

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Marko TROP

**VPLIV VELIKOSTI PREIZKUŠANCEV NA
DOLOČANJE MEHANSKIH LASTNOSTI LESA**

DIPLOMSKI PROJEKT

Visokošolski strokovni študij - 1. stopnja

Ljubljana, 2014

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Marko TROP

**VPLIV VELIKOSTI PREIZKUŠANCEV NA DOLOČANJE
MEHANSKIH LASTNOSTI LESA**

DIPLOMSKI PROJEKT
Visokošolski strokovni študij - 1. stopnja

**INFUENCE OF THE SPECIMEN SIZE ON THE DETERMINATION
OF MECHANICAL PROPERTIES OF WOOD**

B.Sc. THESIS
Professional Study Programmes

Ljubljana, 2014

Diplomski projekt je zaključek Visokošolskega strokovnega študija Tehnologije lesa in vlaknatih kompozitov – 1. stopnja. Delo je bilo opravljeno na Katedri za tehnologijo lesa.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval prof. dr. Željka Goriška, za somentorja doc. dr. Aleša Stražeta in za recenzentko doc. dr. Dominiko Gornik Bučar.

Mentor: prof. dr. Željko Gorišek

Somentor: doc. dr. Aleš Straže

Recenzentka: doc. dr. Dominika Gornik Bučar

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Diplomski projekt je rezultat lastnega dela. Podpisani se strinjam z objavo svojega diplomskega projekta na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je projekt, ki sem ga oddal v elektronski obliki, identičen tiskani verziji

Marko Trop

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Dv1
DK	UDK 630*812
KG	les/modul elastičnosti/togost lesa/dinamična metoda
AV	TROP, Marko
SA	GORIŠEK, Željko (mentor)/STRAŽE, Aleš (somentor)/GORNIK BUČAR, Dominika (recenzentka)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2014
IN	VPLIV VELIKOSTI PREIZKUŠANCEV NA DOLOČANJE MEHANSKIH LASTNOSTI LESA
TD	Diplomsko delo (Visokošolski strokovni študij - 1. stopnja)
OP	IX, 28 str., 5 pregl., 24 sl., 13 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Raziskali smo vpliv velikosti preizkušanca in vlažnosti lesa na togostne lastnosti lesa. Izbrali smo les smreke in bukve ter izdelali preizkušance 6 različnih velikosti. V vsaki velikostni skupini smo izdelali po 5 preizkušancev. Preizkušance smo uravnovesili v 3 različnih klimatskih razmerah ($\varphi_1 = 33 \%$, $\varphi_2 = 65 \%$, $\varphi_3 = 87 \%$). Uravnovešenim preizkušancem smo določili module elastičnosti s 3-točkovnim upogibnim testom po EN 408 in z dinamičnim vzburjanjem v vzdolžni in prečni smeri. Izkazalo se je, da je ujemanje med metodami dobro, z determinacijskim koeficientom med vrednostmi statičnega in dinamičnega modula elastičnosti večjim od 0,9. Gostota in vlažnost lesa sta pomembno vplivali na module elastičnosti smrekovine in bukovine, medtem ko vpliv velikosti preizkušancev ni bil značilen.

KEY WORDS DOCUMENTATION

ND Dv1
DC UDC 630*812
CX wood/modulus of elasticity/stiffness/dynamic method
AU TROP, Marko
AA GORIŠEK, Željko (supervisor)/STRAŽE, Aleš (co-advisor)/GORNIK BUČAR, Dominika (reviewer)
PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
PY 2014
TY INFLUENCE OF THE SPECIMEN SIZE ON THE DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF WOOD
DT B. Sc. Thesis (Professional Study Programmes)
NO IX, 28 p., 5 tab., 24 fig., 13 ref.
LA sl
Al sl/en
AB The influence of the specimen size on testing the stiffness of wood was researched. The wood of Northern spruce and European beech was chosen and the specimens were produced in 6 different sizes. 5 specimens were produced for each size group. The specimens were equilibrated at 3 different climatic conditions ($\varphi_1 = 33 \%$, $\varphi_2 = 65 \%$, $\varphi_3 = 87 \%$). The modulus of elasticity was determined for the equilibrated specimens using 3-point bending test according to EN 408, and dynamic excitation in longitudinal and transverse direction. It turned out that the correlation between the methods was good with the coefficient of determination between static and dynamic modulus of elasticity greater than 0.9. The density and the moisture content had a significant influence on the moduli of elasticity of spruce and beech wood, while impact of specimen size was not significant.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA.....	III
KEY WORDS DOCUMENTATION.....	IV
KAZALO.....	V
KAZALO SLIK.....	VI
KAZALO PREGLEDNIC.....	VII

1 UVOD	1
1.1 POSTAVITEV PROBLEMA.....	1
1.2 HIPOTEZE	1
1.3 CILJI NALOGE	1
2 PREGLED LITERATURE	2
2.1 LES IN NJEGOVE MEHANSKE LASTNOSTI.....	2
2.2 VARIABILNOST ZGRADBE LESA.....	3
2.3 VPLIV GOSTOTE IN VSEBNOSTI VLAGE NA TOGOST	5
2.4 POVEZAVA MED TRDNOSTJO IN TOGOSTJO	5
2.5 METODE DOLOČEVANJA MEHANSKIH LASTNOSTI	6
2.5.1 Statični upogib (EN 408)	6
2.5.2 Vzдолžno elastično vzbujanje.....	7
2.5.3 Prečno elastično vzbujanje prostoležečega preizkušanca	8
3 MATERIALI IN METODE	9
3.1 MATERIALI	9
3.1.1 Priprava preizkušancev	9
3.1.2 Meritve preizkušancev	10
3.2 METODE	11
3.2.1 Določanje modula elastičnosti z vzdolžnim vzbujanjem	11
3.2.2 Določanje modula elastičnosti s prečnim vzbujanjem.....	12
3.2.3 Določanje modula elastičnosti s statičnim upogibom	14
4 REZULTATI IN RAZPRAVA.....	16
4.1 VPLIV VELIKOSTI PREIZKUŠANCEV NA MODUL ELASTIČNOSTI.....	16
4.2 VPLIV GOSTOTE IN VLAŽNOSTI NA MODUL ELASTIČNOSTI.....	20
4.3 PRIMERJAVA METOD	25
5 SKLEPI	27

6	VIRI	28
ZAHVALA		

KAZALO SLIK

Slika 1:	Napetostno deformacijska krivulja; σ_{prop} – meja proporcionalnosti, σ_{zr} – zrušitvena napetost, W – delo do meje proporcionalnosti (Gorišek, 2012).....	3
Slika 2:	Odvisnost gostote lesa od širine branik (Gorišek, 2012).....	4
Slika 3:	Zveza med E – modulom (togostjo) in gostoto lesa pri svežem in zračno suhem lesu (Gorišek, 2012).....	5
Slika 4:	Upogibni preizkus s tri točkovno (levo) in štiri točkovno (desno) obremenitvijo.	6
Slika 5:	Vzdolžno elastično vzbujanje prosto vpetega preizkušanca.....	7
Slika 6:	Prečno elastično vzbujanje prosto vpetega preizkušanca	8
Slika 7:	Velikosti preizkušancev po skupinah	9
Slika 8:	Smrekovi vzorci (a); bukovni vzorci (b); vzorci izpostavljeni določeni klimi (c).....	9
Slika 9:	Meritve mase (levo) in dimenzij (desno) preizkušancev	10
Slika 10:	Merilna veriga za zajemanje akustičnega signala– vzdolžno vzbujanje	11
Slika 11:	Princip prečnega vzbujanja preizkušancev in zajemanje zvočnega signala	12
Slika 12:	Označitev mesta naleganja preizkušancev na elastično podporo	13
Slika 13:	Testirni stroj Zwick Z100 (levo) in Zwick Z005 (desno).....	14
Slika 14:	Vpliv velikosti preizkušancev (od manjših BU-3 in SM-3 do največjih BU-6 in SM-6) na modul elastičnosti pri vzdolžnem vzbujanju bukovine (levo) in smrekovine (desno) v treh različnih klimatskih pogojih ($\varphi = 33\%$; $\varphi = 65\%$; in $\varphi = 87\%$).	17
Slika 15:	Vpliv velikosti preizkušancev (od manjših BU-3 in SM-3 do največjih BU-6 in SM-6) na modul elastičnosti pri prečnem vzbujanju bukovine (levo) in smrekovine (desno) v treh različnih klimatskih pogojih ($\varphi = 33\%$; $\varphi = 65\%$; in $\varphi = 87\%$).	17
Slika 16:	Vpliv velikosti preizkušancev (od manjših BU-1 in SM-1 do največjih BU-6 in SM-6) na modul elastičnosti pri tritočkovnem upogibu bukovine (levo) in smrekovine (desno) v treh različnih klimatskih pogojih ($\varphi = 33\%$; $\varphi = 65\%$; in $\varphi = 87\%$).	18
Slika 17:	Vpliv gostote na modul elastičnosti pri vzdolžnem vzbujanju bukovih preizkušancev različnih velikosti (od manjših BU-3 do največjih BU-6) uravnovešenih v treh različnih klimatskih pogojih ($\varphi = 33\%$; $\varphi = 65\%$; in $\varphi = 87\%$).	21
Slika 18:	Vpliv gostote na modul elastičnosti pri vzdolžnem vzbujanju smrekovih preizkušancev različnih velikosti (od manjših SM-3 do največjih SM-6) uravnovešenih v treh različnih klimatskih pogojih ($\varphi = 33\%$; $\varphi = 65\%$; in $\varphi = 87\%$).	21
Slika 19:	Vpliv gostote na modul elastičnosti pri prečnem vzbujanju bukovih preizkušancev različnih velikosti (od manjših BU-3 do največjih BU-6) uravnovešenih v treh različnih klimatskih pogojih ($\varphi = 33\%$; $\varphi = 65\%$; in $\varphi = 87\%$).	22
Slika 20:	Vpliv gostote na modul elastičnosti pri prečnem vzbujanju smrekovih preizkušancev različnih velikosti (od manjših SM-3 do največjih SM-6) uravnovešenih v treh različnih klimatskih pogojih ($\varphi = 33\%$; $\varphi = 65\%$; in $\varphi = 87\%$).	22

Slika 21:	Vpliv gostote na modul elastičnosti pri statičnem upogibu bukovih preizkušancev različnih velikosti (od manjših BU-1 do največjih BU-6) uravnovešenih v treh različnih klimatskih pogojih ($\varphi = 33\%$; $\varphi = 65\%$; in $\varphi = 87\%$).....	23
Slika 22:	Vpliv gostote na modul elastičnosti pri statičnem upogibu smrekovih preizkušancev različnih velikosti (od manjših SM-1 do največjih SM-6) uravnovešenih v treh različnih klimatskih pogojih ($\varphi = 33\%$; $\varphi = 65\%$; in $\varphi = 87\%$).....	24
Slika 23:	Primerjava modulov elastičnosti bukovine določenih s prečnim- (levo) in z vzdolžnim dinamičnim vzbujanjem (desno) s statično upogibno metodo pri treh različnih vlažnostih.....	25
Slika 24:	Primerjava modulov elastičnosti smrekovine določenih s prečnim- (levo) in z vzdolžnim dinamičnim vzbujanjem (desno) s statično upogibno metodo pri treh različnih vlažnostih.....	26

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1:	Uporabljene solne raztopine, ter odgovarjajoče relativne zračne vlažnosti ϕ in pričakovane ravnovesne vlažnosti lesa EMC_a	10
Preglednica 2:	Povprečne vrednosti modulov elastičnosti bukovih preizkušancev različnih velikosti (BU-1: d (debelina) = 5 mm, BU-2: d = 10 mm, BU-3: d = 15 mm, BU-4: d = 20 mm, BU-5: d = 25 mm in BU-6: d = 30 mm), določene s tremi različnimi metodami, v treh različnih ravnovesnih stanjih.....	16
Preglednica 3:	Povprečne vrednosti modulov elastičnosti smrekovih preizkušancev različnih velikosti (SM-1: d = 5 mm, SM-2: d = 10 mm, SM-3: d = 15 mm, SM-4: d = 20 mm, SM-5: d = 25 mm in SM-6: d = 30 mm), določene s tremi različnimi metodami, v treh različnih ravnovesnih stanjih.	16
Preglednica 4:	Povprečne vrednosti specifičnih modulov elastičnosti bukovih preizkušancev različnih velikosti (od manjših BU-1 do največjih BU-6), določene s tremi različnimi metodami, v treh različnih ravnovesnih stanjih.....	18
Preglednica 5:	Povprečne vrednosti specifičnih modulov elastičnosti smrekovih preizkušancev različnih velikosti (od manjših SM-1 do največjih SM-6), določene s tremi različnimi metodami, v treh različnih ravnovesnih stanjih.....	19

1 UVOD

Les je naraven material, katerega uporabnost je, zaradi izjemnih lastnosti, zelo razširjena za različne pohištvene in druge izdelke. V primerjavi z ostalimi materiali ima les zelo dobre mehanske lastnosti glede na lastno težo, zato se uporablja tudi v konstrukcijske namene. Kadar pa je govora o konstrukcijah, pa seveda najprej pomislimo na varnost izdelkov. Le to lahko zagotovimo z izbiro primernih dimenzij konstrukcijskih nosilcev, pri čemer pa so nujne ustrezne mehanske lastnosti izbranega lesa.

1.1 POSTAVITEV PROBLEMA

Za določitev mehanskih lastnosti lesa je v veljavi uporaba "čistih" in orientiranih vzorcev relativno velikih dimenzij. Pri proučevanju mehanskih lastnosti različnih kategorij lesa, kot sta na primer reakcijski in juvenilni les, imamo, zaradi relativno manjšega deleža, težave pri izdelavi s standardi predpisane velikosti preizkušancev. Primerjave rezultatov iz preizkušanj s podatki iz literature so tako večkrat irelevantne. Netočnost metod se tako pojavi zaradi variabilnosti lesa znotraj vzorca. Večji kot je vzorec, več nepravilnosti zajamemo v test določanja mehanskih lastnosti.

1.2 HIPOTEZE

Predpostavljamo, da zaradi variabilnosti lesa in posledično večjega ali manjšega vpliva posameznih rastnih posebnosti, na določanje mehanskih lastnosti vpliva tudi velikost preizkušancev, zato je potrebno tudi rezultate iz literature obravnavati kritično, še posebno kadar želimo podatke uporabiti v aplikativnih primerih. Domnevamo, da se z večanjem preizkušanca večja tudi variabilnost izmerjenih podatkov pri merjenju mehanskih lastnosti, saj pri večjih preizkušancih zajamemo več rastnih nepravilnosti. Povečano variabilnost rezultatov v tem primeru pričakujemo tudi med posameznimi metodami s katerimi določamo modul elastičnosti lesa. Predpostavljamo tudi, da lesna vlažnost in gostota vplivata na modul elastičnosti.

1.3 CILJI NALOGE

Ker predpostavljamo, da zaradi variabilnosti lesa in posledično značilnosti posameznih rastnih posebnosti, na mehanske lastnosti vpliva več dejavnikov, bomo na primeru bukovine (*Fagus sylvatica* L.) in smrekovine (*Picea abies* Karst.) kritično ovrednotili:

- vpliv velikosti preizkušancev na oceno povprečne togosti lesa,
- primernost oziroma natančnost in točnost dinamičnih in statičnih metod določanja mehanskih lastnosti lesa in
- vpliv gostote in vlažnosti lesa na njegove elastične lastnosti.

2 PREGLED LITERATURE

2.1 LES IN NJEGOVE MEHANSKE LASTNOSTI

Mehanske lastnosti lesa so zelo pomembne, kadar se ta uporablja v konstrukcijske namene. Les pa ima kot konstrukcijski material številne prednosti pred drugimi inženirskimi gradivi:

- manj energije potrebne za predelavo,
- postopki obdelave so relativno enostavni, manjša je poraba energije za predelavo,
- je naraven in okolju prijazen (skladiščenje CO₂) material,
- ima zelo ugodno razmerje med mehanskimi lastnostmi in njegovo maso oz. gostoto,
- ima prijeten naraven videz in
- je cenovno dostopen material.

Zaradi številnih prednosti je uporaba lesa v konstrukcijah velika. Pri tovrstni uporabi je les lahko obremenjen na nateg, tlak, strig, upogib in torzijsko. Predvsem pomembno pri teh obremenitvah pa je, da ne povzročajo porušnih deformacij, ampak se gibljejo v elastičnem območju.

Pri manjših obremenitvah lesa je zveza med napetostjo in deformacijo linearna, na lesu pa opazujemo reverzibilne elastične deformacije (Gorišek, 2009). Govorimo o modulu elastičnosti – elastičnosti oz. togosti lesa. Matematično zapišemo linearno zvezo napetosti in deformacije s Hookovim zakonom:

$$\sigma = E \times \varepsilon \text{ [MPa]} \quad \dots(1)$$

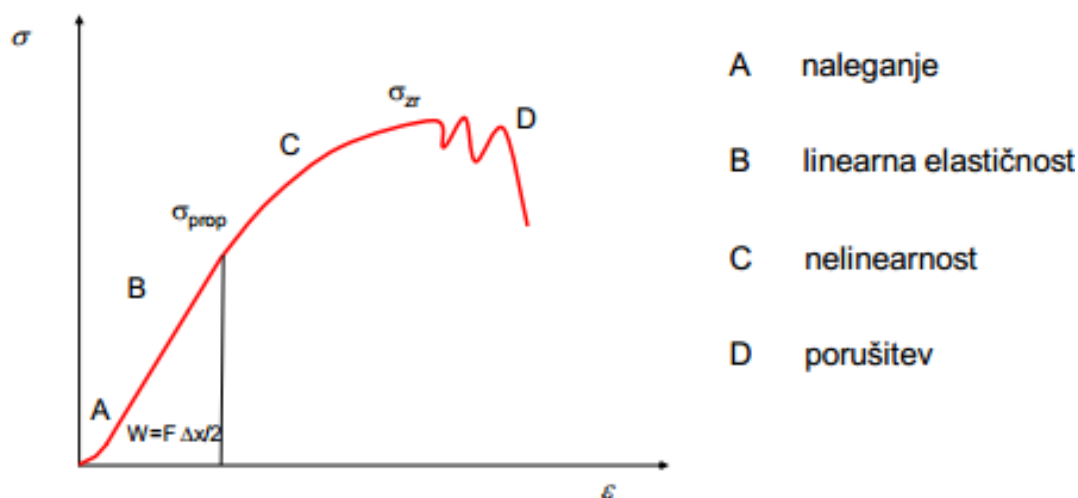
pri čemer je:

- σ ... napetost [MPa],
- E ... faktor proporcionalnosti, imenovan tudi modul elastičnosti, prožnostni modul, E-modul ali Youngov modul [MPa] in
- ε ... specifična deformacija, definirana z relativno spremembo dolžine ($\Delta l/l$).

Manjši kot ima material modul elastičnosti, bolj je prožen oz. elastičen. Z večanjem elastičnega modula, pa se večja tudi togost materiala. Modul elastičnosti je v napetostno-deformacijskem diagramu definiran z naklonom napetostno-deformacijske krivulje v začetnem linearnem – elastičnem območju (Sika 1). V tem območju napetosti so vse deformacije reverzibilne.

Z večanjem deformacije se nad linearnim območjem začne nelinearno območje – plastična deformacija. Takrat se začena deformacija tudi hitreje povečevati od naraščajoče napetosti. Ta deformacija je nepovratna, ki nastane pri večjih in dolgotrajnih obremenitvah. Mejo med elastično in plastično deformacijo imenujemo meja proporcionalnosti.

Največja možna obremenitev, ki jo les še premore, je porušna napetost. Ta napetost je tudi najvišja napetost napetostno-deformacijske krivulje. V tem trenutku se začne porušitev, ki pa je pri nekaterih materialih zelo hitra, pri drugih pa nastopi do končnega porušanja še več delnih porušitev, ko še vedno nosijo nekaj bremena. Konstrukcijski materiali s širšim območjem porušitve, kamor uvrščamo tudi les, imajo velik pomen z varnostnega vidika (Gorišek 2009).



Slika 1: Napetostno deformacijska krivulja; σ_{prop} – meja proporcionalnosti, σ_{zr} – zrušitvena napetost, W – delo do meje proporcionalnosti (Gorišek, 2012).

2.2 VARIABILNOST ZGRADBE LESA

Med drevesnimi vrstami so skozi čas nastale velike razlike (primitivni iglavci, naprednejši listavci), saj se je les evolucijsko razvijal. Zaradi značilnega plastnega priraščanja in najrazličnejših rastnih pogojev so znatne razlike tudi v zgradbi med lesnimi vrstami v okviru iste vrste in tudi v drevesu (Čufar, 2006):

- v radialni smeri od stržena proti kambiju,
- znotraj letne prirastne plasti (branike) in
- vzdolž debla oz. po višini drevesa.

Tako imamo znotraj drevesa veliko razliko že med mladostnim - juvenilnim in zrelim - adultnim lesom. Juvenilni les navadno nastaja prvih 10 do 20 let in je zaradi krajših vlaken in velikih vzdolžnih skrčkov manj primeren za obdelavo. Adultni les pa je relativno dimenzijsko stabilen in tudi v svojih razsežnostih lastnostno manj variira, kot juvenilni les. S staranjem lesa se njegova gostota in mehanske lastnosti večajo (Gorišek in Straže, 2000). Razlike v lastnostih, predvsem v gostoti, najdemo tudi znotraj letne prirastne plasti – branike, katero sestavljata rani in kasni les. Rani les je manj gost, kot kasni les, delež vsakega pa je odvisen od pogojev rasti, starosti drevesa, hranilne sestave tal, podnebja v drevesnem območju in ostalih dejavnikov. Razmerje med gostoto ranega in gostoto kasnega lesa v braniki se od vrste do vrste razlikuje; pri iglastih drevesnih vrstah je to razmerje veliko, pri venčasto poroznih listavcih je za približno polovico manjše, pri raztreseno poroznih listavcih pa najmanjše. Znano je tudi, da se z večanjem branike pri iglavcih večja delež ranega lesa, kar pomeni, da imajo hitrorastoči iglavci (se pravi iglavci na ugodnih rastnih področjih) manjšo gostoto in posledično slabše mehanske lastnosti ter nižje trdnosti. Za venčasto porozne listavce velja obratna zakonitost; pri hitrejšem priraščanju, ko se tvorijo širše branike, je delež kasnega lesa večji, zato je tudi gostota večja (Slika 2).



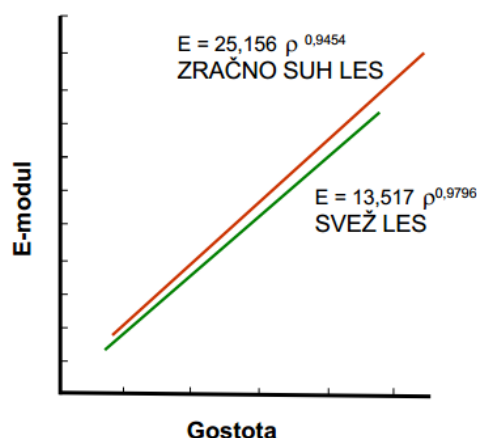
Slika 2: Odvisnost gostote lesa od širine branik (Gorišek, 2012).

V istem drevesu variabilno zgradbo predstavljajo tudi rastne anomalije kot so grče, reakcijski (tenzijski – listavci, kompresijski – iglavci) les in druge. Te anomalije imajo drugačne lastnosti kot 'normalen' del lesa. Grče imajo gostejšo sestavo, reakcijski les pa je zaradi krajših vlaken in drugačne sestave na submikroskopskem nivoju (drugačni koti celuloznih mikrofibril itd.) ter posledično neznačilnega delovanja neprimeren za uporabo.

Vse te anomalije in rastne posebnosti se pojavljajo v lesu znotraj enega drevesa na različnih mestih. Možnost, da jih zajamemo v preizkušane, se z večanjem le tega večja. Zato velja za teste preizkušanja trdnosti lesa, da večji kot imamo preizkušane, več lesne variabilnosti in raznih anomalij zavzamemo v njem. S tem popačimo rezultate preizkušanj, saj iščemo merodajne rezultate, le tistih meritev brez anomalij in drugih pretiranih rastnih posebnosti.

2.3 VPLIV GOSTOTE IN VSEBNOSTI VLAGE NA TOGOST

Gostota je najpomembnejši parameter pri napovedi mehanskih lastnosti lesa (Sonderegger in sod., 2008). Vpliva tudi na fizikalne tehnološke lastnosti lesa. Z naraščanjem gostote dokaj premo sorazmerno naraščajo tudi mehanske lastnosti lesa (Slika 3), kot so trdnost, trdota, udarna žilavost in modul elastičnosti (Gorišek in Straže, 2000; Sonderegger in sod., 2008). Tako lahko po gostoti dokaj dobro sklepamo kakšne so mehanske lastnosti lesa.



Slika 3: Zveza med E – modulom (togostjo) in gostoto lesa pri svežem in zračno suhem lesu (Gorišek, 2012).

Vlažnost lesa vpliva negativno na njegovo togost (Slika 3). Največji vpliv ima na tlačno trdnost, manjši na strižno trdnost in elastični modul, ter najmanjši na natezno trdnost (Gorišek, 2009). Vpliv vlažnosti na mehanske lastnosti lesa je prisoten le pod točko nasičenja celičnih sten. Večja kot je vlažnost lesa, manjši je modul elastičnosti in slabše so mehanske lastnosti. Nad higroskopskim (TNCS) območjem ni več bistvenih razlik v mehanskih lastnostih, ne glede na vsebnost vlage lesa.

2.4 POVEZAVA MED TRDNOSTJO IN TOGOSTJO

Trdnost lesa je največja možna napetost, ki jo les premore; se pravi govorimo o porušni napetosti lesa. Togost lesa pa je definirana s potrebno napetostjo, da lahko opravimo določeno deformacijo v linearnem – elastičnem območju. Ker se obe veličini enako obnašata ob spreminjanju gostote ali vlažnosti lesa in tudi od drugih mehansko vplivnih dejavnikov (temperatura, potek vlaken,...), sta zato tudi tesno povezani. Večja togost lesa pomeni višjo trdnost lesa in obratno. Torej je togost lesa dober pokazatelj njegove trdnosti (The wood database., 2014).

2.5 METODE DOLOČEVANJA MEHANSKIH LASTNOSTI

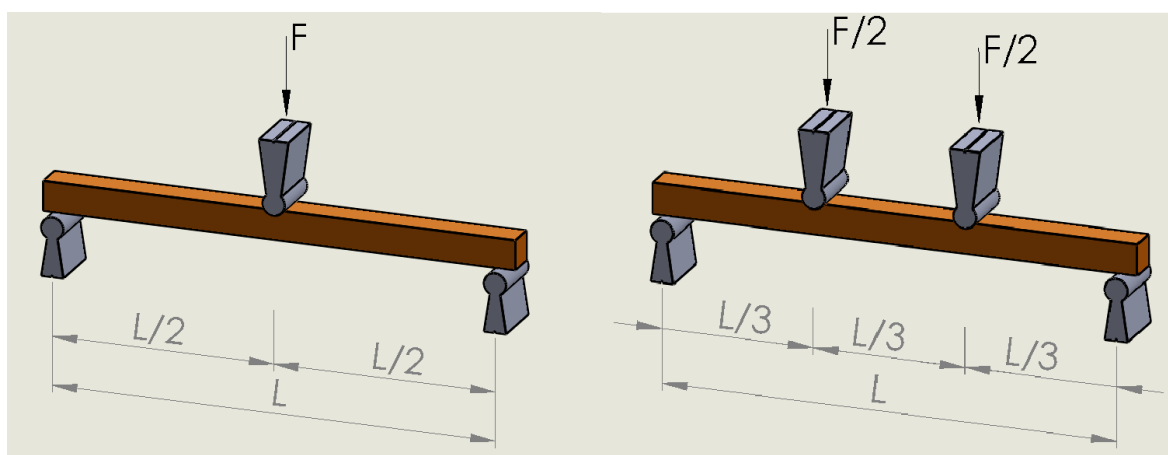
Metode s katerimi določamo mehanske lastnosti lesa so lahko porušne ali neporušne. S prvimi testiramo les do njegove porušitve, kar je tudi slabost teh metod.

Neporušne oz. nedestruktivne metode pa nam omogočajo testirati les in s tem spoznavati njegove relevantne lastnosti, brez da bi zaradi postopka določanja te lastnosti spremenili ali kakor koli vplivali na preizkušan material. To je zelo pomembno, kadar želimo preizkušan les uporabiti kot inženirski material v konstrukcijske namene. Preizkušanje je postalo nujno za vse proizvajalce ali uporabnike konstrukcijskega lesa in ker preizkušamo konstrukcijski les, je treba meritve izvajati tako, da ga ne poškodujemo (Gornik Bučar, 2008). Nedestruktivne metode testiranja ali nedestruktivno ocenjevanje materiala je namreč po definiciji veda, ki meri oz. določa fizikalne in mehanske lastnosti materiala, ne da bi s postopkom ugotavljanja vplivali na končno uporabnost materiala. (Pellerin in Ross, 1994).

2.5.1 Statični upogib (EN 408)

Statični upogib je v osnovi destruktivna (porušna) metoda, ki je najbolj uporabljena metoda za določanje upogibnih trdnostnih lastnosti lesa. Priznana sta dva načina statičnega preizkušanja, in sicer upogib s tri točkovno obremenitvijo in upogib s štiri točkovno obremenitvijo (slika 4). Pri statičnem upogibu vzorce testiramo na valjčnih podporah z obremenjevanjem na sredini podpor (tritočkovni upogib) ali na dveh simetričnih točkah (štiritočkovni upogib). Vzorec obremenjujemo vzporedno z letnicami (EN 408, 2003). Po standardu moramo uporabiti vzorce dimenzij 20x20x300 mm (Slika 5), razmik med valjčnimi podporami mora biti 280 mm in hitrost obremenjevanja mora biti konstantna 0,11 mm/s. Tri-točkovni upogibni test je manj natančen zaradi večjega pojava vtiskanja merilnih valjev v površino lesa in strižnih napetosti na mestu merjenja deformacije (povesa).

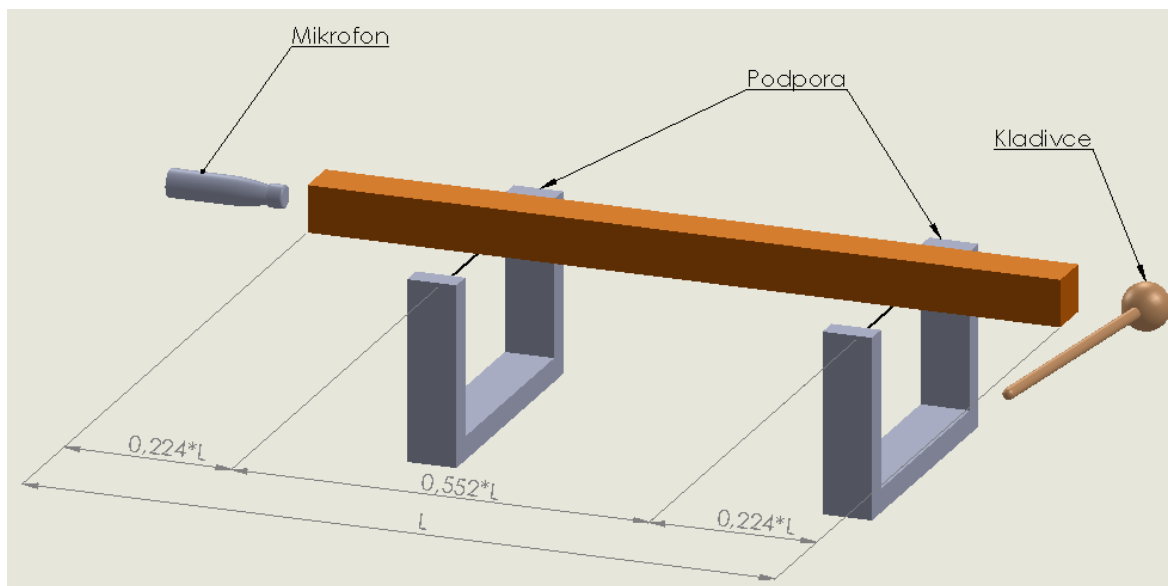
Statični upogib se lahko izvaja tudi na nedestruktiven način, kjer preizkušanec obremenimo le v področju elastičnosti oz. do meje proporcionalnosti napetosti in deformacije. V tem primeru ne dobimo podatka o trdnosti (porušni napetosti) materiala ampak le izračunamo modul elastičnosti.



Slika 4: Upogibni preizkus s tri točkovno (levo) in štiri točkovno (desno) obremenitvijo.

2.5.2 Vz dolžno elastično vz bujanje

Vzdolžno elastično vz bujanje je nedestruktivna metoda za določanje mehanskih lastnosti lesa, pri kateri imamo preizkušanec prosto vpet na elastičnih podporah. Z zunanjim elastičnim impulzom sile na prečni ploskvi induciramo vzdolž dovolj tankega preizkušanca zvočni val oz. vzbudimo preizkušanec v vzdolžno nihanje z njemu lastno frekvenco, katero pa izmerimo z mikrofonom ali pospeškometrom nastavljenim na zrcalni prečni površini nasproti mesta udarca (slika 5).



Slika 5: Vz dolžno elastično vz bujanje prosto vpetega preizkušanca

Hitrost zvočnega valovanja (v) je pri lesu odvisna od gostote in modula elastičnosti (Straže, 2013):

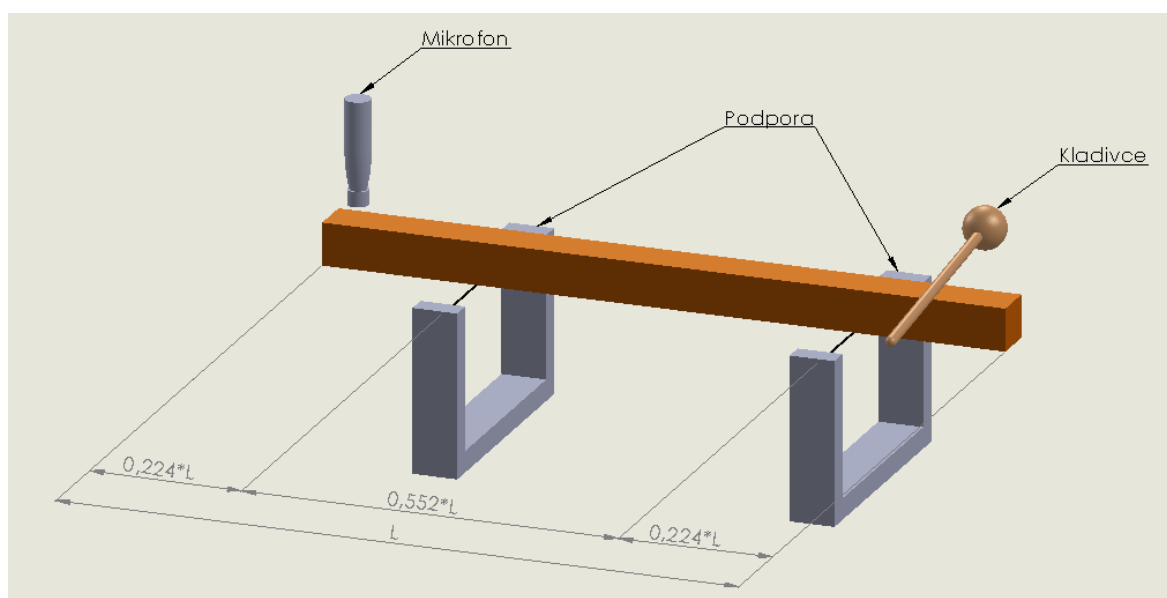
$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \text{ [m/s]} \quad \dots(2)$$

Hitrost valovanja v telesih, ki imajo vsaj dve vzporedni površini lahko določimo s pomočjo valovne dolžine (λ) in frekvence nihanja (f), saj je v osnovnem nihajnem načinu ($n = 1$) valovna dolžina enaka dvojni dolžini preizkušanca (Straže, 2013):

$$v = \lambda_n \times f_n = \frac{2 \times L}{n} \times f_n \text{ [m/s]} \quad \dots(3)$$

2.5.3 Prečno elastično vzbujanje prostoležečega preizkušanca

Je nedestruktivna metoda za določanje mehanskih lastnosti lesa, pri kateri postavimo preizkušane na dve elastični podpori na lokaciji t.i. vozlov oz. na lokaciji t.i. stoječih valov. Določitev modula elastičnosti s tehniko prečnega vzbujanja je bila prvič preučena v začetku 60ih let (Ross, 2007) in od takrat se je tej metodi namenjalo veliko pozornosti predvsem na področju nedestruktivnega razvrščanja lesa v konstrukcijske namene (Divos in Tanaka, 2005). Podpori se postavita na razdalji $0,224 \times L$ od obeh čel preizkušanca, prečno nihanje pa povzročimo s prečnim impulzom sile na koncu preizkušanca. Na mestu največje amplitude, običajno je to na drugem koncu preizkušanca glede na mesto udarjanja oz. vzbujanja, se izmeri lastna frekvenca z mikrofonom ali pospeškometrom (slika 6).



Slika 6: Prečno elastično vzbujanje prosto vpetega preizkušanca

3 MATERIALI IN METODE

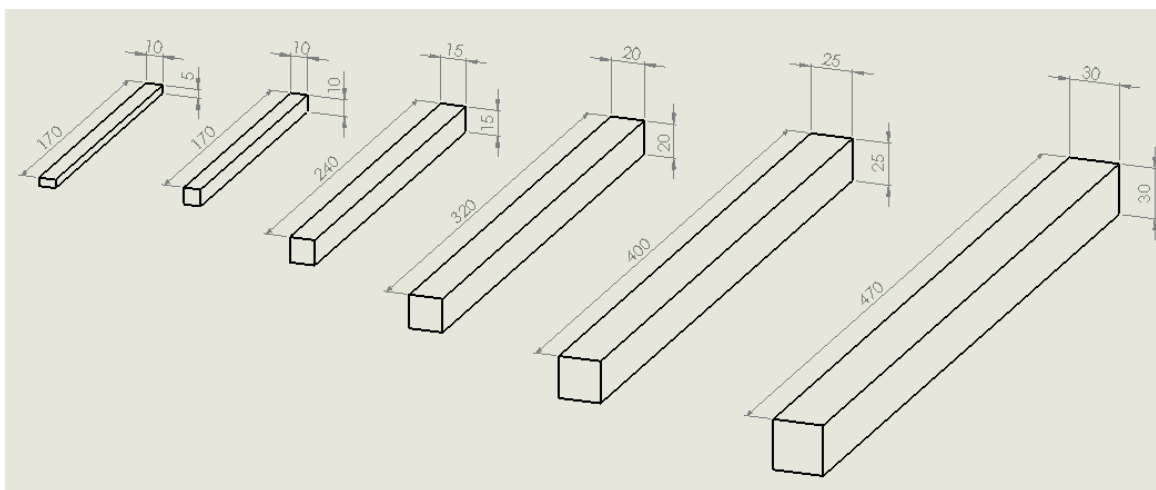
3.1 MATERIALI

3.1.1 Priprava preizkušancev

Za preizkušanje modula elastičnosti smo uporabili les smreke (*Picea abies* Karst.), ki je znan kot zelo uporabljen les v konstrukcijske namene in les bukve (*Fagus sylvatica* L.), ki je zelo razširjen v slovenski lesni industriji.

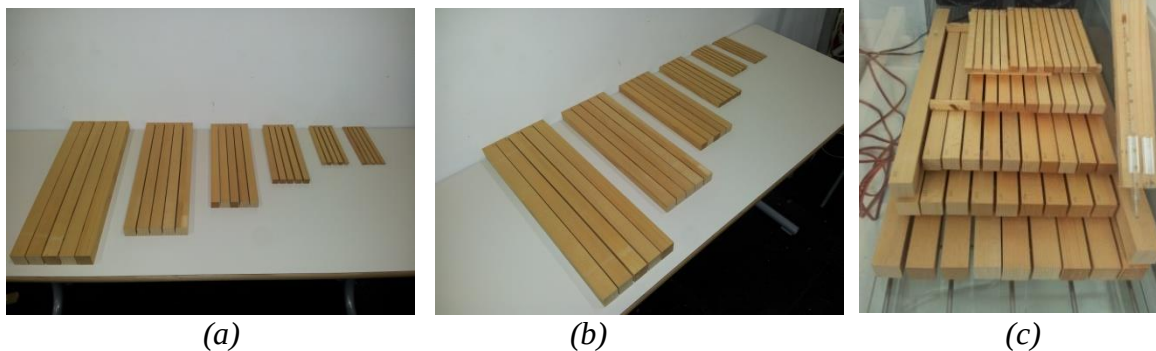
Izbrali smo radialne deske z vzdolžnim potekom vlaken, čim bolj homogene rasti in brez napak, kot so grče in druge rastne posebnosti.

Les smo posušili na vlažnost 6-8 %, iz katerega smo z razžagovanjem in skobljanjem izdelali vzdolžno orientirane vzporedne preizkušance različnih velikosti. Iz vsake lesne vrste smo izdelali 30 preizkušancev, ki so bili razvrščeni v 6 velikostnih skupin (po 5 preizkušancev iste velikosti) (Sl. 7). Preizkušance smo smiselno označili.



Slika 7: Velikosti preizkušancev po skupinah

Preizkušance smo pred vsakim testiranjem za 3 tedne uravnovešali v kontrolirani klimi s temperaturo 20 ± 1 °C in tremi različnim relativnimi zračnimi vlažnostmi (33 %; 65 %; 87 %) (Slika 8). Za vsako klimo smo uporabili iste preizkušance, saj smo jih vedno preizkušali nedestruktivno – tudi pri tritočkovnem upogibu le v območju elastičnosti.



Slika 8: Smrekovi vzorci (a); bukovi vzorci (b); vzorci izpostavljeni določeni klimi (c)

Izpostavitve klimi je potekala v zaprtih steklenih komorah s temperaturo $20 \pm 1^\circ\text{C}$, relativno zračno vlažnost pa smo dosegli z nasičenimi solnimi raztopinami (preglednica 1).

Preglednica 1: Uporabljene solne raztopine, ter odgovarjajoče relativne zračne vlažnosti φ in pričakovane ravnovesne vlažnosti lesa EMC_a .

Raztopina	φ [%]	EMC_a [%]
MgCl_2	33	6,7
NaNO_2	65	12,1
ZnSO_4	87	18,8

3.1.2 Meritve preizkušancev

Klimatiziranim oziroma uravnovešenim preizkušancem smo pred testiranjem mehanskih lastnosti (Slika 9):

- izmerili dimenzije v radialni in tangencialni smeri natančno na 0,01 mm,
- določili maso natančno na 0,001 g in
- jim izračunali gostoto.

Izračun gostote:

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u} \quad \dots(4)$$

Pri čemer je:

ρ_u gostota preizkušanca pri določeni vlažnosti [kg/m^3],
 m_u masa preizkušanca pri določeni vlažnosti [kg] in
 V_u prostornina preizkušanca pri določeni vlažnosti [m^3].

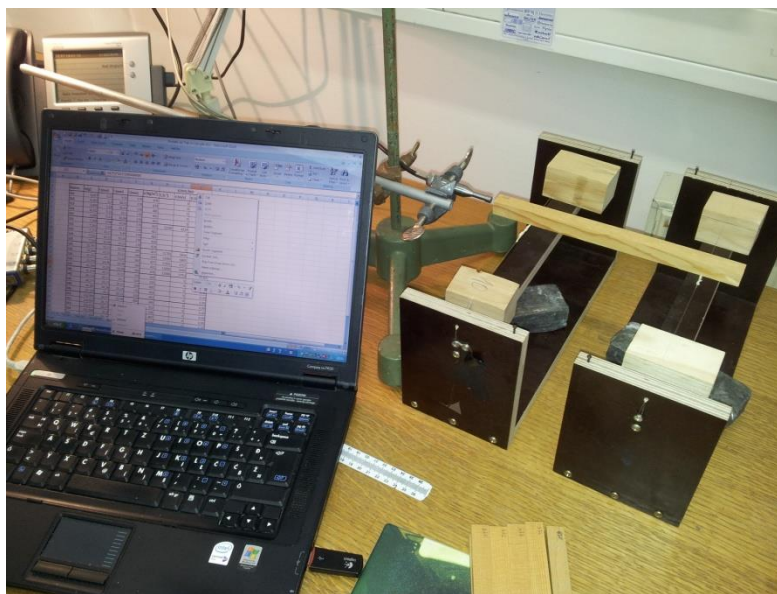


Slika 9: Meritve mase (levo) in dimenzij (desno) preizkušancev

3.2 METODE

3.2.1 Določanje modula elastičnosti z vzdolžnim vzbujanjem

Najprej smo izvedli akustični oz. dinamični test z vzdolžnim vzbujanjem. Za odčitavanje podatkov (vzbujenih frekvenc) smo uporabili modul za zajemanje zvočnega signala (NI-9243) in kondenzatorski mikrofonski (PCB 130D20). Za vpetje preizkušanca smo uporabili dva stojala z napeto najlonsko vrvico, kamor smo postavili preizkušane. Preizkušance smo vzdolžno elastično vzbujali (v longitudinalni smeri) z okroglo leseno palico tako, da smo udarjali po čelih prosto vpetih preizkušancev (Slika 10). To metodo smo izvedli brez prve in druge skupine preizkušancev, zaradi njihove premajhne mase in težav pri vzbujanju.



Slika 10: Merilna veriga za zajemanje akustičnega signala – vzdolžno vzbujanje

Z impulznim elastičnim udarcem po čelu preizkušanca smo vzbudili mehansko nihanje vzdolž njega, na podlagi katerega smo s pomočjo programa LabVIEW in hitre Fourier-jeve transformacije določili lastno frekvenco v 1. nihajnem načinu. Pogoji za uspešno meritev so bili natančnost udarca, tišina v prostoru merjenja in pravilna postavitve navedenih merilnih komponent. V kolikor je pri udarjanju prišlo do dveh ali več trkov, smo meritev ponovili. Iz lastne frekvence in dolžine preizkušanca smo potem izračunali hitrost širjenja zvoka vzdolž preizkušanca po enačbi:

$$v = \frac{2 \times L}{n} \times f_L \quad \dots(5)$$

Pri čemer je:

- | | |
|-------|---|
| v | hitrost valovanja [m/s], |
| L | dolžina preizkušanca [m], |
| n | nihajni način ($n = 1$ pri osnovnem načinu nihanja) in |
| f_L | lastna frekvenca [s^{-1}]. |

Sledil je izračun E – modula:

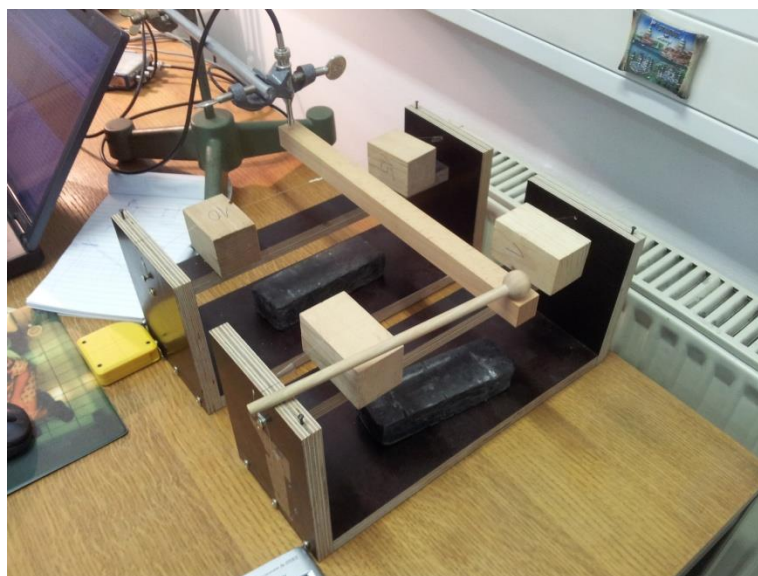
$$E = v^2 \times \rho \quad \dots(6)$$

Pri čemer je:

E modul elastičnosti [$\text{N/mm}^2 = \text{MPa}$],
 v hitrost valovanja [m/s] in
 ρ gostota (kg/m^3).

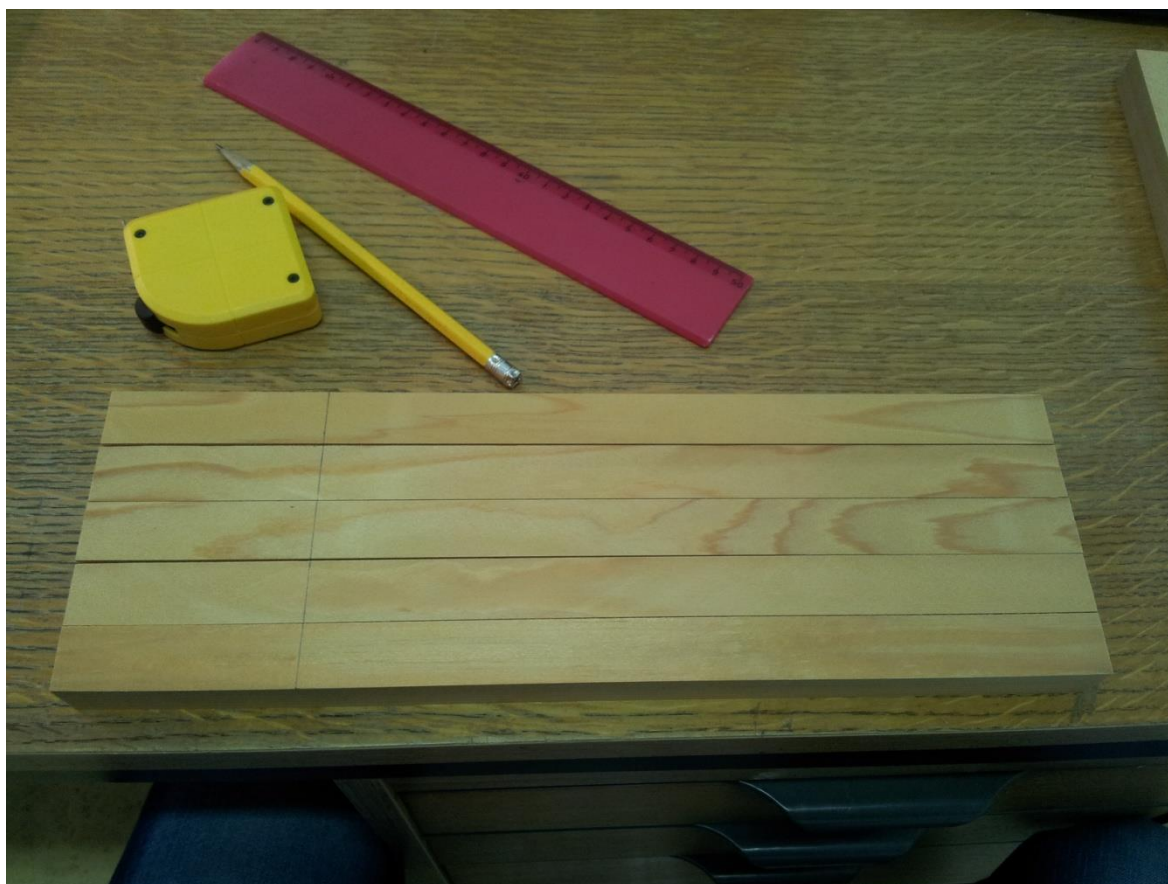
3.2.2 Določanje modula elastičnosti s prečnim vzbujanjem

Pri prečnem vzbujanju smo prav tako izvzeli najmanjši prvi dve velikostni skupini vzorcev zaradi njihove premajhne teže. Uporabili smo enake naprave za zaznavanje lastnih frekvenc, kot pri vzdolžnem vzbujanju, le da so bile te drugače postavljene (slika 11). Enako kot v vzdolžnem vzbujanju smo tudi v tem primeru nihanje vzbujaali z leseno palico, vendar tokrat v prečni smeri, in sicer v tangencialni smeri na enem koncu preizkušanca. Na drugem koncu smo na radialni površini s kondenzatorskim mikrofonom merili vzbujeno nihanje. Iz izmerjenih vrednosti smo odčitali lastno frekvenco prvega prečnega nihajnega načina.



Slika 11: Princip prečnega vzbujanja preizkušancev in zajemanje zvočnega signala

Elastični podpori sta v tem primeru bili postavljeni za $0,224 \times L$ od obeh čel, kar smo označili na preizkušancih (slika 12).



Slika 12: Označitev mesta naganja preizkušancev na elastično podporo

Modul elastičnosti pri prečnem nihanju smo izračunali po enačbi:

$$E = \frac{4 \times \pi^2 \times L^4 \times \rho \times f_n^2 \times A}{I \times k_i^4} \quad \dots(7)$$

Kjer je:

- L dolžina preizkušanca [m],
- f_n lastna frekvenca [Hz],
- A prečni prerez [m²],
- I vztrajnostni moment prereza [m⁴],
- ρ_u povprečna gostota [kg/m³] in
- k_i korekcijski koeficient za 1. nihajni način ($k = 4,730$).

3.2.3 Določanje modula elastičnosti s statičnim upogibom

Statični upogib smo izvedli tritočkovno v skladu s standardom SIST EN 408; na univerzalnem testirnem stroju Zwick Z100 (slika 13), z razdaljo med podporami 15 krat večjo od višine preizkušanca in z obremenitvijo na sredini. Obremenitev smo izvajali na radialno površino (v tangencialni smeri) in le v območju elastičnosti ($\sigma_{\max} = 20 \text{ MPa}$), približno 20 % porušne napetosti) da smo iste preizkušance lahko uporabili še za testiranje po izpostavitvi drugačnim klimatskim pogojem. Hitrost pomika smo prilagajali z različnimi velikostmi preizkušancev tako, da je do maksimalne sile prišlo v približno tridesetih sekundah. Za prvo in drugo skupino preizkušancev smo uporabili testirni stroj Zwick Z005 (slika 13), ki je manjši, bolj občutljiv oz. natančen in posledično primernejši za manjše preizkušance.



Slika 13: Testirni stroj Zwick Z100 (levo) in Zwick Z005 (desno)

Iz programsko izmerjenega povesa in sile smo izračunali modul elastičnosti preizkušancev po formuli:

$$E = \frac{L^3 \times (F_2 - F_1)}{4 \times b \times t^3 \times (a_2 - a_1)} \quad \dots(8)$$

Pri čemer je:

- L razdalja med podporami [mm],
- F_2 sila pri 90 % maksimalne obremenitve [N],
- F_1 sila pri 20 % maksimalne obremenitve [N],
- b širina preizkušanca [mm],
- t debelina preizkušanca [mm],
- a_2 poves pri 90 % maksimalne obremenitve [mm] in
- a_1 poves pri 20 % maksimalne obremenitve [mm].

4 REZULTATI IN RAZPRAVA

4.1 VPLIV VELIKOSTI PREIZKUŠANCEV NA MODUL ELASTIČNOSTI

Povprečna vrednost modula elastičnosti bukovih preizkušancev vseh velikosti, izmerjena z vzdolžnim elastičnim vzbujanjem, je bila pri ravnovesnem stanju $\varphi = 65 \%$ 16,6 GPa in je bila za 3,43 % manjša kot pri $\varphi = 33 \%$ ter večja za 7,38 % kot pri $\varphi = 87 \%$ (pregl. 2). S prečnim vzbujanjem smo dobili nekoliko nižje rezultate. Povprečna vrednost pri $\varphi = 65 \%$ je bila 14,9 GPa; ob izpostavitvi preizkušancev nižji relativni zračni vlažnosti ($\varphi = 33 \%$) se je povečala na 15,6 GPa, ko pa smo preizkušance izpostavili klimi z visoko relativno zračno vlažnostjo ($\varphi = 87 \%$), so izmerjeni moduli elastičnosti padli na povprečno vrednost 13,7 GPa. Najnižje vrednosti smo izmerili s tritočkovnim upogibom, kjer so bile povprečne vrednosti: 12,6 GPa pri $\varphi = 65 \%$, 14,0 GPa pri $\varphi = 33 \%$ in 11,54 GPa pri $\varphi = 87 \%$. Pri smrekovih preizkušancih smo izmerili nekoliko nižje vrednosti kot pri preizkušancih iz bukovine; in sicer so bile vrednosti v vseh ravnovesnih stanjih v povprečju manjše za 10 % (pregl. 3).

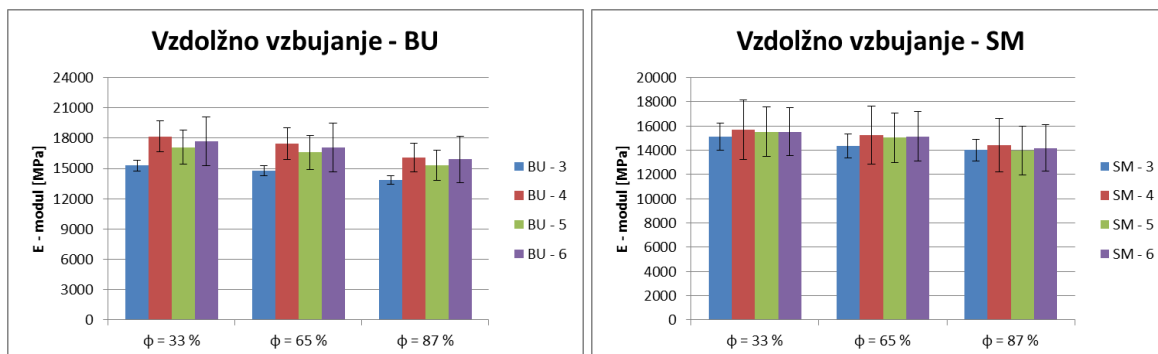
Preglednica 2: Povprečne vrednosti modulov elastičnosti bukovih preizkušancev različnih velikosti (BU-1: d (debelina) = 5 mm, BU-2: d = 10 mm, BU-3: d = 15 mm, BU-4: d = 20 mm, BU-5: d = 25 mm in BU-6: d = 30 mm), določene s tremi različnimi metodami, v treh različnih ravnovesnih stanjih.

	E - modul _{Vzdolžno vzbujanje} [MPa]			E - modul _{prečno vzbujanje} [MPa]			E - modul _{tritočkovni upogib} [MPa]		
	$\varphi = 33 \%$	$\varphi = 65 \%$	$\varphi = 87 \%$	$\varphi = 33 \%$	$\varphi = 65 \%$	$\varphi = 87 \%$	$\varphi = 33 \%$	$\varphi = 65 \%$	$\varphi = 87 \%$
BU-1							12899	12590	8580
BU-2							16868	13660	14162
BU-3	15282	14799	13868	13905	13260	12511	12290	10179	10482
BU-4	18168	17477	16058	16464	15647	14305	14518	12963	11748
BU-5	17098	16609	15317	15633	14984	13638	13362	12853	11350
BU-6	17698	17101	15903	15986	15303	14092	13833	13298	11726

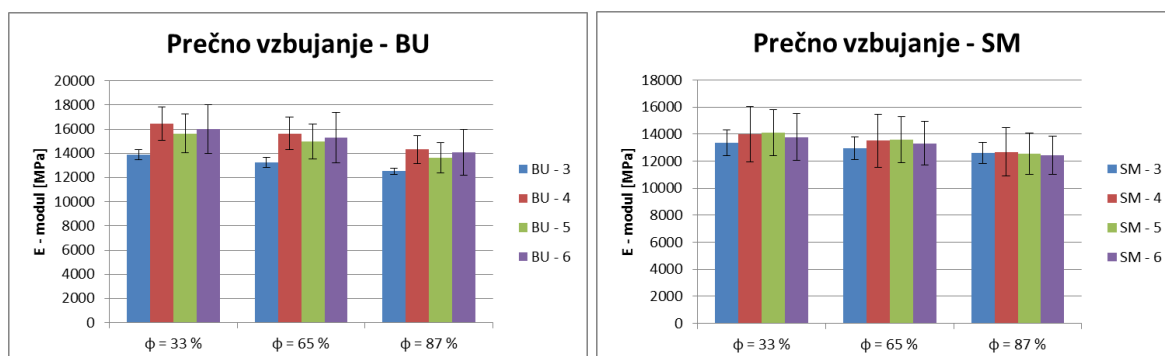
Preglednica 3: Povprečne vrednosti modulov elastičnosti smrekovih preizkušancev različnih velikosti (SM-1: d = 5 mm, SM-2: d = 10 mm, SM-3: d = 15 mm, SM-4: d = 20 mm, SM-5: d = 25 mm in SM-6: d = 30 mm), določene s tremi različnimi metodami, v treh različnih ravnovesnih stanjih.

	E - modul _{Vzdolžno vzbujanje} [MPa]			E - modul _{prečno vzbujanje} [MPa]			E - modul _{tritočkovni upogib} [MPa]		
	$\varphi = 33 \%$	$\varphi = 65 \%$	$\varphi = 87 \%$	$\varphi = 33 \%$	$\varphi = 65 \%$	$\varphi = 87 \%$	$\varphi = 33 \%$	$\varphi = 65 \%$	$\varphi = 87 \%$
SM-1							11836	11442	9901
SM-2							12007	9716	9339
SM-3	15128	14359	14015	13382	12940	12613	12106	10059	10158
SM-4	15715	15234	14435	14018	13510	12698	12528	11751	10599
SM-5	15523	15036	13957	14116	13610	12554	12721	12214	11032
SM-6	15528	15147	14194	13785	13323	12452	12315	12023	10375

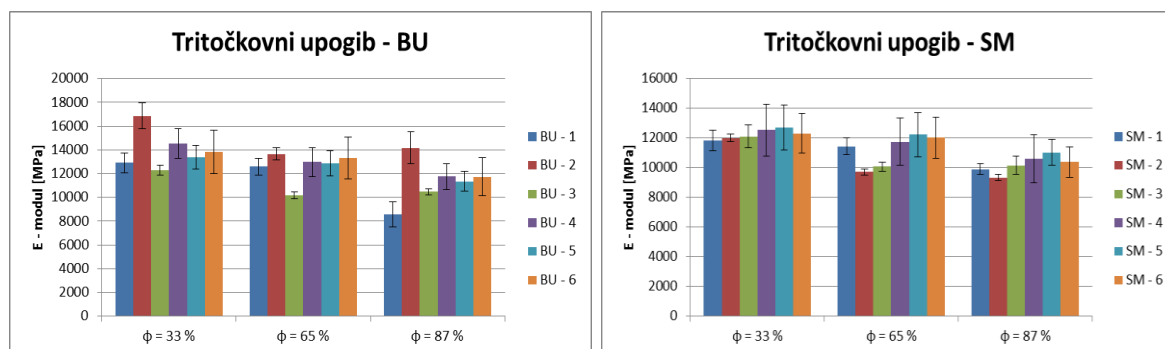
Pri smrekovini rezultati med posameznimi velikostnimi skupinami preizkušancev manj variirajo v primerjavi z bukovino; znotraj velikostnih skupin pa je pri obeh vrstah zaznano večanje variabilnosti z večanjem preizkušanca. Pri vseh meritvah je bil ugotovljen negativen vpliv vlažnosti preizkušancev na modul elastičnosti (slika 14, slika 15, slika 16). Kot smo pričakovali, smo pri višjih vlažnostih lesa izmerili nižje module elastičnosti. Pri velikih preizkušancih je bila variabilnost rezultatov večja tako pri dinamičnem kot tudi pri statičnem določanju modula elastičnosti. Takšen vpliv je bil pričakovan, saj se z večanjem preizkušanca večja tudi število napak, rastnih posebnosti in ostalih variabilnosti znotraj njega.



Slika 14: Vpliv velikosti preizkušancev (od manjših BU-3 in SM-3 do največjih BU-6 in SM-6) na modul elastičnosti pri vzdolžnem vzburjanju bukove (levo) in smrekove (desno) v treh različnih klimatskih pogojih ($\phi = 33\%$; $\phi = 65\%$; in $\phi = 87\%$).



Slika 15: Vpliv velikosti preizkušancev (od manjših BU-3 in SM-3 do največjih BU-6 in SM-6) na modul elastičnosti pri prečnem vzburjanju bukove (levo) in smrekove (desno) v treh različnih klimatskih pogojih ($\phi = 33\%$; $\phi = 65\%$; in $\phi = 87\%$).



Slika 16: Vpliv velikosti preizkušancev (od manjših BU-1 in SM-1 do največjih BU-6 in SM-6) na modul elastičnosti pri tritočkovnem upogibu bukovine (levo) in smrekovine (desno) v treh različnih klimatskih pogojih ($\varphi = 33\%$; $\varphi = 65\%$; in $\varphi = 87\%$).

Za lažjo razjasnitev vpliva velikosti vzorcev na njihovo togost pa smo preizkušancem določili še specifični modul elastičnosti. Specifični modul (E-modul/d) je razmerje med modulom elastičnosti in gostotnim indeksom preizkušancev in se je pri smrekovini gibal od 22 do 27 GPa pri podatkih izmerjenih s statičnim upogibom, od 29 do 33 GPa pri vzdolžnem in od 26 do 30 GPa pri prečnem vzbujujanju ter je padal z večanjem vlažnosti lesa pri obeh preizkušanih lesnih vrstah (preglednica 5). Pri bukovih preizkušancih so bila ta razmerja v povprečju manjša kot pri smrekovih; in sicer za 27 % pri statičnem upogibu ter za 24 % pri obeh različnih frekvenčne metode določanja modula elastičnosti (preglednica 4). To pomeni, da ima smrekovina v primerjavi z bukovim lesom ugodnejšo strukturo za uporabo v konstrukcijske namene, saj nam pri enaki masi nudi občutno večji elastični modul. Prav tako je za konstrukcije potrebno imeti les primerno posušen.

Preglednica 4: Povprečne vrednosti specifičnih modulov elastičnosti bukovih preizkušancev različnih velikosti (od manjših BU-1 do največjih BU-6), določene s tremi različnimi metodami, v treh različnih ravnovesnih stanjih.

	E - modul/ ρ _{Vzdolžno vzbujujanje} [GPa]			E - modul/ ρ _{prečno vzbujujanje} [GPa]			E - modul/ ρ _{tritočkovni upogib} [GPa]		
	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 65\%$	$\varphi = 87\%$	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 65\%$	$\varphi = 87\%$	$\varphi = 33\%$	$\varphi = 65\%$	$\varphi = 87\%$
BU-1							19,45	18,48	12,44
BU-2							20,96	16,74	17,35
BU-3	24,47	23,29	21,46	22,27	20,87	19,37	19,68	16,02	16,22
BU-4	25,17	23,94	21,65	22,81	21,44	19,31	20,12	17,76	15,87
BU-5	24,55	23,50	21,31	22,44	21,20	18,98	19,21	18,49	15,85
BU-6	24,78	23,66	21,65	22,40	21,18	19,19	19,37	18,40	15,96

Preglednica 5: Povprečne vrednosti specifičnih modulov elastičnosti smrekovih preizkušancev različnih velikosti (od manjših SM-1 do največjih SM-6), določene s tremi različnimi metodami, v treh različnih ravnovesnih stanjih.

	E - modul/ ρ _{Vzdolžno vzbujanje} [GPa]			E - modul/ ρ _{prečno vzbujanje} [GPa]			E - modul/ ρ _{tritočkovni upogib} [GPa]		
	$\varphi = 33 \%$	$\varphi = 65 \%$	$\varphi = 87 \%$	$\varphi = 33 \%$	$\varphi = 65 \%$	$\varphi = 87 \%$	$\varphi = 33 \%$	$\varphi = 65 \%$	$\varphi = 87 \%$
SM-1							26,19	24,85	21,25
SM-2							28,85	23,09	21,78
SM-3	34,09	25,90	30,58	30,16	23,34	27,53	27,30	22,48	22,17
SM-4	34,22	32,74	30,37	30,56	29,06	26,75	26,80	25,30	22,30
SM-5	30,99	29,63	27,06	28,18	26,82	24,34	25,34	24,07	21,41
SM-6	33,08	31,91	29,25	29,36	28,08	25,68	26,25	25,34	21,41

Izkazalo se je, da se specifični modul elastičnosti med skupinami preizkušancev bistveno ne razlikuje in v splošnem z velikostjo vzorcev niti ne narašča, niti ne pada. To jasno nakazuje, da so vsi naši preizkušanci (tudi večjih dimenzij) bili čisti in razen variacije v gostoti niso zajemali kakšnih drugih rastnih in strukturnih posebnosti, ki bi lahko bistveno vplivale na njihovo togost.

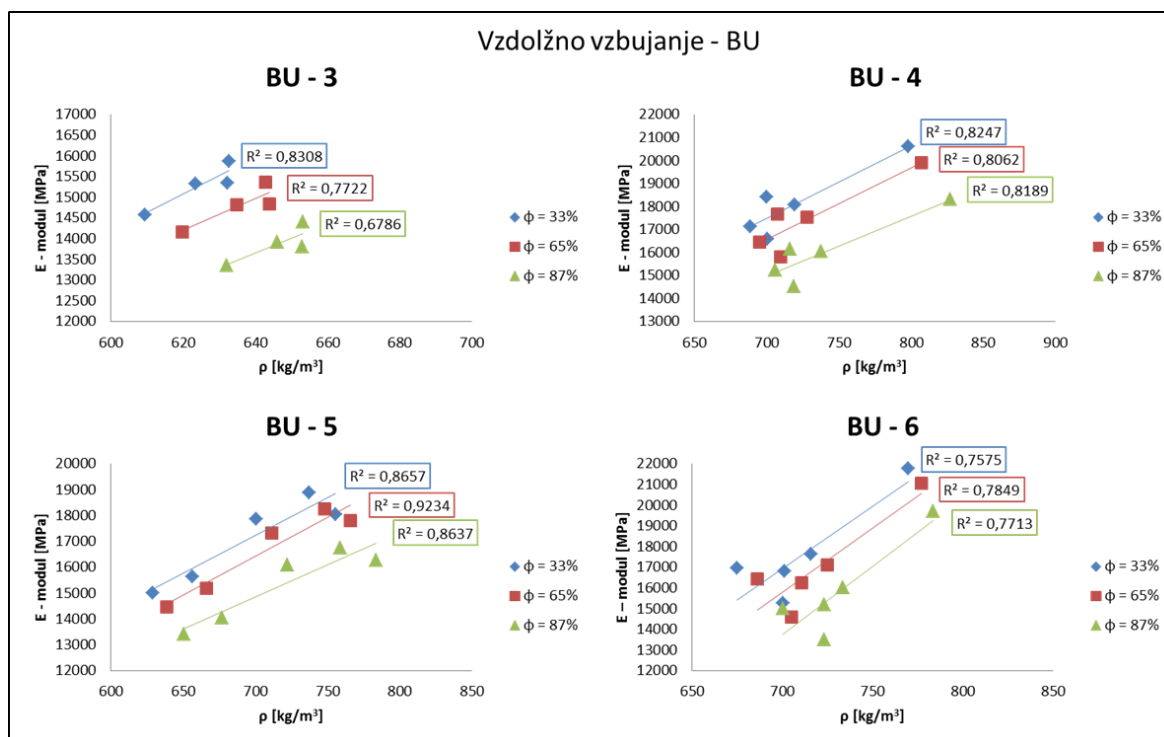
4.2 VPLIV GOSTOTE IN VLAŽNOSTI NA MODUL ELASTIČNOSTI

Po izpostavitvi nizki relativni zračni vlažnosti ($\varphi = 33 \%$) so imeli bukovi preizkušanci povprečno gostoto 706 kg/m^3 , v normalni klimi ($\varphi = 65 \%$) 716 kg/m^3 , v tretji klimi ($\varphi = 87 \%$) pa 726 kg/m^3 . Povprečna gostota najbolj osušenih smrekovih preizkušancev uravnovešenih pri $\varphi = 33 \%$ je bila 456 kg/m^3 , pri srednje vlažnih je bila 463 kg/m^3 in pri najbolj vlažnih 471 kg/m^3 .

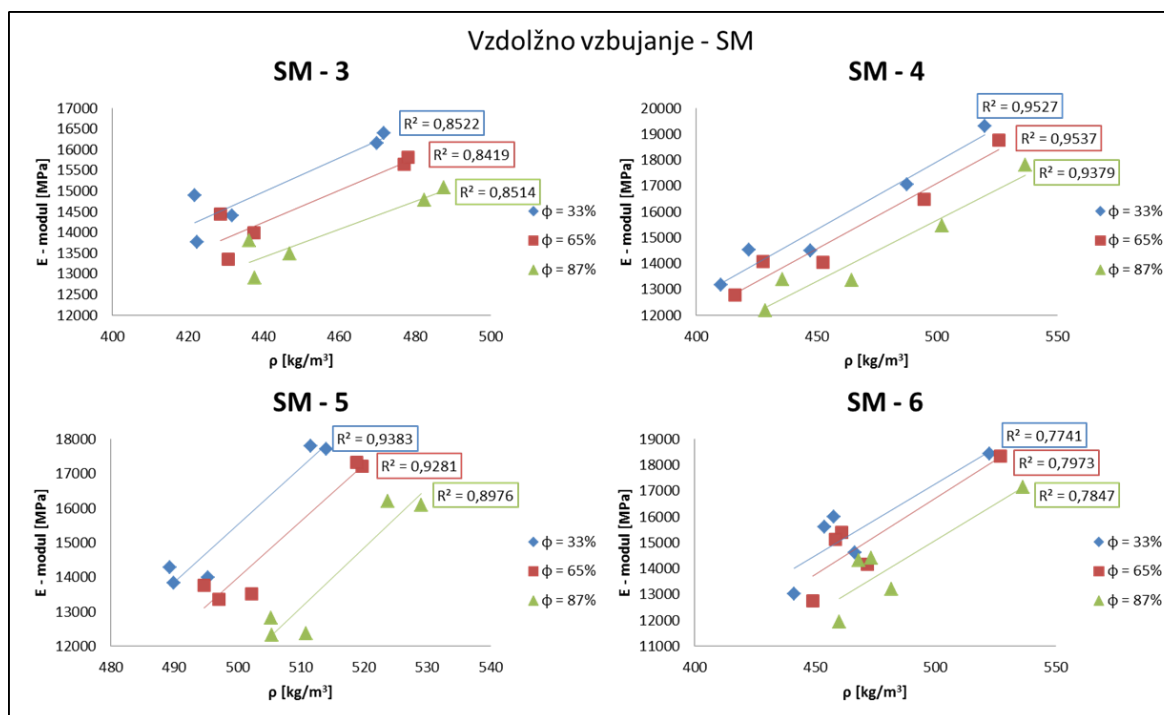
Modul elastičnosti se linearno povečuje z naraščanjem gostote preizkušancev pri vseh ravnovesnih stanjih obeh drevesnih vrst. Pri bukovini se determinacijski koeficienti (R^2) gibljejo od 0,67 do 0,92 pri vzdolžnem vzbujujanju (slika 17), od 0,54 do 0,95 pri prečnem vzbujujanju (slika 19) in od 0,30 do 0,99 pri statičnem testu (slika 21). Pri smrekovini je variabilnost rezultatov manjša (razen v drugi in tretji velikostni skupini pri preizkušanju s statičnim testom); in sicer je determinacijski koeficient pri vzdolžnem vzbujujanju od 0,77 do 0,95 (slika 18), pri prečnem vzbujujanju od 0,69 do 0,93 (slika 20) in pri statičnem testu od 0,14 do 0,95 (slika 22).

Lesna vlažnost ima negativen vpliv, pri višjih vlažnostih je modul elastičnosti nižji kot smo tudi pričakovali. Posebnega vpliva vlažnosti na variabilnost izmerjenih podatkov ne zasledimo - R^2 se spreminjanjem vlažnosti bistveno ne spreminja.

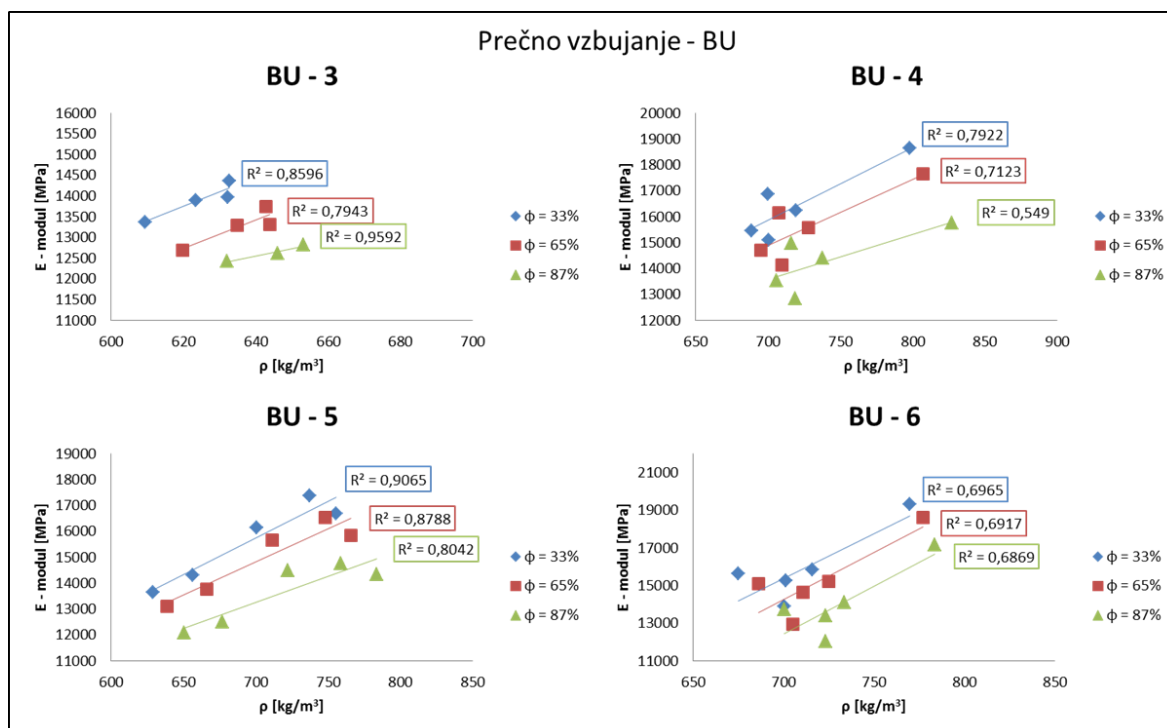
Razvidno je, da ima pomemben vpliv tudi velikost vzorca, saj se determinacijski koeficient z velikostjo vzorca zmanjšuje (R^2 pada). Takšen vpliv je pričakovan in ga lahko pripišemo variabilni zgradbi lesa znotraj istega drevesa. Verjetno so za povečano variabilnost večjih vzorcev krive rastne posebnosti, kot so grče in druge anomalije, katerih z večjim vzorcem lahko zajamemo več.



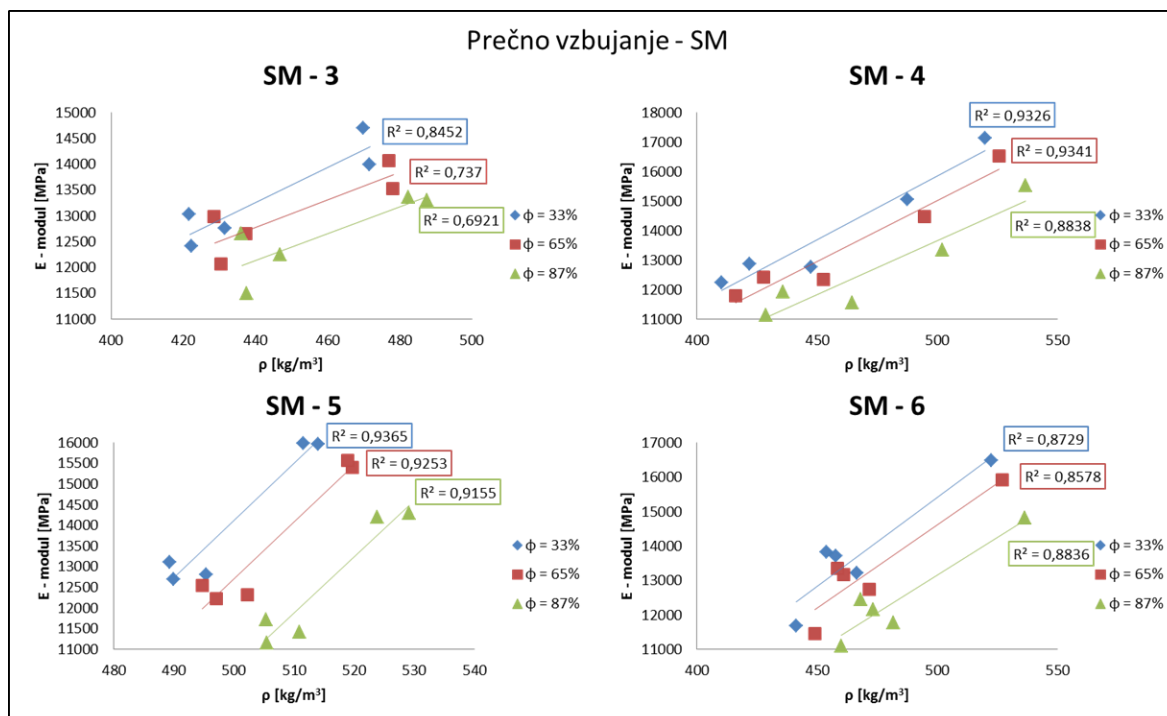
Slika 17: Vpliv gostote na modul elastičnosti pri vzdolžnem vzbujanju bukovih preizkušancev različnih velikosti (od manjših BU-3 do največjih BU-6) uravnovešenih v treh različnih klimatskih pogojih ($\phi = 33\%$; $\phi = 65\%$; in $\phi = 87\%$).



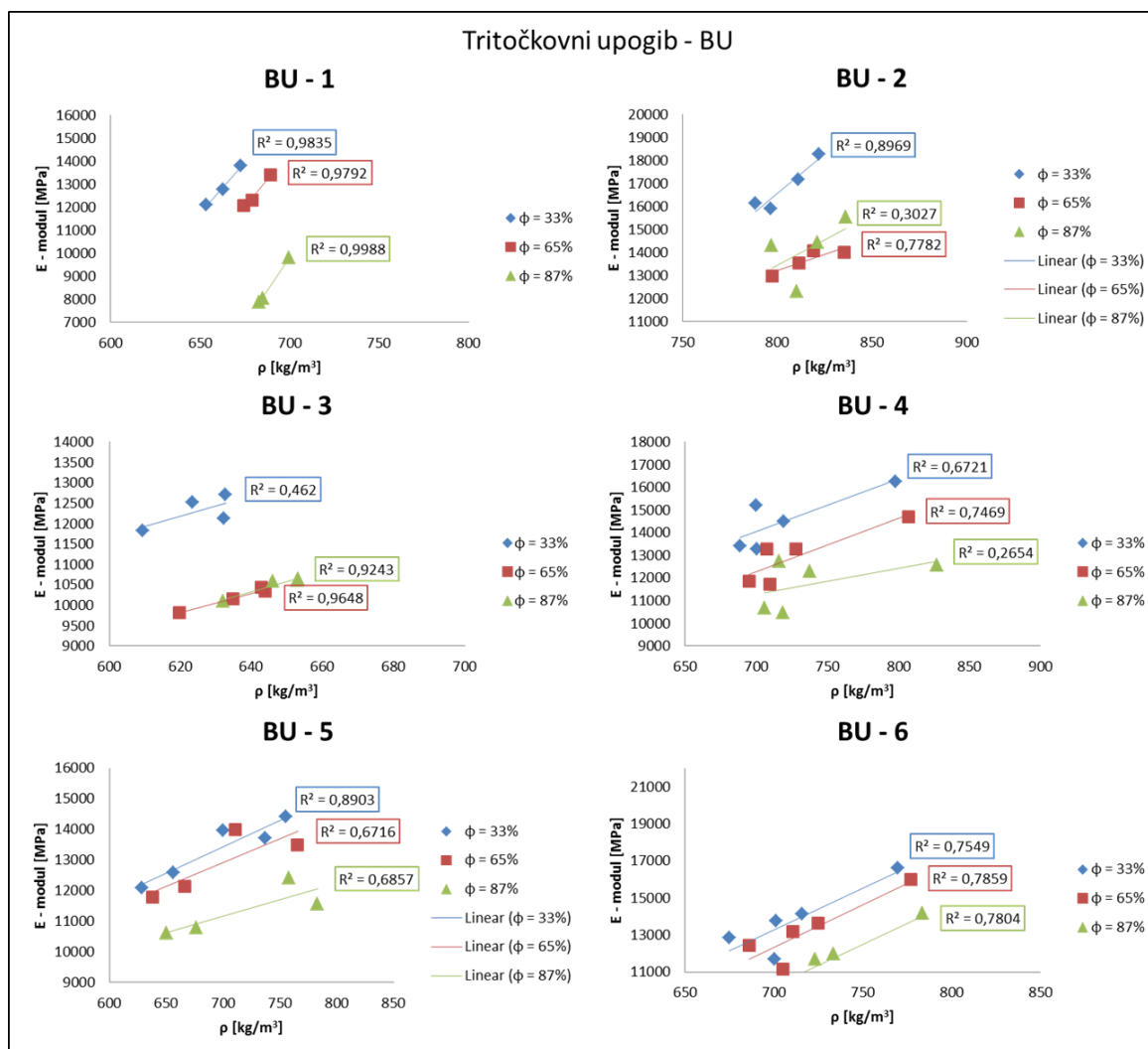
Slika 18: Vpliv gostote na modul elastičnosti pri vzdolžnem vzbujanju smrekovih preizkušancev različnih velikosti (od manjših SM-3 do največjih SM-6) uravnovešenih v treh različnih klimatskih pogojih ($\phi = 33\%$; $\phi = 65\%$; in $\phi = 87\%$).



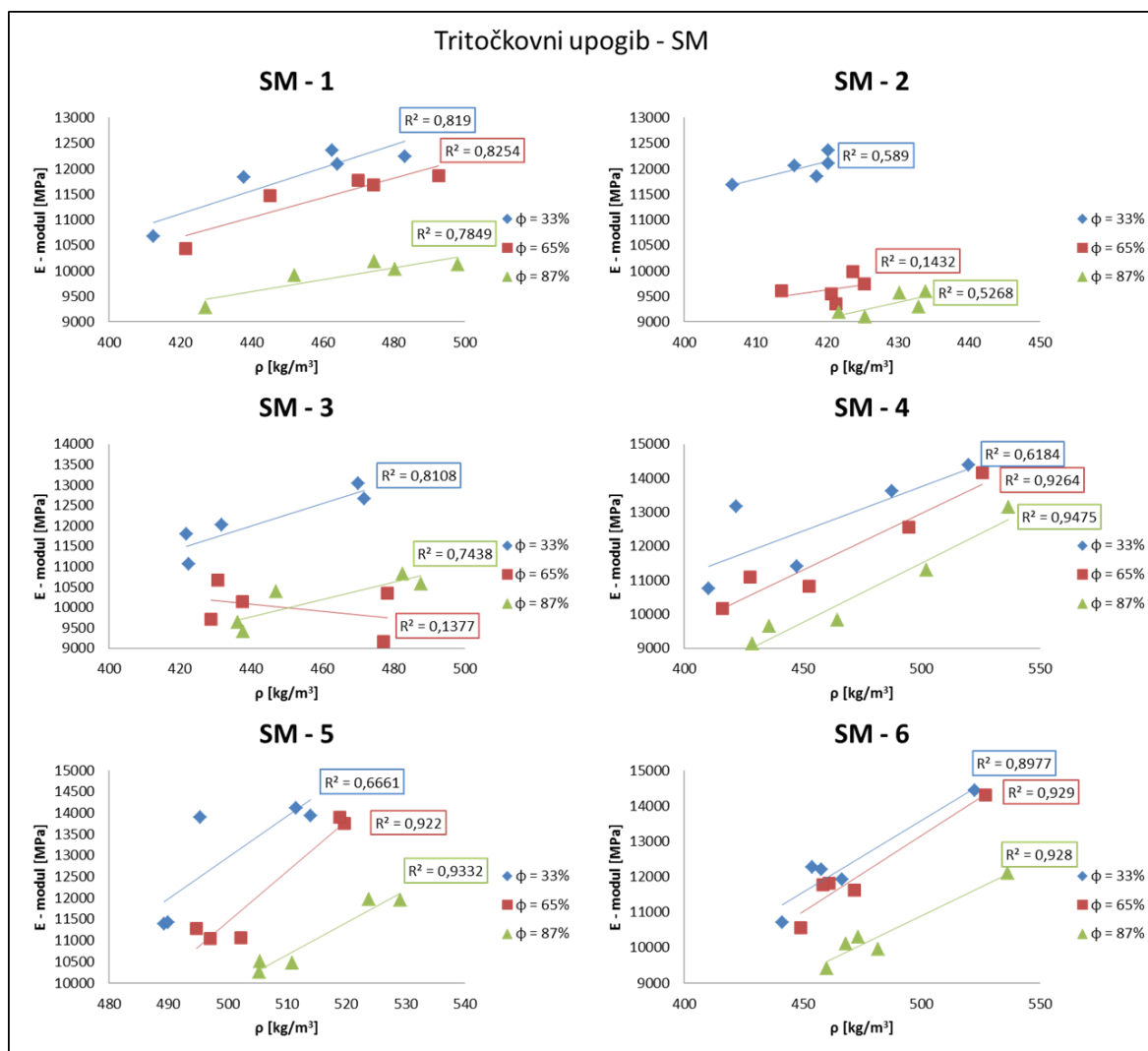
Slika 19: Vpliv gostote na modul elastičnosti pri prečnem vzbujanju bukovih preizkušancev različnih velikosti (od manjših BU-3 do največjih BU-6) uravnavešenih v treh različnih klimatskih pogojih ($\phi = 33\%$; $\phi = 65\%$; in $\phi = 87\%$).



Slika 20: Vpliv gostote na modul elastičnosti pri prečnem vzbujanju smrekovih preizkušancev različnih velikosti (od manjših SM-3 do največjih SM-6) uravnavešenih v treh različnih klimatskih pogojih ($\phi = 33\%$; $\phi = 65\%$; in $\phi = 87\%$).



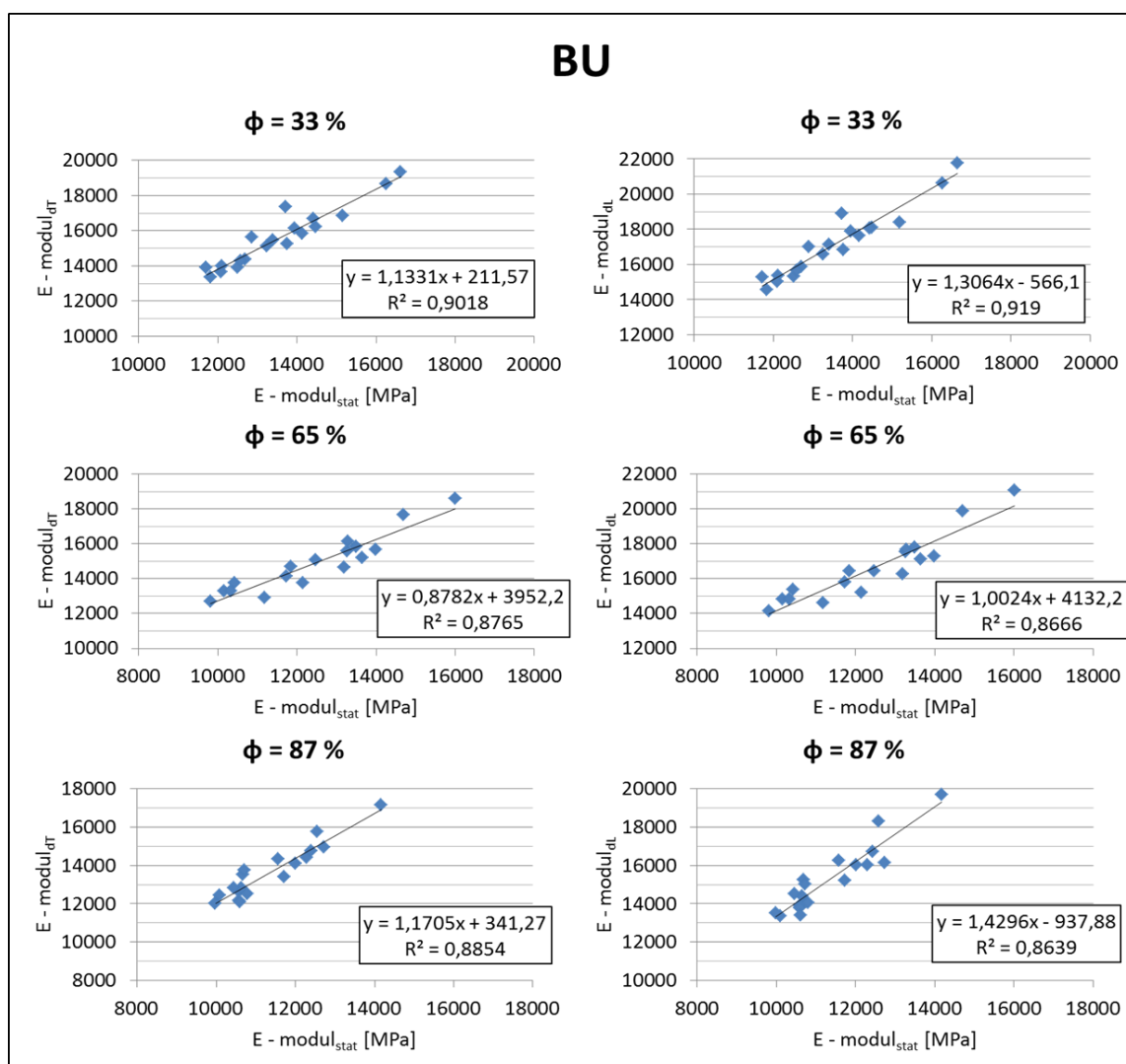
Slika 21: Vpliv gostote na modul elastičnosti pri statičnem upogibu bukovih preizkušancev različnih velikosti (od manjših BU-1 do največjih BU-6) uravnavešenih v treh različnih klimatskih pogojih ($\phi = 33\%$; $\phi = 65\%$; in $\phi = 87\%$).



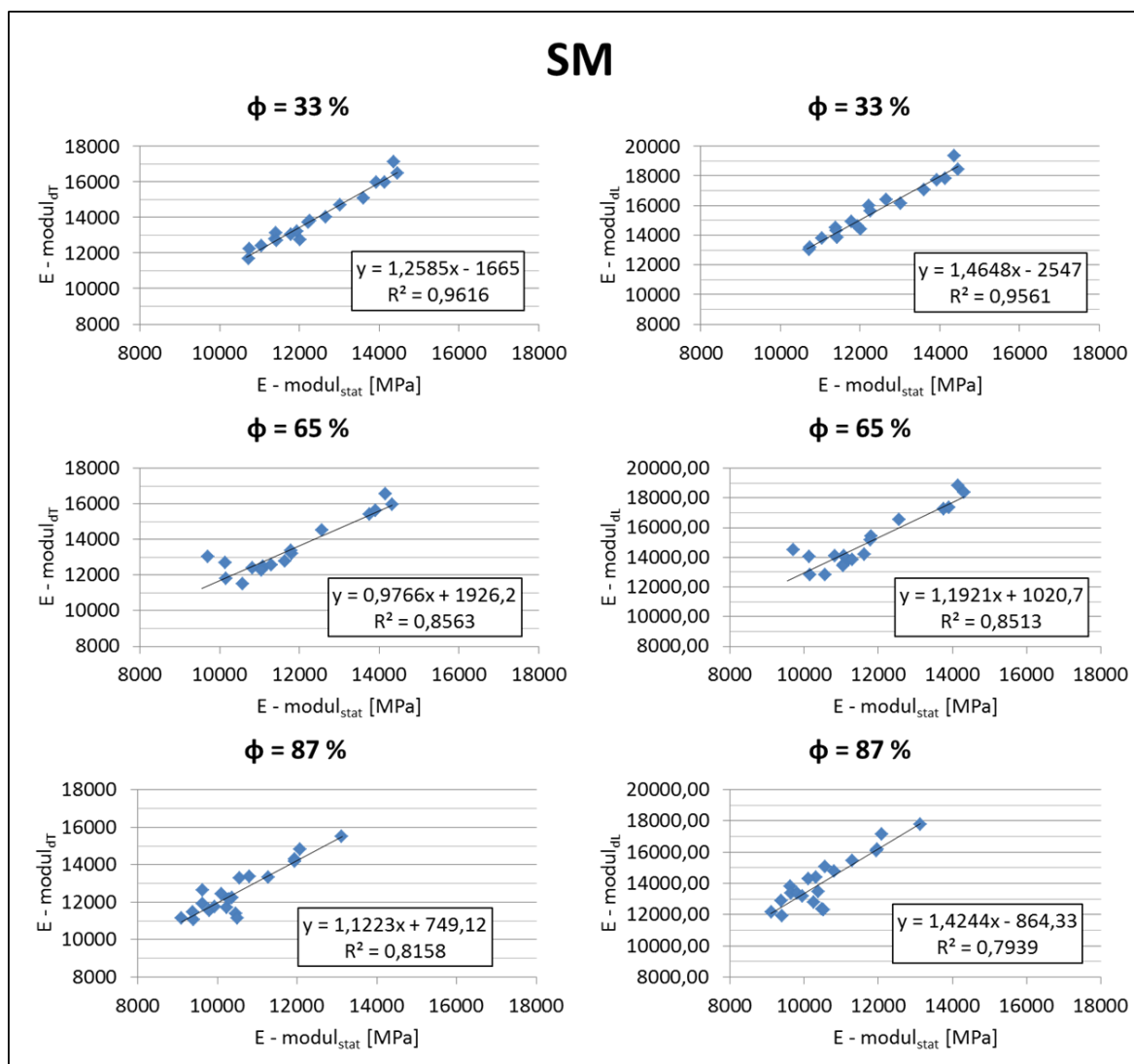
Slika 22: Vpliv gostote na modul elastičnosti pri statičnem upogibu smrekovih preizkušancev različnih velikosti (od manjših SM-1 do največjih SM-6) uravnovešenih v treh različnih klimatskih pogojih ($\phi = 33\%$; $\phi = 65\%$; in $\phi = 87\%$).

4.3 PRIMERJAVA METOD

Pričakovano je povezava med dinamičnimi metodami in statično metodo linearna. Korelacija med dinamično in statično metodo je zelo dobra ($R^2 > 0,9$) pri nizki ravnovesni vlažnosti lesa, vendar pa je pri smrekovini (slika 24) veliko boljša kot pri bukovini (slika 23). Dobro ujemanje (R^2 : 0,90 – 0,96) med statično in dinamično določenimi moduli elastičnosti so ugotovili tudi drugi avtorji (Divos, 2005). Z večanjem vlažnosti lesa se korelacija med statično in dinamično metodo bistveno zmanjšuje. To je v večji meri mogoče opaziti pri preizkušancih smreke, kot pri bukovih preizkušancih, saj je tam pri višjih vlažnostih korelacija boljša. Razvidno je tudi, da so moduli elastičnosti izmerjeni z akustičnimi metodami nekoliko višji od modulov elastičnosti izmerjenih s statično metodo. Najvišji so moduli elastičnosti izmerjeni z vzdolžnim vzbujanjem. Dinamično določevanje modula elastičnosti v primerjavi s statičnim določanjem nam običajno poda približno 10 % višje vrednosti (Divos, 2005).



Slika 23: Primerjava modulov elastičnosti bukovine določenih s prečnim- (levo) in z vzdolžnim dinamičnim vzbujanjem (desno) s statično upogibno metodo pri treh različnih vlažnostih.



Slika 24: Primerjava modulov elastičnosti smrekovine določenih s prečnim- (levo) in z vzdolžnim dinamičnim vzbujanjem (desno) s statično upogibno metodo pri treh različnih vlažnostih.

5 SKLEPI

Primarni cilj diplomskega dela je bil proučiti vpliv velikosti preizkušanca na rezultat meritev nekaterih pomembnih mehanskih lastnosti. S statičnim upogibom in z akustičnimi metodami (vzdolžno in prečno dinamično vzbujanje) smo ugotovili, da se z velikostjo vzorca večja njegova variabilnost in posledično imamo variabilnejše rezultate meritev modula elastičnosti.

Primerjava med dinamičnima in statično metodo nam pokaže linearno regresijsko povezavo. Pri tem se determinacijski koeficient zmanjšuje z večanjem vlažnosti. To nam pove, da so dinamične metode določanja mehanskih lastnosti glede na statično testiranje primerno natančne, vendar pa povezanost z višanjem vlažnosti lesa pada. Modul elastičnosti lesa izračunan po meritvah z dinamičnimi metodami, še posebej z vzdolžnim vzbujanjem, je nekoliko višji kot modul elastičnosti izmerjen s statično metodo.

Z izračunom gostote in meritvami modulov elastičnosti posameznih preizkušancev, smo prišli do zaključka, da se modul elastičnosti lesa linearno povečuje z gostoto lesa. Večje ujemanje je bilo pri manjših preizkušancih.

Z izpostavljanjem vzorcev trem različnim ravnovesnim stanjem smo prišli do sklepa, da ima vlažnost vpliv na modul elastičnosti lesa smreke in bukve, saj smo pri vseh meritvah dobili značilno različne rezultate v različnih vlažnostnih stanjih – pri visokih vlažnostih preizkušancev so bili izmerjeni moduli elastičnosti nižji, kot pri nizkih vlažnostih. Torej se z večanjem vlažnosti modul elastičnosti lesa manjša in obratno.

6 VIRI

- Čufar K. 2006. Anatomija lesa. Univerzitetni učbenik. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 183 str.
- Divos F., Tanaka T. 2005. Relation Between Static and Dynamic Modulus of Elasticity of Wood. *Acta Silv. Lign. Hung.*, 1: 105-110
- Gorišek Ž., Straže A. 2000. Vpliv juvenilnosti na gostoto in mehanske lastnosti smrekovine (*Picea abies* Karst.) in jelovine (*Abies alba* Mill.). Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo. *LES wood* 52: 185-190
- Gorišek Ž. 2009. Les: zgradba in lastnosti: njegova variabilnost in heterogenost. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 178 str.
- Gorišek Ž. 2012. Gostota lesa. Gradivo s predavanj – Fizika lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo. http://les.bf.uni-lj.si/uploads/media/02_Gostota_in_poroznost_03.pdf (26. jul.2014)
- Gorišek Ž. 2012. Mehanske lastnosti lesa: Napetost in deformacija. Gradivo s predavanj – Fizika lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo. http://les.bf.uni-lj.si/uploads/media/09_Mehanske_lastnosti_lesa_02.pdf (26.jul.2014)
- Gornik Bučar D. 2008. Razvrščanje konstrukcijskega lesa. Gradnja z lesom – izziv in priložnost za Slovenijo. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 114-118
- Pellerin, R.F. in Ross, R.J. 1994. Nondestructive Testing for assessing Wood Members in structures: a review. <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr70.pdf> (26. jul.2014)
- Ross R.J. 2007. Transverse vibration techniques – logs to structural systems. USA, Minesota, Dulut, 15th internatoional symposium on nondestructive testing of wood: 13-15
- SIST EN 408: 2003. Konstrukcijski les – Določanje nekaterih fizikalnih in mehanskih lastnosti lesa. Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties. 2003
- Sonderegger W., Mandallaz D., Niemz P. 2007. An investigation of the influence of selected factors on the properties of spruce wood. *Wood Sci Technol*, 42: 281-298
- Straže A. 2013. Določanje mehanskih lastnosti lesa z nedestruktivnimi metodami. Gradivo z vaj – LIM. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 4 str.
- The wood database. Modulus of elasticity. <http://www.wood-database.com/wood-articles/modulus-of-elasticity/> (21. avg.2014)

ZAHVALA

Zahvaljujem se prof. dr. Željko Gorišku za mentorstvo, za njegovo dostopost pri vprašanjih ter za nasvete in usmerjanje pri izdelavi diplomskega projekta.

Zahvaljujem se somentorju doc. dr. Alešu Stražetu za njegovo pomoč pri meritvah in koristne nasvete.

Prav tako se zahvaljujem doc. dr. Dominiki Gornik Bučar za recenzijo diplomskega projekta.

Hvala tudi vsej družini, ki me je vedno podpirala pri mojih interesih in mi ves čas finančno stala ob strani ter prijateljem in ostalim, ki so mi na kakršen koli način pomagali pri ustvarjanju.