

Utjecaj usmjerenosti strukture na savojnu čvrstoću drva jele u longitudinalnom smjeru

Matić, Emanuel Branimir

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:904757>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-27**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Emanuel Branimir Matić

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Vera Rede, dipl. ing.
Dr.sc. Ime Prezime, dipl.ing.

Student:

Emanuel Branimir Matić

Zagreb, 2022.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojoj mentorici prof. dr. sc. Vera Rede na izdvojenom vremenu, trudu i pomoći.

Zahvaljujem svojoj obitelji i curi na pruženoj podršci tijekom studija.

Posebno se zahvaljujem svom najboljem bratu Gabrielu.

Emanuel Branimir Matić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Emanuel Branimir Matić JMBAG: 0246069130

Naslov rada na hrvatskom jeziku: Utjecaj usmjerenosti strukture na savojnu čvrstoću drva jele u longitudinalnom smjeru

Naslov rada na engleskom jeziku: Effect of structural orientation on the bending strength in the longitudinal direction of fir wood

Opis zadatka:

Drvo je prirodan, visokovrijedan i obnovljiv tehnički materijal. U odnosu na druge tehničke materijale posjeduje niz prednosti, ali i nedostataka. Mehanička svojstva drva određena su u velikoj mjeri njegovom strukturom čije je osnovno svojstvo usmjerenost u tri osnovna smjera - longitudinalnom, radijalnom i tangencijalnom. Jedno od najčešće određivanih svojstava jest savojna čvrstoća koja također ovisi o orijentaciji i najviša je u longitudinalnom smjeru. Kod nekih vrsta drva vrijednost čvrstoće u longitudinalnom smjeru ovisi o kutu koji savojna sila zatvara s tangentom na god, a kod drugih vrsta potpuno je neovisna o navedenome.

U završnom radu potrebno je odrediti savojnu čvrstoću drva obične jele (*Abies alba*) u longitudinalnom smjeru. Ispitivanje treba provesti metodom savijanja u tri točke. Uzorci za ispitivanje trebaju biti izrezani tako da savojna sila djeluje okomito na longitudinalni smjer, a u odnosu na tangentu goda djeluje pod kutem od 0°, 45° i 90°. Zbog očekivanog velikog rasipanja rezultata za svaki smjer treba ispitati veći broj uzoraka. Dobivene rezultate potrebno je statistički obraditi, analizirati i na temelju svega donijeti odgovarajuće zaključke.

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Zadatak zadala:

Prof. dr. sc. Vera Rede

Rede

Predsjednik Povjerenstva:

Branko Bauer
Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA.....	V
SAŽETAK	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD	1
2. PODJELA DRVA	3
3. MAKROSTRUKTURA DRVA.....	5
3.1 Poprečni presjek debla	5
3.1.1 Godovi	7
3.2 Radijalni presjek.....	8
3.3 Tangencijalni presjek	8
4. MIKROSTRUKTURA DRVA	9
5. MOLEKULARNA STRUKTURA DRVA.....	11
6. SVOJSTVA DRVA.....	14
6.1 Gustoća	14
6.2 Toplinska svojstva drva.....	15
6.2.1 Toplinska vodljivost	15
6.2.2 Toplinsko širenje.....	16
6.2.3 Ponašanje u požaru.....	16
6.2.4 Utjecaj topline na mehanička svojstva drva	16
6.2.5 Električna svojstva	17
7. MEHANIČKA SVOJSTVA DRVA.....	18
7.1 Tvrdća.....	18
7.2 Svojstva čvrstoće.....	19
7.3 Vlačna čvrstoća.....	20
7.3.1 Tlačna čvrstoća	20
7.3.2 Savojna čvrstoća	21
7.3.3 Smična čvrstoća	23
7.4 Modul elastičnosti	25
8. EKSPERIMENTALNI DIO.....	26
8.1 Cilj rada i provođenje ispitivanja.....	26
8.2 Priprema uzorka.....	26
8.3 Odeđivanje gustoće uzoraka	30
8.4 Ispitivanje savojne čvrstoće uzorka.....	30
8.4.1 Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće uzoraka skupine L0 (0°)	31
8.4.2 Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće uzoraka skupine L45 (45°).....	33

8.4.3	Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće uzoraka skupine L90 (90°).....	36
8.5	Analiza podataka pomoću Weibullove razdiobe	39
9.	ZAKLJUČAK.....	42

POPIS SLIKA

Slika 1	Drvena crkva Sv. Barbare [4].....	1
Slika 2	Uobičajeni životni ciklus stabla [6]	2
Slika 3	Karakteristični oblici stabla četinjače (A) i listače (B) [9]	4
Slika 4	Poprečni, tangencijalni i radijalni presjeci debla [10].....	5
Slika 5	Slojevi debla [11]	6
Slika 6	Razlika u širini godova na poprečnom presjeku ariša.....	7
Slika 7	Radijalni i tangencijalni presjek [13].....	8
Slika 8	Prikaz vrsta drvnih stanica listača i četinjača [14].....	10
Slika 9	Ovisnost gustoće o vlazi [22]	14
Slika 10	Shematski prikaz ispitivanja tvrdoće Brinellovom metodom [19].....	19
Slika 11	Metoda ispitivanja savojne čvrstoće u tri točke [20].....	21
Slika 12	Metoda ispitivanja savojne čvrstoće u četiri točke [20]	22
Slika 13	Usmjerenost godovo u odnosu na opterećenje [1]	22
Slika 14	Shematski prikaz mogućih smičnih naprezanja [22]	24
Slika 15	„Grubo“ rezanje drva.....	26
Slika 16	Izrezivanje epruveta.....	27
Slika 17	Brušenje uzoraka.....	27
Slika 18	Skupine epruveta.....	28
Slika 19	Savijanje ispitnog uzorka na kidalici	31
Slika 20	Vrijednosti savojne čvrstoće uzoraka L0 za 12 % vlage	33
Slika 21	Karakterističan izgled lomova na ispitnim uzorcima L0 (0°).....	33
Slika 22	Vrijednosti savojne čvrstoće uzoraka L45 za 12 % vlage	35
Slika 23	Karakterističan izgled lomova na ispitnim uzorcima L45 (45°).....	35
Slika 24	Vrijednosti savojne čvrstoće uzoraka L90 za 12 % vlage	37
Slika 25	Karakterističan izgled lomova na ispitnim uzorcima L90 (90°).....	38
Slika 26	Weibullowa raspodjela za savojnu čvrstoću L0 (0°).....	39
Slika 27	Weibullowa raspodjela za savojnu čvrstoću L45 (45°).....	40
Slika 28	Weibullowa raspodjela za savojnu čvrstoću L90 (90°).....	40

POPIS TABLICA

Tablica 1	Sastav drvog tkiva na razini spojeva [17].....	11
Tablica 2	Prikaz masenih udjela komponenti drvnog tkiva nekih vrsta drva [15].....	12
Tablica 3	Smanjenje mehaničkih svojstava izazvano snižavanjem temperature.....	17
Tablica 4	Dimenzije epruveta	29
Tablica 5	Vrijednosti savojne čvrstoće uzoraka L0 (0°).....	32
Tablica 6	Vrijednosti savojne čvrstoće uzoraka L45 (45°).....	34
Tablica 7	Vrijednosti savojne čvrstoće uzoraka L90 (90°).....	36
Tablica 8	Statistički rezultati za vrijednosti savojne čvrstoće.....	41

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ρ_w	Kg/m ³	Gustoća pri nekom udjelu vlage
ρ_0	Kg/m ³	Gustoća u apsolutno suhom stanju
ρ_{12}	Kg/m ³	Gustoća pri udjelu vlage od 12 %
m_w	kg	Masa pri nekom udjelu vlage
m_0	kg	Masa u apsolutno suhom stanju
V_w	m ³	Volumen pri nekom udjelu vlage
V_0	m ³	Volumen u apsolutno suhom stanju
w	%	Udio vlage
HB	N/mm ²	Tvrdoća po Brinellu
D	mm	Promjer otiska
d	mm	Promjer utiska
h_u	mm	Dubina utiska
R_m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
R_{mt}	N/mm ²	Tlačna čvrstoća
R_{ms}	N/mm ²	Savojna čvrstoća
$R_{m\tau}$	N/mm ²	Smična čvrstoća
F_{max}	N	Maksimalna sila
F	N	Sila
A_0	mm ²	Površina presjeka
h	mm	Visina epruvete
b	mm	Debljina epruvete
L	mm	Duljina epruvete
E	N/mm ²	Modul elastičnosti

SAŽETAK

Cilj ovog rada je ispitati utjecaj usmjerenosti strukture te savojnu čvrstoću drva jela (*Abies alba*) u longitudinalnom smjeru. Ispitivanje savojne čvrstoće provedeno metodom savijanja u tri točke. Savojna sila bila je okomita na longitudinalni smjer, a u odnosu na tangentu goda, pod kutem od 0°, 45° i 90°. Za svaki kut ispitano je po 33 uzorka.

Utvrđeno je da savojna čvrstoća ovisi o kutu između savojne sile i tangente na god. Najveća vrijednost (91,9 N/mm²) dobivena je kod kuta od 0°, a najmanja (85,3 N/mm²) pod kutem od 45°. Vrijednost savojne čvrstoće kod kuta od 90° iznosila je 87,9 N/mm².

Rasipanja rezultata pri ispitivanju savojne čvrstoće bila su relativno velika, ali je koeficijent varijacije (15,9 %) ipak bio ispod dopuštene vrijednosti (16 %).

Dobivene vrijednosti Weibullovog modula potvrđuju da se Weibullovom razdiobom mogu dobro opisati dobivene vrijednosti savojne čvrstoće.

Ključne riječi: savojna čvrstoća, usmjerenost, jela

SUMMARY

The goal of this study was to examine the influence of the orientation of the structure and the flexural strength of fir wood (*Abies alba*) in the longitudinal direction. Flexural strength test was performed by the three-point bending method. The bending force was perpendicular to the longitudinal direction, and in relation to the tangent of the tree rings, at an angle of 0°, 45°, and 90°. 33 specimens were tested for each angle. It was found that the bending strength depends on the angle between the bending force and the tangent per tree ring.

The highest value (91.9 N/mm²) was obtained at an angle of 0°, and the lowest (85.3 N/mm²) at an angle of 45°. The value of flexural strength at an angle of 90° was 87.9 N/mm².

The variations in the bending strength test results were relatively large, but the coefficient of variation (15.9%) was still below the permissible value (16%).

The obtained values of the Weibull modulus confirm that the obtained values of flexural strength can be well described by the Weibull distribution.

Key words: flexural strength, orientation, fir tree

1. UVOD

Pod pojmom drvo podrazumijeva se tvrdi čvrsti vlaknasti materijali od kojega su izgrađena debla, grane, korijenje drveća i grmlja. Drvo je svestran materijal koji je imao krucijalnu ulogu u razvoju čovječanstva. Drvo je služilo kao građevinski materijal, ogrjev, oruđe i oružje. Drvo kao materijal ima niz povoljnih fizikalnih i tehničkih svojstva. Drvo se uz pomoć jednostavnih alata lako obrađuje, ima vrlo visoku nosivost i malu gustoću u odnosu na druge tehničke materijale te povoljnu toplinsku vodljivost i povoljna akustična svojstva. U usporedbi s drugim građevinskim materijalima, prije svega čelikom, posjeduje visoku otpornost prema većini kemikalija. Drvo je relativno trajan materijal i ako se minimalno održava, može imati dugi vijek trajanja. [1-3]

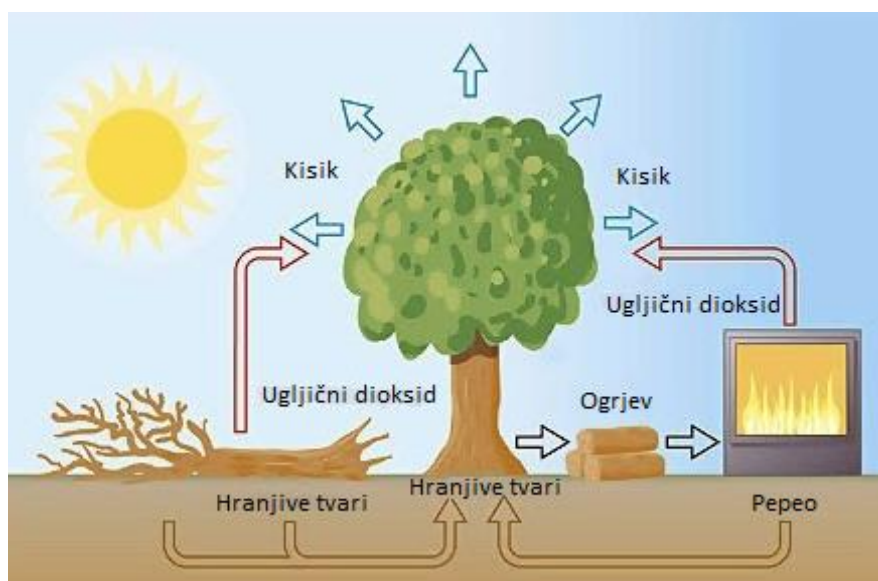
Slika 1 prikazuje drvenu crkvu Sv. Barbare u Velikoj Mlaki. Crkva je izgrađena 1642. godine i dobar je primjer dobre postojanosti drva prema vremenskim utjecajima. [4]



Slika 1 Drvena crkva Sv. Barbare [4]

Uloga drva je i danas značajna, naime 27 % energije u svijetu dobiveno je iz drva i drvenog ugljena. Bitno je naglasiti da je drvo prirodan, biološki, a time i biorazgradiv materijal, koji ima bitnu ulogu u proizvodnji kisika, čuvanju tla, vezanju ugljičnog dioksida (čime se smanjuje njegova emisija u atmosferu) te povoljno utječe na klimu. [1,5]

Slika 2 prikazuje uobičajeni životni ciklus stabla. [6]



Slika 2 Uobičajeni životni ciklus stabla [6]

Postoji puno različitih vrsta drva, što četinjača što listača. Na području Hrvatske ima nekoliko komercijalno zanimljivih vrsta drva kao što su hrast, bukva, obični jesen, obični grab te ostale listače. U skupini četinjača tehnički su zanimljive smerka, jela, bor i ariš.

U ovom završnom radu ispitana je savojna čvrstoća u longitudinalnom smjeru na drvetu jele (*Abies alba*). Jela je vazdazeleno stablo iz porodice borovki (*Pinaceae*) koje rastu u brdsko-planinskom pojasu do 2000 m nadmorske visine. Raste na području južne, srednje i zapadne Europe, a u Hrvatskoj je najprisutnija na području Gorskog kotara. [1,7]

2. PODJELA DRVA

Drvo je prirodni, heterogeni materijal dobiven iz višegodišnjih drvenastih biljka. Kako je drvo heterogen materijal potrebno je proučiti strukturu drva i njezin utjecajna svojstva i karakteristike drva.

Stablo se sastoji od tri glavna djela: korijena, debla i krošnje. Svaki dio ima svoju ulogu u postojanju stabla. Korijen se nalazi ispod zemlje i služi za držanje stabla uspravnim te za apsorpiranje hranjivih tvari (vode i minerala) iz tla. Deblo je središnji nosač stabla, a na njemu se nalazi krošnja. Deblo također služi za prenošenje hranjivih tvari iz korijenja do krošnje i kao pohranitelj rezervnih tvari i šećera. Krošnja je ukupna masa grana, lišća, cvjetova i plodova. U listovima se odvija fotosinteza. Fotosinteza je proces u kojem se apsorbira ugljični dioksid (CO_2) i upija energija iz sunčeve svjetlosti i iz tih „sirovina“ proizvode se ugljikohidrati i kisik. Dobiveni ugljikohidrati prenose se kroz unutarnji sloj kore do svih dijelova stabla.

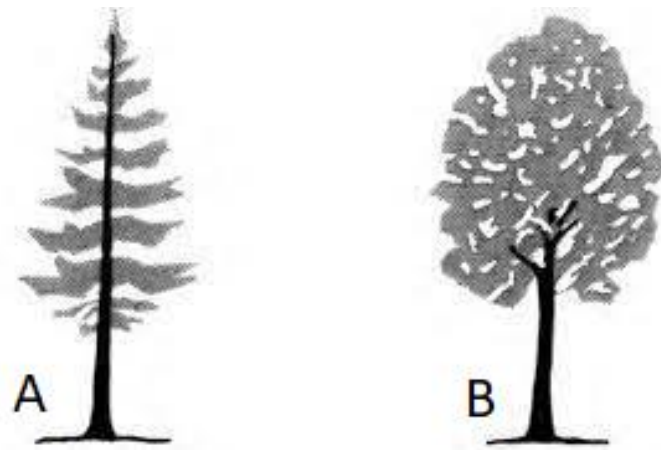
Sve tehnički značajnije vrste drva pripadaju skupini cvjetnica ili sjemenjača, a dijele se na listače (tvrdo drvo) i četinjače (meko drvo). Tvrdo drvo i meko drvo ne govori o tome kolika je stvarna tvrdoća nego govori o gustoći drva. Drvo se smatra tvrdim ako ima gustoću u suhom stanju iznad $0,55 \text{ g/cm}^3$ odnosno mekim, ako ima gustoću u suhom stanju manju od $0,55 \text{ g/cm}^3$.

U pravilu tvrdo drvo dulje izgara i daje više topline u odnosu na meko drvo.

Četinjače imaju uglavnom čunjast oblik stabla, deblo im se proteže kroz cijelu visinu stabla i imaju lišće u obliku iglica koje zimi uglavnom ne otpadaju.

Listače imaju široku okruglastu krošnju, a lišće im je plosnato i širokog oblika te najčešće opada na kraju vegetacijskog ciklusa. [1,8,9]

Slika 3 prikazuje izgled stabla četinjače i listače. [9]



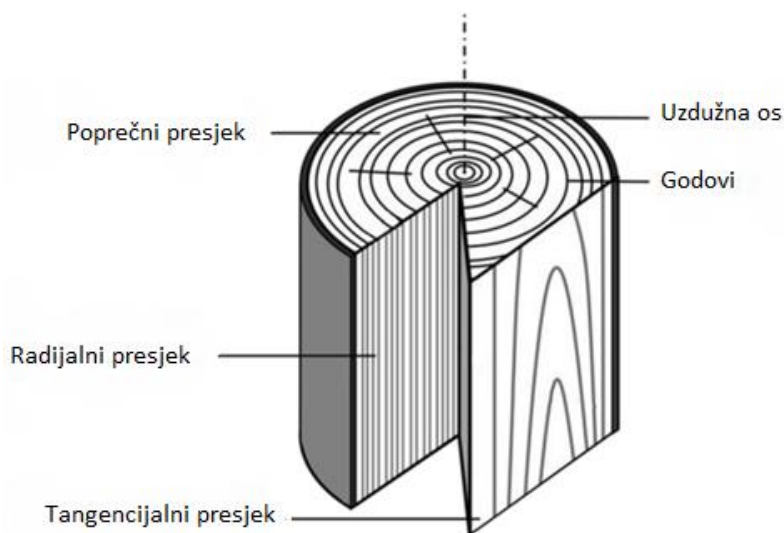
Slika 3 Karakteristični oblici stabla četinjače (A) i listače (B) [9]

3. MAKROSTRUKTURA DRVA

Kako bi se odredila svojstva i karakteristike drva potrebno je proučiti strukturu drva. Struktura drva može se promatrati na makro i mikro razini. Makrostruktura drva je izrazito usmjerena i da bi se potpuno opisala potrebno ju je promotriti u tri karakteristična, međusobno okomita presjeka:

- poprečnom
- tangencijalnom
- i radijalnom.

Slika 4 prikazuje karakteristične presjeke debla. [10]



Slika 4 Poprečni, tangencijalni i radijalni presjeci debla [10]

3.1 Poprečni presjek debla

Poprečni presjek je okomiti na uzdužnu os debla. Na poprečnom presjeku vidljiva je slojevita struktura debla koju čine, gledajući izvana prema unutra, sljedeći slojevi:

- vanjska kora
- unutarnja kora
- bjeljika
- srževina ili srž
- i srčika.

Slika 5 prikazuje poprečni presjek debla na kojem se vide navedeni slojevi. [11]



Slika 5 Slojevi debla [11]

Kako sve u prirodi ima svoju funkciju tako i svaki sloj debla obavlja određenu funkciju. Vanjska kora služi za zaštitu od mehaničkih povreda te sprječava evaporaciju vode iz unutarnjih slojeva debla.

Unutarnja kora prenosi hranjive tvari nastale fotosintezom iz krošnje do korijena i svih drugih dijelova stabla. Sloj koji se nalazi između unutarnje kore i bjeljike naziva se vaskularni ili žilni kambiji. To je sloj u kojem se nalaze žive stanice tvornog tkiva koje su zaslužne za sekundarni rast stabla i iz kojeg kreće rast novih godova i unutarnje kore na početku svakog vegetacijskog perioda.

Bjeljika je svjetliji dio debla koji se nalazi između kore i srčevine. Bjeljika provodi hranjive tvari odnosno vodu i minerale od korijena prema krošnji. Također pohranjuje škrob i lipide kao rezervnu hranu za stablo.

Srčevina služi kao skladište biokemijskih tvari te je iz tog razloga tamnije boje. Kroz srčevinu je otežan ili potpuno onemogućen protoka vode i hranjivih tvari.

Srčika se nalazi u centru debla, ona je ostatak tkiva iz faze ranog rasta stabljike kada još nije bilo formirano deblo. [1]

3.1.1 Godovi

Na poprečnom presjeku golim okom jasno se mogu vidjeti godovi odnosno godišnji prsteni. Godovi su posljedica sekundarnog rasta drva. Da bi nastalo deblo potreban je višegodišnji rast. Stablo ne raste samo u visinu već i u širinu. Rast u visinu nazivamo još primarnim rastom, a rast u širinu nazivamo sekundarnim rastom. God predstavlja jednogodišnji prirast drva u klimatskim zonama za koje su karakteristične izmjene godišnjih doba. Bitno je naglasiti da neke vrste drveća ne stvaraju godove, a za to je zaslužna klima u kojem se drvo nalazi. Drveće koje nema godove nalazi se najčešće u tropskim krajevima gdje je prirast drvnog tkiva kontinuiran. Godovi nam daju sliku u kakvim klimatskim uvjetima je drvo raslo (temperatura, vlaga i sunčeva svjetlost). U grubo se može reći da širi godovi prikazuju dobru godinu što znači da je drvo u jednoj godini zbog povoljnih uvjeta naraslo više nego inače, npr. više kiše.

Godovi mogu biti jače i slabije izraženi odnosno mogu biti markantni ili manje markantni. U pravilu jače su izraženi godovi kod četinjača.

Godovi se također mogu dijeliti po boji goda odnosno mogu biti svjetliji i tamniji. Mogu se dijeliti i po širini na fine ili uske, polu-fine ili srednje široke te grube ili široke godove. Slika 6 prikazuje razliku širine godova kod drva ariša. [1]



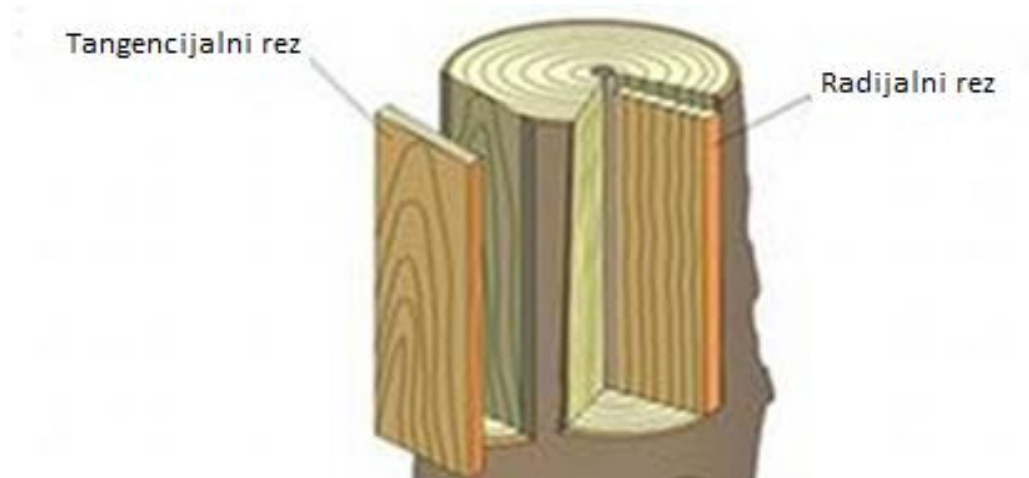
Slika 6 Razlika u širini godova na poprečnom presjeku ariša

3.2 Radijalni presjek

Radijalni presjek je svaka ravnina čija je površina paralelna s uzdužnom osi debla i istodobno prolazi kroz srčiku. U radijalnom presjeku mogu se jasno vidjeti aksijalno (uzdužno) orijentirana drvena tkiva. Godovi su vidljivi kao uzdužne linije. U ovom presjeku mogu se vidjeti uzdužne promjene u strukturi debla što u poprečnom presjeku nije moguće, slika 7. [12]

3.3 Tangencijalni presjek

Tangencijalni presjek je poput radijalnog presjeka, paralelan s uzdužnom osi debla. Ovaj presjek je okomit na poprečni presjek, tangira godove i ne prolazi kroz srčiku. Godovi nisu nikada savršeno okrugli, a njihova zakrivljenost varira ovisno o udaljenosti od srčike. To je jasno vidljivo u tangencijalnom presjeku jer se u njemu godovi najčešće vide u obliku slova U i V, slika 7. [12]



Slika 7 Radijalni i tangencijalni presjek [13]

4. MIKROSTRUKTURA DRVA

Pod mikroskopom je vidljivo da je drvo sačinjeno od sićušnih jedinki koje nazivamo drvnim stanicama. U grubo se može uzeti da u jednom kubičnom metru drva ima između 350 i 500 milijardi stanica. Osnovne vrste drvnih stanica razlikuju se kod četinjača i listača.

Četinjače se sastoje uglavnom od traheida, a sadrže i određenu količinu parenhimnih drvnih stanica. Traheide su uglavnom longitudinalne ili aksijalne – njihova dulja strana je orijentirana u smjeru osi debla. Aksijalne traheide kod četinjača koje su ujedno i najdulje stanice drva; u prosjeku su duge 3 do 5 mm. Aksijalne parenhimske stanice nalaze se samo u nekim vrstama dok se radijalne parenhimske stanice uvijek pojavljuju. Neke četinjače u svojoj strukturi sadrže i smolne kanale koji nisu u pravom smislu stanice već cjevasti prostori između stanica koji su obloženi posebnim parenhimom.

Na slici 8 prikazanesu osnovne stanice četinjača i listača i njihova orijentacija u deblu.

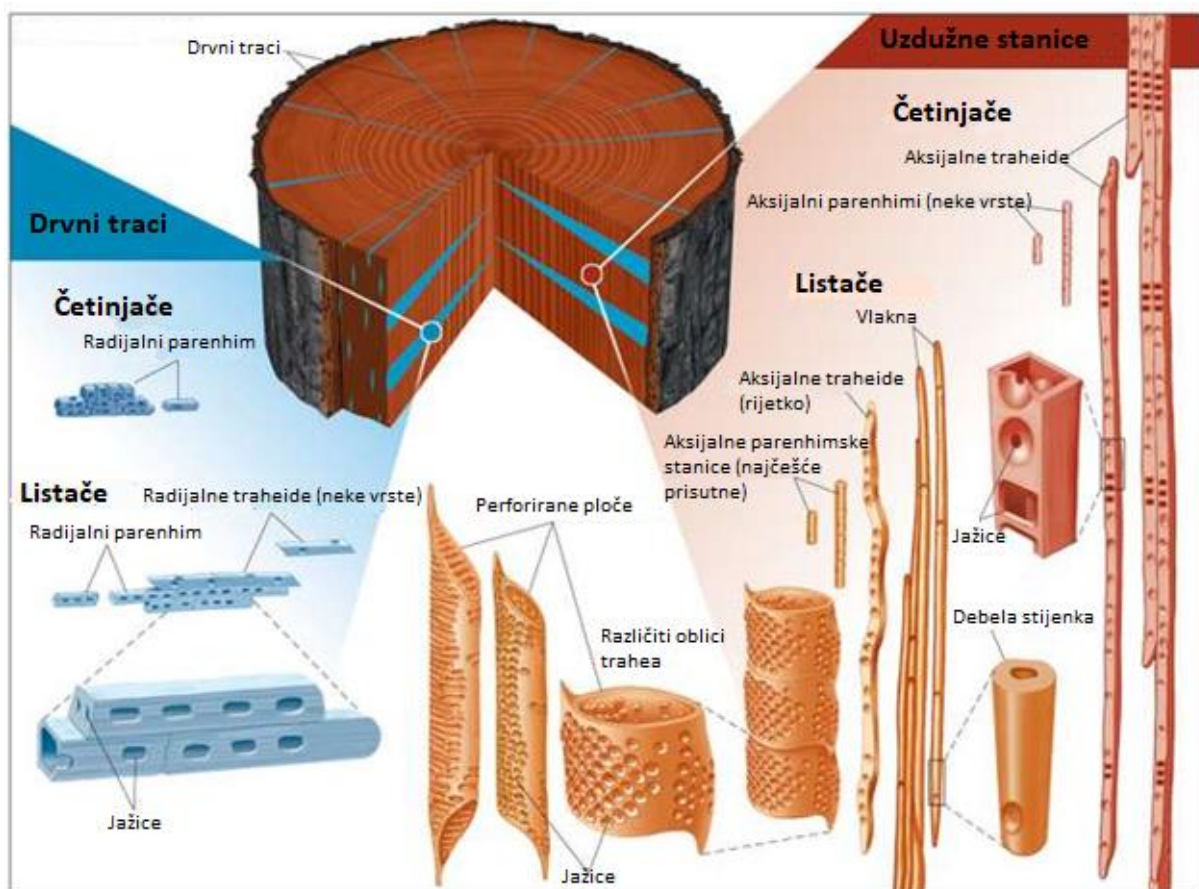
Građa listača je puno kompliciranija i uglavnom se sastoji od traheja, drvnih vlaknaca i parenhimskih stanica. Postoje listače koje sadrže i aksijalne traheide, ali to je rijetko. Kod listača je udio konstituentnih stanica ovisan o vrsti drva.

Sve gore navedene stanice su cjevastog oblika. Traheide i vlaknca imaju zatvorene krajeve. U drvnom tkivu vlaknaca su povezani s kraja na kraj i tvore okomite cijevi (posude) neodređene duljine. Karakteristične pore koje se vide na presjeku tvrdog drva su zapravo traheje. Traheje kod listača su nešto kraće sa prosječnom duljinom od 1 do 2 mm i to su najvažnije stanice koje provode vodu. Iako vlaknaca u stablima tvrdog drva također mogu biti uključena u provođenje vode to im nije glavna funkcija već im je glavna funkcija pružanje mehaničke potpore.

Drvni traci su sačinjeni od radijalnih parenhimskih stanica koje su poput cigli složene u smjeru od srčike prema kori. Parenhimske stanice su vrlo male, duljina im je od 0,1 do 0,2 mm, i širina od 0,01 do 0,05 mm. Glavna uloga im je skladištenje hrane i njezin transport u radijalnom smjeru.

Većina drvnih stanica, čak i u živim stablima su mrtve, odnosno stanice su bez protoplazme i jezgre. Iznimke su neki slojevi mladih stanica koje čine kambij i parenhimske stanice tijekom rasta u vanjskom sloju bijeljike.

U stijenkama stanica često se u velikom broju mogu vidjeti otvori raznih oblika, tzv. jažice. Jažice služe kao komunikacijski kanali između susjednih stanica i dolaze u parovima, po jedna u svakoj od susjednih staničnih stijenki koje su odvojeni membranom. [14]



Slika 8 Prikaz vrsta drvnih stanica listača i četinjača [14]

5. MOLEKULARNA STRUKTURA DRVA

Kemijski gledano drvo se sastoji od ugljika, kisika i vodika. Ova tri kemijska elementa čine glavni kostur organskih spojeva. U drvu su raspoređeni u sljedećem omjeru: ugljik 50 % kisik 43 % i vodik 6 %. Ostalih 1 % dijeli se na mineralne komponente i dušik. Ovaj elementarni sastav je sličan za sve vrste drva. Na kemijski sastav može utjecati vrsta drva, mjesto rasta, položaj uzorka u deblu i sl.

Na razini spojeva sve vrste drva sastoje se od celuloze, hemiceluloze i lignina. One tvore neku vrstu prirodnog kompozitnog materijala. Čvrstoća, stabilnost i otpornost drva ovisno o udjelima ovih spojeva i načinu na koji su oni međusobno povezani.

U tablici 1 prikazane su sve komponente drvnog tkiva i rasponi njihovih udjela. [15] Tablica 2 prikazuje masene udjele celuloze, heloceluloze, lignina, pektina i ekstraktiva u nekim vrstama drva. [16]

Tablica 1 Sastav drvog tkiva na razini spojeva [15]

Glavne komponente drva	Holoceluloza (konstrukcijska komponenta stanične stijenke) 46-87%	Celuloza 40-60%
		Hemiceluloza (konsolidiraju zajedno sa ligninom celulozni okvir staničnih stijenki) 15-36%
	Lignin: Četinjače: 28-41% Listače: 18-25%	
Popratne komponente	Ekstraktivi (anorganski i organski sastojci) utječu i često određuju kemijski, biološka i fizikalna svojstva, npr. Otpornost na svjetlost, zapaljivost, otpornost na štetočine itd.	Masti, ulja, smole, voskovi
		Bjelančevine, škrob, šećer
		Alkaloidi, tanini, boje, mirisi, kamfor
		Anorganske i organske kiseline, soli
		Minerali

Tablica 2 Prikaz masenih udjela komponenti drvnog tkiva nekih vrsta drva [16]

Naziv	Botanički naziv	Maseni udio, %				
		Celuloza	Hemiceluloza	Pektin	Lignin	Ekstraktivi
Bor	<i>Pinus sylvestris</i>	44	26	9	28	4
Smreka	<i>Picea abies</i>	43	27	9	29	2
Duglazija	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	47	22	7	30	5
Breza	<i>Betula verrucosa</i>	46	36	25	19	2
Bukva	<i>Fagus sylvatica</i>	45	35	17	18	4
Jasika	<i>Populus tremolodies</i>	50	31	17	18	4
Eukaliptus	<i>Eucalyptus globulus</i>	47	27	17	26	1,5

Celuloza je komplicirana visoko molekularna tvar koja zapravo čini staničnu strukturu. Predstavlja strukturnu tvar stijenki drvnih stanica i ona najviše doprinosi čvrstoći drva. Dugi molekularni lanci, nalik nitima, sastavljeni su u jedinice koje se nazivaju fibrili. Pojednostavljeno, funkcija celuloze može se usporediti s učinkom armature u armiranom betonu.

Lignin služi kao vezivno tkivo, zadaća mu je povezivanje celuloze i hemiceluloze. Na taj način povisuje tlačnu čvrstoću drva. Lignin je jako tvrd, može apsorbirati tlačno opterećenje, nije fleksibilan i hidrofoban je.

Hemiceluloza čine molekule kratkih lanaca. Hemiceluloza čini fleksibilni sloj čija je zadaća povezivanje celuloze i lignina te se nalazi između celulozih vlakana i lignina.
[15,16,17]

6. SVOJSTVA DRVA

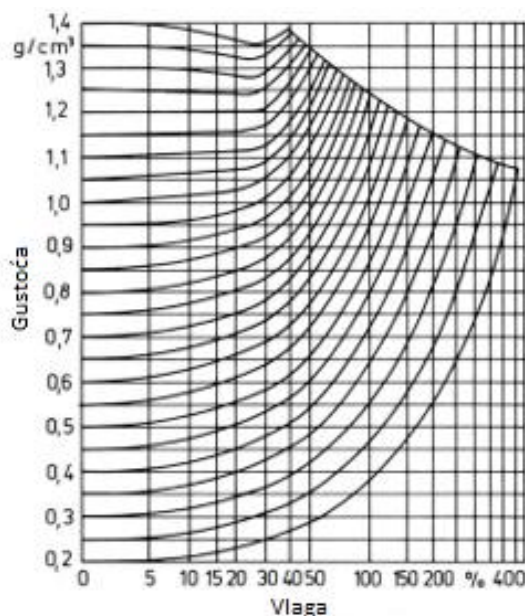
6.1 Gustoća

Gustoća je jedno od najvažnijih svojstva drva. Ona utječe skoro na sva ostala svojstva (npr. čvrstoća, bubrenje, skupljanje, koeficijent toplinske vodljivost,...).

Gustoća drva varira u širokom rasponu od 100 kg/m^3 do 1200 kg/m^3 . Što je veća gustoća to znači da je veći udio staničnih stijenki a udio pora je manji.

Zbog higroskopskog ponašanja drva, gustoća ovisi o količini vlage u okruženju.

Slika 9 prikazuje utjecaj vlage na gustoću. [18]



Slika 9 Ovisnost gustoće o vlazi [22]

Gustoća drva pri nekom udjelu vlage računa se pomoću sljedeće jednadžbe:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \text{ , kg/m}^3 \quad (1)$$

gdje je:

ρ_w – gustoća uzorka pri nekom udjelu vlage, kg/m^3

m_w – masa uzorka pri nekom udjelu vlage, kg

V_w – volumen uzorka pri nekom udjelu vlage, m^3 .

Gustoća drva u apsolutno suhom stanju računa se prema izrazu:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0}, \text{ kg/m}^3 \quad (2)$$

gdje je:

ρ_0 – gustoća uzorka u apsolutnom suhom stanju, kg/m³

m_0 – masa uzorka u apsolutnom suhom stanju, kg

V_0 – volumen uzorka u apsolutnom suhom stanju, m³.

Udio vlage u drvu određuje se prema izrazu:

$$w = (m_w - m_0)/m_w, (\%) \quad (3)$$

gdje je:

w – udio vlage, %.

Masa u apsolutno suhom stanju mjeri se nakon grijanja uzorka u peći na temperaturi od 103 ± 2 °C. Drvo ostaje u peći dok dva uzastopna vaganja ne pokažu istu vrijednost. To znači da u drvu nema više vlage.

Kako se vrijednosti svih svojstava drva prikazuju za udio vlage od 12 %, dobivene vrijednosti gustoće kod nekog udjela vlage (w) preračunavaju se u vrijednosti gustoće pri udjelu vlage od 12 % (ρ_{12}).

$$\rho_{12} = \rho_w \frac{1+0,01 \times (12-w)}{1+0,01 \times (12-w) \times \frac{\rho_w}{\rho_{H_2O}}}, (\text{g/cm}^3) \quad (4)$$

6.2 Toplinska svojstva drva

6.2.1 Toplinska vodljivost

Koeficijent toplinske vodljivost (λ) je količina topline koja prođe kroz kocku duljine brida 1 m kod temperaturne razlike od 1 K u jednom satu. Mjerna jedinica za toplinsku vodljivost je W/mK. Toplinska vodljivost drva znatno ovisi o vlazi te s povećanjem vlage raste i toplinska vodljivost ($1 \% \Delta u = 1,25 \% \Delta \lambda$). Također s povećanjem gustoće raste toplinska vodljivost pa je tako kod smreke, bora i jele

toplinska vodljivost 0,13 W/mK, a kod bukve i hrasta 0,20 W/mK. Kako je mikrostruktura drva izrazito usmjerena, toplinska vodljivost ovisi o orijentaciji mikrostrukture. Tako je u smjeru vlaknanaca toplinska vodljivost duplo veća nego u smjeru okomitom na vlakanca.

Specifični toplinski kapacitet je količina topline potrebna da zagrije 1 kg određene tvari za 1 K. Mjerna jedinica za specifični toplinski kapacitet je kJ/kgK. Kod suhog drva specifični toplinski kapacitet iznosi 1300 J/kgK. Ta vrijednost je gotovo neovisna o vrsti drva, ali s povećanjem vlažnosti drva raste i kapacitet. Tako pri udjelu vlage od 100 % specifični toplinski kapacitet može doseći vrijednost od 2800 J/kgK. U odnosu na druge materijale drvo ima relativno visoku vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta.

Zbog visokog specifičnog toplinskog kapaciteta i niskog koeficijenta toplinske vodljivosti drvo se koristi kao izolacijski materijal. [18]

6.2.2 Toplinsko širenje

Toplinsko širenje je malo u usporedbi sa širenjem zbog promjene vlažnosti. To je osobito važno kod nekih proizvoda poput parketa. Kod proizvoda od punog drva širenje ovisi o vrsti drva i usmjerenosti strukture. Širenje u smjeru vlaknanaca manje je nego širenje okomito na vlakanca. [18]

6.2.3 Ponašanje u požaru

Drvo i materijali na bazi drva su zapaljivi. Točka paljenja tj. temperatura pri kojoj se drvni plinovi samozapaljuju pri dovedu kisika je 330 do 350 °C, a žarišna točka je 260 do 290 °C. Drvna prašina, kakva se javlja u preradi drva, vrlo je eksplozivna ovisno o sastavu mješavine prašine i zraka. Kalorična vrijednost drva je od 15 do 17 MJ/kg i raste s gustoćom drva. [18]

6.2.4 Utjecaj topline na mehanička svojstva drva

Kod povećanja temperature smanjuju se mehanička svojstva drva. Relativni odnos između mehaničkih svojstava na 100 °C i na 20 °C ovisi o dimezijama drva, tablica 3.

Tablica 3 Smanjenje mehaničkih svojstava izazvano snižavanjem temperature

Mehaničko svojstvo	Veliki uzorci drva	Mali uzorci drva
savojna čvrstoća	72%	45%
vlačna čvrstoća	92%	89%
tlačna čvrstoća	56%	49%

Niska toplinska vodljivost i nizak koeficijent toplinskog širenja te stvaranje sloja drvenog ugljena na rubu, kod većih presjeka povećava otpornost drva prema gorenju. Uz odgovarajuće velike presjeke nosivih elementa, drvene konstrukcije se stoga ponašaju povoljnije od onih izgrađenih od negorivih građevinskih materijala kao što je čelik. Čelik gubi čvrstoću i počinje se savijati pri temperaturama koje nastaju tijekom požara. S druge strane, temperatura unutar velikih drvenih presjeka doseže maksimalno 100 °C te je smanjenje čvrstoće neznatno. [18]

6.2.5 Električna svojstva

Suho drvo je dobar izolator. To potvrđuje i činjenica da električni otpor naglo raste sa smanjenjem vlage u drvu. Specifična otpornost bora s 0 % vlage iznosi $2,3 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$, kod 7 % vlage iznosi $5 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$, a s 20% vlage iznosi $3 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$.

Otpor drva se također smanjuje s porastom temperature.

Električna i dielektrična svojstva drva u industriji koriste se za određivanje vlage u drvu (električni otpor, dielektrična konstanta). [18]

7. MEHANIČKA SVOJSTVA DRVA

7.1 Tvrdća

Tvrdoća je otpor koji drvo pruža prilikom prodiranja tvrdog materijala u njegovu površinu. Općenito je poznato da tvrdoća linearno raste s povećanjem gustoće drva. Najčešće korištena metoda mjerenja tvrdoće za drvo jest Brinellova metoda. Čelična kuglica promjera 2,5 mm ili 10 mm optereti s konstantnom silom od 500 ili 1000 N, ovisno o materijalu. Trajanje opterećenja je oko 30 sekundi nakon čega se kuglica rasteret. Mjeri se srednji promjer otiska uz točnost uređaja za mjerenje od 0,1 mm.

Tvrdoća se može izračunati na dva načina: [18]

- pomoću promjera otiska

$$HB = \frac{2F}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \text{ N/mm}^2 \quad (5)$$

- pomoću dubine otiska

$$HB = \frac{F}{D \cdot \pi \cdot h_u}, \text{ N/mm}^2 \quad (6)$$

gdje je:

HB – tvrdoća po Brinellu, N/mm²

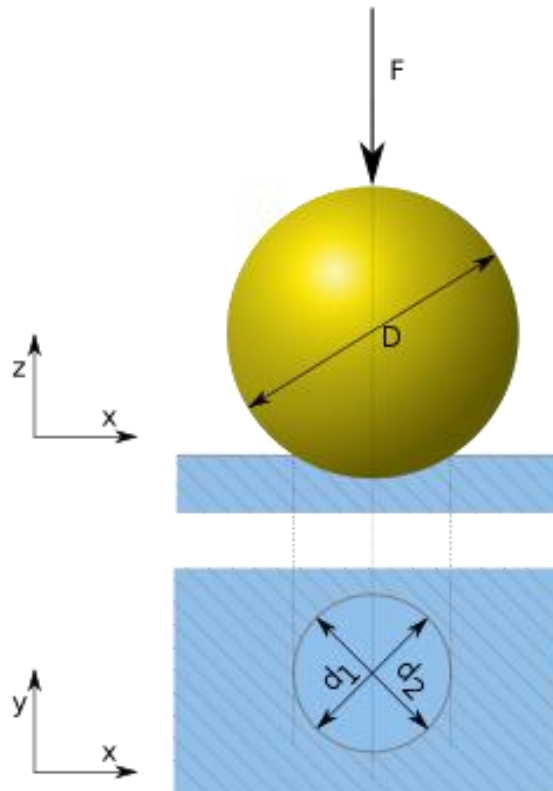
F – sila, N

D – promjer kuglice, mm

d – promjer otiska, mm

h_u – dubina otiska, mm.

Slika 10 shematski prikazuje ispitivanje tvrdoće Brinellovom metodom. [19]



Slika 10 Shematski prikaz ispitivanja tvrdoće Brinellovom metodom [19]

7.2 Svojstva čvrstoće

Čvrstoća je granično naprezanje pri kojem se ispitni uzorak lomi pod opterećenjem. S obzirom na prirast naprezanja u jedinici vremena razlikuju se statička ($<10 \text{ N/mm}^2$) i dinamička ($>10 \text{ N/mm}^2$) čvrstoća.

Prema načinu opterećenja razlikuju se:

- vlačna čvrstoća
- tlačna čvrstoća
- smična čvrstoća
- torzijska čvrstoća.

Budući da se pri ispitivanju bilo kojeg svojstva drva pojavljuju značajna rasipanja vrijednosti potrebno je uvijek ispitati veći broj uzoraka, a pri konstruiranju potrebno je uzeti odgovarajući faktor sigurnosti. [18]

7.3 Vlačna čvrstoća

Vlačna čvrstoća je naprezanje pri kojem dolazi do loma materijala. Sile koje djeluju na materijal su vlačne. Vlačna čvrstoća drva određuje se na malim, besprijekornim uzorcima.

Najveću vlačnu čvrstoću drvo ima u smjeru vlaknaca. Vlačna čvrstoća okomito na vlakanca iznosi samo od 5 do 10 % vlačne čvrstoće u smjeru vlaknaca. Određene razlike postoje između radijalnog i tangencijalnog smjera. Najčešće je nešto veća vlačna čvrstoća u radijalnom smjeru. [18]

Vlačna čvrstoća se računa pomoću sljedećeg izraza:

$$R_m = \frac{F_{max}}{A_0}, \text{ N/mm}^2 \quad (7)$$

gdje je:

- R_m – vlačna čvrstoća, N/mm²
- F_{max} – maksimalna vlačna sila, N
- A_0 – površina presjeka, mm².

7.3.1 Tlačna čvrstoća

I kog tlačne čvrstoće postoje velike razlike u vrijednostima između čvrstoće mjerene u smjeru vlaknaca i okomito na vlakanca. Ako tlačna sila djeluje okomito na vlakanca, često ispitivanja počinju tek pri određenom zbijanju drveta (npr. 5%), budući da se drvo može jako stisnuti te ne dolazi do stvarnog loma. Tlačna čvrstoća punog drva u smjeru vlaknaca upola je manja od vlačne čvrstoće u istom smjeru.

Tlačna čvrstoća izračunava se pomoću jednadžbe: [18]

$$R_{mt} = \frac{F_{max}}{A_0}, \text{ N/mm}^2 \quad (8)$$

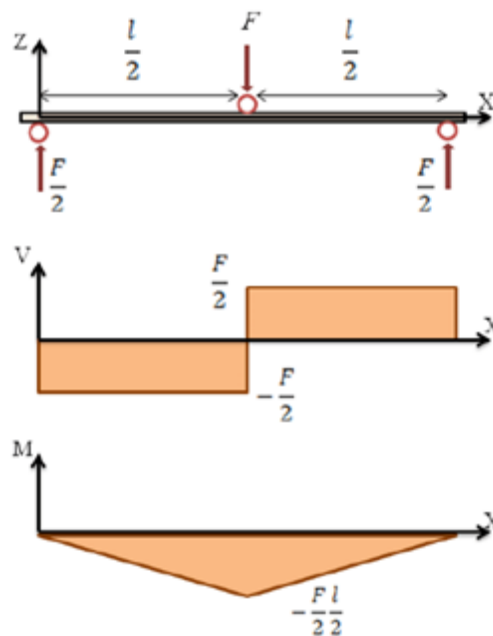
gdje je:

- R_{mt} – tlačna čvrstoća, N/mm²
- F_{max} – maksimalna tlačna sila, N
- A_0 – Površina presjeka, mm².

7.3.2 Savojna čvrstoća

Savojna čvrstoća je naprezanje koje dovodi do loma materijala pod djelovanjem savojne sile. Za ispitivanje savojna čvrstoća najčešće se primjenjuje metoda savijanja u tri točke. Epruveta se rubovima oslanja na dva oslonca a u sredini se opterećuje savojnom silom. Na mjestu gdje djeluje sila savojni moment je maksimalan. Kod savijanja u rubnim zonama nastaju vlačna i tlačna naprezanja. Ovisno o slučaju opterećenja dolazi do prisutnosti posmičnih naprezanja.

Na slici 11 shematski je prikazano ispitivanje savojne čvrstoće metodom u tri točke.

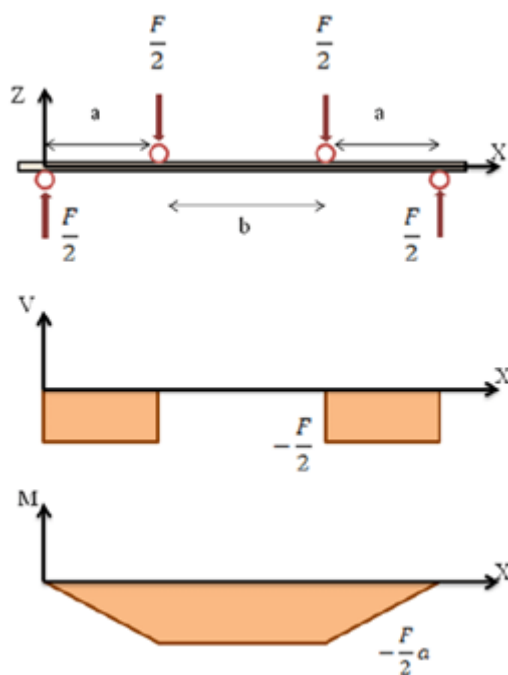


Slika 11 Metoda ispitivanja savojne čvrstoće u tri točke [20]

Kod opterećenja u četiri točke u području između dviju sila nema smičnog naprezanja. Smična naprezanja javljaju se samo u rubnim područjima između oslonaca i sila. Stoga se pomoću opterećenja u četiri točke u području gdje nema smičnog naprezanja može odrediti modul elastičnosti za čisto savijanje.

S druge strane kod opterećenja u tri točke u dobivene rezultate je uvijek ukomponirano smično opterećenje. U tom slučaju modul elastičnosti pri savijanju ovisi o odnosu između raspona oslonaca i debljine uzoraka.

Na slici 12 shematski je prikazano ispitivanje savojne čvrstoće metodom u četiri točke. [18]

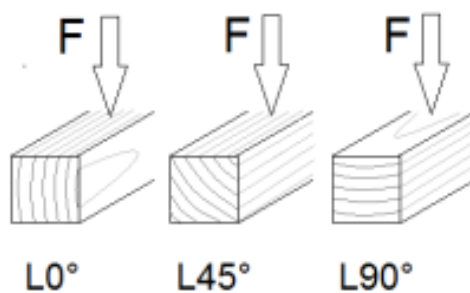


Slika 12 Metoda ispitivanja savojne čvrstoće u četiri točke [20]

Usmjerenost i pravilnost strukture imaju značajan utjecaj na savojnu čvrstoću drva. Jedan od važnih čimbenika pri ispitivanju savojne čvrstoće je kut koji zatvaraju savojna sila i tangenta na god. Pri tome kut između savojne sile i vlakana iznosi 90° .

Kod nekih vrsta kut između savojne sile i tangente na god nema utjecaja na vrijednost savojne čvrstoće, a kod nekih ima. Najveće vrijednosti savojne čvrstoće ponekad se postižu pri kutu od 45° , a ponekad, pri nekom drugom kutu. [21,22]

Slika 13 prikazuje tri različita kuta između savojne sile i tangente na god (0° , 45° , 90°) pri ispitivanju savojne čvrstoće metodom u tri točke. [1]



Slika 13 Usmjerenost godovo u odnosu na opterećenje [1]

Savojna čvrstoća ispitivana metodom u tri točke računa se prema izrazu:

$$R_{ms} = \frac{3F_{max} \cdot L}{2b \cdot h^2}, \text{ N/mm}^2 \quad (9)$$

gdje su:

F_{max} – maksimalna sila, N

L – duljina epruvete, mm

h – visina epruvete, mm

b – debljina epruvete, mm.

7.3.3 Smična čvrstoća

Smična čvrstoća je otpor tijela prilikom djelovanja dviju paralelnih sila suprotnog smjera na dvije susjedne površine tijela. Simična čvrstoća računa se pomoću jednadžbe:

$$R_{m\tau} = \frac{F_{max}}{L \cdot b}, \text{ N/mm}^2 \quad (10)$$

gdje su:

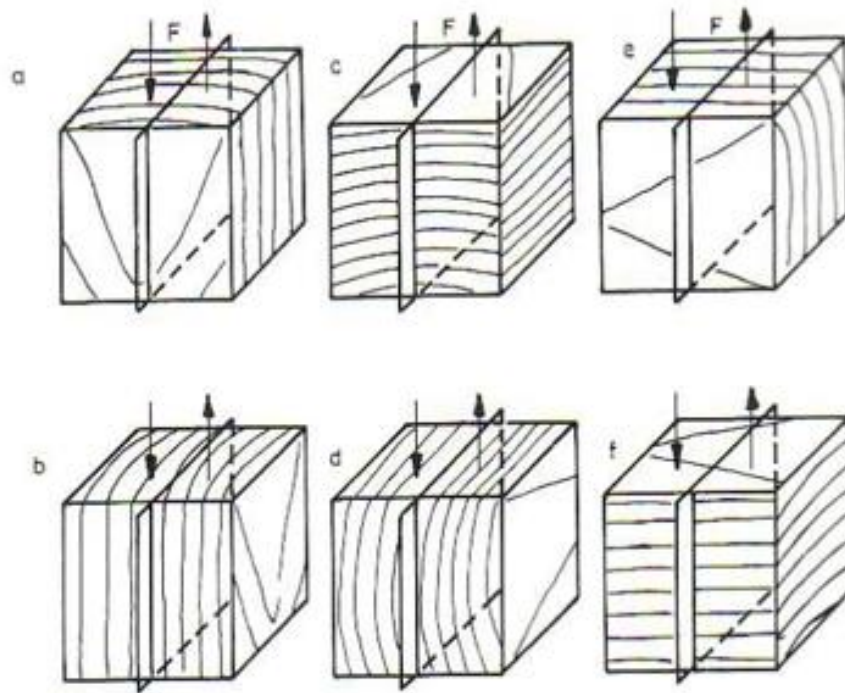
$R_{m\tau}$ - smična čvrstoća, N/mm²

F_{max} – maksimalna sila, N

b – širina uzorka, mm

L – duljina uzorka, mm.

Slika 14 prikazuje sve moguće smične ravnine s obzirom na usmjerenost strukture drva. Smična čvrstoća u smjeru paralelnom sa smjerom vlaknaca veća je od čvrstoće okomite na smjer vlaknaca. Kod opterećenja paralelnog sa smjerom vlaknaca prvo dolazi do sabijanja drva, a tek poslje do pomicanja. Zbog prethodnog sabijanja prilikom loma dolazi do snažnog strukturnog loma. Do loma usljed smika rijetko dolazi u ovoj ravnini. Prilikom ispitivanja u toj ravnini zapravo dolazi do ispitivanja zbijenog drva. [18]



Slika 14 Shematski prikaz mogućih smičnih naprezanja [22]

7.4 Modul elastičnosti

Modul elastičnosti opisuje proporcionalni odnos između naprezanja i istežanja kada se čvrsto tijelo linearno-elastično deformira. Modul elastičnosti ovisan je o vrst drva, karakteristikama rasta, vlazi, temperaturi i usmjerenosti strukture. Povećanjem vlage u drvu povećava se i elastična deformacija drva. [18]

Modul elastičnosti određuje se pomoću jednadžbe:

$$E = \frac{L^3(F_2 - F_1)}{4bt^3(a_2 - a_1)}, \text{ N/mm}^2 \quad (11)$$

gdje je:

L – razmak između oslonaca, mm

b – širina uzorka, mm

h – visina uzorka, mm

$(F_2 - F_1)$ – prirast sile u području gdje je ovisnost sila-progib linearna

$(a_2 - a_1)$ – prirast progiba (odgovara razlici $F_2 - F_1$)

$F_1 = 0,1 \times F_{\max}$ i $F_2 = 0,4 \times F_{\max}$

8. EKSPERIMENTALNI DIO

8.1 Cilj rada i provođenje ispitivanja

Osnovni cilj ovog rada bio je ispitati utjecaj usmjerenosti strukture na savojnu čvrstoću drva jele (*Abies alba*) u longitudinalnom smjeru metodom savijanja u tri točke. U tu svrhu provedeno je sljedeće:

- priprema uzoraka
- određivanje udjela vlage u drvu
- određivanje gustoće
- ispitivanje savojne čvrstoće
- analiza podataka

8.2 Priprema uzorka

Iz većih komada drva jele izrezani su ispitni uzorci propisanih dimenzija i potrebne orijentacije. Uzorci su imali oblik četverostrane prizme dimenzija 6 × 6 × 100 mm. Duljina uzoraka (100 mm) podudarala se s longitudinalnim smjerom. Na kvadratnom poprečnom presjeku (6 × 6 mm) godovi su, u odnosu na stranicu, bili pod kutom od 0°, 45° i 90°.



Slika 15 „Grubo“ rezanje drva



Slika 16 Izrezivanje epruveta

Za svaki kut izrezano je po četrdesetak uzoraka između kojih su izabrana po 33 uzoraka za daljnje ispitivanje. Isključeni su svi uzorci koji nisu imali dobru orijentaciju ili su pokazivali neke druge nepravilnosti.

Izrezivanje uzoraka (grubo i fino) prikazano je na slici 15 i na slici 16.

Nakon izrezivanja i odabira potrebnog broja uzoraka uslijedilo je brušenje uzoraka brusnim papirom kako bi se uklonili tragovi pile i kako bi se postigla relativno glatka površina. Brušenje uzoraka prikazano je na slici 17.



Slika 17 Brušenje uzoraka

Nakon brušenja, uzorci su podijeljeni u tri skupine. U prvoj skupini nalazila su se 33 uzorka kod kojih će linija goda (gledano u poprečnom presjeku) u odnosu na smjer djelovanja savojne sile biti pod kutom od 90° . U drugoj skupini nalazio se isti broj uzoraka kod kojih će navedeni kut iznositi 45° , a u trećoj skupini ispitni uzorci za kut od 0° . Prva skupina označena je oznakom L90, druga L45 i treća L0. Sve epruvete unutar iste skupine numerirane su brojevima od 1 do 33.

Svim ispitnim uzorcima izmjerene su širina (b) i visina (h) pomoću pomičnog mjerila. Dimenzije su prikazane u tablici 4.

Na slici 18 prikazane su sve tri skupine ispitnih uzoraka prije ispitivanja savojne čvrstoće.



Slika 18 Skupine epruveta

Tablica 4 Dimenzije epruveta

Broj epruvete	L90 (90°)		L45 (45°)		L0 (0°)	
	<i>b</i> -širina, mm	<i>h</i> -visina, mm	<i>b</i> -širina, mm	<i>h</i> -visina, mm	<i>b</i> -širina, mm	<i>h</i> -visina, mm
1	6,02	6,04	5,93	5,98	6,00	5,95
2	5,99	6,01	6,01	6,05	5,83	6,06
3	6,04	6,14	6,08	5,94	6,11	5,96
4	5,67	6,04	6,05	6,01	5,99	5,91
5	6,11	5,94	6,01	5,96	6,06	5,91
6	6,03	6,03	6,13	5,98	5,93	6,04
7	6,04	6,03	6,03	5,78	5,82	6,15
8	6,10	5,90	5,78	5,99	5,91	5,84
9	6,15	5,98	6,01	6,18	5,99	5,94
10	6,08	5,97	6,09	6,00	5,92	6,03
11	5,91	6,06	6,04	6,14	6,08	5,93
12	6,03	6,01	6,11	6,16	5,92	5,95
13	5,92	6,00	5,91	5,82	5,79	6,08
14	5,95	5,96	5,97	5,72	6,05	5,97
15	6,23	6,10	6,14	6,05	6,06	5,89
16	5,95	5,95	6,20	6,04	6,00	6,05
17	6,09	6,03	6,01	5,96	6,00	6,03
18	6,14	6,03	5,94	6,03	5,95	5,77
19	6,16	6,08	5,87	6,01	6,02	5,87
20	6,20	6,02	6,12	6,01	5,94	6,06
21	6,05	5,93	5,80	5,84	5,85	5,91
22	6,15	5,77	6,12	6,07	5,74	6,14
23	6,08	5,93	6,06	5,80	5,83	6,17
24	6,14	5,99	6,00	5,71	6,09	5,90
25	5,89	5,98	6,01	5,94	5,95	6,00
26	6,00	6,04	6,08	6,02	5,84	6,15
27	6,09	5,91	6,09	6,15	6,03	6,04
28	5,92	6,07	5,99	5,95	5,98	5,88
29	5,94	5,73	5,96	6,13	5,91	6,13
30	5,83	6,04	5,84	5,77	5,68	6,09
31	5,98	5,96	5,94	5,92	5,87	6,03
32	5,98	5,88	6,05	5,80	5,90	6,15
33	6,12	5,84	6,03	5,92	6,07	5,86

8.3 Odeđivanje gustoće uzoraka

Određivanje gustoće ispitnih uzoraka provedeno je u Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Uzorcima su izmjerene dimenzije te masa na analitičkoj vagi Ohaus Analytical Plus. Nakon toga ispitni uzorci su stavljeni u peć i pri temperaturi $105 \pm 3^\circ\text{C}$ sušeni 24 h kako bi se odredio udio vlage u drvu. Na temelju toga može se odrediti gustoća u apsolutno suhom stanju te gustoća pri 12 % vlage.

Dobiveni su sljedeći rezultati:

- Udio vlage pri ispitivanju: 7,03 %
- Gustoća (pri udjelu vlage od 7,03 %): $0,436 \text{ g/cm}^3$
 - Prosječna masa pri udjelu vlage od 7,03 % (m_w): 1,619 g
 - Prosječni volumen pri udjelu vlage od 7,03 % (V_w): $3,709 \text{ cm}^3$
- Gustoća u apsolutno suhom stanju: $0,406 \text{ g/cm}^3$
 - Prosječna masa u apsolutno suhom stanju (m_0): 1,505 g
- Gustoća (pri udjelu vlage od 12 %): $0,448 \text{ g/cm}^3$

8.4 Ispitivanje savojne čvrstoće uzorka

Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Ispitivanje se provodilo na kidalici njemačkog proizvođača Erichsen. Vrijednosti progiba i sile su se očitavali na upravljačkom računaru kidalice. Razmak između oslonaca bio je 80 mm, a promjer oslonaca iznosio je 2 mm. Promjer središnjeg valjka kojim je vršeno opterećenje uzorka iznosio je 10 mm. Brzina opterećenja iznosila je 2 mm/min. Ukupno je ispitano 99 epruveta. Svaka epruveta opterećena je do loma. Pri ispitivanju je bilježena maksimalna sila i maksimalni progub.

Slika 19 prikazuje savijanje ispitnog uzorka na kidalici metodom u tri točke.



Slika 19 Savijanje ispitnog uzorka na kidalici

8.4.1 Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće uzoraka skupine L0 (0°)

U ovoj skupini ispitivanje savojne čvrstoće provedeno je na uzorcima kod kojih je savojna sila bila okomita na longitudinalni smjer (i smjer traheida), a kut između savojne sile i tangente na god iznosio je 0°. U ovoj skupini ispitana su 33 ispitna uzorka, a vrijednosti maksimalne sile i savojne čvrstoće pri izmjerenom udjelu vlage prikazane su u tablici 5. U istoj tablici navedene su i vrijednosti savojne čvrstoće preračunate na udio vlage od 12 %.

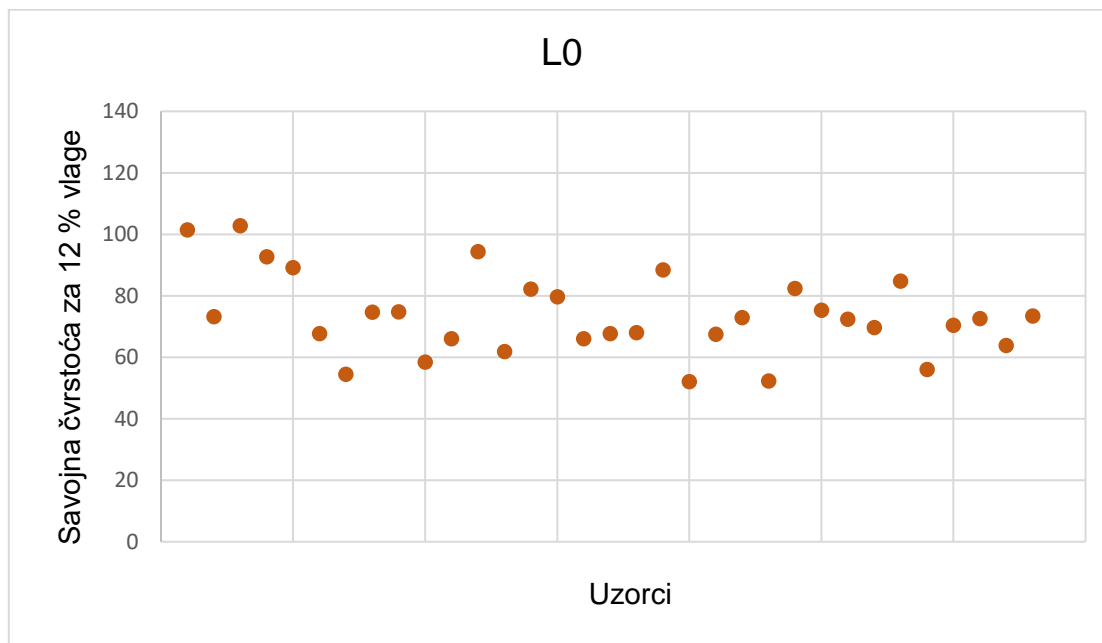
U dijagramu na slici 20 grafički su prikazane vrijednosti savojne čvrstoće preračunate na udio vlage od 12 %, za sva 33 ispitna uzorka.

Slika 21 prikazuje karakteristični lom ispitnih uzoraka iz ove serije.

Tablica 5 Vrijednosti savojne čvrstoće uzoraka L0 (0°)

Broj epruvete	F_{max} , N	R_{ms} , N/mm ² za 7,03 % vlage	R_{ms} , N/mm ² za 12 % vlage
1	179,2	126,5	101,4
2	130,4	91,4	73,2
3	185,6	128,3	102,8
4	161,3	115,6	92,7
5	156,9	111,2	89,1
6	121,8	84,5	67,7
7	99,7	67,9	54,4
8	125,3	93,2	74,7
9	131,4	93,3	74,7
10	104,7	73,0	58,5
11	117,5	82,4	66,0
12	164,5	117,7	94,3
13	110,1	77,2	61,8
14	147,4	102,5	82,2
15	139,4	99,5	79,7
16	120,7	82,4	66,1
17	122,8	84,4	67,6
18	112,1	84,9	68,0
19	152,6	110,4	88,4
20	94,6	65,1	52,1
21	114,8	84,3	67,5
22	131,2	90,9	72,9
23	96,5	65,2	52,3
24	145,3	102,8	82,4
25	134,2	94,0	75,3
26	133,1	90,4	72,4
27	127,5	86,9	69,7
28	145,8	105,8	84,7
29	103,5	69,9	56,0
30	123,4	87,9	70,4
31	128,9	90,6	72,6
32	118,5	79,7	63,8
33	127,4	91,7	73,5

Srednja vrijednost savojne čvrstoće (za 12 % vlage) za uzorke iz skupine L0 iznosi 73,6 N/mm², vrijednost standardne devijacije je 13,15, a koeficijent varijacije iznosi 17,9.



Slika 20 Vrijednosti savojne čvrstoće uzoraka L0 za 12 % vlage



Slika 21 Karakterističan izgled lomova na ispitnim uzorcima L0 (0°)

8.4.2 Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće uzoraka skupine L45 (45°)

U ovoj skupini ispitivanje savojne čvrstoće provedeno je na uzorcima kod kojih je savojna sila bila okomita na longitudinalni smjer, a kut između savojne sile i tangente

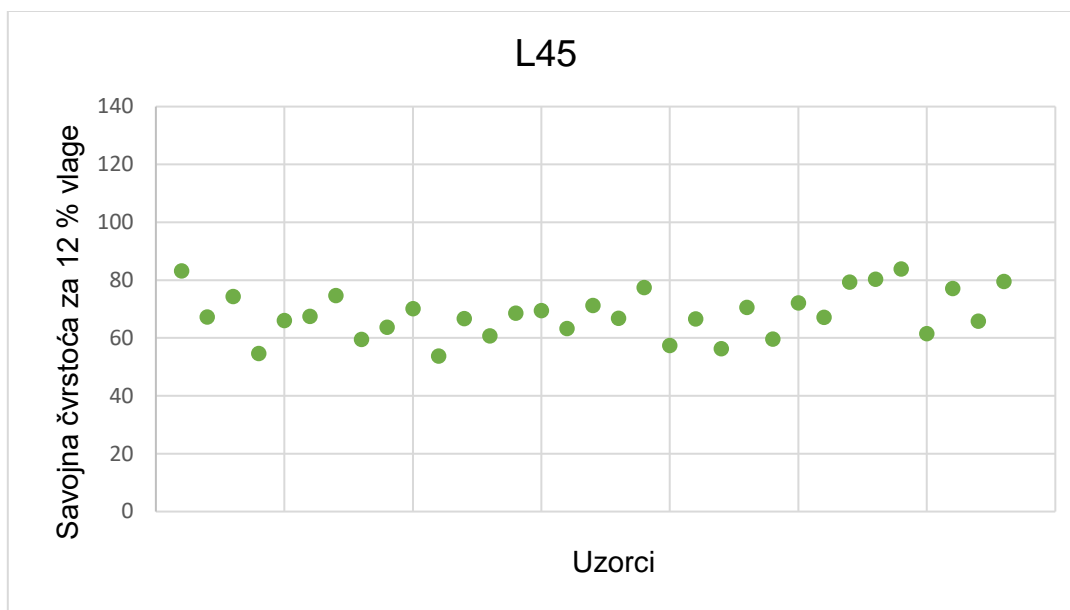
na god iznosio je 45°. Ispitivanje je provedeno na 33 ispitna uzorka, a vrijednosti maksimalne sile i savojne čvrstoće pri izmjerenom udjelu vlage te vrijednosti savojne čvrstoće preračunate na udio vlage od 12 %, prikazane su u tablici 6.

Tablica 6 Vrijednosti savojne čvrstoće uzoraka L45 (45°)

Broj epruvete	F_{max} , N	R_{ms} , N/mm ² za 7,03 % vlage	R_{ms} , N/mm ² za 12 % vlage
1	146,8	103,8	83,2
2	123,1	83,9	67,3
3	132,6	92,7	74,3
4	99,3	68,2	54,6
5	117,2	82,3	66,0
6	123	84,2	67,4
7	125,2	93,2	74,7
8	102,7	74,3	59,5
9	121,6	79,5	63,7
10	128	87,6	70,2
11	101,8	67,1	53,7
12	128,7	83,3	66,7
13	101,2	75,8	60,8
14	111,4	85,5	68,5
15	129,8	86,6	69,4
16	119,1	79,0	63,3
17	126,5	88,9	71,2
18	120,1	83,4	66,8
19	136,6	96,6	77,4
20	105,6	71,7	57,4
21	109,5	83,0	66,5
22	105,6	70,2	56,3
23	119,7	88,1	70,6
24	97	74,4	59,6
25	127,2	90,0	72,1
26	123,1	83,8	67,1
27	152	99,0	79,3
28	141,7	100,2	80,3
29	156,3	104,7	83,9
30	99,5	76,8	61,5
31	133,6	96,3	77,1
32	111,5	82,2	65,8
33	139,9	99,3	79,6

Srednja vrijednost savojne čvrstoće (za 12 % vlage) za uzorke iz skupine L45 iznosi $68,4 \text{ N/mm}^2$, vrijednost standardne devijacije je 8,13, a koeficijent varijacije iznosi 11,9. U dijagramu na slici 22 grafički su prikazane vrijednosti savojne čvrstoće preračunate na udio vlage od 12 %, za sva 33 ispitna uzorka.

Slika 23 prikazuje karakteristični lom ispitnih uzoraka iz ove serije.



Slika 22 Vrijednosti savojne čvrstoće uzoraka L45 za 12 % vlage



Slika 23 Karakterističan izgled lomova na ispitnim uzorcima L45 (45°)

8.4.3 Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće uzoraka skupine L90 (90°)

U ovoj skupini ispitana je savojna čvrstoća na uzorcima kod kojih je savojna sila bila okomita na longitudinalni smjer, a kut između sile i tangente na god iznosio je 90°.

Tablica 7 Vrijednosti savojne čvrstoće uzoraka L90 (90°)

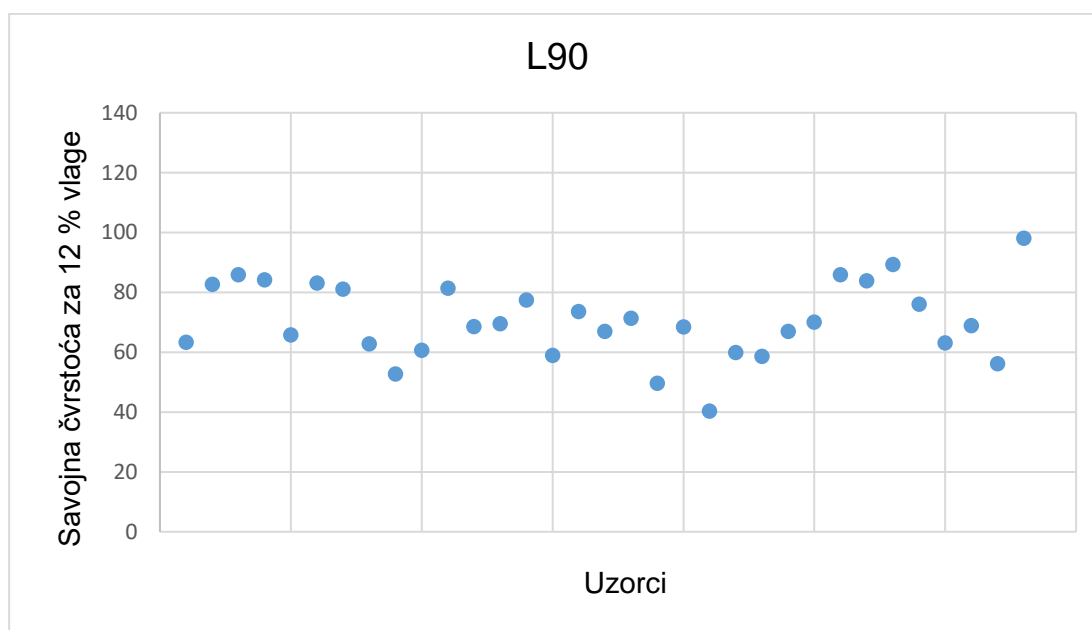
Broj epruvete	F_{max} , N	R_{ms} , N/mm ² za 7,03 % vlage	R_{ms} , N/mm ² za 12 % vlage
1	115,7	79,0	63,3
2	148,8	103,2	82,7
3	162,6	107,1	85,8
4	144,9	105,1	84,2
5	118	82,1	65,8
6	151,6	103,7	83,1
7	148,1	101,2	81,0
8	110,8	78,3	62,7
9	96,5	65,8	52,7
10	109,4	75,7	60,7
11	147	101,6	81,4
12	124,2	85,5	68,5
13	123,2	86,7	69,5
14	136,2	96,7	77,4
15	113,7	73,6	58,9
16	129	91,9	73,6
17	123,3	83,5	66,9
18	132,4	89,0	71,3
19	93,9	61,9	49,6
20	127,9	85,4	68,4
21	71,3	50,3	40,3
22	102	74,7	59,9
23	104,2	73,1	58,6
24	122,7	83,5	66,9
25	122,8	87,5	70,1
26	156,3	107,1	85,8
27	148,3	104,6	83,8
28	162,1	111,5	89,3
29	123,4	94,9	76,0
30	111,7	78,8	63,1
31	121,8	86,0	68,9
32	96,5	70,0	56,1
33	170,3	122,4	98,1

Ispitivanje je provedeno na 33 ispitna uzorka, a dobivene vrijednosti maksimalne sile i savojne čvrstoće pri izmjerenom udjelu vlage te vrijednosti savojne čvrstoće preračunate na udio vlage od 12 %, prikazane su u tablici 7.

U dijagramu na slici 24 grafički su prikazane vrijednosti savojne čvrstoće preračunate na udio vlage od 12 %, za sva 33 ispitna uzorka.

Slika 25 prikazuje karakteristični izgled loma ispitnih uzoraka iz ove serije.

Srednja vrijednost savojne čvrstoće (za 12 % vlage) za uzorke iz skupine L90 iznosi $70,4 \text{ N/mm}^2$, vrijednost standardne devijacije je 12,69, a koeficijent varijacije iznosi 18,0.



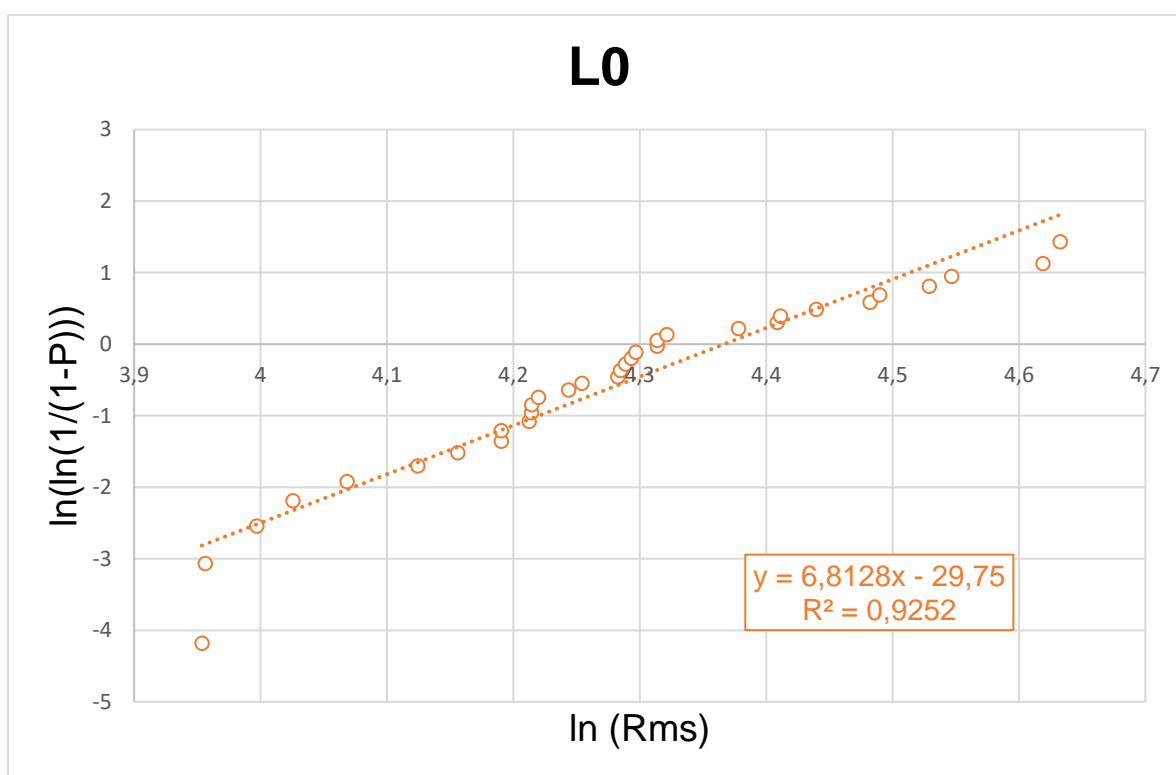
Slika 24 Vrijednosti savojne čvrstoće uzoraka L90 za 12 % vlage



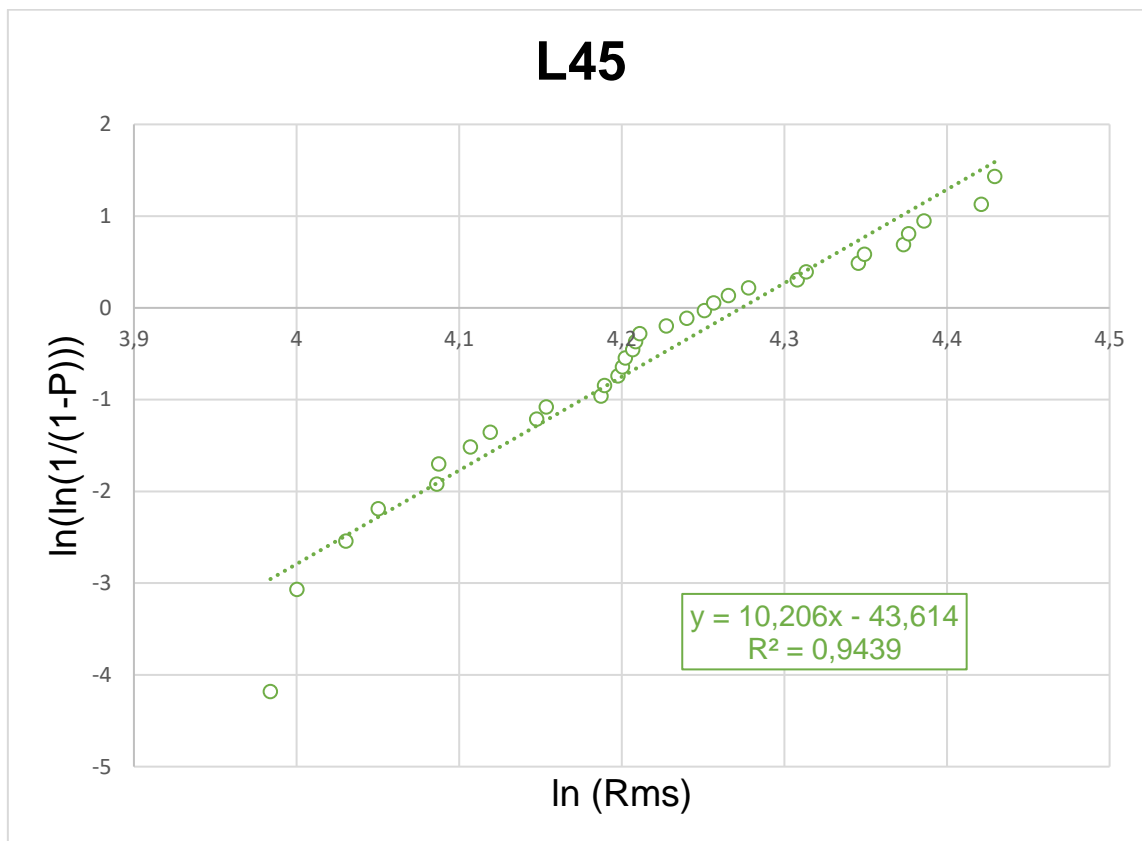
Slika 25 Karakterističan izgled lomova na ispitnim uzorcima L90 (90°)

8.5 Analiza podataka pomoću Weibullove razdiobe

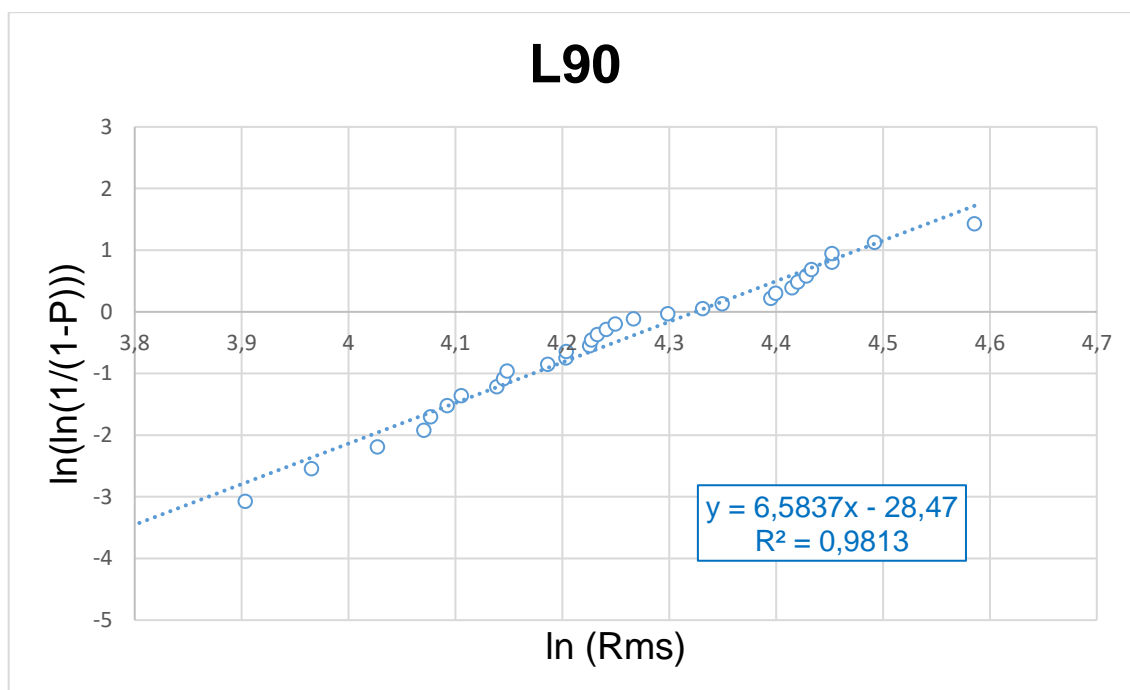
Dobiveni podatci pri ispitivanju savojne čvrstoće analizirani i pomoću Weibullove raspodjele. Dijagrami na slikama od 26, 27 i 28 prikazuju regresijske jednadžbe za savojnu čvrstoću uzoraka pri 12 % vlage za skupinu L0, L45 i L90. Koeficijent m u jednadžbama $y = mx \pm b$, predstavlja Weibullov modul rasipanja, a koeficijent b predstavlja odsječak na osi y . Vrijednosti Weibullovog modula rasipanja m uobičajeno se kreću između 10 i 20. Što su vrijednosti Weibullovog modula rasipanja veće to je materijal homogeniji.



Slika 26 Weibullowa raspodjela za savojnu čvrstoću L0 (0°)



Slika 27 Weibullowa raspodjela za savojnu čvrstoću L45 (45°)



Slika 28 Weibullowa raspodjela za savojnu čvrstoću L90 (90°)

U Tablica 8 prikazani su statistički rezultati za vrijednosti savojne čvrstoće svih triju serija uzoraka. Weibullovi parametri su određeni i izračunati iz dijagrama pomoću jednadžbe pravca ($y = mx \pm b$). Vrlo visoke vrijednosti koeficijent korelacije (L0: 0,962; L45: 0,972; L90: 0,991) potvrđuju reprezentativnost modela.

Tablica 8 Statistički rezultati za vrijednosti savojne čvrstoće

Savojna čvrstoća	Min.	Max.	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Weibullov modul m
L0	52,1	102,8	73,6	13,15	6,81
L45	53,7	83,9	68,4	8,13	10,2
L90	40,3	98,1	70,4	12,69	6,58

9. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja i pritom dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

1. Vrijednosti savojne čvrstoće drva jele u longitudinalnom smjeru ovise o kutu između savojne sile i tangente na god.
2. Najveća vrijednost savojne čvrstoće dobivena je kad je sila bila paralelna s tangentom na god (0°) i iznosila je $91,9 \text{ N/mm}^2$. Najmanja vrijednost savojne čvrstoće izmjerena je pod kutem od 45° i iznosila je $85,3 \text{ N/mm}^2$. Vrijednost savojne čvrstoće kod kuta od 90° iznosila je $87,9 \text{ N/mm}^2$.
3. Rasipanja rezultata pri ispitivanju savojne čvrstoće bila su relativno velika, ali je koeficijent varijacije (15,9 %) ipak bio ispod dopuštene vrijednost (16 %).
4. Dobivene vrijednosti Weibullovog modula pokazuju da se Weibullovom razdiobom mogu dobro opisati dobivene vrijednosti savojne čvrstoće.

LITERATURA

- [1] Rede, V.:Drvo-tehnički materijal
- [2] Dirk, Z.:Ausziehtragfähigkeit und Steifigkeit rechtwinklig zur Faser eingeschraubter Vollgewindeschrauben
- [3] <https://cpd4gb.com.hr/wp-content/uploads/2018/10/DRVO-%E2%80%93-materijal-za-zelenu-gradnju-predavanje-RBL.pdf>
- [4] https://www.google.com/search?q=Drvena+crkva+Sv.+Barbare&sxsrf=AOaemvI0XkBYuMA2UuU771GS0SefPDhfyw:1640890398450&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwin_sGKmYz1AhWe_7sIHQVUCngQ_AUoAXoECAEQAw#imgrc=pNaD2b9zKxKybM
- [5] <https://ourworldindata.org/energy-mix>
- [6] https://www.google.com/search?q=wood+co2+into+o2+photosynthesis&tbm=isch&ved=2ahUKEwjmm8SFqJX1AhWY7qQKHXT5CM8Q2-cCegQIABAA&oq=wood+co2+into+o2+photosynthesis&gs_lcp=CgNpbWcQA1CdCFjOMGDUMWgAcAB4AIABuAKIAdASkgEIMC4xNC4xLjGYAQCgAQGqAQ tnd3Mtd2l6LWltZ8ABAQ&sclient=img&ei=xMfSYeapCpjdkwX08qP4DA&bih=941&biw=1920#imgrc=KwLdnNaWGjY7PM
- [7] <https://www.plantea.com.hr/obicna-jela/>
- [8] <https://www.hoftechnik.at/a/hartholz-und-weichholz-wo-liegen-die-unterschiede-und-womit-heizt-es-sich-am-besten>
- [9] <https://element.hr/wp-content/uploads/2020/06/unutra-12336.pdf>
- [10] https://www.google.com/search?q=longitudinal+tangential+radial+wood&tbm=isch&ved=2ahUKEwjSo8WNsJb1AhXJgKQKHcIkBAYQ2-cCegQIABAA&oq=tangential+radial+wood+&gs_lcp=CgNpbWcQARgAMgYIABAFEB4yBggAEAgQHjIGCAAQCBAeOgcllxDvAxAnOgUIABCABDoECAAAQzoeCAAQHICnEFjCMWCcPWgAcAB4AIABtgKIAa8dkgEIMC4yMS4yLjGYAQCgAQQGqAQ tnd3Mtd2l6LWltZ8ABAQ&sclient=img&ei=cFbTYdKrC8mBkgXJyZEw&bih=941&biw=1920#imgrc=9v7UmKaOuuw_BM
- [11] http://bonsai-zen.hr/category/osnovne_bonsai_tehnike/page/4/
- [12] <https://www.delta-intkey.com/citeswood/en/intro.htm>

- [13] https://www.google.com/search?q=radial+wood+cut&tbm=isch&ved=2ahUKEwj87cWU8Zj1AhUCr6QKHfbmCD4Q2-cCegQIABAA&oq=radial+wood+cut&gs_lcp=CgNpbWcQAzIFCAAQgAQ6BwgjEO8DECc6BAgAEB46BggAEAUQHjoGCAAQCBAeUJkSWJE_YP8_aANwAHgAgAF9iAHNDZIBBDaUMTWYAQCgAQGgAQtnd3Mtd2l6LWltZ8ABAQ&sclient=img&ei=FqfUYfyKKILekgX2zaPwAw&bih=941&biw=1920#imgrc=1vEjrqEdCTheM
- [14] <https://delphipages.live/de/technologie/industrie/naturliche-produkte/microstructure>
- [15] <http://www.holzwurm-page.de/holz/holz/chemisch.htm>
- [16] <https://mediatum.ub.tum.de/doc/601305/601305.pdf>
- [17] <https://www.massivum.de/wissenswertes/holzeigenschaften/>
- [18] Zücker, E., Niemz, P.: Holz: Struktur und Eigenschaften
- [19] https://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrdo%C4%87a_po_Brinellu
- [20] https://www.google.com/search?q=flexual+testing+three+and+four+point&tbm=isch&ved=2ahUKEwjSop_iiKD1AhVDqaQKHbpgB-UQ2-cCegQIABAA&oq=flexual+testing+three+and+four+point&gs_lcp=CgNpbWcQAzoGCAAQChAYUN0BWN8vYOcwaAVwAHgAgAH4AYgBvRuSAQYwLjI2LjGYAQCgAQGgAQtnd3Mtd2l6LWltZ8ABAQ&sclient=img&ei=XWvYYZKAMMPSkgW61Z2oDg&bih=914&biw=941&hl=en#imgrc=TA31k5cDa-5EcM&imgdii=t5TMXiWP7YyyyM
- [21] <http://www.holzwurm-page.de/holz/holz/biegefestigkeit.htm>
- [22] <https://www.research-collection.ethz.ch/mapping/eserv/eth:4516/eth-4516-01.pdf>