30 m do 50 m, izjemoma tudi do 60 m, premeri pa do 1,2 m. Smrekovina ima neobarvano jedrovino, zato se beljava in jedrovina barvno ne ločita. Les je večinoma rumenkastobel, v starosti tudi rumenkastorjav. Branike od ozkih do zelo širokih, so razločne. Prehod iz svetlega, belkastega ranega lesa do rdečkastorumenega kasnega lesa je večinoma postopen. Poskobljane površine imajo svilnat lesk. Svež les diši po smoli. Pogost je pojav smolnih žepkov. Smrekovina je zelo podobna jelovini, ki nima smolnih kanalov in je bolj bela, pogosto z modrikastim odtenkom. Les je mehek in srednje gost (gostota ρ_0 300...430...640 kg/m³). Je elastična in trdna, suši se brez težav, lahko se cepi in lepo se lušči. Les je le malo nagnjen k zvijanju in pokanju in se z lahkoto obdeluje z ročnimi orodji ali strojno. Brez težav se površinsko obdeluje z vsemi komercialnimi laki. Lepi se dobro. Zaradi nizke vsebnosti ekstraktivov je les kemično komajda aktiven. Ob stiku z vodo, kislinami, bazami, alkoholom, maščobami, olji, bakrom ali medenino ne pride do obarvanja. Nezaščiten les je le zmerno odporen proti atmosferilijam in neodporen proti insektom in glivam. Pri uporabi na prostem mora biti zato smrekovina pravilno vgrajena in zaščiten oz. površinsko obdelana. V primerjavi z borovino se bistveno slabše impregnira. Beljava svežega lesa se lahko v kotlih pod pritiskom zadovoljivo impregnira z vodotopnimi, suha beljava pa z oljnimi sredstvi, zato je mogoče tudi ob neugodnih pogojih doseči večjo trajnost (Čufar, 2006).

2.2 TERMIČNA MODIFIKACIJA

Termična modifikacija je že dolgo poznana kot metoda, s katero izboljšamo lastnosti lesa. Eden prvih raziskovalcev termične obdelave lesa je bil Tiemann, ki je že leta 1915 objavil, da se lesu, ki je izpostavljen visokim temperaturam, spremenijo fizikalne lastnosti (Hill, 2006; Gorišek, 2007).

V Evropi so bili razviti in komercializirani štirje postopki termične modifikacije: na Finskem Thermowood, na Nizozemskem Plato Wood, v Franciji Retification in v Nemčiji Oil Heat Treatment (Militz, 2002; Homan in Jorissen, 2004). Vedno bolj pa se uveljavlja tudi postopek, ki temelji na intaktnem vakuumu, ki so ga komercializirali v podjetju Silvaproduct, d. o. o. (Silvaproduct, 2014).

Termična modifikacija lesa z dovajanjem toplote spremeni strukturo celičnih sten. Stene lesnih celic so sestavljene iz celuloze, hemiceluloze in lignina. Z modifikacijo teh molekul se zmanjša zmožnost vpijanja vlage, s tem pa tudi nabrekanje in krčenje. Posledično se zmanjša možnost okužbe z lesnimi glivami (Hill, 2006). Po drugi strani pa ima termično modificiran les pomembno slabost. Poslabšajo se mu mehanske lastnosti, kar omejuje njegovo uporabo v gradbeništvu. Zato ga večinoma uporabljamo za izdelke, pri katerih nosilnost nima odločilnega pomena: stenske in talne obloge, ograje, vrtno pohištvo, zvočne bariere ob avtocestah, savne ... (Humar, 2009). Zaradi spremenjene kemične zgradbe glive

ali insekti modificiranega lesa ne prepoznajo več kot vir hrane. Z modifikacijo lignina lahko povečamo tudi odpornost lesa proti razgradnji z UV-žarki. Postopki termične modifikacije se največkrat uporabljajo za les manj odpornih drevesnih vrst (smreke, topola, zelenega bora, breze ...).

Termična modifikacija lesa v splošnem poteka pri temperaturah med 160 °C in 260 °C (Militz, 2002). V primeru, da so temperature pod 140 °C, se material le malo spremeni, ko pa so temperature lesa nad 300 °C, pride do znatne degradacije materiala in les povsem poogleni (Hill, 2006).

Temperatura med postopkom bistveno vpliva na barvo lesa in druge pomembne lastnosti. Med segrevanjem pri visokih temperaturah moramo poskrbeti, da kisik ni prisoten, zato les segrevamo v različnih medijih: vodni pari, vročem olju ali kakem drugem mediju. Rezultat teh procesov je bolj obstojen material z lepšim videzom in povečano odpornostjo proti lesnim škodljivcem. Modificiran les se bistveno manj krči, nabreka in poka kot neobdelan. Manjše pokanje prispeva k boljši trajnosti, saj v razpokah ne zastaja voda. Zaradi manjšega delovanja lesa so tudi površinski premazi na njem obstojnejši. Nižja ravnovesna vlažnost prav tako izboljša odpornost proti lesnim glivam (Hill, 2006).

2.3 PARAMETRI TERMIČNE MODIFIKACIJE

2.3.1 Temperatura in trajanje postopka modifikacije

Temperatura izrazito vpliva na lastnosti modificiranega lesa. Z višjo temperaturo dosežemo boljšo odpornost lesa proti glivam in boljšo dimenzijsko stabilnost. Slaba stran pa je, da se poslabšajo mehanske lastnosti, predvsem udarna žilavost. Zaradi tega je potrebno izbrati kompromis med temperaturo modifikacije glede na čas modifikacije in namenom uporabe modificiranega lesa (Patzelt in sod., 2002).

Proces termične modifikacije je sestavljen iz treh faz:

- segrevanje (zvišanje temperature od 100 °C do 150 °C)
- modifikacija (konstantna temperatura od 150 °C do 260 °C)
- ohlajanje (znižanje temperature na temperaturo okolice in navlaževanje lesa)

Ko se les segreva, pride do spremembe mase, sprva zaradi difuzije vezane vode in hlapnih ekstraktivov. S povečevanjem temperature se začenjajo odvijati kemijske spremembe v celičnih stenah, čemur sledi nadaljnja izguba mase in sprememba barve lesa (Hill, 2006).

2.3.2 Lesna vrsta

Za termično modifikacijo se uporablja predvsem cenejše, manj odporne drevesne vrste. Vrste, ki se pogosto uporabljajo, so: smreka, jelka, bor, topol, breza in evropska trepetlika.

Proces termične modifikacije je za vsako lesno vrsto različen. Končni rezultat je zaradi različne kemijske sestave in anatomske zgradbe posamezne lesne vrste pri vsaki lesni vrsti drugačen. Glede na namen uporabe se običajno za iglavce uporablja strožji režim modifikacije kot za listavce, saj les iglavcev uporabljamo v zunanjih konstrukcijah, kjer je potrebna zaščita pred vlago. Listavci pa se pogosteje vgrajujejo v notranje prostore in jih velikokrat modificiramo zaradi estetskih razlogov (temnejša barva) (Syrjanen in Oy, 2001). Termična modifikacija je relativno drag postopek, zato je pomembna ustrezna kvaliteta lesa. Problem predstavljajo predvsem grče, nepravilna orientiranost, rastne napetosti in neprimerna vlažnost. Zato je pomembno, kako je les razžagan. Priporočljivo je, da so letnice pod kotom 45° , saj so tako deformacije manjše.

2.4 RELAVANTNE LASTNOSTI TERMIČNO MODIFICIRANEGA LESA

2.4.1 Izguba mase

Izguba mase je ena najpomembnejših sprememb termične modifikacije lesa in je pogosto pokazatelj kakovosti in stopnje modifikacije (Estevens in Pereira, 2009). Z izgubo mase pride tudi do zmanjšanja volumna in – če se postopek ne vodi pravilno – tudi do deformacije materiala.

Specifična gostota se zmanjšuje z višanjem temperature in trajanjem postopka. Izguba mase je večja, če postopek izvajamo ob prisotnosti kisika, zato se postopki izvajajo v čim bolj anoksični atmosferi, ki jo zagotovimo s segrevanjem v olju, nasičeni vodni pari, dušikovi atmosferi ... (Hill, 2006).

Patzelt in sodelavci (2002) so ugotovili, da imajo bukovi vzorci večjo izgubo mase kot smrekovi, če so modificirani pri enakih pogojih modifikacije.

Vzorci, modificirani pri nižji temperaturi, kljub daljšim časom trajanja modifikacije ne dosežejo tako velike izgube mase kot tisti pri višji temperaturi. Izguba mase je odvisna od časa trajanja modifikacije, kisika in temperature (Kariž in Šernek, 2008).

Welzbacher in sodelavci (2007) navajajo, da je izguba mase smrekovega lesa pri 240°C in treh urah trajanja modifikacije znašala 12,5 %. Da se doseže enak rezultat pri nižji temperaturi, je potreben daljši čas trajanja modifikacije, in sicer pri 220°C 8 ur, pri 210°C 14 ur, pri 200°C 20 ur, ter pri 180°C 72 ur.

2.5 ZGOŠČEVANJE LESA

2.5.1 VTC postopek zgostitve

Zgoščevanje omogoča modifikacijo nizko gostotnih in komercialno nezanimivih vrst v kakovostne produkte. Sama zgodovina zgoščevanja lesa sega v leto 1886, s prvo idejo o zgoščevanju lesa v radialni smeri (Kollmann in Cote, 1968). Prvi postopek zgoščevanja s stiskanjem lesa v prečni smeri je bil »Staypak«. V Evropi je bil takšen postopek prvič

izveden leta 1930 pod imenom »Lignostone«. Sledili so mu »Lignofol«, »Jicwood« in »Jablo« (Kollmann in sod., 1975).

Postopka Staypak in Lignostone sta izboljšala določene mehanske lastnosti, vendar je bil proizvod zelo nestabilen, saj je ob navlaževanju in segrevanju lahko prišlo tudi do 100 % povrnitve tlačne deformacije. Zato so se uporabljali različni kemični, fizikalni in mehanski postopki stabilizacije tlačne deformacije (Inoue in sod., 1993). Čeprav je med vsemi postopki dimenzijske stabilizacije zgoščenega lesa temperaturni postopek najbolj učinkovit, traja pri 180 °C 20 ur in pri 200 °C 5 ur (Inoue in sod., 1993).

Leta 1997 je bil patentiran nov postopek zgoščevanja, imenovan Calignum proces, ki poteka v stiskalnici, ki ima na eni strani ravno ploščo, na drugi stani pa gumijasto opno, v katero se črpa olje in s tem doseže pritiske do 140 MPa. Pri tem postopku se les obdeluje pri sobni temperaturi in s tlaki nad 80 MPa, zgoščen les pa dobi nepravilno obliko (Kutnar in sod., 2008).

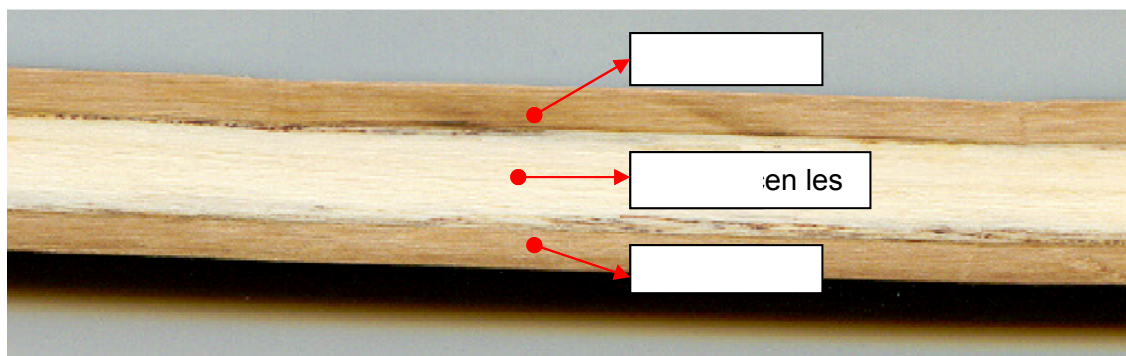
Postopek, po katerem so bili zgoščeni tudi naši vzorci lesa in je novejši, pa se imenuje viskoelastično toplotno zgoščevanje (Viscoelastic Thermal Compressed, VTC), ki sta ga razvila Kamke in Sizemore (2008).

Namensko je bil postopek razvit za izrabo hitrorastočih nizko-gostotnih drevesnih vrst, uporablja pa se tudi za druge drevesne vrste, različnih gostot in vlažnosti. Postopek je namenjen uporabi v lesnih kompozitih, kot so večslojne plošče, ki bi bile v veliki meri lahko uporabljene v konstrukcijskih aplikacijah, npr. 3-slojni kompoziti z uporabo zgoščenega lesa v zunanjih slojih, medtem ko je za sredico uporabljen les z nizko gostoto in nizko togostjo (Kutnar in sod., 2008).

Kutnar in Kamke (2012) sta proučevala vpliv parametrov zgoščevanja na lastnosti proizvedenega lesa, predvsem z namenom iskanja optimalnih pogojev za proizvodnjo visoko stabilnega zgoščenega lesa. Postopki zgoščevanja navadno sledijo naslednjim korakom (Morsing, 2000):

- mehčanje in plastificiranje celične stene,
- zgoščevanje pravokotno na obdelovanec,
- ohlajevanje in sušenje v deformiranem stanju,
- fiksacija deformacije.

S kombinacijo pare in toplote ter mehanskim stiskanjem se poveča gostota lesa za 100 % do 300 %. Visoka temperatura in visok tlak vodne pare med postopkom stiskanja plastificirata les in preprečita lom celičnih sten pod ekstremnimi napetostmi. VTC les ima spremenjene anatomske, fizikalne in mehanske lastnosti. Zaradi visoke gostote in s tem izboljšanih mehanskih lastnosti ter dobre dimenzijske stabilnosti bi lahko imel VTC les velik pomen v prihodnjem razvoju lesne industrije. Postopek VTC namreč omogoča modifikacijo komercialno nezanimivih lesnih vrst z nizko gostoto in njihovo uporabo za najrazličnejše kompozite (slika 1) (Kutnar in Šernek, 2009).



Slika 1: 3-slojni VTC kompozit (Kutnar in Šernek, 2009)

Viskoelastična toplotna zgostitev lesa uporablja ustrezno kombinacijo temperature in vodne pare, ki med postopkom stiskanja plastificirata les in preprečita lom celičnih sten pod ekstremnimi napetostmi. Višja je stopnja zgostitve, večje je zmanjšanje prostornine praznih prostorov – lumnov trahej in vlaken. VTC proces zgostitve lesa spremeni mehanske, morfološke in površinske lastnosti VTC lesa, vendar nima negativnega vpliva na njegov adhezijski potencial (Kutnar, 2008).

2.6 LASTNOSTI VTC LESA

Za učinkovito izrabo zgoščenega lesa v lesnih kompozitih so bistvene njegove mehanske in lepilne lastnosti. Zgostitev lesa je rezultat zmanjšanja praznih prostorov v celični zgradbi lesa. Ker sta gibanje in izguba vlažnosti ključnega pomena, so za zgoščevanje bolj uporabni elementi majhnih debelin, saj se hitreje uravnovesijo v temperaturnih in vlažnostih pogojih, ki se uporabljajo v postopku zgoščevanja (Kutnar in sod., 2008).

Debeline obdelovancev npr. pri VTC postopku se predvidoma gibljejo od 3 mm do 12 mm. Vlažnost lesa naj bi bila od 15 % do 30 %, vendar je lahko tudi večja (Kutnar in sod., 2008a). Med procesom se uporablja para pod povišanim tlakom, s katero se zagotovi, da so obdelovanci v območju nad točko steklastega prehoda, kar omogoča proizvodnjo izdelkov z visoko gostoto brez poškodb celičnih sten (Kutnar in sod., 2009). Prav tako je tudi zelo pomembna obstojnost tlačne deformacije po izpostavitvi visokim vlažnostim. Raziskovalci so dokazali, da lahko ireverzibilno nabrekanje eliminiramo s parjenjem in segrevanjem ter tako dosežemo trajno fiksacijo tlačne deformacije (Inoue in sod., 1993).

3 MATERIAL IN METODE DELA

3.1 MATERIALI

3.1.1 Vzorci lesa

Za potrebe raziskave smo uporabili vzorce smrekovine (*Picea abies*) in bukovine (*Fagus sylvatica*), ki sta bili predhodno zgoščeni s postopkom VTC. Postopek zgoščevanja je bil izveden v laboratoriju na Oregon State University v ZDA.

Vzorci so bili najprej zračno sušeni in nato preneseni v nadzorovano okolje (20 °C, 65 % relativna zračna vlažnost), dokler ni bila vzpostavljena ravnovesna vlažnost 12 %. Vzorčni les je bil nato razrezan na debelino 6 mm, dolžino 500 mm in širino 240 mm. Vzorci so bili brez napak, grč, debelina pa je bila radialno-tangencialno usmerjena.

Navedene vzorce dimenzije 6 mm x 10 mm x 30 mm smo nato v Sloveniji pregledali in selekcionirali glede na vidne anomalije, ki so nastale pri zgoščevanju. Za nadaljnjo uporabo vzorcev pri termični modifikaciji smo izbrane vzorce oštevilčili z oznakami SC–smreka kontrola, BC– bukev kontrola, SA– zgoščena smreka, BA– zgoščena bukev, kar nam je omogočilo nadaljnjo sledljivost in prepoznavanje pri meritvah.

V raziskavah smo uporabili 150 vzorcev smrekovine in 150 vzorcev bukovine (preglednica 1, slika 4). Za potrebe kontrole smo pripravili vzorce smreke (*Picea abies*) in bukve (*Fagus sylvatica*). Dimenzije vzorcev so bile 30 mm × 10 mm × 6 mm, poskobljani so bili na debelinskem skobeljnem stroju, dolžinsko razžagani na krožnem žagalnem stroju in po robovih ročno obrušeni, da smo odstranili drobne zatrganine. Kontrolni vzorci so nam služili kot referenčni vzorci lesa, s katerimi smo kontrolirali povratno tlačno deformacijo VTC zgoščenega lesa. Opisane vzorce smo najprej sušili v sušilni komori proizvajalca Kambič Semič (slika 3) pri temperaturi 103 °C ± 1 °C in 24 ur do 0 % lesne vlažnosti. Sledilo je uravnotežanje vzorcev na ravnovesno vlažnost v komori s konstantno relativno zračno vlažnostjo 65 % in 20 °C. Tako pripravljenim vzorcem smo določili maso s tehtnico proizvajalca Sartorius (slika 2). Vsem vzorcem smo izmerili še dolžino, širino in debelino, kar smo opravili z elektronskim kljunastim merilom Sylvac (slika 3). Po določeni masi in na podlagi meritev dimenzij smo izračunali gostoto vzorcev.



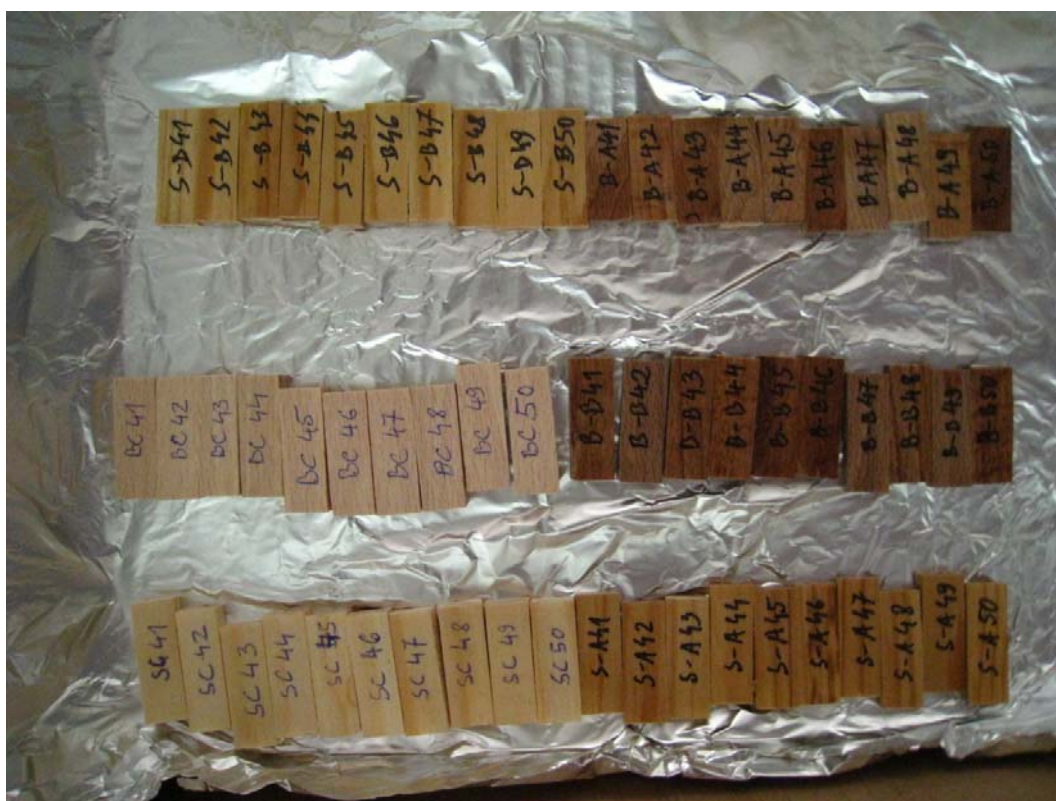
Slika 2: Tehtnica Sartorius (foto Matej Rozman)



Slika 3: Elektronsko kljunasto merilo Sylvac (foto Matej Rozman)

Preglednica 1.: Število in oznake vzorcev kontrole ter zgoščenega lesa smrekovine in bukovine

	Temperatura				
	25 °C (kos)	190 °C (kos)	200 °C (kos)	210 °C (kos)	220 °C (kos)
Bukev					
Kontrola (BC)	10	10	10	10	10
Zgostitev 1 (B-A)	10	10	10	10	10
Zgostitev 2 (B-B)	10	10	10	10	10
Smreka					
Kontrola (SC)	10	10	10	10	10
Zgostitev 1 (S-A)	10	10	10	10	10
Zgostitev 2 (S-B)	10	10	10	10	10
SKUPAJ	60	60	60	60	60



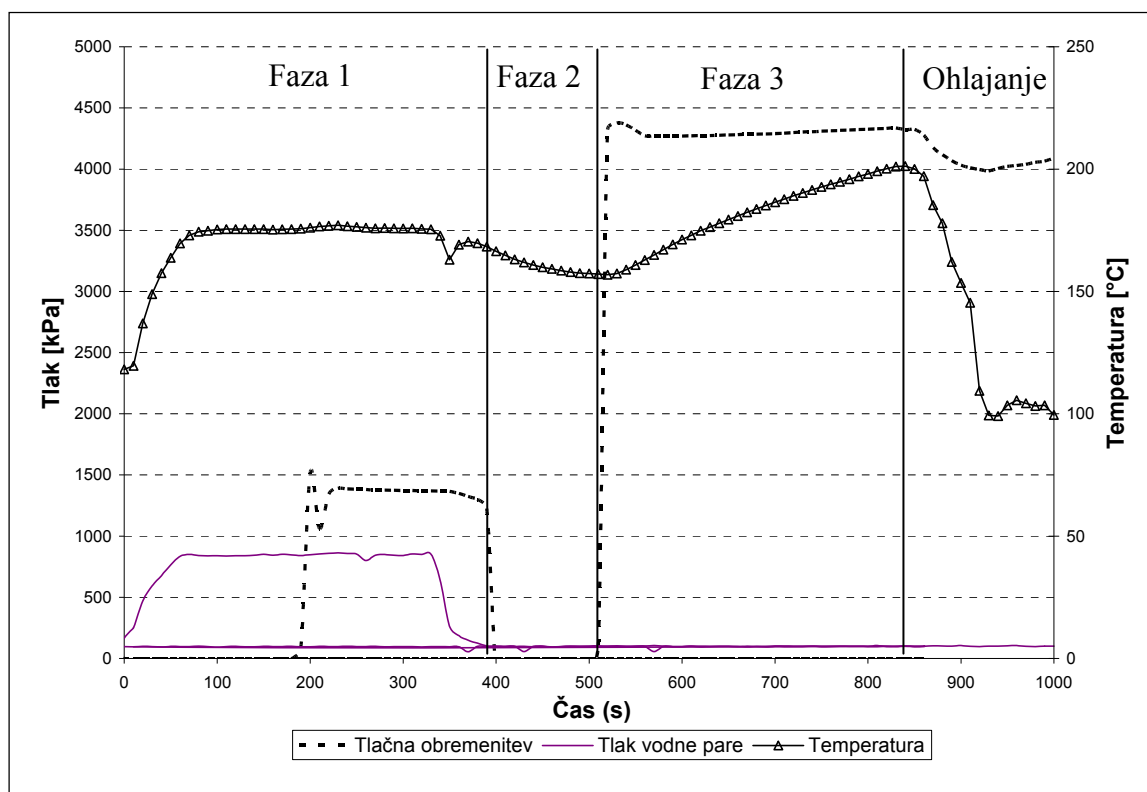
Slika 4: Videz oštevilčenih vzorcev pred termično modifikacijo (foto Matej Rozman)



Slika 5: Sušilna komora Kambič (foto Matej Rozman)

3.2 VTC POSTOPEK ZGOSTITVE

Proces zgoščevanja po metodi VTC je potekal najprej v tlačni posodi, opremljeni z ogrevano hidravlično stiskalnico, pri temperaturi 170 °C. Postopek VTC je sestavljen iz treh glavnih faz (slika 6), v katerih s kombinacijo pare in toplote ter mehanskim stiskanjem povečamo gostoto lesa (Kutnar in sod., 2009).



Slika 6: Faze VTC procesa (Kutnar in sod., 2009)

Celoten postopek zgostitve traja 15 min. V začetni fazi je potekalo parjenje vzorcev lesa pri $860 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, temu sledi izpostavljenost tlaku vodne pare brez mehanskega tlaka za 3 min. Po procesu sprostitve tlaka je bila ponovno uvedena tlačna sila $1380 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ za dodatni 2 min. V 2. fazi poteka uravnovešanje brez mehanskega tlaka, ki traja 100 s. Preizkušancu se v fazi uravnovešanja zniža vlažnost, prav tako pade tudi temperatura. Faza 3 se začne z vzpostavitvijo tlačne sile $4480 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$. Temperatura se dvigne z začetne 170°C na 200°C , ki so ji bili preizkušanci izpostavljeni 300 s. Temu sledi ohlajevanje pod tlačno obremenitvijo do temperature 100°C , kar je trajalo 30 sekund.

Preizkušanci so bili stisnjeni do različnih končnih debelin, tako smo dobili vzorce z različnimi stopnjami zgostitve (zgostitev 1 in zgostitev 2). Gostota VTC vzorcev in njihove oznake so prikazane v preglednici 2.

Preglednica 2: Lastnosti VTC vzorcev in kontrolnih vzorcev bukovine in smrekovine

	Začetna gostota (D1) MC = 0 % (g·cm ⁻³)	Gostota po stiskanju (D2) MC = 0 % (g·cm ⁻³)	Razmerje zgostitve (D2-D1)/D1
Bukev			
Zgostitev 1 (B-A)	0,677	1,198	0,433
Zgostitev 2 (B-B)	0,683	1,075	0,365
Kontrola (BC)	0,680	-	-
Smreka			
Zgostitev 1 (S-A)	0,400	0,948	0,578
Zgostitev 2 (S-B)	0,398	0,833	0,523
Kontrola (SC)	0,398	-	-

Gostoto lesa smo izračunali iz podatkov o volumnu in masi vzorcev v absolutno suhem stanju. Gostota lesa, na nek način opisuje, kako zgoščen je bil les. Les z višjo gostoto je bolj zgoščen.

3.3 METODE

3.3.1 Opis termične modifikacije

Testne vzorce smrekovine in bukovine smo termično modificirali z začetnim vakuumom po postopku, ki je bil razviti na Biotehniški fakulteti in v skladu s patentno prijavo (Pohleven in Rep 2004). Pred toplotno obdelavo so bili vsi vzorci posušeni v komori pri temperaturi 103 ± 2 °C, na podlagi česar smo določili izgubo mase po termični modifikaciji. Izgubo mase smo izračunali po naslednji formuli (1).

$$m_{\text{izgube}} = \frac{m_0 - m_2}{m_2} * 100 \text{ [%]} \quad [\text{g}] \quad \dots (1)$$

Kjer je:

m_{izgube} – izguba mase vzorcev [g]

m_0 – masa absolutno suhih vzorcev [g]

m_2 – masa absolutno suhih vzorcev po modifikaciji [g]

Postopek termične modifikacije je potekal v treh fazah. Suhe vzorce smo dali v tlačno komoro Kambič (slika 7) s 500 ml destilirane vode, v kateri je bil dosežen 90-odstotni vakuum. Vzorce smo nato segreli do ciljne temperature in v tej fazi se je tlak v komori povečal do 900 mbar.

V drugi fazi so bili vzorci toplotno obdelani pri konstantni temperaturi termične modifikacije treh ur pri konstantnem tlaku 900 mbar. Uporabili smo naslednje temperature modifikacije: 190 °C, 200 °C, 210 °C in 220 °C.

V tretji fazi je sledilo ohlajanje vzorcev. Pred koncem te faze smo za 15 min vzorce izpostavili vakuumu in temperaturi 100 °C. Celoten postopek je trajal od 18 ur do 20 ur, odvisno od temperature modifikacije. Po toplotni obdelavi smo vzorce ponovno posušili v sušilni komori in izračunali izgubo mase zaradi toplotne modifikacije. Na podlagi podatkov o masi in meritvah dimenzij smo izračunali gostoto vzorcev po termični modifikaciji.



Slika 7: Komora za termično modifikacijo lesa (foto Matej Rozman)

3.3.2 Metoda določanja povratka tlačne deformacije

Za merjenje povratne tlačne deformacije smo predhodno termično modificirane vzorce lesa sušili v sušilni komori pri 103 °C 24 ur, do absolutno suhega stanja in suhe dimenzije. Vzorce smo nato namakali v destilirani vodi za 24 ur in ponovno sušili v sušilni komori pri 103 °C 24 ur do absolutno suhega stanja in suhe dimenzije. Opisani postopek predstavlja en cikel in smo ga ponovili petkrat, pet mokrih in pet suhih ciklov.

Vzorcem lesa smo po vsakem postopku z elektronskim kljunastim merilom izmerili debelino, in sicer pred namakanjem, po namakanju v destilirani vodi ter po sušenju v sušilni komori. Povratek tlačne deformacije smo izračunali z naslednjo enačbo (2):

$$\text{Povratna tlačna deformacija} = [(t_s - t_c) / (t_i - t_c)] * 100 [\%] \quad \dots (2)$$

Kjer je:

t_s – debelina vzorca po namakanju [mm]

t_c – debelina absolutno suhega stisnjenega vzorca [mm]

t_i – debelina nestisnjenega začetnega vzorca [mm]



Slika 8: Proces namakanja v destilirani vodi (foto Matej Rozman)



Slika 9: Izgled vzorcev po namakanju v destilirani vodi (foto Matej Rozman)



Slika 10: Izgled zgoščenih in modificiranih vzorcev po sušenju (foto Matej Rozman)

4 REZULTATI IN RAZPRAVA

4.1 Vpliv termične modifikacije na lastnosti lesa

Termična modifikacija vpliva na lastnosti lesa. Eden najpomembnejših in najlažje določljivih pokazateljev je izguba mase. Altgen in sodelavci (2012) navajajo, da je izguba mase v odvisnosti od trajanja in temperature modifikacije. Višja temperatura modifikacije se odraža v večji izgubi mase. To povezanost smo opazili tudi v tej raziskavi. Izguba mase narašča s temperaturo in je največja pri 220 °C.

Patzelt in sodelavci (2002) so ugotovili, da imajo bukovi vzorci večjo izgubo mase kot smrekovi, če so modificirani pri enakih pogojih modifikacije. Ta povezava je opazna tudi pri vzorcih naše raziskave. Tako so bukovi vzorci, modificirani pri 220 °C, izgubili 11,9 % smrekovi pa 6,7 % mase. Les med postopkom termične modifikacije potemni. Intenzivnost potemnitve je predvsem odvisna od temperature modifikacije, nekoliko manj od časa, v manjši meri pa na spremembo barve vpliva drevesna vrsta. Z uravnavanjem stopnje termične modifikacije lahko dobimo želeni odtenek barve, kar s pridom izkoriščajo v proizvodnji notranjih talnih oblog iz modificiranega lesa listavcev, s termično modifikacijo pri temperaturi 220 °C (Rep, 2008). Tudi v našem primeru je vidna potemnitev, predvsem pri vzorcih bukovine (slika 11).



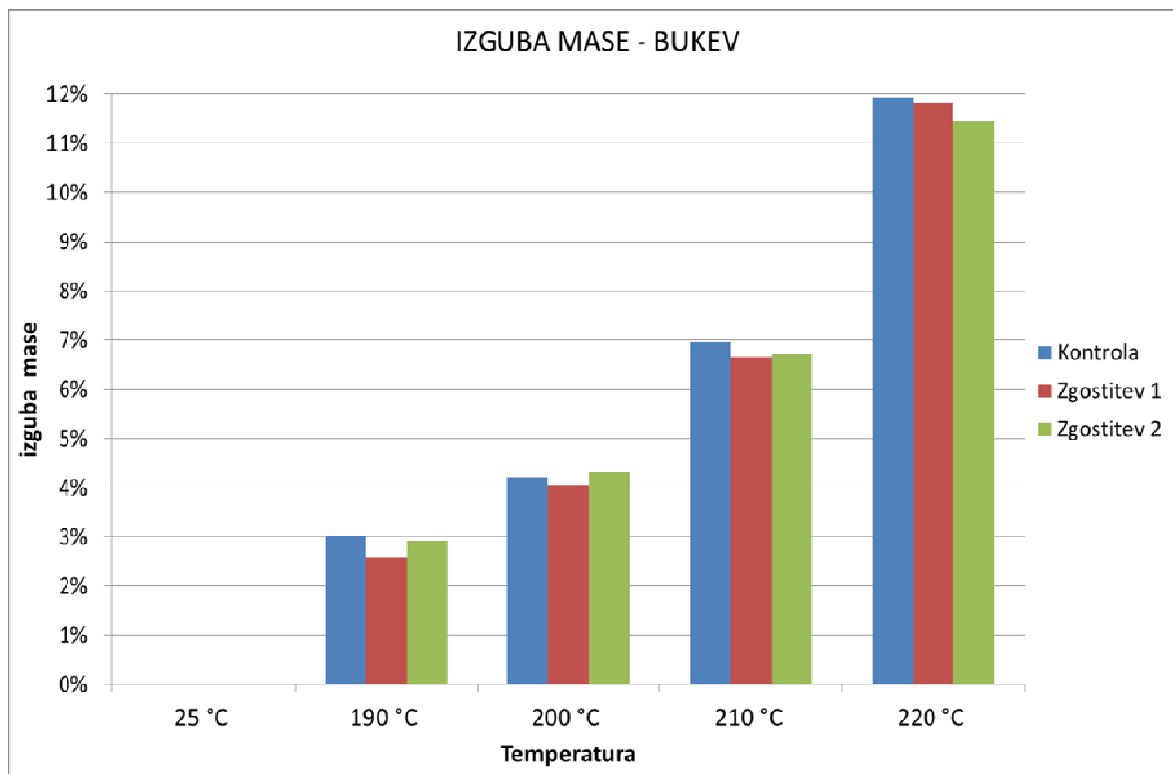
Slika 11: Prikaz barvne spremembe za vzorce smrekovine in bukovine po termični modifikaciji pri temperaturi 190 °C (na levi strani) in po modifikaciji pri 220 °C (na desni strani). (foto Matej Rozman)

4.2 IZGUBA MASE ZARADI TERMIČNE MODIFIKACIJE LESA

4.2.1 Izguba mase bukovih vzorcev

Preglednica 3: Izguba mase bukovih vzorcev v odvisnosti od temperature termične modifikacije

TEMPERATURA					
	25 °C	190 °C	200 °C	210 °C	220 °C
Kontrola	0,0 %	3,0 %	4,2 %	7,0 %	11,9 %
Zgostitev 1	0,0 %	2,6 %	4,0 %	6,7 %	11,8 %
Zgostitev 2	0,0 %	2,9 %	4,3 %	6,7 %	11,5 %



Slika 12: Izguba mase pri bukvi v odvisnosti od temperature termične modifikacije

Vzorce bukovine (preglednica 3, slika 12) smo termično modificirali pri različnih temperaturah (190 °C, 200 °C, 210 °C, 220 °C). Med seboj smo primerjali vzorce

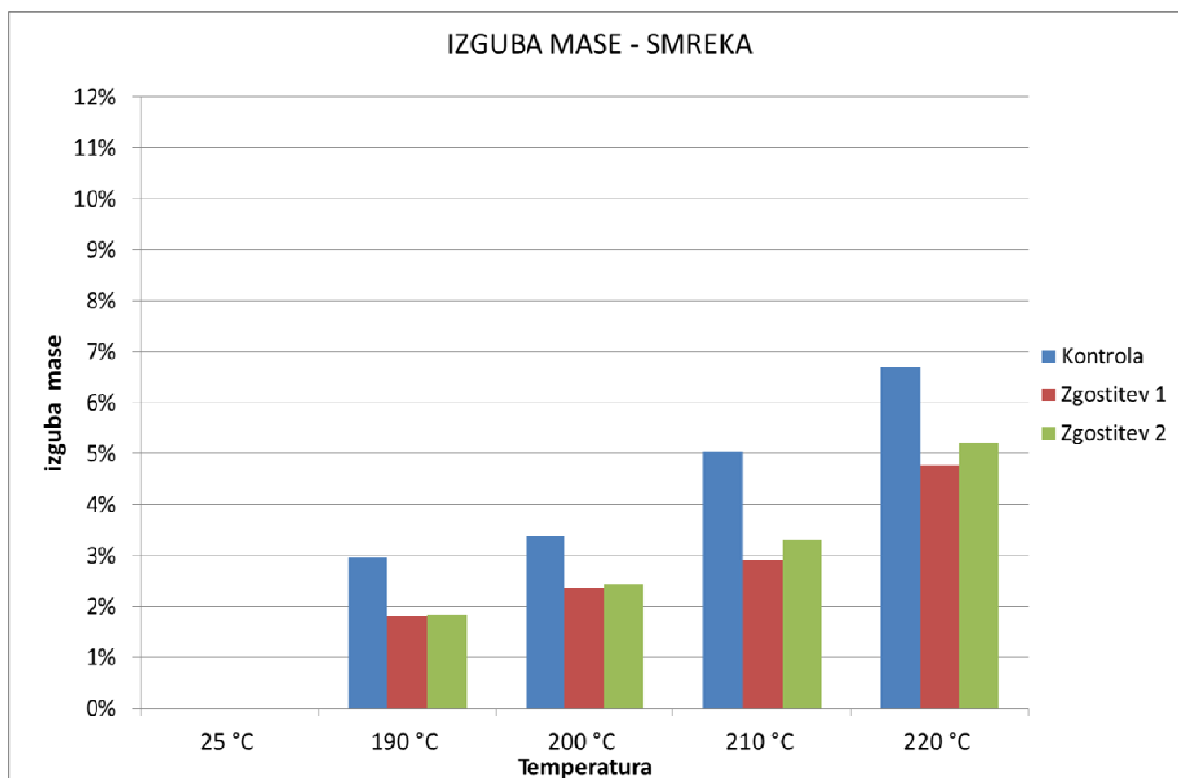
zgoščenega lesa bukovine in nezgoščenega lesa. Po končani termični modifikaciji smo določili izgubo mase.

Rezultati (preglednica 3, slika 12) kažejo, da se izguba mase z višanjem temperature modifikacije povečuje. Največja izguba mase je pri nezgoščenem lesu (kontrola) in pri temperaturi 220 °C (11,9 %). Iz rezultatov je razvidno, da so nekoliko manjše izgube mase zabeležene pri zgoščenem lesu, vendar so te razlike zanemarljive. To pomeni, da postopek zgostitve ni imel bistvenega vpliva na izgubo mase. Najmanjša izguba je pri zgoščenem lesu (zgostitev 1) in temperaturi termične modifikacije 190 °C (2,6 %).

4.2.2 Izguba mase smrekovih vzorcev

Preglednica 4: Izguba mase smrekovih vzorcev v odvisnosti od temperature termične modifikacije

TEMPERATURA					
	25 °C	190 °C	200 °C	210 °C	220 °C
Kontrola	0,0 %	3,0 %	3,4 %	5,0 %	6,7 %
Zgostitev 1	0,0 %	1,8 %	2,4 %	2,9 %	4,8 %
Zgostitev 2	0,0 %	1,8 %	2,4 %	3,3 %	5,2 %



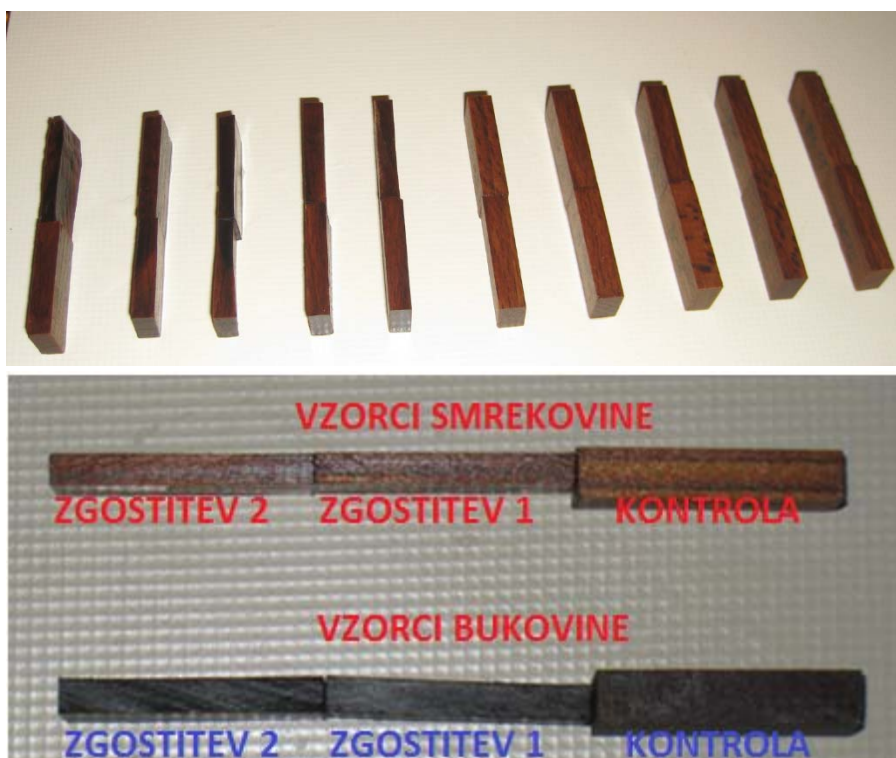
Slika 13: Izguba mase pri smreki v odvisnosti od temperature termične modifikacije

Vzorci smrekovine (preglednica 4, slika 13) smo termično modificirali pri štirih različnih temperaturah, enako kot bukove vzorce (190 °C, 200 °C, 210 °C, 220 °C). Med seboj smo primerjali vzorce zgoščenega in nezgoščenega lesa smrekovine. Po končani termični modifikaciji smo določili izgubo mase zgoščenih in nezgoščenih smrekovih vzorcev.

Iz rezultatov (preglednica 4, slika 13) je razvidno, da se izguba mase z višanjem temperature modifikacije povečuje. Največja izguba mase je pri nezgoščeni smrekovini (kontrola), ki smo jo modificirali pri temperaturi 220 °C (6,7 %). Rezultati kažejo, da so manjše izgube mase pri zgoščenem lesu, vendar postopek zgostitve ni imel izrazitega vpliva na izgubo mase. Najmanjša izguba je pri zgoščenem lesu (zgostitev 2) in temperaturi termične modifikacije 190 °C (1,8 %). V primerjavi z vzorci bukovine je izguba mase približno dvakrat večja pri bukovini kot pri smrekovem lesu. To velja tako za zgoščen kot tudi nezgoščen les, vendar smo pri nezgoščenem lesu zabeležili večje izgube mase. Navedeno pa se sklada, kar so ugotovili tudi Patzelt in sodelavci (2002), da imajo vzorci bukovine večjo izgubo mase kot smrekovi vzorci ob enakih pogojih termične modifikacije.

4.3 POVRATEK TLAČNE DEFORMACIJE

Zgoščen les nabreka zaradi navzemanja vode, prav tako kot tudi nezgoščen les. Vendar pri zgoščenem lesu navzem vode predstavlja dodatne notranje napetosti, ki so nastale zaradi zgoščevanja. Les z največjo stopnjo zgostitve ima največjo stopnjo povratka tlačne deformacije (Kutnar in sod., 2009). Do takih ugotovitev so nas pripeljali tudi naši rezultati. Povratno tlačno deformacijo smo merili v petih ciklih namakanja na vzorcih bukovine in smrekovine. Pri kontrolnih vzorcih bukovine ni zaznati vpliva števila ponovitvenih ciklov na povratno tlačno deformacijo, saj so vrednosti v vseh petih ciklih stabilne. Iz rezultatov je razvidno, da so maksimalne vrednosti povratne tlačne deformacije po termični modifikaciji za polovico nižje kot pri vzorcih, ki niso bili termično modificirani.

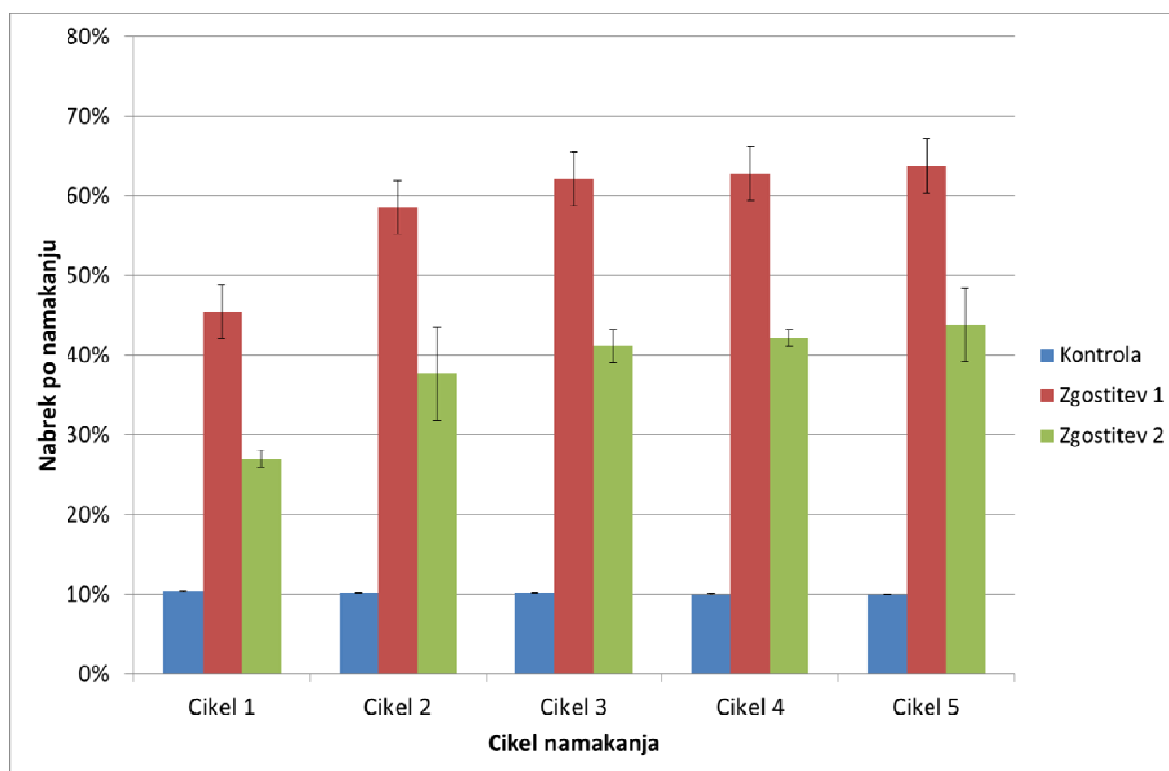


Slika 14: Vzorci smrekovine in bukovine – povratna tlačna deformacija (foto Matej Rozman)

4.3.1 Povratek tlačne deformacije pri bukovih vzorcih

Preglednica 5: Povratna tlačna deformacija za bukev, ki ni bila termično modificirana

BUKOVINA - 25 °C										
	Cikel 1	Odklon 1	Cikel 2	Odklon 2	Cikel 3	Odklon 3	Cikel 4	Odklon 4	Cikel 5	Odklon 5
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Kontrola	10,4	1,1	10,1	1,0	10,2	0,3	10,0	0,2	9,9	0,3
Zgostitev 1	45,4	5,9	58,5	4,6	62,1	2,6	62,8	2,7	63,7	2,8
Zgostitev 2	27,0	2,1	37,6	3,3	41,1	5,5	42,1	5,7	43,8	5,5



Slika 15: Grafični prikaz povratne tlačne deformacije (nabrek po namakanju) za bukev, ki ni bila termično modificirana

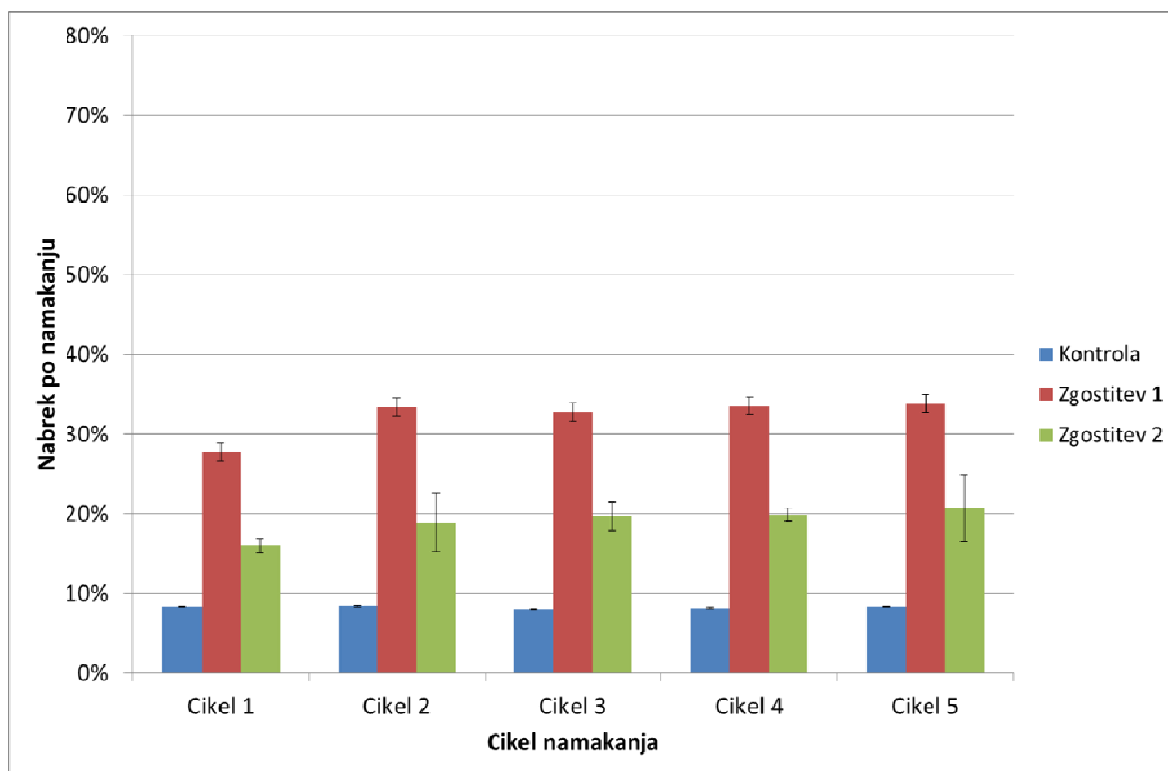
Rezultati (preglednica 5, slika 15) prikazujejo povratno tlačno deformacijo bukovine po posameznih ciklih in njen standardni odklon, s katerim smo prikazali, kako razpršene so vrednosti glede na število meritev v posameznih ciklih. Za vsak cikel smo izvedli po tri

meritve dolžine, širine in debeline vzorca. Vzorci v tem primeru niso bili termično modificirani.

Povratna tlačna deformacija je najnižja po prvem ciklu. Iz rezultatov je razvidno, da se je pri tretjem ponovitvenem ciklu umirila. Pri kontrolnih vzorcih bukovine ni zaznati vpliva števila ponovitvenih ciklov na povratek tlačne deformacije, saj se je vrednost v vseh petih ciklih gibala pri $10 \% \pm 0,3 \%$. Ima pa na povratek tlačne deformacije viden vpliv zgostitev lesa. Pri bolj zgoščenem lesu je povratek tlačne deformacije večji. Pri vzorcu zgostitev 1 je v petem ciklu povratna tlačna deformacija 63,7 % (preglednica 5, slika 15), kar predstavlja največjo vrednost. Povratek tlačne deformacije je bolj očiten pri vzorcih, ki so bili bolj zgoščeni z zgostitvijo 1 v primerjavi z zgostitvijo 2. Ta rezultat je pričakovan, saj se bolj tlačno deformirani vzorci v večji meri povrnejo v prvotno stanje.

Preglednica 6: Povratna tlačna deformacija za bukev, termično modificirano pri 190 °C

BUKOVINA - 190 °C										
	Cikel 1	Odklon 1	Cikel 2	Odklon 2	Cikel 3	Odklon 3	Cikel 4	Odklon 4	Cikel 5	Odklon 5
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Kontrola	8,3	0,9	8,4	0,8	8,1	0,3	8,2	0,2	8,3	0,3
Zgostitev 1	27,7	3,6	33,4	4,2	32,7	2,6	33,5	2,7	33,8	2,8
Zgostitev 2	16,0	1,8	18,9	2,4	19,6	5,5	19,9	5,7	20,7	5,5



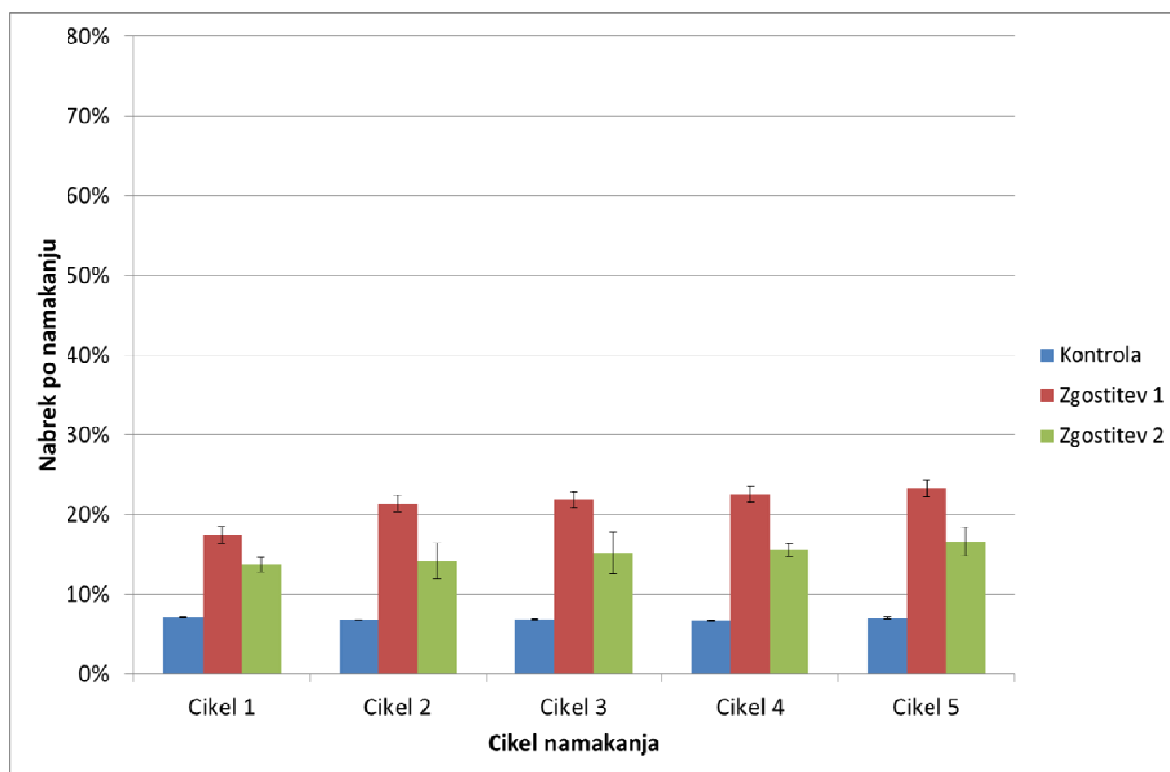
Slika 16: Grafični prikaz povratne tlačne deformacije (nabrek po namakanju) za bukev, termično modificirano pri 190 °C

Rezultati (preglednica 6, slika 16) predstavljajo vrednosti povratne tlačne deformacije za vzorce bukovine, ki so bili termično modificirani pri temperaturi 190 °C.

Povratna tlačna deformacija je najnižja po prvem ciklu, rezultati pa kažejo, da se je v drugem ponovitvenem ciklu ustalila. Nadaljnje vrednosti povratne tlačne deformacije so stabilne in se v drugem do petem ciklu gibajo od 32,7 % do 33,8 % pri vzorcih zgostitev 1, pri vzorcih zgostitev 2 pa od 16 % do 20,7 %. Pri kontrolnih vzorcih termično modificirane bukovine ni zaznati vpliva števila ponovitvenih ciklov na povratno tlačno deformacijo, saj se je vrednost v vseh petih ciklih gibala okrog ($8,2 \% \pm 0,2 \%$), kar je za približno 2 % manj kot pri kontrolnih nemodificiranih vzorcih. Iz rezultatov je razvidno, da so maksimalne vrednosti povratne tlačne deformacije po termični modifikaciji za polovico nižje kot pri vzorcih, ki niso bili termično modificirani. Rezultati prikazujejo tudi vpliv zgostitve; bolj zgoščen les bolj nabrekne (zgostitev 1). Minimalna povratna deformacija pri temperaturi 190 °C za zgoščene vzorce je bila 16 % (zgostitev 2, cikel 1).

Preglednica 7: Povratna tlačna deformacija za bukev, modificirano pri 200 °C

BUKOVINA - 200 °C										
	Cikel 1	Odklon 1	Cikel 2	Odklon 2	Cikel 3	Odklon 3	Cikel 4	Odklon 4	Cikel 5	Odklon 5
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Kontrola	7,1	0,9	6,8	0,8	6,8	0,3	6,7	0,2	7,0	0,3
Zgostitev 1	17,4	2,2	21,4	1,8	21,8	2,6	22,5	2,7	23,3	2,8
Zgostitev 2	13,7	2,6	14,2	3,2	15,2	5,5	15,5	5,7	16,6	5,5



Slika 17: Grafični prikaz povratne tlačne deformacije (nabrek po namakanju) za bukev, termično modificirano pri 200 °C

Rezultati (preglednica 7, slika 17) predstavljajo vrednosti za povratno tlačno deformacijo za vzorce bukovine, ki so bili termično modificirani pri temperaturi 200 °C.

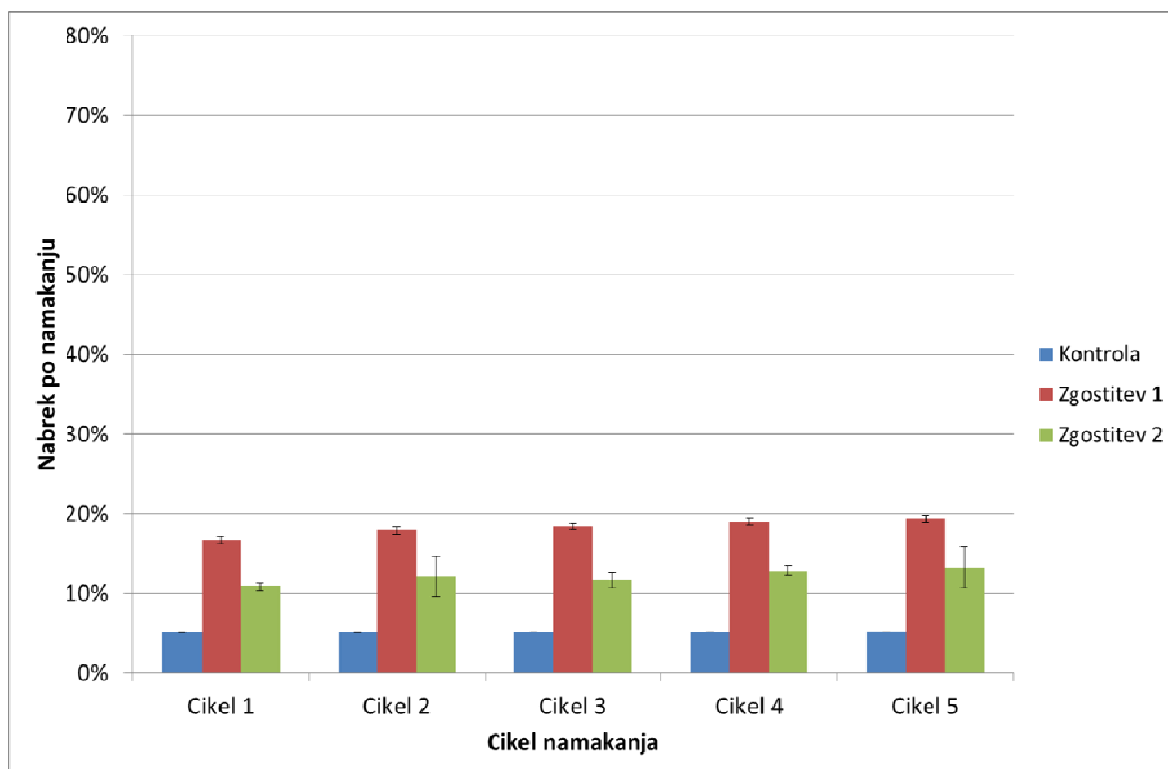
Povratna tlačna deformacija je najnižja po prvem ciklu, rezultati pa kažejo, da pa se je v drugem ponovitvenem ciklu ustalila. Nadaljnje vrednosti povratne tlačne deformacije so stabilne in se v drugem do petem ciklu gibajo od 32,7 % do 33,8 % pri vzorcih zgostitev 1, pri vzorcih zgostitev 2 pa od 16 % do 20,7 %. Pri kontrolnih vzorcih bukovine ni zaznati

vpliva števila ponovitvenih ciklov na povratno tlačno deformacijo, saj se je vrednost v vseh petih ciklih gibala okrog ($7,0 \% \pm 0,3 \%$). Iz rezultatov je razvidno, da so maksimalne vrednosti povratne tlačne deformacije po termični modifikaciji za polovico nižje kot pri vzorcih, ki niso bili termično modificirani. Ta rezultat nakazuje na to, da s termično modifikacijo, ki poteka že pri relativno nizkih temperaturah, lahko bistveno zmanjšamo povratek tlačne deformacije.

Rezultati prikazujejo tudi vpliv zgostitve; bolj zgoščen les se bolj napihne (zgostitev 1). Minimalna povratna deformacija pri temperaturi $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ za zgoščene vzorce je bila $13,7 \%$ (zgostitev 2, cikel 1).

Preglednica 8: Povratna tlačna deformacija za bukev, termično modificirano pri $210\text{ }^{\circ}\text{C}$

BUKOVINA - $210\text{ }^{\circ}\text{C}$										
	Cikel 1	Odklon 1	Cikel 2	Odklon 2	Cikel 3	Odklon 3	Cikel 4	Odklon 4	Cikel 5	Odklon 5
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Kontrola	5,1	0,5	5,1	0,6	5,2	0,3	5,2	0,2	5,2	0,3
Zgostitev 1	16,7	2,6	17,9	2,6	18,4	2,6	19,0	2,7	19,4	2,8
Zgostitev 2	10,9	1,0	12,1	1,2	11,7	5,5	12,9	5,7	13,3	5,5



Slika 18: Grafični prikaz povratne tlačne deformacije (nabrek po namakanju) za bukev termično modificirani pri 210 °C

Rezultati (preglednica 8, slika 18) predstavljajo vrednosti povratne tlačne deformacije za vzorce bukovine, ki so bili termično modificirani pri temperaturi 210 °C. Ta temperatura se uporablja v praksi za modifikacijo bukovine, kjer je na prvem mestu cilj zagotoviti dimenzijsko stabilnost.

Vrednosti povratne tlačne deformacije pri temperaturi 210 °C so v primerjavi s predhodno termično modifikacijo padle pod 20 %, kar je zelo pomemben rezultat s praktičnega vidika in kaže na to, da bi ta les lahko uporabljali tudi v okoljih, kjer bi se občasno navlažil.

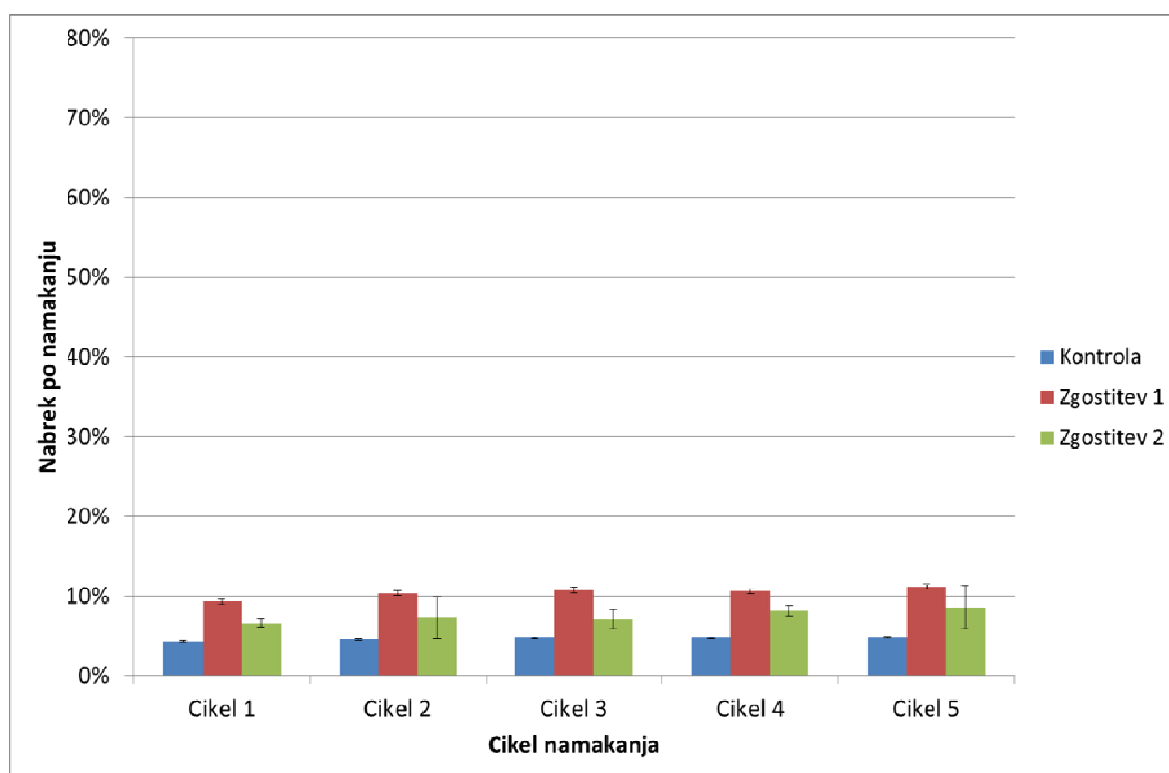
Iz rezultatov je razvidno, da se je povratna tlačna deformacija ustalila že po prvem ciklu, kjer ima hkrati najnižjo vrednost, ki je pri vzorcih zgostitev 1 16,7 % in pri vzorcih zgostitev 2 10,9 %. Nadaljnje vrednosti povratne tlačne deformacije so stabilne, z izjemo v petega cikla, kjer zaznamo porast do maksimalne vrednosti 19,4 %.

Pri kontrolnih vzorcih bukovine ni zaznati vpliva števila ponovitvenih ciklov na povratno tlačno deformacijo, saj se je vrednost v vseh petih ciklih gibala okrog 5,1 % $\pm$ 0,1 %. Ta vrednost je za polovico nižja od nabreka kontrolnih, nemodificiranih vzorcev in jasno dokazuje vpliv termične modifikacije na dimenzijsko stabilnost. Iz rezultatov je razvidno, da so maksimalne vrednosti povratne tlačne deformacije po termični modifikacije bistveno nižje kot pri vzorcih, ki niso bili termično modificirani.

Rezultati prikazujejo tudi vpliv zgostitve; bolj zgoščen les se bolj nabrekne (zgostitev 1), podobno kot smo opazili že v prejšnjih meritvah. Minimalna povratna deformacija pri temperaturi 210 °C za zgoščene vzorce je bila 10,9 % (zgostitev 2, cikel 1).

Preglednica 9: Povratna tlačna deformacija za bukev, termično modificirano pri 220 °C

BUKOVINA - 220 °C										
	Cikel 1	Odklon 1	Cikel 2	Odklon 2	Cikel 3	Odklon 3	Cikel 4	Odklon 4	Cikel 5	Odklon 5
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Kontrola	4,3	0,5	4,5	0,6	4,7	0,3	4,7	0,2	4,8	0,3
Zgostitev 1	9,3	2,7	10,4	2,7	10,7	2,6	10,6	2,7	11,1	2,8
Zgostitev 2	6,6	1,2	7,2	1,4	7,1	5,5	8,1	5,7	8,5	5,5



Slika 19: Grafični prikaz povratne tlačne deformacije (nabrek po namakanju) za bukev, termično modificirano pri 220 °C

Rezultati (preglednica 9, slika 19) predstavljajo vrednosti za povratno tlačno deformacijo za vzorce bukovine, ki so bili termično modificirani pri temperaturi 220 °C.

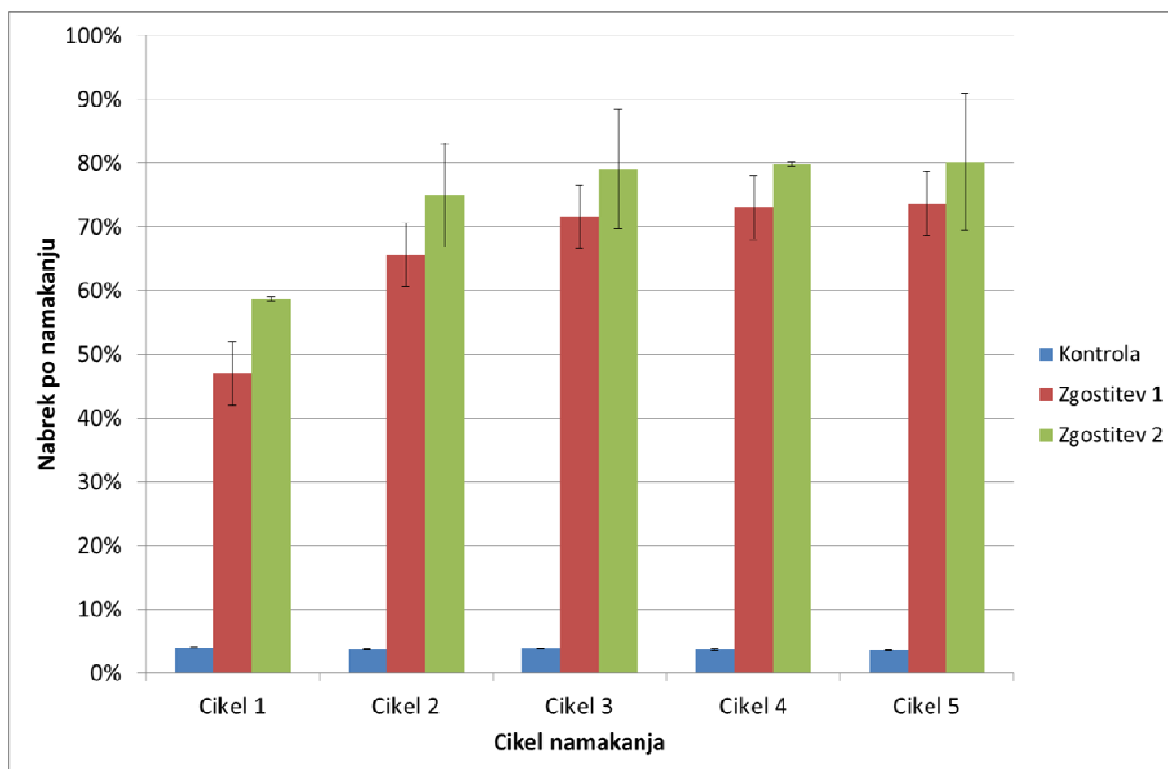
Vrednosti povratne tlačne deformacije pri temperaturi 220 °C so se ustalile pri okrog 10 % in so hkrati najnižje glede deformacije vzorcev, modificiranih pri nižjih temperaturah. Ta rezultat kaže na to, da bi s kombinacijo dveh tehnik, termične modifikacije in zgostitve, lahko izdelali material z odličnimi mehanskimi lastnostmi, ki bi bil dimenzijsko stabilen. Iz rezultatov je razvidno, da se je povratna tlačna deformacija ustalila že v prvem ciklu, kjer ima hkrati najnižjo vrednost, ki je pri vzorcih zgostitev 1 9,3 % in pri vzorcih zgostitev 2 6,6 %. Nadaljnje vrednosti povratne tlačne deformacije so stabilne, v petem ciklu zaznamo porast do maksimalne vrednosti 11,1 %. Te vrednosti so povsem primerljive z nabrekli, ki smo jih določili pri kontrolnih, nemodificiranih in nezgoščenih vzorcih. Pri kontrolnih vzorcih bukovine ni zaznati vpliva števila ponovitvenih ciklov na povratno tlačno deformacijo, saj se je vrednost v vseh petih ciklih gibala okrog $4,5\% \pm 0,3\%$. Iz rezultatov je razvidno, da so maksimalne vrednosti povratne tlačne deformacije po termični modifikaciji bistveno nižje kot pri vzorcih, ki niso bili termično modificirani.

Rezultati prikazujejo tudi vpliv zgostitve, bolj zgoščen les se bolj nabrekne (vzorci zgostitev 1). Minimalna povratna deformacija pri temperaturi 220 °C za zgoščene vzorce je bila 6,6% (zgostitev 2, cikel 1).

4.3.2 Povratek tlačne deformacije pri smrekovih vzorcih

Preglednica 10: Povratna tlačna deformacija za termično nemodificirano smrekovino

SMREKOVINA - 25 °C										
	Cikel 1	Odklon 1	Cikel 2	Odklon 2	Cikel 3	Odklon 3	Cikel 4	Odklon 4	Cikel 5	Odklon 5
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Kontrola	4,0	0,3	3,8	0,3	3,9	0,3	3,7	0,2	3,7	0,3
Zgostitev 1	47,0	8,2	65,7	10,7	71,5	2,6	73,0	2,7	73,6	2,8
Zgostitev 2	58,7	9,4	74,9	10,1	79,1	5,5	79,8	5,7	80,2	5,5



Slika 20: Grafični prikaz povratne tlačne deformacije (nabrek po namakanju) za termično nemodificirano smreko

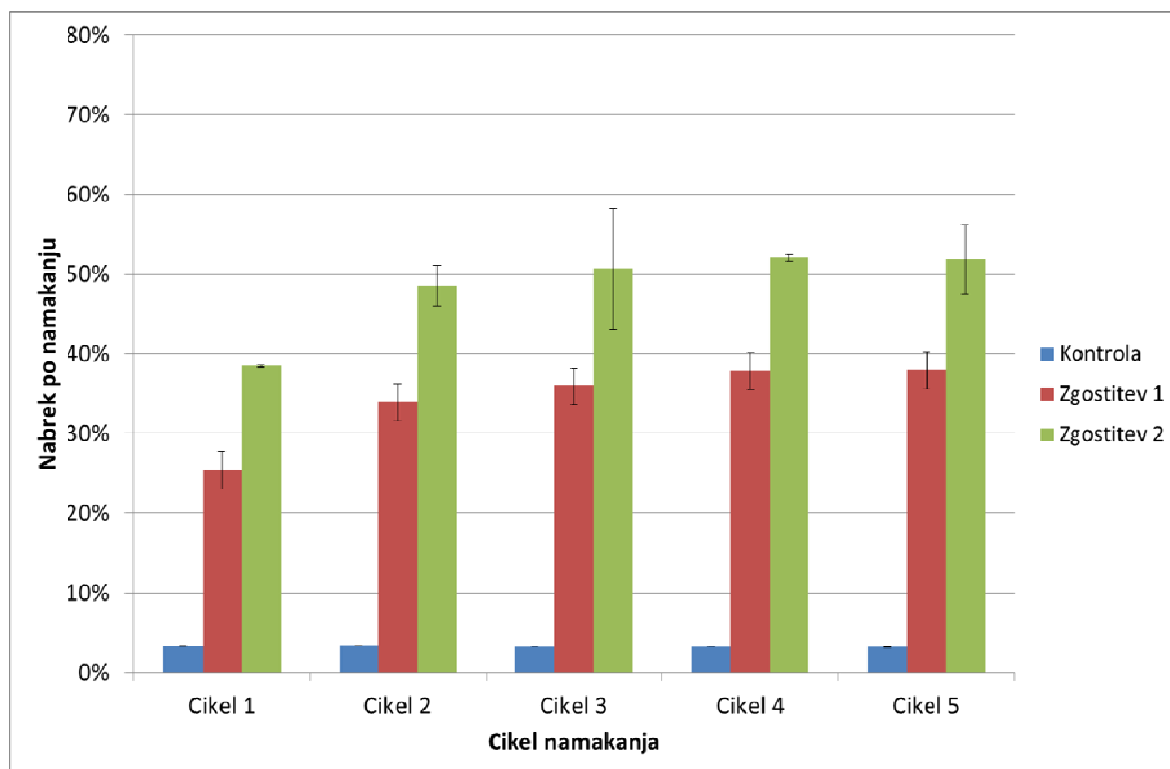
Iz rezultatov (preglednica 10, slika 20) je razvidna povratna tlačna deformacija smrekovine po posameznih ciklih in njen standardni odklon, s katerim smo prikazali, kako razpršene so vrednosti glede na število meritev v posameznih ciklih. Za vsak cikel smo izvedli po tri meritve dolžine, širine in debeline vzorca. Vzorci niso bili termično modificirani.

Povratna tlačna deformacija je najnižja po prvem ciklu in največja v zadnjem ciklu, podobno kot smo opazili tudi pri bukovih vzorcih. Iz rezultatov je razvidno, da pa se je pri četrtem ponovitvenem ciklu umirila. Pri kontrolnih vzorcih smrekovine ni zaznati vpliva števila ponovitvenih ciklov na povratno tlačno deformacijo, saj se je vrednost v vseh petih ciklih gibala okrog $3,8 \% \pm 0,2 \%$. V primerjavi z vzorci bukovine je nabrek kontrolnih vzorcev nižji za 6 odstotnih točk. Ta rezultat je pričakovan, saj je za bukev značilna bistveno večja dimenzijska nestabilnost kot za smrekovino. Na povratno tlačno deformacijo vpliva tudi zgostitev lesa, bolj zgoščen les ima večji nabrek. To smo zabeležili tudi pri zgoščenih bukovih vzorcih. Pri vzorcu zgostitev 1 je v petem ciklu povratna tlačna deformacija 80,2 % (preglednica 10, slika 20), kar predstavlja največjo vrednost.

V nadaljevanju je razvidno, da ima tako kot pri bukovih vzorcih temperatura termične modifikacije pomemben vpliv na povratno tlačno deformacijo tudi pri vzorcih iz smrekovine.

Preglednica 11: Povratna tlačna deformacija za smrekovino, termično modificirano pri 190 °C

SMREKOVINA - 190 °C										
	Cikel 1	Odklon 1	Cikel 2	Odklon 2	Cikel 3	Odklon 3	Cikel 4	Odklon 4	Cikel 5	Odklon 5
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Kontrola	3,3	0,2	3,4	0,5	3,2	0,3	3,2	0,2	3,2	0,3
Zgostitev 1	25,3	2,6	33,9	4,4	35,9	2,6	37,8	2,7	37,9	2,8
Zgostitev 2	38,4	7,6	48,5	9,4	50,6	5,5	52,0	5,7	51,9	5,5



Slika 21: Grafični prikaz povratne tlačne deformacije (nabrek po namakanju) za smrekovino, termično modificirano pri 190 °C

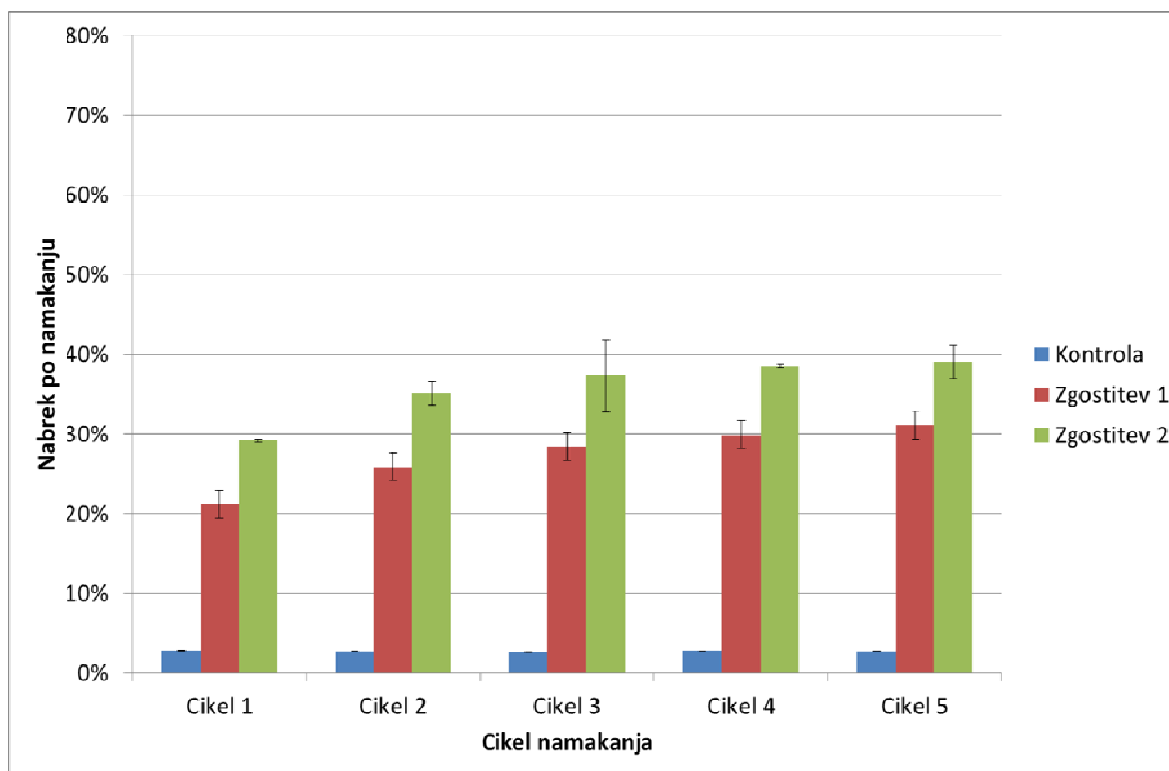
Rezultati (preglednica 11, slika 21) predstavljajo vrednosti povratne tlačne deformacije za vzorce smrekovine, ki so bili termično modificirani pri temperaturi 190 °C.

Povratna tlačna deformacija je najnižja po prvem ciklu, podobno kot pri ostalih meritvah. Rezultati pa kažejo, da se je šele v četrtem ponovitvenem ciklu ustalila. Nadaljnje vrednosti povratne tlačne deformacije so stabilne in se v četrtem in petem ciklu gibajo okrog 37,8 % ± 0,1 % pri vzorcih zgostitev 1, vrednosti pri vzorcih zgostitev 2 pa so 52 %

$\pm 0,1$ %. Pri kontrolnih vzorcih termično modificirane smrekovine ni zaznati vpliva števila ponovitvenih ciklov na povratno tlačno deformacije, saj se je vrednost v vseh petih ciklih gibala okrog $3,3\% \pm 0,1$. Rezultati prikazujejo tudi vpliv zgostitve, bolj zgoščen les bolj nabrekne (zgostitev 1). Minimalna povratna deformacija pri temperaturi $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ za zgoščene vzorce je bila $25,3\%$ (zgostitev 1, cikel 1). V primerjavi z vzorci bukovine je povratna tlačna deformacija kontrolnih vzorcev smrekovine nižja za okvirno 5 odstotnih točk. Izstopajo pa rezultati vzorcev zgostitev 2, kjer je povratna tlačna deformacija v posameznih ciklih tudi za 32% višja kot pri vzorcih bukve, medtem ko imajo vzorci zgostitev 1 pri smrekovini približno enakovredne rezultate kot vzorci pri bukovini.

Preglednica 12: Povratna tlačna deformacija za smrekovino, termično modificirano pri 200°C

SMREKOVINA - $200\text{ }^{\circ}\text{C}$										
	Cikel 1	Odklon 1	Cikel 2	Odklon 2	Cikel 3	Odklon 3	Cikel 4	Odklon 4	Cikel 5	Odklon 5
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Kontrola	2,8	0,2	2,8	0,2	2,6	0,3	2,8	0,2	2,8	0,3
Zgostitev 1	21,2	1,5	25,9	2,1	28,4	2,6	29,9	2,7	31,1	2,8
Zgostitev 2	29,2	4,5	35,1	5,5	37,3	5,5	38,5	5,7	39,0	5,5



Slika 22: Grafični prikaz povratne tlačne deformacije (nabrek po namakanju) za smrekovino, termično modificirano pri 200 °C

Rezultati (preglednica 12, slika 22) predstavljajo vrednosti za povratno tlačno deformacijo za vzorce smrekovine, ki so bili termično modificirani pri temperaturi 200 °C.

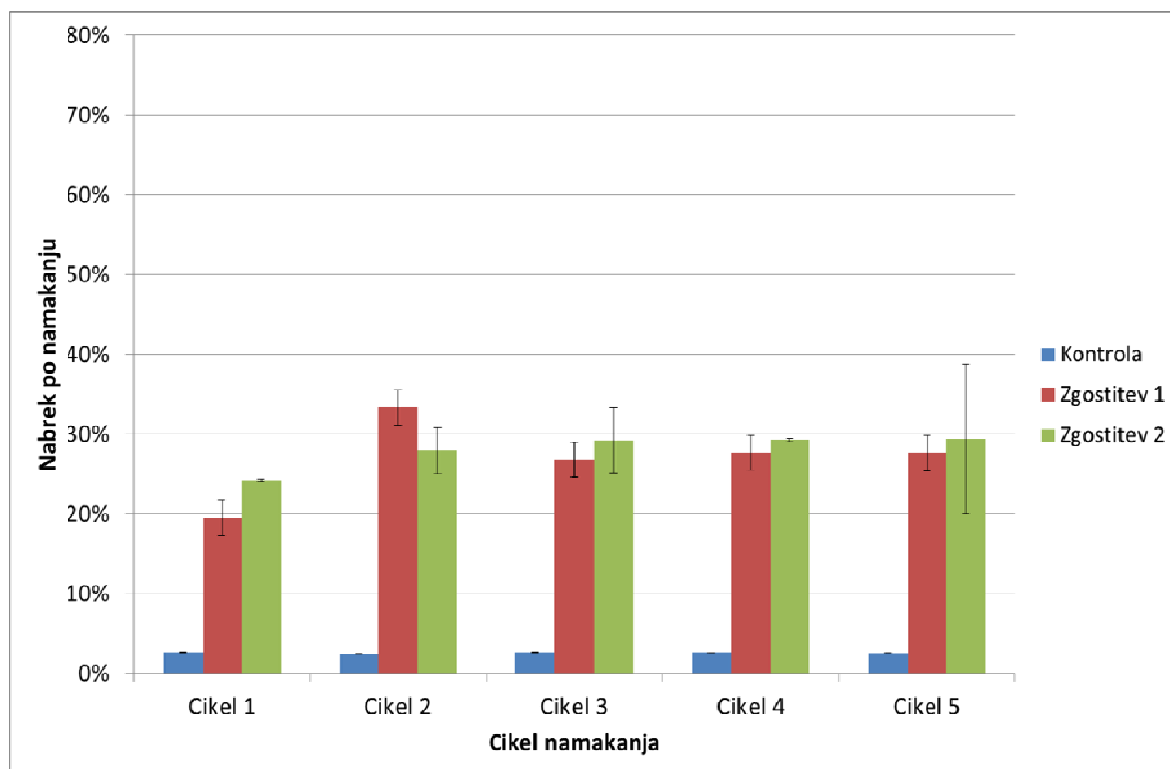
Povratno tlačno deformacijo smo merili v petih ciklih namakanja in prikazali še standardni odklon za posamezni cikel. Povratna tlačna deformacija je najnižja po prvem ciklu, rezultati pa kažejo, da pa se je v tretjem ponovitvenem ciklu ustalila. Tudi tu se kaže trend, da se z naraščajočo temperaturo modifikacije povratna tlačna deformacija ustali prej. Nadaljnje vrednosti povratne tlačne deformacije so stabilne in se v tretjem do petem ciklu gibajo od 28,4 % do 31,1 % pri vzorcih zgostitev 1, pri vzorcih zgostitev 2 pa od 37,3 % do 39,0 %. Pri kontrolnih vzorcih termično modificirane, nezgoščene smrekovine ni zaznati vpliva števila ponovitvenih ciklov na nabrek, saj se je vrednost v vseh petih ciklih gibala okrog (2,8 % $\pm$ 0,2 %). Primerjava kontrolnega nemodificiranega in termično modificiranega lesa kaže jasn vpliv termične modifikacije na dimenzijsko stabilnost. Iz rezultatov je razvidno, da so maksimalne vrednosti povratne tlačne deformacije po termični modifikaciji za polovico nižje kot pri vzorcih, ki niso bili termično modificirani.

Rezultati prikazujejo tudi vpliv zgostitve, bolj zgoščen les bolj nabrekne (zgostitev 2). Minimalna povratna deformacija pri temperaturi 200 °C za zgoščene vzorce je bila 21,2 % (zgostitev 1, cikel 1). V primerjavi z vzorci bukovine je povratna tlačna deformacija kontrolnih vzorcev smrekovine nižja za 3,6 % $\pm$ 0,2 %, medtem ko imajo vzorci

zgoščenega lesa smrekovine višjo povratno tlačno deformacijo kot vzorci bukovine. Za vzorce zgostitev 1 je vrednost višja pri smrekovini tudi do 15,3 % (cikel 4). Izstopajo pa rezultati vzorcev zgostitev 2, ki so v posameznih ciklih tudi za 36,5 % višji kot pri vzorcih bukovine.

Preglednica 13: Povratna tlačna deformacija za smrekovino, termično modificirano pri 210 °C

SMREKOVINA - 210 °C										
	Cikel 1	Odklon 1	Cikel 2	Odklon 2	Cikel 3	Odklon 3	Cikel 4	Odklon 4	Cikel 5	Odklon 5
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Kontrola	2,6	0,2	2,5	0,2	2,6	0,3	2,6	0,2	2,6	0,3
Zgostitev 1	19,5	2,9	33,3	9,4	26,8	2,6	27,7	2,7	27,6	2,8
Zgostitev 2	24,2	4,1	28,0	5,6	29,2	5,5	29,3	5,7	29,4	5,5



Slika 23: Grafični prikaz povratne tlačne deformacije (nabrek po namakanju) za smrekovino, termično modificirano pri 210 °C

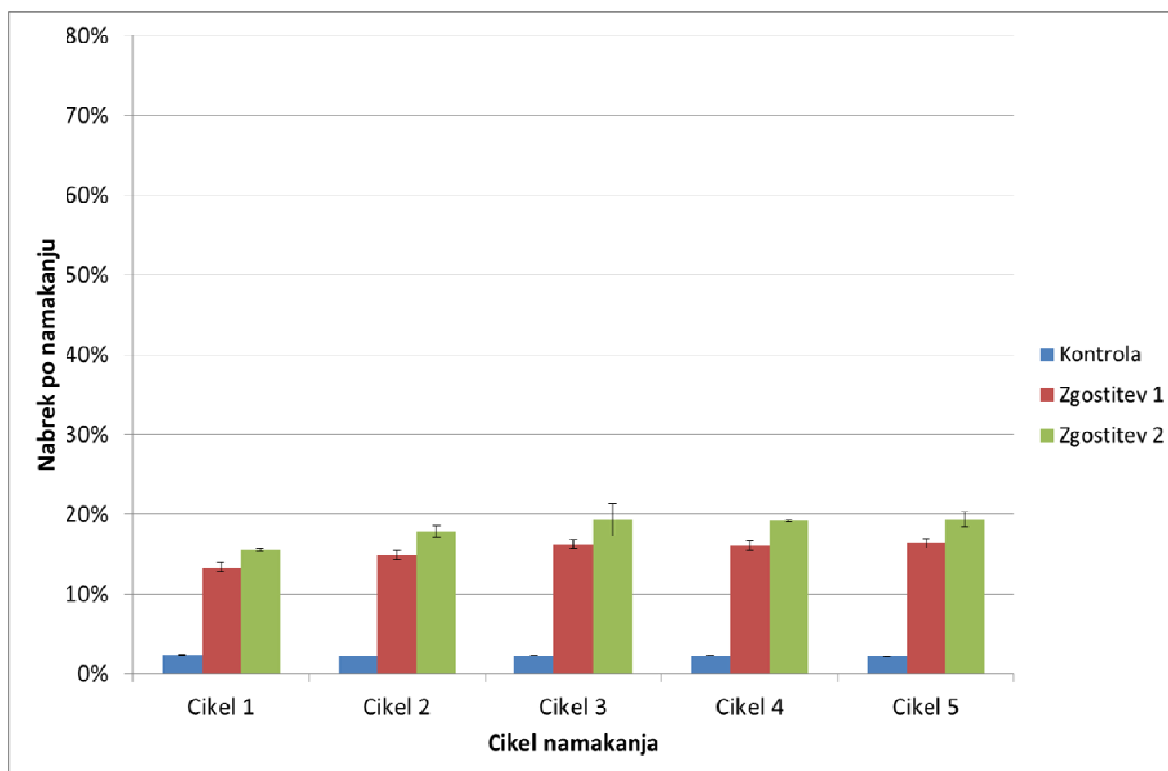
Rezultati (preglednica 13, slika 23) predstavljajo vrednosti povratne tlačne deformacije za vzorce smrekovine, ki so bili termično modificirani pri temperaturi 210 °C. Ta temperatura se uporablja za smrekovino, kjer želimo preprečiti padec mehanskih lastnosti in zagotoviti minimalno dimenzijsko stabilnost. Povratno tlačno deformacijo smo merili v petih ciklih namakanja in prikazali še standardni odklon za posamezni cikel. Vrednosti povratne tlačne deformacije pri temperaturi 210 °C so v primerjavi z predhodno termično modifikacijo padle na 30 %, z izjemo drugega cikla, ki izstopa z vrednostjo 33,3 %. Iz rezultatov je razvidno, da se je povratna tlačna ustalila v tretjem ciklu. Najnižja vrednost je v prvem ciklu pri vzorcih zgostitev 1 (19,5 %). Pri kontrolnih vzorcih smrekovine ni zaznati vpliva števila ponovitvenih ciklov na nabrek, saj se je vrednost v vseh petih ciklih gibala okrog ($2,6\% \pm 0,1 \%$). Iz rezultatov je razvidno, da so maksimalne vrednosti povratne tlačne deformacije po termični modifikaciji bistveno nižje kot pri vzorcih, ki niso bili termično modificirani.

Rezultati prikazujejo tudi vpliv zgostitve, bolj zgoščen les ima večji nabrek (zgostitev 2), podobno kot je bilo opisno pri ostalih temperaturah modifikacije.

V primerjavi z vzorci bukovine je povratna tlačna deformacija kontrolnih vzorcev smrekovine nižja za $2,5\% \pm 0,1\%$. Vzorci zgoščenega lesa smrekovine (zgostitev 1) imajo tudi do 15,4 % (cikel 4) višjo povratno tlačno deformacijo kot bukovi vzorci. Rezultati vzorcev zgostitev 2 pa so v posameznih ciklih tudi za 17,5 % višji kot pri vzorcih bukve.

Preglednica 14: Povratna tlačna deformacija za smrekovino, termično modificirano pri 220 °C

SMREKOVINA - 220 °C										
	Cikel 1	Odklon 1	Cikel 2	Odklon 2	Cikel 3	Odklon 3	Cikel 4	Odklon 4	Cikel 5	Odklon 5
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Kontrola	2,3	0,2	2,2	0,2	2,3	0,3	2,2	0,2	2,2	0,3
Zgostitev 1	13,4	0,7	14,9	0,9	16,2	2,6	16,1	2,7	16,4	2,8
Zgostitev 2	15,5	2,0	17,8	2,4	19,4	5,5	19,2	5,7	19,4	5,5



Slika 24: Grafični prikaz povratne tlačne deformacije (nabrek po namakanju) za smrekovino, termično modificirano pri 220 °C

Rezultati (preglednica 14, slika 24) predstavljajo vrednosti za povratno tlačno deformacijo za vzorce smrekovine, ki so bili termično modificirani pri temperaturi 220 °C. V praksi se uporabljajo še višje temperature, a le te niso primerne za obdelavo lesa, ki ga želimo uporabljati v konstrukcijske namene. Zgoščen les je v prvi vrsti namenjen za rabo v konstrukcijske namene, zato nismo uporabili višjih temperatur.

Vrednosti povratne tlačne deformacije pri temperaturi 220 °C so se ustale pod 20 % in so hkrati najnižje glede na predhodne temperature. Če primerjamo zgoščeno smrekovino in bukovino, vidimo, da so vrednosti pri bukovini bistveno nižje, saj se je povratna tlačna deformacija ustalila pri 10 %.

Iz rezultatov je razvidno, da se je povratna tlačna deformacija ustalila že v drugem ciklu. Najnižja vrednost je pri vzorcih zgostitev 1 (13,4 %) in pri vzorcih zgostitev 2 (15,5 %). Nadaljnje vrednosti povratne tlačne deformacije so stabilne, v petem ciklu zaznamo porast do maksimalne vrednosti 19,4 %.

Pri nezgoščenih kontrolnih vzorcih termično modificirane smrekovine ni zaznati vpliva števila ponovitvenih ciklov na povratno tlačno deformacijo, saj se je vrednost v vseh petih ciklih gibala okrog (2,2 % $\pm$ 0,1 %). Iz rezultatov je razvidno, da so maksimalne vrednosti povratne tlačne deformacije po termični modifikacije bistveno nižje kot pri vzorcih, ki niso bili termično modificirani.

Rezultati prikazujejo tudi vpliv zgostitve; bolj zgoščen les ima večji nabrek (zgostitev 2). V primerjavi z vzorci bukovine je povratna tlačna deformacija kontrolnih vzorcev smrekovine nižji za $2,3 \% \pm 0,3 \%$. Vzorci zgoščenega lesa smrekovine (zgostitev 1) imajo tudi do $5,5 \%$ (cikel 4) višjo povratno tlačno deformacijo kot bukovi vzorci. Povratna tlačna deformacija vzorcev zgostitev 2 pa je v posameznih ciklih tudi za $12,3 \%$ višja kot pri vzorcih bukve. Primerjava vzorcev bukovine in smrekovine nakazuje, da so razlike povratne tlačne deformacije med obema lesnima vrstama pri temperaturi $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ najnižje glede na predhodne temperature.

5 SKLEPI

Ugotovitve raziskav, ki smo jih izvedli na vzorcih zgoščenega lesa bukovine in smrekovine lahko, strnimo z naslednjimi sklepi:

- Izguba mase zaradi termične modifikacije lesa je pomemben pokazatelj učinkovitosti in stopnje modifikacije. Ugotovili smo, da pri enakih pogojih in postopku termične modifikacije pride pri vzorcih bukovine do večjih izgub mase kot pri smrekovini. Izguba mase je približno dvakrat večja pri bukovini kot pri smrekovem lesu. To velja tako za zgoščen kot tudi nezgoščen les, vendar smo pri nezgoščenem lesu zabeležili večje izgube mase.
- Iz rezultatov je razvidno, da z naraščanjem temperature termične modifikacije raste tudi izguba mase, tako so bile v naših raziskavah največje izgube mase pri temperaturi 220 °C.
- S termično modifikacijo lesa, zgoščenega po postopku VTC, smo omejili povratno tlačno deformacijo. Pri smrekovini je omejitev povratne tlačne deformacije z največje vrednosti 80,2 %, ki smo jo zabeležili pri termično nemodificiranih vzorcih lesa, padla na najmanjšo vrednost 13,4 %. Pri bukovini pa je končna omejitev povratne tlačne deformacije še večja, saj je padla na 6,6 %, medtem ko je pri termično nemodificiranih vzorcih zgoščenega lesa bukovine znašala 63,7 %.
- Najbolj smo omejili povratno tlačno deformacijo s termično modifikacijo pri temperaturi 220 °C. To velja tako za zgoščen les smrekovine kot tudi bukovine.
- Z omejitvijo povratne tlačne deformacije zgoščenega lesa smo pokazali na nove možnosti uporabe lesa, predvsem manj vrednih lesnih vrst.

6 POVZETEK

Razvoj novih, okolju in človeku bolj primernih postopkov zaščite in obdelave lesa je zelo pomemben pri ohranjanju konkurenčnosti lesa z drugimi materiali. Skladna z okoljsko ozaveščenostjo je tudi uporaba in izraba manj vrednih lesnih vrst. To pa je tudi končni cilj naših raziskav, da bi z omejitvijo povratne tlačne deformacije zgoščenega lesa pridobili nove možnosti uporabe lesa, predvsem manj vrednih lesnih vrst.

Termična modifikacija je postopek, ki pomaga zmanjšati pomanjkljivosti lesa, saj smo prišli do spoznanja, da lahko z njo izboljšamo dimenzijsko obstojnost in zmanjšamo povratno tlačno deformacijo zgoščenega lesa. Za izboljšanje mehanskih lastnosti lesa namreč uporabljamo tudi postopke zgostitve, zato ima viskoelastično toplotno zgoščen (VTC les) velik pomen pri razvoju lesne industrije. Širšo uporabo omejuje v največji meri povratek tlačne deformacije, do katerega pride ob izpostavitvi VTC lesa povišani vlažnosti. Raziskovali smo možnosti uporabe termične modifikacije za povečanje dimenzijske stabilnosti zgoščenega lesa tudi pri izpostavitvi povišani relativni zračni vlagi. Zato smo termično modificirali predhodno zgoščen les bukovine in smrekovine. Vzorce smrekovine in bukovine, ki so bili predhodno zgoščeni po postopku VTC, smo s postopkom termične modifikacije modificirali pri različnih temperaturah (190 °C, 200 °C, 210 °C in 220 °C). Vzoredno smo modificirali vzorce, ki so bili zgoščeni po VTC postopku in kontrolne nezgoščene vzorce. Obstojnost tlačne deformacije smo preverili z namakanjem in ponovitvijo le-tega v petih ciklih, kjer smo vzorce namakali v destilirani vodi in jih nato osušili in na podlagi meritev izračunali povratno tlačno deformacijo.

Iz opravljenih raziskav je razvidno, da pri enakih pogojih termične modifikacije pride pri vzorcih bukovine do večje izgube mase kot pri smrekovini, kar velja tako za zgoščen kot tudi nezgoščen les, vendar so večje izgube mase pri nezgoščenem lesu.

Ugotovili smo, da je povratek tlačne deformacije odvisen od temperature termične modifikacije in lesne vrste. Opazili smo tudi, da je obstojnost VTC lesa v povezavi z izgubo mase, nastale med postopkom termične modifikacije. Pri termični modifikaciji s temperaturo 220 °C pride do večje izgube mase lesa, pri čemer dosežemo boljšo obstojnost in zmanjšamo povratno tlačno deformacijo ter s tem izboljšamo lastnosti VTC lesa.

S tem smo dokazali, da je termična modifikacija eden izmed načinov, s katerim lahko omejimo povratek tlačne deformacije zgoščenega lesa in s tem izboljšamo možnosti uporabe manj vrednih lesnih vrst.

7 VIRI

- Altgen M., Welzbacher C., Humar M., Militz H. 2012. ESR-spectroscopy as a potential method for the quality control of thermally modified wood. V: COST FP0904 Workshop, Current and Future Trends of Thermo-Hydro-Mechanical Modification of Wood, Opportunities for new markets? Nancy, France, Marec 26-28, 2012.
<http://www.cost-fp0904.ahb.bfh.ch> (15.08.2014)
- Brus R. 2011. Dendrologija za gozdarje. 3. izdaja. Ljubljana, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 408 str.
- Čufar K. 2006. Anatomija lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 185 str.
- Estevens M. B., Pereira M. H. 2009. Wood modification by heat treatment – a review. BioResources, 4,1: 370-404
- Gorišek Ž. 2007. Modifikacija lesa. Korak, 8, 6: 26-29
- Inoue M., Norimoto M., Tanahashi M., Rowell R. M. 1993. Steam or heat fixation of compressed wood. Wood and Fiber Science, 25, 3: 224-235
- Hill, C.A.S. 2006. Wood modification. Chemical, thermal and other processes. Chichester, John Wiley & Sons; 239 str.
- Homan W.J., Jorissen A.J.M. 2004. Wood modification developments. Heron, 49, 4: 361-386
http://heron.tudelft.nl/2004_4/Art5.pdf (17.8.14)
- Humar M. 2009. Kako zaščititi les.
http://www.lesena-gradnja.si/html/img/pool/Kako_zascititi_les_Humar.pdf (16.08.2014)
- Kamke F.A., Sizemore H. 2008. Viscoelastic thermal compression of wood. U.S. Patent Application No. US Patent št. 7.404.422
- Kariž M., Šernek M. 2008. Lepljenje termično modificiranega lesa. Les, 60, 7/8: 275-282
- Kollmann F. P., Cote W. A. 1968. Principles of wood science and technology, solid wood. Heidelberg, Springer-Verlag: 592 str.
- Kollmann F. P., Kuenzi E. W., Stamm A. J. 1975. Principles of wood science and

technology, woodbased materials. Heidelberg, Springer- Verlag: 703 str.

Kutnar A., Kamke F. A., Šernek M. 2008. The mechanical properties of densified VTC wood relevant for structural composites. Review of research. European Journal of Wood and Wood Products, 66, 6: 439-446

Kutnar A. 2008. Influence of viscoelastic thermal compression of wood on adhesion potential: doctoral dissertation = Vpliv viskoelastične toplotne zgostitve lesa na adhezijski potencial: doktorska disertacija. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Odd. za lesarstvo: 60 str.

Kutnar A. in Šernek. M. 2009. Vpliv viskoelastične toplotne zgostitve na adhezijski potencial lesa. Zveza društev inženirjev in tehnikov gozdarstva in lesarstva Slovenije Les 61,4:134-140

Kutnar A., Kamke F. A., Šernek M. 2009. Density profile and morphology of viscoelastic thermal compressed wood. Wood Science and Technology, 43, 1/2: 57-68

Kutnar A., Kamke F. A. 2012. Compression of wood under saturated steam, superheated steam, and transient conditions at 150 °C, 160 °C, and 170 °C. Wood Science and Technology, 46, 1/3: 73-88

Militz H. 2002. Thermal treatment of wood: European processes and their background. IRG/WP 02-40241: 20 str.

Morsing N. 2000. Densification of wood – the influence of hygrothermal treatment on compression of beech perpendicular to the grain. Department of structural engineering and materials technical university of Denmark, 79: 138 str.

Pohleven F., Rep, G. 2004. Postopek termične modifikacije lesa v vakuumu: številka patentne prijave P-200400064. Urad Republike Slovenije za intelektualno lastnino. Ljubljana: 6 str.

Patzelt M., Stingel R., Teischinger A. 2002. Thermische Modifikation von Holz und deren Einfluss auf ausgewählte Holzeigenschaften, V: Modifiziertes Holz: Eigenschaften und Märkte. Teischinger A., Stingel R. (ed.). Wein, LIGNOVISINEN: 101-147

Rep G. 2008. Modificiran les. Lesarski utrip, 14, 2:22-23

Silvaproduct, izvirni postopek termične modifikacije lesa.
http://www.silvaproduct.si/default.asp?page_id=01KKJATZdR0352V92U5C1438001201

(5.09.2014)

Syrjanen T., Oy K. 2001. Production and classification of heat treated wood in Finland. V:
Review on heat treatemens of wood. Rapp A.O. (ur.) Luxemburg, Office for Official
Publications of the European Communités: 9 str.

Welzbacher C. R., Brischke C., Rapp A. O. 2007. Influence of treatment temperature and
duration on selected biological, mechanical, physical and optical properties of thermally
modified timber. Wood Material Science and Engineering, 1, 1: 34-38

ZAHVALA

Prof. dr. Mihi Humarju in doc. dr. Andreji Kutnar za strokovno pomoč, usmerjanje in motivacijo do končnega cilja. Prijetno je bilo sodelovati.

Vsem sodelavcem delovne skupine za patologijo in zaščito lesa za prijaznost in ustrežljivost. Zahvala tudi prof. dr. Marku Petriču za recenzijo in odzivnost.

Evi Juliji, Maruški, Vidu, staršem in prijateljem, ki so mi pokazali, da je življenje lepo.

PRILOGE

Priloga 1: Povprečne vrednosti povratno tlačne deformacije modificiranih ter zgoščenih bukovih in smrekovih vzorcev

Lesna vrsta	Temperatura [°C]	Oznaka vzorcev	Povprečje mase [%]	Povprečje gostote [g/cm ³]	Povprečje izgube mase [%]	Povprečje gostote po TM [g/cm ³]
bukev	25	kontrola	0,0	0,7	-1,6	0,0
		zgostitev 1	0,0	1,1	-2,0	0,0
		zgostitev 2	0,0	1,1	-1,7	0,0
	190	kontrola	3,0	0,7	-1,2	0,7
		zgostitev 1	2,6	1,1	-1,4	1,1
		zgostitev 2	2,9	1,1	-0,9	1,1
	200	kontrola	4,2	0,7	-1,4	0,7
		zgostitev 1	4,0	1,1	-1,3	1,1
		zgostitev 2	4,3	1,1	-0,9	1,1
	210	kontrola	7,0	0,7	-1,4	0,7
		zgostitev 1	6,7	1,1	-1,2	1,0
		zgostitev 2	6,7	1,1	-0,6	1,1
	220	kontrola	11,9	0,7	-1,2	0,7
		zgostitev 1	11,8	1,1	-0,8	1,0
		zgostitev 2	11,5	1,1	-0,5	1,1
smreka	25	kontrola	0,0	0,4	-1,1	0,0
		zgostitev 1	0,0	1,0	-1,3	0,0
		zgostitev 2	0,0	0,9	-1,2	0,0
	190	kontrola	3,0	0,4	-0,7	0,4
		zgostitev 1	1,8	0,9	-0,7	0,9
		zgostitev 2	1,8	0,9	-0,7	0,9
	200	kontrola	3,4	0,4	-0,7	0,4
		zgostitev 1	2,4	0,9	-0,7	0,9
		zgostitev 2	2,4	0,9	-0,5	0,8
	210	kontrola	5,0	0,4	-0,5	0,4
		zgostitev 1	2,9	0,9	-0,7	0,9
		zgostitev 2	3,3	0,8	-0,8	0,8
	220	kontrola	6,7	0,4	-0,6	0,4
		zgostitev 1	4,8	1,0	-0,6	1,0
		zgostitev 2	5,2	0,9	-0,8	0,8

Priloga 2: Podatki o povprečni masi in dimenzijah zgoščenih ter termično modificiranih vzorcev smrekovine in bukovine v suhem stanju

SUHI VZORCI							
Lesna vrsta	Temperatura [°C]	Oznaka vzorcev	Cikel 1 [%]	Cikel 2 [%]	Cikel 3 [%]	Cikel 4 [%]	Cikel 5 [%]
bukev	25	kontrola	10,4	10,1	10,2	10,0	9,9
		zgoštev 1	45,4	58,5	62,1	62,8	63,7
		zgoštev 2	27,0	37,6	41,1	42,1	43,8
	190	kontrola	8,3	8,4	8,1	8,2	8,3
		zgoštev 1	27,7	33,4	32,7	33,5	33,8
		zgoštev 2	16,0	18,9	19,6	19,9	20,7
	200	kontrola	7,1	6,8	6,8	6,7	7,0
		zgoštev 1	17,4	21,4	21,8	22,5	23,3
		zgoštev 2	13,7	14,2	15,2	15,5	16,6
	210	kontrola	5,1	5,1	5,2	5,2	5,2
		zgoštev 1	16,7	17,9	18,4	19,0	19,4
		zgoštev 2	10,9	12,1	11,7	12,9	13,3
	220	kontrola	4,3	4,5	4,7	4,7	4,8
		zgoštev 1	9,3	10,4	10,7	10,6	11,1
		zgoštev 2	6,6	7,2	7,1	8,1	8,5
smreka	25	kontrola	4,0	3,8	3,9	3,7	3,7
		zgoštev 1	47,0	65,7	71,5	73,0	73,6
		zgoštev 2	58,7	74,9	79,1	79,8	80,2
	190	kontrola	3,3	3,4	3,2	3,2	3,2
		zgoštev 1	25,3	33,9	35,9	37,8	37,9
		zgoštev 2	38,4	48,5	50,6	52,0	51,9
	200	kontrola	2,8	2,8	2,6	2,8	2,8
		zgoštev 1	21,2	25,9	28,4	29,9	31,1
		zgoštev 2	29,2	35,1	37,3	38,5	39,0
	210	kontrola	2,6	2,5	2,6	2,6	2,6
		zgoštev 1	19,5	33,3	26,8	27,7	27,6
		zgoštev 2	24,2	28,0	29,2	29,3	29,4
	220	kontrola	2,3	2,2	2,3	2,2	2,2
		zgoštev 1	13,4	14,9	16,2	16,1	16,4
		zgoštev 2	15,5	17,8	19,4	19,2	19,4

Priloga 3: Podatki o povprečni masi in dimenzijah zgoščenih ter termično modificiranih vzorcev smrekovine in bukovine v vlažnem stanju

MOKRI VZORCI							
Lesna vrsta	Temperatura [°C]	Oznaka vzorcev	Cikel 1 [%]	Cikel 2 [%]	Cikel 3 [%]	Cikel 4 [%]	Cikel 5 [%]
bukev	25	kontrola	0,6	0,5	0,6	0,8	1,1
		zgostitev 1	32,1	35,6	38,3	38,7	40,1
		zgostitev 2	14,7	18,4	21,2	21,4	24,0
	190	kontrola	-0,2	-0,2	-0,3	-0,6	-0,5
		zgostitev 1	11,8	12,5	13,3	11,8	13,5
		zgostitev 2	1,9	3,0	4,7	4,1	5,4
	200	kontrola	-0,5	-0,6	-0,9	-0,8	-1,1
		zgostitev 1	4,8	5,7	5,9	5,4	6,4
		zgostitev 2	1,9	2,3	2,6	2,6	3,0
	210	kontrola	-0,5	-0,7	-0,7	-0,8	-0,9
		zgostitev 1	3,3	3,4	3,1	2,3	3,7
		zgostitev 2	0,6	-0,6	-0,5	0,3	0,3
	220	kontrola	-0,6	-0,8	-0,8	-1,0	-1,0
		zgostitev 1	-0,2	-0,4	-0,6	-1,0	-0,7
		zgostitev 2	-0,6	-0,8	-1,2	-1,4	-1,3
smreka	25	kontrola	0,5	0,8	0,7	0,4	0,6
		zgostitev 1	28,3	35,7	40,4	37,5	41,6
		zgostitev 2	44,0	51,1	53,5	51,6	54,8
	190	kontrola	-0,3	-0,4	-0,3	-0,6	-0,6
		zgostitev 1	8,5	11,5	12,5	11,3	13,4
		zgostitev 2	20,9	25,3	27,1	25,5	26,6
	200	kontrola	-0,5	-0,6	-0,6	-0,5	-0,9
		zgostitev 1	4,7	6,8	8,0	7,4	9,2
		zgostitev 2	10,4	13,2	14,0	13,3	15,3
	210	kontrola	-0,5	-0,6	-0,5	-0,6	-0,5
		zgostitev 1	4,2	6,6	7,3	6,6	8,6
		zgostitev 2	7,7	8,6	8,9	7,7	9,7
	220	kontrola	-0,5	-0,6	-0,8	-0,7	-0,9
		zgostitev 1	0,4	1,6	1,7	1,3	2,1
		zgostitev 2	2,5	3,2	3,6	3,0	4,0

Priloga 4: Standardni odkloni povratne tlačne deformacije modificiranih ter zgoščenih bukovih in smrekovih vzorcev

STANDARDNI ODKLON – SUHI VZORCI							
Lesna vrsta	Temperatura [°C]	Oznaka vzorcev	Cikel 1 [%]	Cikel 2 [%]	Cikel 3 [%]	Cikel 4 [%]	Cikel 5 [%]
bukev	25	kontrola	0,6	0,5	0,6	0,8	1,1
		zghostitev 1	32,1	35,6	38,3	38,7	40,1
		zghostitev 2	14,7	18,4	21,2	21,4	24,0
	190	kontrola	-0,2	-0,2	-0,3	-0,6	-0,5
		zghostitev 1	11,8	12,5	13,3	11,8	13,5
		zghostitev 2	1,9	3,0	4,7	4,1	5,4
	200	kontrola	-0,5	-0,6	-0,9	-0,8	-1,1
		zghostitev 1	4,8	5,7	5,9	5,4	6,4
		zghostitev 2	1,9	2,3	2,6	2,6	3,0
	210	kontrola	-0,5	-0,7	-0,7	-0,8	-0,9
		zghostitev 1	3,3	3,4	3,1	2,3	3,7
		zghostitev 2	0,6	-0,6	-0,5	0,3	0,3
	220	kontrola	-0,6	-0,8	-0,8	-1,0	-1,0
		zghostitev 1	-0,2	-0,4	-0,6	-1,0	-0,7
		zghostitev 2	-0,6	-0,8	-1,2	-1,4	-1,3
smreka	25	kontrola	0,5	0,8	0,7	0,4	0,6
		zghostitev 1	28,3	35,7	40,4	37,5	41,6
		zghostitev 2	44,0	51,1	53,5	51,6	54,8
	190	kontrola	-0,3	-0,4	-0,3	-0,6	-0,6
		zghostitev 1	8,5	11,5	12,5	11,3	13,4
		zghostitev 2	20,9	25,3	27,1	25,5	26,6
	200	kontrola	-0,5	-0,6	-0,6	-0,5	-0,9
		zghostitev 1	4,7	6,8	8,0	7,4	9,2
		zghostitev 2	10,4	13,2	14,0	13,3	15,3
	210	kontrola	-0,5	-0,6	-0,5	-0,6	-0,5
		zghostitev 1	4,2	6,6	7,3	6,6	8,6
		zghostitev 2	7,7	8,6	8,9	7,7	9,7
	220	kontrola	-0,5	-0,6	-0,8	-0,7	-0,9
		zghostitev 1	0,4	1,6	1,7	1,3	2,1
		zghostitev 2	2,5	3,2	3,6	3,0	4,0

Priloga 5: Standardni odkloni mas in dimenzij zgoščenih ter termično modificiranih vzorcev smrekovine in bukovine v vlažnem stanju

STANDARNI ODKLON - MOKRI VZORCI							
Lesna vrsta	Temperatura [°C]	Oznaka vzorcev	Cikel 1 [%]	Cikel 2 [%]	Cikel 3 [%]	Cikel 4 [%]	Cikel 5 [%]
bukov	25	kontrola	2,2	2,1	2,0	1,9	2,0
		zgoštev 1	11,8	9,3	7,9	8,0	7,4
		zgoštev 2	4,2	6,6	6,4	6,5	5,8
	190	kontrola	1,7	1,6	1,6	1,7	1,6
		zgoštev 1	7,2	8,4	8,0	8,2	9,2
		zgoštev 2	3,6	4,8	4,5	5,6	5,1
	200	kontrola	1,9	1,7	1,6	1,6	1,7
		zgoštev 1	4,5	3,6	3,8	3,3	3,7
		zgoštev 2	5,3	6,3	6,0	6,1	6,3
	210	kontrola	1,0	1,1	1,0	1,1	1,1
		zgoštev 1	5,1	5,2	5,1	5,5	5,9
		zgoštev 2	1,9	2,4	2,7	2,5	2,6
	220	kontrola	1,0	1,3	1,2	1,3	1,4
		zgoštev 1	5,3	5,4	4,8	5,5	6,2
		zgoštev 2	2,4	2,7	4,0	3,7	3,8
smreka	25	kontrola	0,5	0,7	0,6	0,6	0,5
		zgoštev 1	16,3	21,5	22,5	22,9	23,1
		zgoštev 2	18,8	20,3	19,8	19,8	19,9
	190	kontrola	0,3	0,9	0,4	0,3	0,3
		zgoštev 1	5,1	8,8	9,6	10,0	9,7
		zgoštev 2	15,3	18,8	19,2	19,1	18,6
	200	kontrola	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5
		zgoštev 1	3,0	4,2	5,2	5,5	5,7
		zgoštev 2	9,1	11,0	11,0	11,5	11,1
	210	kontrola	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3
		zgoštev 1	5,8	18,8	7,4	7,6	7,7
		zgoštev 2	8,1	11,3	11,1	11,3	11,4
	220	kontrola	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4
		zgoštev 1	1,4	1,8	1,8	1,8	1,9
		zgoštev 2	4,0	4,8	4,9	5,1	5,1