

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvorna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Plos, M. 2006. Nedestruktivne metode za razvrščanje gradbenega lesa po trdnosti. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Turk, G., somentorica Srpčič, J.): 66 str.

University  
of Ljubljana  
Faculty of  
*Civil and Geodetic  
Engineering*



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Plos, M. 2006. Nedestruktivne metode za razvrščanje gradbenega lesa po trdnosti. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering. (supervisor Turk, G., co-supervisor Srpčič, J.): 66 pp.

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



Jamova c.2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
[fgg@fgg.uni-lj.si](mailto:fgg@fgg.uni-lj.si)  
Visoki strokovni študij  
gradbeništva  
*Konstrukcijska smer*

**Kandidat:  
MITJA PLOS**

**Nedestruktivne metode za razvrščanje gradbenega lesa v  
trdnostne razrede**

Diplomska naloga št.: 247/K

**Non-destructive methods in strength grading of structural  
timber**

Graduation thesis No. 247/K

**Mentor:**

izr. prof. dr. Goran Turk

**Somentor:**

mag. Jelena Srpčič

Datum zagovora: 28. 9. 2006

**POPRAVKI:**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

## IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **MITJA PLOS** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:  
**»NEDESTRUKTIVNE METODE ZA RAZVRŠČANJE GRADBENEGA LESA V TRDNOSTNE RAZREDE«**

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL, Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana,

11.09.2006

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>519.33:691.11(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Mitja Plos</b>
<b>Mentor:</b>	<b>izr. prof. dr. Goran Turk</b>
<b>Somentor:</b>	<b>mag. Jelena Srpčič</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Nedestruktivne metode za razvrščanje gradbenega lesa v trdnostne razrede</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>52 str., 29 pregl., 20 sl., 21 en.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>nedestruktivne metode, gradbeni les, razvrščanje, trdnostni razredi</b>

### **Izvleček:**

Vsak lesen konstrukcijski element gre najmanj skozi nek enostaven vizualni proces ocenjevanja, ki se izvrši najprej na hlodih in nato na žagah. V Sloveniji je to v večini primerov edini proces ocenjevanja lastnosti gradbenega lesa. Tako v EU kot v Sloveniji bo v kratkem postal obvezen standard EN 14081-1, ki bo zahteval označevanje vsega gradbenega žaganega lesa z oznako CE. Ta bo vsebovala identifikacijsko številko, kraj proizvodnje, vrsto lesa ter trdnostni razred elementa. Z uvedbo teh zahtev bo vsaka žaga primorana izvajati vsaj eno od nedestruktivnih ocenjevanj. Ker je vizualno ocenjevanje, ki je sedaj v uporabi, samo površinsko, precej subjektivno, nenatančno in zahteva nenehno usposabljanje osebja je smotno razmišljati o alternativah. Z namenom ugotovitve bolj primerne in objektivne alternative, ki bi ekonomsko in časovno ter predvsem kvalitativno nadomestila vizualno, je nastala tudi ta raziskava. Opisali smo vse nedestruktivne metode, ki smo jih uporabili. Nedestruktivne metode so bile: vizualno razvrščanje, longitudinalno širjenje valov, ultrazvok, upogibni preizkus in metoda frekvenčnega odziva. Vse nedestruktivne metode smo primerjali z dejansko trdnostjo, pridobljeno s porušno metodo. Naredili smo vse smiselne korelacije in jih ovrednotili. Preizkušance smo razvrstili v trdnostne razrede in te primerjali s trdnostnimi razredi, podanimi z nedestruktivnimi metodami. Naredili smo frekvenčne in cenovne matrike. V zaključku smo se odločili za najbolj primerno metodo.

## BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

- UDC:** 519.33:691.11(043.2)
- Author:** Mitja Plos
- Supervisor:** Associate Prof. Goran Turk, Ph.D.
- Co-Supervisor:** Jelena Srpčič, M.Sc.
- Title:** Non-destructive methods in strength grading of structural timber
- Notes:** 52 p., 29 tab., 20 fig., 21 eq.
- Key words:** non-destructive methods, strength grading, structural timber

### **Abstract:**

Every structural timber product goes through at least some sort of visual process of grading that is done on logs and after sawing. In Slovenia, in most cases this is also the only process of strength grading of construction timber. As Slovenia joined the European Union (EU) she started accepting European norms. In the EU and also in Slovenia a norm EN 14081-1 that will force the marking of all structural timber with the CE mark, that will consist of an identification number, the place of manufacture, the species and the bending strength will become obligating. With the introduction of these demands, all sawmills will be obliged to start using at least one of the nondestructive evaluation methods. Because visual grading which is at this time most common evaluates timber only from the surface, is subjective, inexact and demands constant training of the staff, it would be smart to start thinking of alternatives. The goal of this research was to find more suitable and objective alternatives that would be more economic and faster. A short description of all the methods used was given. The methods were: visual grading, longitudinal wave propagation, ultrasound, the bending test and the vibration frequency method. All the methods were compared with the actual bending strength given by the destruction method. All sensible correlations were made and evaluated. The specimens were assigned to strength classes and compared to the strength classes given by the nondestructive methods. Frequency and cost matrices were made. In the conclusion a decision on the most suitable method was made.

## ZAHVALA

Za vključitev v projekt, strokovno pomoč in vodenje ter pozornost se iskreno zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Goranu Turku. Za svetovanje in vodenje med preizkusi ter pri nastanku naloge se zahvaljujem somentorici mag. Jeleni Srpčič. Za pomoč pri izvajanju preizkusov se zahvaljujem tudi vsem iz laboratorija za konstrukcije na Zavodu za gradbeništvo.

Staršema Danici in Zdravku se zahvaljujem za podporo in potrpežljivost skozi vsa leta.

Za razumevanje, vzpodbudo in stanje ob strani, v trenutkih, ko sem jo najbolj potreboval, se zahvaljujem moji ljubezni Ani.

HVALA.

*To the generous mind  
the heaviest debt is that of gratitude,  
when it is not in our power to repay it.*  
(Benjamin Franklin)

## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OPIS NEDESTRUKTIVNIH METOD PREIZKUŠANJA .....</b>	<b>3</b>
2.1	VIZUALNO RAZVRŠČANJE .....	4
2.2	LONGITUDINALNO ŠIRJENJE VALOV .....	6
2.3	ULTRAZVOK .....	8
2.4	METODE FREKVENČNEGA ODZIVA .....	10
2.5	DOLOČANJE STATIČNEGA MODULA ELASTIČNOSTI .....	13
<b>3</b>	<b>POTEK PREIZKUŠANJA ELEMENTOV .....</b>	<b>16</b>
3.1	NEDESTRUKTIVNE METODE .....	16
3.1.1	Vizualno razvrščanje .....	16
3.1.2	Longitudinalno širjenje valov .....	17
3.1.3	Ultrazvok .....	19
3.1.4	Metode frekvenčnega odziva .....	21
3.1.5	Določanje statičnega modula elastičnosti .....	21
3.2	UGOTAVLJANJE TRDNOSTI .....	25
<b>4</b>	<b>ANALIZA REZULTATOV MERITEV .....</b>	<b>26</b>
4.1	KORELACIJE .....	27
4.1.1	Korelacije količin izmerjenih z nedestruktivnimi in destruktivno metodo ....	27
4.1.2	Korelacije modulov elastičnosti .....	31
4.2	RAZVRŠČANJE V TRDNOSTNE RAZREDE IN CENOVNE MATRIKE .....	34
4.2.1	Trdnostni razredi .....	34
4.2.2	Frekvenčne matrike .....	37
4.2.3	Globalne cenovne matrike .....	39
4.2.4	Karakteristične vrednosti dodeljenih razredov .....	42
<b>5</b>	<b>ZAKLJUČEK .....</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>VIRI .....</b>	<b>50</b>
<b>7</b>	<b>PRILOGE .....</b>	<b>53</b>



## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1: Kriteriji razvrščanja v trdnostne razrede po standardu DIN 4074-1 .....	6
Preglednica 3.1: Statični modul elastičnosti za globalni in lokalni pomik po skupinah.....	25
Preglednica 4.1: Korelacije za trame med moduli elastičnosti, dobljenimi z različnimi nedestruktivnimi metodami, in tremi lastnostmi, ki določajo trdnostne razrede .....	28
Preglednica 4.2: Korelacije za deske med moduli elastičnosti, dobljenimi z različnimi nedestruktivnimi metodami, in tremi lastnostmi, ki določajo trdnostne razrede .....	29
Preglednica 4.3: Korelacije za plohe med moduli elastičnosti, dobljenimi z različnimi nedestruktivnimi metodami, in tremi lastnostmi, ki določajo trdnostne razrede .....	29
Preglednica 4.4: Korelacije za vse skupine skupaj med moduli elastičnosti, dobljenimi z različnimi nedestruktivnimi metodami, in tremi lastnostmi, ki določajo trdnostne razrede (korelacije za $E_{POL-BF}$ in $E_{DIN-BF}$ veljajo samo za deske in plohe) .....	30
Preglednica 4.5: Korelacije vseh modulov elastičnosti za trame .....	31
Preglednica 4.6: Korelacije vseh modulov elastičnosti za deske .....	31
Preglednica 4.7: Korelacije vseh modulov elastičnosti za plohe .....	32
Preglednica 4.8: Korelacije vseh modulov elastičnosti za vse elemente (korelacije za $E_{POL-BF}$ in $E_{DIN-BF}$ veljajo samo za deske in plohe) .....	32
Preglednica 4.9: Zahtevane lastnosti za posamezne razrede po SIST EN 338 .....	34
Preglednica 4.10: Optimalna razvrstitev elementov v trdnostne razrede C30, C24 in C18 po standardu SIST EN 338.....	36
Preglednica 4.11: Optimalna razvrstitev elementov v trdnostne razrede C30, C24 in C16 po standardu SIST EN 338.....	36
Preglednica 4.12: Primerjava trdnostnih razredov naprave Timber Grader MTG (Raz-TNO) z optimalnimi trdnostnimi razredi (frekvenčna matrika) .....	37
Preglednica 4.13: Primerjava trdnostnih razredov vizualnega razvrščanja inštituta TNO (Viz-TNO) z optimalnimi trdnostnimi razredi (frekvenčna matrika) .....	38
Preglednica 4.14: Primerjava trdnostnih razredov vizualnega razvrščanja Biotehniške fakultete, Oddelek za lesarstvo (Viz-BF) z optimalnimi trdnostnimi razredi (frekvenčna matrika) .....	38
Preglednica 4.15: Primerjava trdnostnih razredov razvrščanja skupine desk in plohov, na osnovi dinamičnih modulov elastičnosti (Raz- $E_{DIN-BF}$ ) z optimalnimi trdnostnimi razredi (frekvenčna matrika).....	39
Preglednica 4.16: Delna osnovna cenovna matrika povzeta po standardu SIST EN 14081-2 .....	40
Preglednica 4.17: Primerjava trdnostnih razredov naprave Timber Grader MTG (Raz-TNO) z optimalnimi trdnostnimi razredi (globalna cenovna matrika).....	40
Preglednica 4.18: Primerjava trdnostnih razredov vizualnega razvrščanja inštituta TNO (Viz-TNO) z optimalnimi trdnostnimi razredi (globalna cenovna matrika) .....	40

Preglednica 4.19: Primerjava trdnostnih razredov vizualnega razvrščanja Biotehniške fakultete, Oddelka za lesarstvo (Viz-BF) z optimalnimi trdnostnimi razredi (globalna cenovna matrika) .....	41
Preglednica 4.20: Primerjava trdnostnih razredov razvrščanja skupine desk in plohov, na osnovi meritev dinamičnih modulov elastičnosti Biotehniške fakultete, Oddelka za lesarstvo (Raz-E <sub>DIN</sub> -BF) z optimalnimi trdnostnimi razredi (globalna cenovna matrika) .....	41
Preglednica 4.21: Minimalne modificirane zahtevane vrednosti odločilnih parametrov za razrede, dodeljene z napravo Timber Grader MTG (Raz-TNO) .....	43
Preglednica 4.22: Minimalne zahtevane vrednosti odločilnih parametrov za vizualno dodeljene razrede (Viz-TNO, Viz-BF) .....	43
Preglednica 4.23: Minimalne modificirane zahtevane vrednosti odločilnih parametrov za razrede, dodeljene na osnovi meritev dinamičnih modulov elastičnosti Biotehniške fakultete, Oddelka za lesarstvo (Raz-E <sub>DIN</sub> -BF) .....	43
Preglednica 4.24: Dejanske karakteristične vrednosti odločilnih parametrov elementov razredov, razvrščenih z napravo Timber Grader MTG (Raz-TNO) .....	43
Preglednica 4.25: Dejanske karakteristične vrednosti odločilnih parametrov elementov razredov vizualnega razvrščanja strokovnjaka iz Nizozemske (Viz-TNO) .....	44
Preglednica 4.26: Dejanske karakteristične vrednosti odločilnih parametrov elementov razredov vizualnega razvrščanja Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete (Viz-BF) .....	44
Preglednica 4.27: Dejanske karakteristične vrednosti odločilnih parametrov elementov razredov, razvrščenih na osnovi dinamičnih modulov elastičnosti Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete (Raz-E <sub>DIN</sub> -BF) .....	44

## KAZALO SLIK

Slika 2.1: Osnovni sistem merjenja longitudinalnega širjenja valov .....	7
Slika 2.2: Shematski prikaz delovanja metode dvojni prelet .....	8
Slika 2.3: Shematski prikaz delovanja enosmerne ultrazvočne metode .....	9
Slika 2.4: Dva načina podpiranja pri metodi transversalnih vibracij .....	10
Slika 2.5: Spekter odziva .....	12
Slika 2.6: Analogija vibrirajoče mase in vibrirajočega elementa .....	12
Slika 2.7: Shematski prikaz delovanja upogibne naprave v tekočem traku .....	14
Slika 2.8: Slika upogibne naprave M 7200 (Metriguard) .....	14
Slika 2.9: Postavitev preizkusa za določitev lokalnega modula elastičnosti (SIST EN 408) .....	15
Slika 2.10: Preizkus za določitev globalnega modula elastičnosti (SIST EN 408) .....	15
Slika 3.1: Vizualno ocenjevanje trdnostnih razredov Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete .....	17
Slika 3.2: Merjenje z napravo Timber Grader MTG .....	18
Slika 3.3: Timber Grader MTG .....	18
Slika 3.4: Merjenje z ultrazvočno napravo AU2000, CEBPT .....	19
Slika 3.5: Merjenje z ultrazvočno napravo Sylvatest .....	19
Slika 3.6: Ultrazvočna naprava AU2000 Ultrasonic tester, CEBPT .....	20
Slika 3.7: Ultrazvočna naprava Sylvatest .....	20
Slika 3.8: Merjenje z ultrazvočno napravo Sylvatest .....	21
Slika 3.10: Skica statičnega upogibnega testa po standardu SIST EN 408 .....	23

## 1 UVOD

Spremembe okolja, na katere znanstveniki opozarjajo že več desetletij, so se počasi začele kazati. Segrevanje Zemljinega ozračja zaradi pojava tople grede postaja vse bolj pereč problem, ki ga je potrebno ustaviti. Človek je povzročil spremembe v okolju, sedaj okolje terja spremembo človeka. Le-ta se mora odražati v človekovi dejavnosti, tudi gradbeništvu. Potrebno je graditi ekološko, z gradnjo energetske varčnih zgradb in uporabo energetske varčnih materialov.

Uporaba lesa v gradbeništvu je ekološka, saj je les naraven material, pridobljen iz dreves, ki med rastjo s fotosintezo iz ogljikovega dioksida pridelajo kisik in v les spravijo veliko ogljika. 50 odstotkov lesa je zgrajenega iz ogljika, ki ostane v lesu vse do razkroja ali sežiga. S povečano gradnjo z lesom bomo zmanjšali količino ogljika v atmosferi. Poleg tega pa pri proizvodnji lesa v primerjavi z jeklom, porabimo dosti manj energije, torej izpustimo tudi manj toplogrednih plinov.

Čeprav je sekanje dreves pomemben negativen ekološki dejavnik, pa bi imelo z vestnim globalnim ponovnim pogozdovanjem precej manjši vpliv, kot ga imata globalna raba energije iz fosilnih goriv in emisija škodljivih plinov, kot je ogljikov dioksid.

Količina uporabljenega lesa v gradbeništvu za konstrukcijske elemente je s prihodom betona, jekla in armiranega betona drastično padla. Na območju Evropske unije pred zadnjo širitvijo (EU-15) je bilo letno zgrajenih 1,8 milijona hiš, katerih samo 5 odstotkov je imelo leseno konstrukcijo. Pri nas je uporaba tega naravnega, ekološko čistega in obnovljivega vira omejena večinoma na strešne konstrukcije stanovanjskih hiš. To dejstvo je v zadnjem času delno izboljšala vse večja uporaba lepljenega lesa in povečana gradnja montažnih hiš, vendar je uporaba lesa še vedno precej za ostalimi materiali.

Les je v gradbeništvu zaradi asociacij s krčenjem gozdov neupravičeno na slabem glasu kot ekološko oporečen material. Dejstvo pa je, da že reciklaža tone jekla porabi neprimerno več energije kot pridelava tone konstrukcijskega lesa.

Poleg občutljivosti na vlago in biološke škodljivce je eden izmed razlogov za slab odnos do lesa v gradbeništvu predimenzioniranje zaradi neprimerno večjih varnostnih faktorjev v primerjavi z nekaterimi drugimi materiali, npr. jeklom. Predimenzioniranje je posledica slabega ocenjevanja mehanskih lastnosti lesa predvsem trdnost. Pri jeklu in betonu so mehanske lastnosti bolj znane in lažje empirično ugotovljive, saj so kontrolirane in po potrebi modificirane pri samem procesu proizvodnje. Tako je povprečna kakovost elementov v določenem kakovostnem razredu le malo nad zahtevano. Medtem pa je pri lesu, ki je naraven, nehomogen, ortotropen material, katerega mehanske lastnosti močno variirajo tako pri različnih vrstah in rastiščih kot tudi vzdolž posameznega elementa, povprečna kakovost posameznih elementov precej nad zahtevano. Zaradi velikega raztrosa je trdnost večine elementov v razredu precej znižana, in sicer na trdnost skoraj najslabšega.

Veliko bi bilo storjeno pri reševanju te situacije, če bi poznali lastnosti vsakega od elementov. Elemente z višjo trdnostjo bi lahko tako uporabili v primerih, kjer je ta zahtevana, prav tako pa bi z uporabo le-teh lahko zmanjšali potrebne prereze pri dimenzioniranju. Elemente z manjšo trdnostjo pa bi lahko uporabili tam, kjer trdnost in togost nista tako pomembni. Varnostne faktorje je potrebno znižati. Potreba kliče po vpeljavi nedestruktivnih metod razvrščanja lesa, ki bi bile lahko uporabljene za boljše ocenjevanje trdnosti.

## 2 OPIS NEDESTRUKTIVNIH METOD PREIZKUŠANJA

Nedestruktivne metode testiranja oziroma nedestruktivno ocenjevanje materiala je po definiciji veda ugotavljanja fizikalnih in mehanskih lastnosti ali napak v nekem kosu materiala ali konstrukciji, ne da bi s tem vplivali na njeno končno uporabnost (Ross, Pellerin, 1994). Nedestruktivne metode ločimo po lastnostih, ki jih ugotavljajo, ter po načinu iskanja le-teh. Delimo jih v štiri skupine vizualne, mehanske, fizikalne in kemijske. Osredotočili se bomo na vizualno metodo, fizikalne metode longitudinalnega širjenja valov, ultrazvoka in frekvenčnega odziva ter na mehansko metodo določanja upogibne togosti.

Začetki povezovanja modula elastičnosti in resonančne frekvence ter s tem začetki nedestruktivnih metod ocenjevanja trdnosti naj bi segali več kot 150 let nazaj. Leta 1886 sta Todhunter in Pearson pisala o francoskem fiziku po imenu Savart, ki naj bi že v zgodnjem 19. stoletju izračunal modul elastičnosti železne palice iz resonančne frekvence longitudinalnega vzbujanja vibracij. Kmalu za tem je Lagerjhelm primerjal Savartove rezultate dinamičnih preizkusov s svojimi statičnimi napetostnimi preizkusi, narejenimi prav tako na železnih palicah. Kolikor je znano, naj bi bil to prvi poskus primerjave elastičnih konstant, dobljenih iz dinamičnih in statičnih testov (Jayne, 1959).

Osnovno hipotezo za nedestruktivno testiranje lesa je postavil B. A. Jayne (1959). Predpostavil je, da so pri lesu lastnosti absorpcije energije in disipacija, ki se lahko izmerijo z uporabo nedestruktivnih metod testiranja, kontrolirane z istimi mehanizmi, ki določajo tudi statično obnašanje materiala. Posledično je med temi lastnostmi in statičnim obnašanjem v elastičnem območju ter trdnostjo materiala z uporabo statističnih regresijskih analiz mogoče ugotoviti matematične povezave (Ross, Pellerin, 1994).

Vsak lesen konstrukcijski element gre najmanj skozi nek enostaven vizualni proces ocenjevanja, ki se izvrši najprej na deblih in nato na žagah. V Sloveniji je to v večini primerov to tudi edini proces ocenjevanja lastnosti gradbenega lesa. Ocenjuje se bolj vizualno kakovost kot trdnost, oziroma loči se neuporaben les od uporabnega, ta pa se nato loči glede na namen uporabe, torej na konstrukcijski les, les za obloge in les za pohištvo. To

je potrdila tudi raziskava, ki jo je leta 2005 opravil Boris Zorko v okviru diplomske naloge. Zorko je obiskal nekaj naključno izbranih žag v Sloveniji in ugotovil naslednje:

»Večina žag še vedno razvršča po nekoč veljavnih JUS standardih, pri čemer so si kriterije za razvrščanje priredili lastnim potrebam. Najslabše je na manjših žagah, kjer se les dejansko ne razvršča. Splošna ugotovitev je, da se veliko več pozornosti posveča zunanjemu izgledu lesa kot pa njegovim lastnostim, ki vlivajo na trdnost.«

(Zorko, B., 2006, Metode razvrščanja lesa po trdnosti, str. 55)

Z vstopom v Evropsko Unijo (EU) je Slovenija sprejela pravni red unije in harmonizirala evropske standarde. Tako v EU kot v Sloveniji bo v kratkem postal obvezen standard, ki bo zahteval označevanje vsega gradbenega žaganega lesa z oznako CE. Ta bo vsebovala identifikacijsko številko, kraj proizvodnje, vrsto lesa ter trdnostni razred elementa. Z uvedbo teh zahtev bo vsaka žaga primorana izvajati vsaj eno od nedestruktivnih ocenjevanj. Verjetnost, da se bodo na žagah odločili obdržati vizualno metodo ocenjevanja, je kar precejšnja. Ker pa je vizualno ocenjevanje samo površinsko, precej subjektivno, nenatančno, zamudno in zahteva nenehno usposabljanje osebja, ki ga izvaja, je smotrno razmišljati o alternativah. Da bi našli bolj primerne in objektivne alternative, ki bi ekonomsko in časovno nadomestila vizualno metodo razvrščanja lesa, je nastala tudi ta raziskava. Z njo smo želeli nakazati možno pot do večjih odstotkov lesa v višjih razredih in s tem boljših izkoristkov lesa, manjših odstotkov odpadnega lesa in boljše ekonomske uspešnosti in konkurenčnosti žag.

## 2.1 VIZUALNO RAZVRŠČANJE

Ker vizualne preiskave ne temeljijo na tehnologiji, temveč zgolj na človekovem opazovanju, je povsem razumljivo, da so te najstarejše in tako segajo daleč v zgodovino. S časom in boljším razumevanjem vpliva določenih anomalij v lesu na mehanske lastnosti pa so se precej spremenile. Danes imamo na razpolago celo vrsto standardov (npr.: DIN 4074-1, INSTA 142, SIST EN 14081, BS 4978, NF B 52-001-4, STS 04, UNI 8198, IS 127 idr.),

ki na osnovi napak (grče, razpoke, zavrtost vlaken) omogočajo razvrščanje lesa v trdnostne razrede. Veliko število različnih načinov vizualnega ocenjevanja po svetu je moč pripisati različnim lokalnim vrstam dreves, različnim geografskim lastnostim, tradiciji gradnje ter različnim zahtevam.

Z metodo vizualnega ocenjevanja lahko dokaj enostavno odkrivamo napake, ki vplivajo na trdnost; zunanje poškodbe, razkroj, poškodbe vlaken, prisotnost razpok idr. Ker je vizualno ocenjevanje je omejeno samo na zunanje površine elementa, ne dobimo vedno realne slike materiala po celotnem prerezu, kar pride najbolj do izraza pri prerezih večjih dimenzij.

Kot je prikazano v preglednici 2.1, se elementu dodeli trdnostni razred na osnovi ocene grč, zavrtosti vlaken, razpok, gostote elementa, prisotnosti stržena, širine branik oziroma drugih lastnosti, ki vplivajo na trdnost lesa. Pri grčah se meri velikost glede na prerez, število, lokacijo po prerezu in gostoto posejanosti le-teh na določenem segmentu (vence grč). Poleg grč sta vpliva na upogibno trdnost lesa še razpokanost in širina branik. Razpoke pri lesu nastanejo zaradi strel, kolesivosti in zaradi krčenja. Zelo pomembna je tudi širina branik, saj večje število branik pomeni gostejši les in s tem večjo trdnost.

Bolj za uporabnost in izgled kot pa za trdnost je pomembna tudi ukrivljenost oziroma zavrtost. Pri vizualnem ocenjevanju je potrebno preveriti tudi prisotnost poškodb zaradi delovanja bioloških škodljivcev.



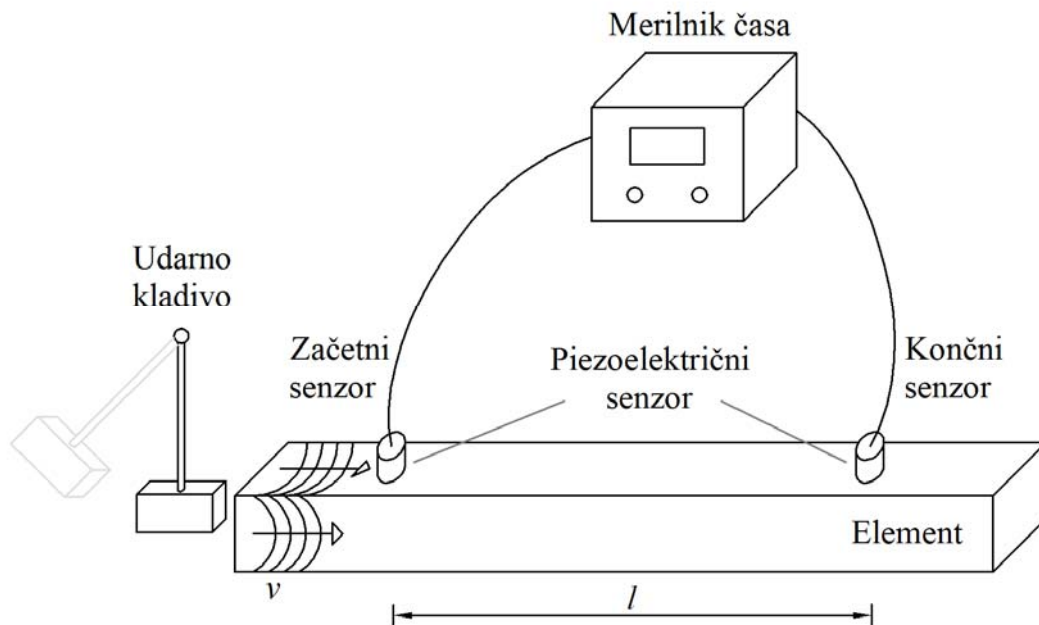
Preglednica 2.1: Kriteriji razvrščanja v trdnostne razrede po standardu DIN 4074-1

Kriteriji razvrščanja	Razredi		
	S 7	S 10	S 13
1. Grče - posamezne grče - venci grč - bočne grče <sup>a</sup>	do 1/2 do 2/3 -----	do 1/3 do 1/2 do 2/3	do 1/5 do 1/3 do 1/3
2. Zavitost vlaken	do 16 %	do 12 %	do 7 %
3. Stržen	dopusten	dopusten	ni dopusten
4. Širina branike - splošno - pri duglaziji	do 6 mm do 8 mm	do 6 mm do 8 mm	do 4 mm do 6 mm
5. Razpoke - od strele <sup>b</sup> - od zmrzali in kolesivosti	dopustne niso dopustne	dopustne niso dopustne	dopustne niso dopustne
6. Lisičavost	do 1/3	do 1/3	do 1/4
7. Veženje <sup>b</sup> - vzdolžna ukrivljenost - zavitev, vijak - korito	do 12 mm 2 mm/25 mm širine do 1/20	do 8 mm 1 mm/25 mm širine do 1/30	do 8 mm 1 mm/25 mm širine do 1/50
8. Obarvanost, trohnoba - modrikavost - rjave in rdeče proge - rjava in bela trohnoba	dopustna do 3/5 ni dopustna	dopustna do 2/5 ni dopustna	dopustna do 1/5 ni dopustna
9. Kompresijski les	do 3/5	do 2/5	do 1/5
10. Obžrtost zaradi insektov	Dopustne so luknjice insektov do 2 mm		
11. Ostale značilnosti	Upoštevati je potrebno vse značilnosti, ki kakorkoli vplivajo na vizualne in trdnostne lastnosti lesa		

<sup>a</sup> Ta kriterij ne velja za deske za slojnat lameliran les (BS-Holz)  
<sup>b</sup> Kriteriji razvrščanja se ne upoštevajo pri žaganem lesu, ki je bil predhodno sušen

## 2.2 LONGITUDINALNO ŠIRJENJE VALOV

Merjenje longitudinalnega širjenja valov oziroma motenj (hitrost potovanja zvoka) je ena najhitrejših nedestruktivnih metod ocenjevanja. Merjenje je zelo preprosto in temelji na empiričnih ugotovitvah, da pri lesu slabe kvalitete valovi potujejo počasneje. Torej manjša hitrost širjenja potovanja sovpada s šibkim materialom. Osnovni sistem je sestavljen iz dveh senzorjev na določeni medsebojni razdalji, merilca časa, ki meri čas potovanja valov, in vzbujevalca valov v obliki kladiva (slika 2.1).



Slika 2.1: Osnovni sistem merjenja longitudinalnega širjenja valov

Z enačbo

$$v = \frac{l}{t}, \quad (2.1)$$

kjer so

$v$  hitrost potovanja valovanja,

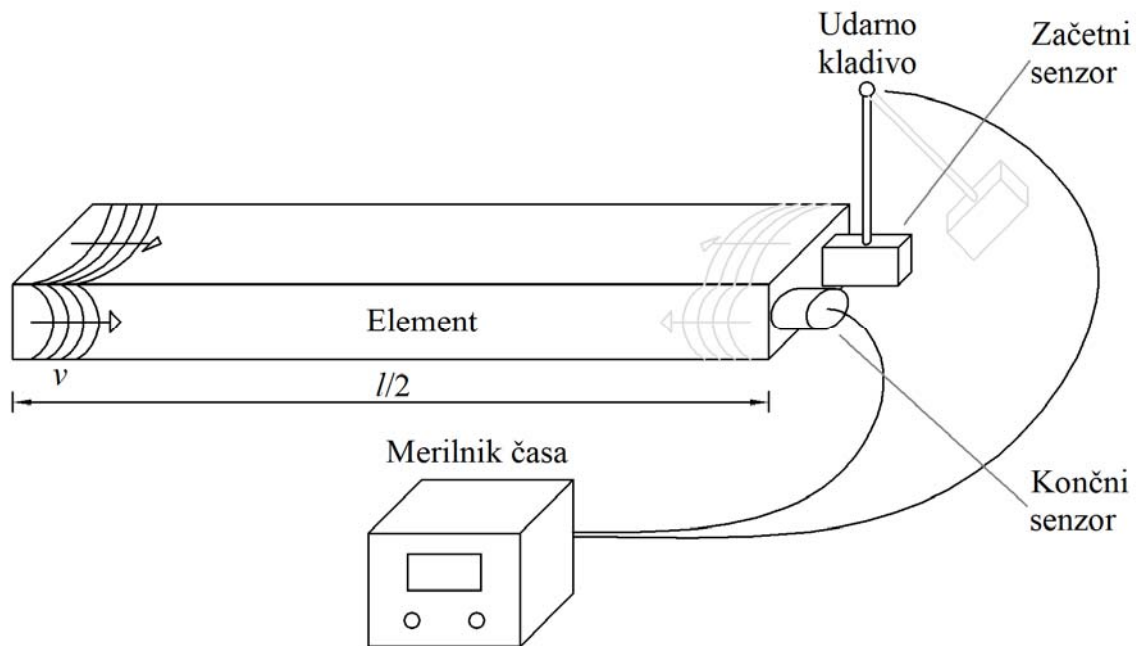
$l$  razdalja med senzorjema,

$t$  čas potovanja (čas preleta),

lahko z izmerjenega časa in dolžine izračunamo hitrost potovanja motnje. Na osnovi izračunane hitrosti  $v$  in gostote  $\rho$  elementa, ki jo moramo ugotoviti iz teže in dimenzij ali pa vsaj približno oceniti, lahko izračunamo dinamični modul elastičnosti  $E_{\text{DIN}}$  po enačbi

$$E_{\text{DIN}} = \rho v^2. \quad (2.2)$$

Poleg zgoraj omenjene metode poznamo še tako imenovano metodo dvojnega preleta. Pri slednji je princip delovanja enak zgoraj omenjenemu s to razliko, da sta vzbujevalnik in senzor na isti strani elementa (slika 2.2). Meri se čas, ki ga val potrebuje, da prepotuje od enega do drugega konca elementa in nazaj.



Slika 2.2: Shematski prikaz delovanja metode dvojni prelet

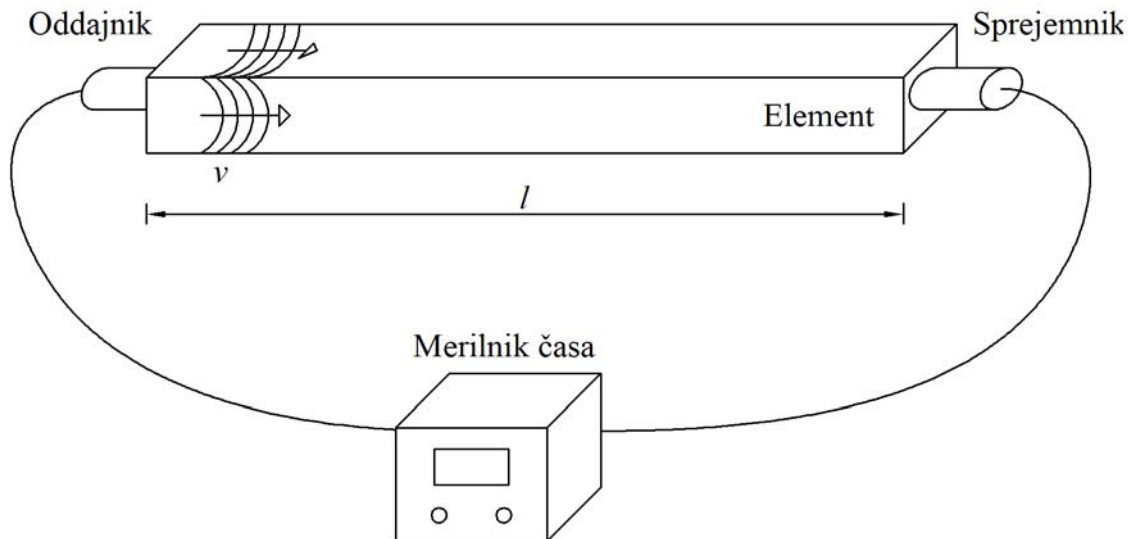
Naprave, ki delujejo na principu te metode, so primerne za preizkuse na terenu (*in situ*). Razlog za to je majhnost in prenosnost tovrstnih naprav, ki so poleg ultrazvočnih med najmanjšimi.

### 2.3 ULTRAZVOK

Ultrazvočna metoda je zelo priljubljena in natančna pri homogenih in izotropnih materialih, kot so beton, jeklo in keramika, kjer se uporablja za odkrivanje napak, praznin, razpok in drugih anomalij. Pri lesu se ultrazvok zaradi sposobnosti, da se ultrazvočni signal koncentrira na majhne površine, uporablja največ pri lepljenem lesu in vezanih ploščah.

Najbolj pogosti ultrazvočni metodi sta, tako kot pri longitudinalnem širjenju valov, enosmerna in dvosmerna z odbojem (metoda dvojnega preleta). Pri enosmerni metodi sta potrebna dva piezoelektrična senzorja, en oddajnik in en sprejemnik, nameščen na drugi strani elementa (slika 2.3). Ultrazvočni signal, ki pri potovanju po elementu naleti na

napako, se delno odbije nazaj in ga tako zazna oddajnik, sprejemnik pa zato prejme oslabljen signal. Iz velikosti teh dveh signalov je moč ugotoviti notranje napake. Druga metoda, dvosmerna z odbojem, uporablja samo en senzor, ki služi kot oddajnik in prejemnik odbitih pulzov.



Slika 2.3: Shematski prikaz delovanja enosmerne ultrazvočne metode

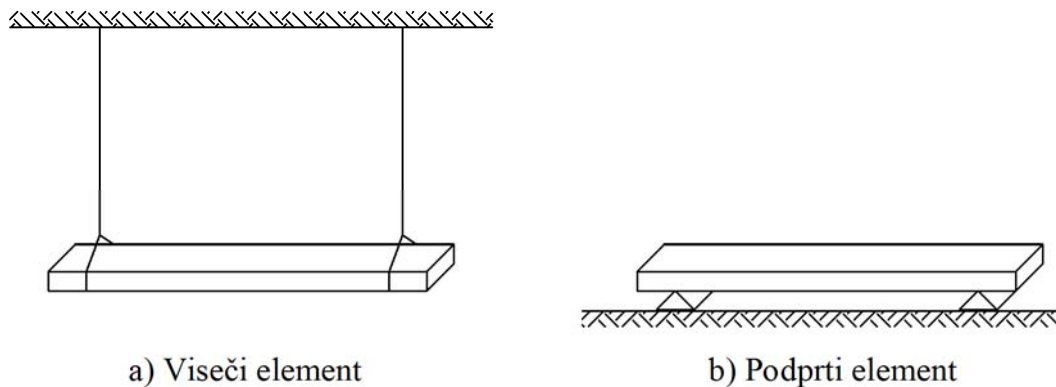
Na ultrazvok vplivajo poleg gostote tudi druge karakteristike lesa, kot so vlaga in smer vlaken. Ker potuje ultrazvok vzdolž vlaken hitreje kot prečno na njih, je možno zaznati spremembo smeri vlaken.

Ultrazvočna metoda je precej podobna prej omenjeni (longitudinalno širjenje valovanj), le da deluje na višjih frekvencah. Zaradi visoke disipacije so pri preizkušanju lesa najpogosteje uporabljene frekvence od 20 do 500 kHz.

Pri tej metodi merimo hitrost potovanja ultrazvoka skozi material, to pa je sorazmerna s togostjo oziroma z modulom elastičnosti. Tega lahko z upoštevanjem gostote elementa izračunamo enako kot pri zvočnem valovanju po enačbah (2.1) in (2.2).

## 2.4 METODE FREKVENČNEGA ODZIVA

Metode frekvenčnega odziva oziroma metode transverzalnih vibracij temeljijo na teoriji, da so dinamične mehanske lastnosti odvisne od lastne frekvence in disipacije. Ločimo več načinov podpiranja, mi bomo navedli dva. Prvi je prosto viseč (lebdeč), kjer je element obešen na obeh koncih. Pri drugem načinu pa je element podprt na dveh koncih kot prostoležeči nosilec (slika 2.4).



Slika 2.4: Dva načina podpiranja pri metodi transverzalnih vibracij

Princip vzbujanja vibracij ločimo na vsiljeno, pri katerem element periodično obremenjujemo, in prosto vibriranje, pri katerem element obremenimo hipno. Pri prvem določimo resonančne frekvence z vsiljeno sinusno periodično silo s funkcijo  $P_0 \sin \omega t$ . Z dobljeno resonančno frekvenco lahko izračunamo dinamični modul elastičnosti za viseči element  $E_F$  po enačbi

$$E_F = \frac{f_r^2 m l^3}{12,65 I}, \quad (2.3)$$

kjer so

- $f_r$  resonančna frekvenca,
- $m$  masa elementa,
- $l$  dolžina elementa,
- $I$  vztrajnostni moment

in dinamični modul elastičnosti  $E_P$  za podprti element po enačbi

$$E_p = \frac{f_r^2 ml^3}{2,46I}. \quad (2.4)$$

Pri prostem vibriranju mirujoč element udarimo in opazujemo amplitudo nihanja, ki upada s časom. Za kvantitativno oceno dušenja definiramo koeficient dušenja  $\delta$ , ki ga za prosto vibriranje izračunamo po enačbi

$$\delta_p = \frac{1}{n-1} \ln \frac{A_1}{A_n}, \quad (2.5)$$

kjer so

- $\delta_p$  koeficient dušenja  $\delta$  za prosto vibriranje,
- $n$  število oscilacij,
- $A_1, A_n$  amplitudi dveh oscilacij (1. in  $n$ -te).

Koeficient dušenja  $\delta$  za vsiljeno nihanje  $\delta_v$  je

$$\delta_v = \frac{\pi \Delta f}{f_r} \frac{1}{\sqrt{(A_r/A)^2 - 1}}, \quad (2.6)$$

kjer so

- $\Delta f$  razlika frekvence v dveh točkah amplitude  $A$  na obeh straneh spektra odziva (slika 2.5),
- $A_r$  resonančna amplituda vibriranja,
- $A$  amplituda vibriranja.

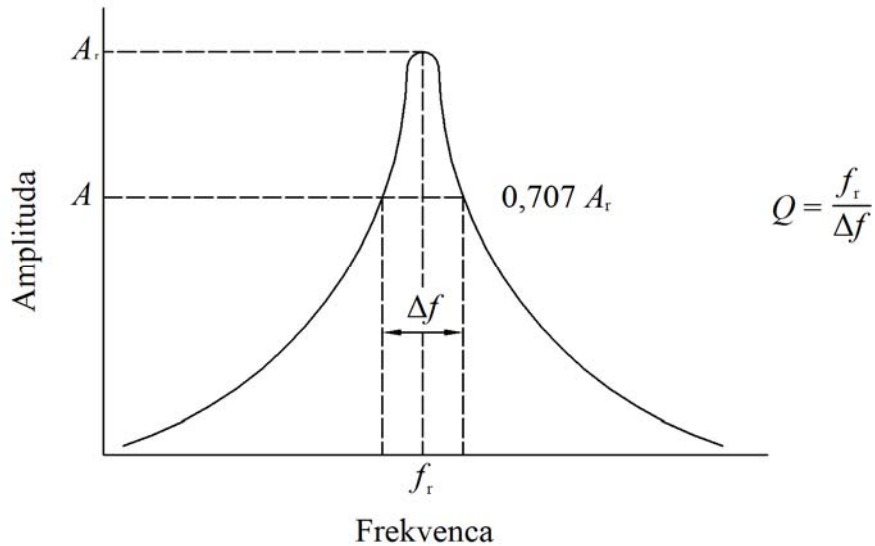
Če koeficient dušenja  $\delta$  delimo z gostoto elementa, dobimo vrednost, ki je v zelo dobri povezavi s trdnostjo.

Izgubo energije vibracijskega sistema lahko izrazimo tudi z ostrino spektra odziva  $Q$  (slika 2.5), ki je z koeficientom dušenja  $\delta$  povezana po enačbi

$$Q = \frac{\pi}{\delta}. \quad (2.7)$$

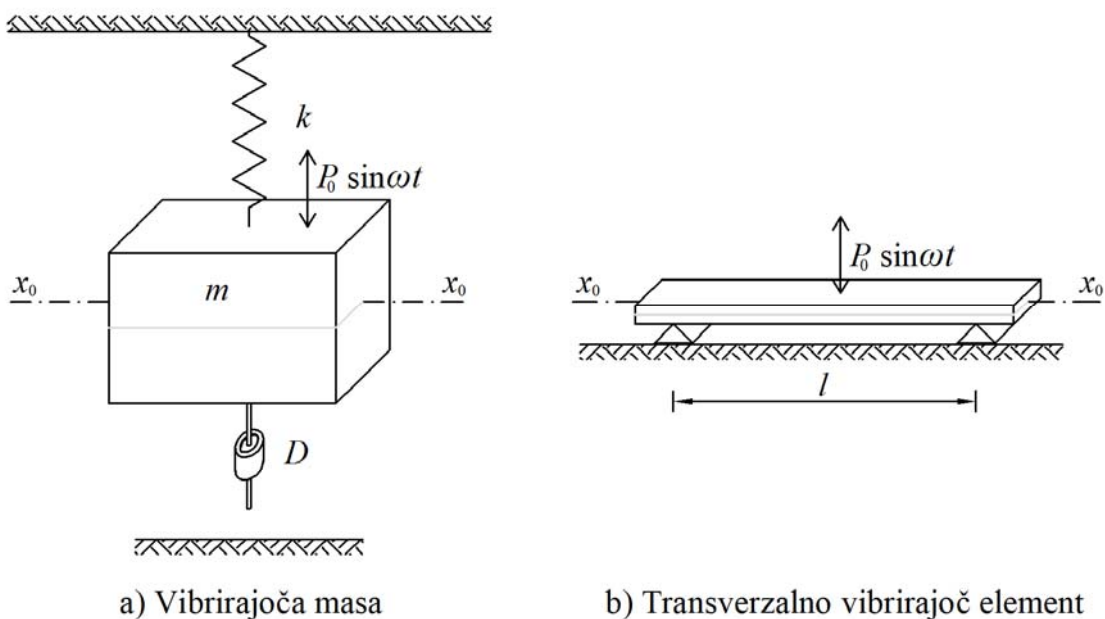
Spekter odziva dobimo iz razmerja  $f_r/f$ . Če v enačbi (2.6) izberemo taki frekvenci vzbujanja, kjer je amplituda enaka 0,707 krat-ni vrednosti amplitude resonance, se enačba zelo poenostavi. (Jayne, 1959)

$$\delta_v = \frac{\pi \Delta f}{f_r} \quad (2.8)$$



Slika 2.5: Spekter odziva

Za lažje razumevanje primerjajmo obnašanje vibrirajočega lesenega elementa in vibrirajočega telesa mase  $m$ , ki visi z nepodajne podpore na zanemarljivo lahki vzmeti togosti  $k$  in je povezana z dušilcem s koeficientom dušenja  $D$  (slika 2.6).



Slika 2.6: Analogija vibrirajoče mase in vibrirajočega elementa

Vibriranje telesa z maso  $m$  lahko opišemo z diferencialno enačbo

$$m\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right) + D\left(\frac{dx}{dt}\right) + kx = P_0 \sin \omega t. \quad (2.15)$$

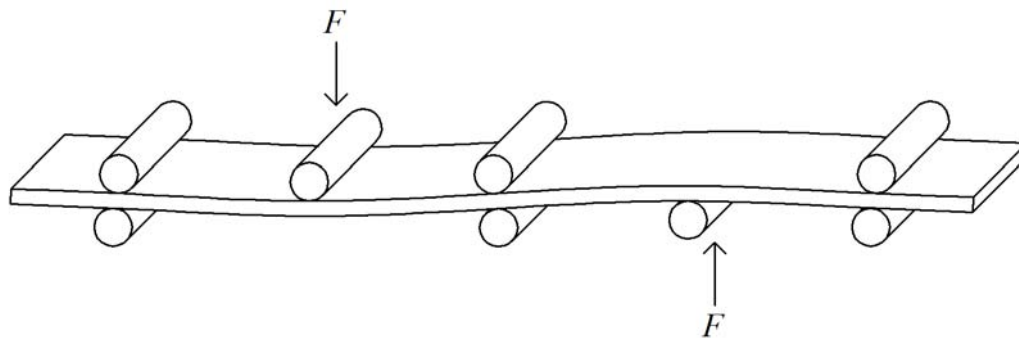
Glede na izračunan odziv lahko iz  $k$  izračunamo modul elastičnosti za viseč  $E_F$  po enačbi (2.3) in za podprt element  $E_P$  po enačbi (2.4), iz  $D$ , ki predstavlja dušenje sistema, pa omenjeni koeficient dušenja  $\delta$  za prosto vibriranje  $\delta_P$  po enačbi (2.5) in za vsiljeno vibriranje  $\delta_V$  po enačbi (2.6) (Ross, Pellerin, 1994).

## 2.5 DOLOČANJE STATIČNEGA MODULA ELASTIČNOSTI

Ugotavljanje statičnega modula elastičnosti je z upogibno metodo dokaj enostavno. Določamo ga z merjenjem togosti, ki jo ob poznavanju dimenzij prereza lahko izrazimo z modulom elastičnosti. Togost ugotavljamo z merjenjem pomika, ki ga povzroči določena sila. Poznamo dva principa. Pri prvem element obremenjujemo do izbrane sile in merimo pomik. Paziti moramo, da sila ni prevelika, saj lahko povzroči porušitev. Pri drugem načinu merimo silo, ki bo povzročila predpisan pomik.

V svetu je upogibna metoda precej v uporabi, saj je dokaj hitra in natančna. Pomembno je tudi, da se jo lahko zelo enostavno umesti v sistem tekočega traku. Elementi gredo skozi sistem valjev, ki na element delujejo z določeno silo (slika 2.7). Med valji merimo pomik in tako določimo modul elastičnosti. Pri večjih žagarskih obratih, kjer izdelajo več tisoč elementov na dan, se dnevno odvzame nekaj deset vzorcev za kontrolo, ki se jih obremeni do porušitve. S takim postopkom se lahko zelo dobro nadzira in ocenjuje kvaliteto elementov, porušeni vzorci pa predstavljajo le zanemarljivo majhen delež. Naprave za merjenje upogiba so učinkovite, vendar razmeroma drage, zato so primerne za večje žagarske obrate in predstavljajo dolgoročno naložbo, kar v Sloveniji zaradi majhnosti žag ne pride v poštev. Primer tovrstne naprave je prikazan na sliki 2.8.





Slika 2.7: Shematski prikaz delovanja upogibne naprave v tekočem traku



Slika 2.8: Slika upogibne naprave M 7200 (Metriguard)

Lokalni in globalni statični modul elastičnosti ugotavljamo po standardu SIST EN 408 na naslednji način:

- element na razponu  $18h$  simetrično obremenimo z dvema točkovnima silama slika 2.9;
- element je podprt kot prostoležeči nosilec;
- da preprečimo uklon, element bočno podpremo;
- povečevanje sile naj bo konstantno ( $0,003 h$  mm/s);
- maksimalna sila ne sme preseči  $0,4 F_{\max}$ ;
- na sredini razpona na razdalji  $5h$  merimo pomik  $w$ ;
- narišemo graf sila/pomik in uporabimo le del med  $0,1 F_{\max}$  in  $0,4 F_{\max}$ ;
- elastični modul izračunamo po enačbi

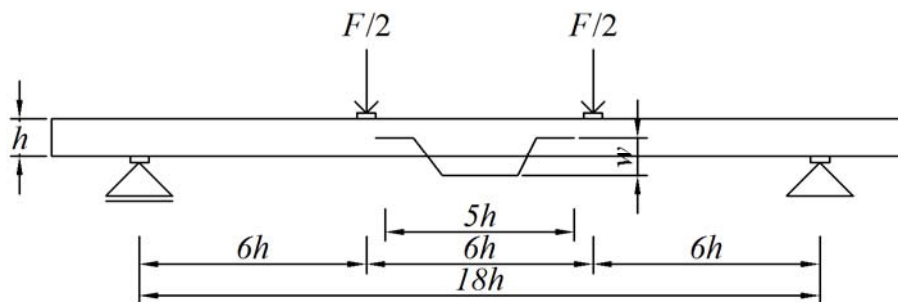
$$E_{m,l} = \frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)}, \quad (2.10)$$

kjer so

$F_2 - F_1$  sprememba sile,

$w_2 - w_1$  sprememba pomika

$I$  vztrajnostni moment elementa.



Slika 2.9: Postavitev preizkusa za določitev lokalnega modula elastičnosti (SIST EN 408)

Globalni statični modul elastičnosti ugotovimo podobno, le da merimo pomik na celotni razpetini (slika 2.10) in ga izračunamo po enačbi

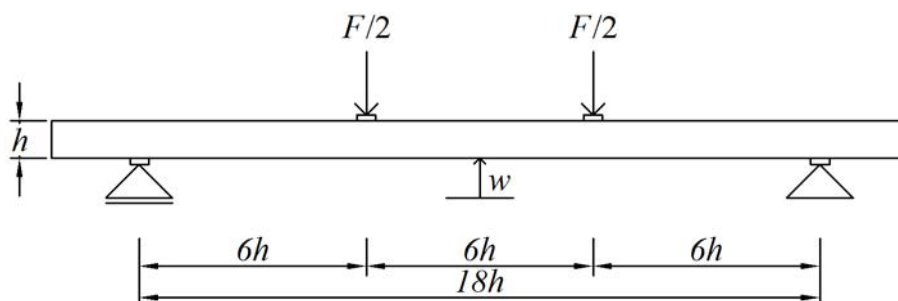
$$E_{m,l} = \frac{l^3(F_2 - F_1)}{bh^3(w_2 - w_1)} \left[ \left( \frac{3a}{4l} \right) - \left( \frac{a}{l} \right)^3 \right], \quad (2.11)$$

kjer so

$a$  razdalja od podpore do sile,

$b$  širina elementa,

$h$  višina elementa.



Slika 2.10: Preizkus za določitev globalnega modula elastičnosti (SIST EN 408)

### 3 POTEK PREIZKUŠANJA ELEMENTOV

Lesene elemente dolžine 4000 mm s tremi različnimi prerezi smo označili kot trame (60/80 mm), plohe (175/38 mm) in deske (130/20 mm) in jih preizkušali po enakem postopku. Vzorce smo pred pričetkom preizkusov natančno premerili s kljunastim merilom (širino, višino) in tračnim metrom (dolžino). Natančnost meritev s kljunastim merilom je znašala  $\pm 0,1$  mm s tračni metrom pa  $\pm 1$  mm. Vlažnost vzorcev, ki je bila pri večini 11 odstotna, smo izmerili z vlagomerom (GANN M4050). Iz mase, določene s tehtanjem, in izmerjenih dimenzij smo za vsak vzorec izračunali tudi gostoto.

Da bi ugotovili primernost različnih nedestruktivnih metod določanja trdnosti gradbenega lesa, smo vsak vzorec preizkusili na kar največ načinov. Na koncu smo opravili še destruktivne preizkuse, ki so pokazali dejansko trdnost vzorcev. To smo potem primerjali s predhodno dobljenimi rezultati nedestruktivnih metod.

#### 3.1 NEDESTRUKTIVNE METODE

Na vzorcih smo naredili preizkuse s petimi različnimi nedestruktivnimi metodami (vizualno, metodo longitudinalnega širjenja valovanj, ultrazvočno, dinamično in statično upogibno metodo). Nekateri preizkuse smo ponovili večkrat, tako z različnimi inštrumenti in v različnih smereh, kot tudi na različnih lokacijah ter z drugim osebjem. Iz petih različnih metod smo tako dobili devet meritev.

##### 3.1.1 Vizualno razvrščanje

Pri raziskavi smo uporabili dve vizualni metodi razvrščanja. Prvo vizualno oceno so podali strokovnjaki iz Biotehniške fakultete, Oddelka za lesarstvo, ki so z meritvami značilnosti razvrstili elemente po standardu DIN 4074-1 (slika 3.1), o čemer je podrobneje pisal M.

Čepon v svoji diplomski nalogi (2006). Vsak element so razvrstili v enega izmed treh trdnostnih razredov (S7, S10 in S13) po zahtevah iz preglednice 2.1. Ti razredi so primerljivi z razredi C16, C24 in C30 standarda SIST EN 338.



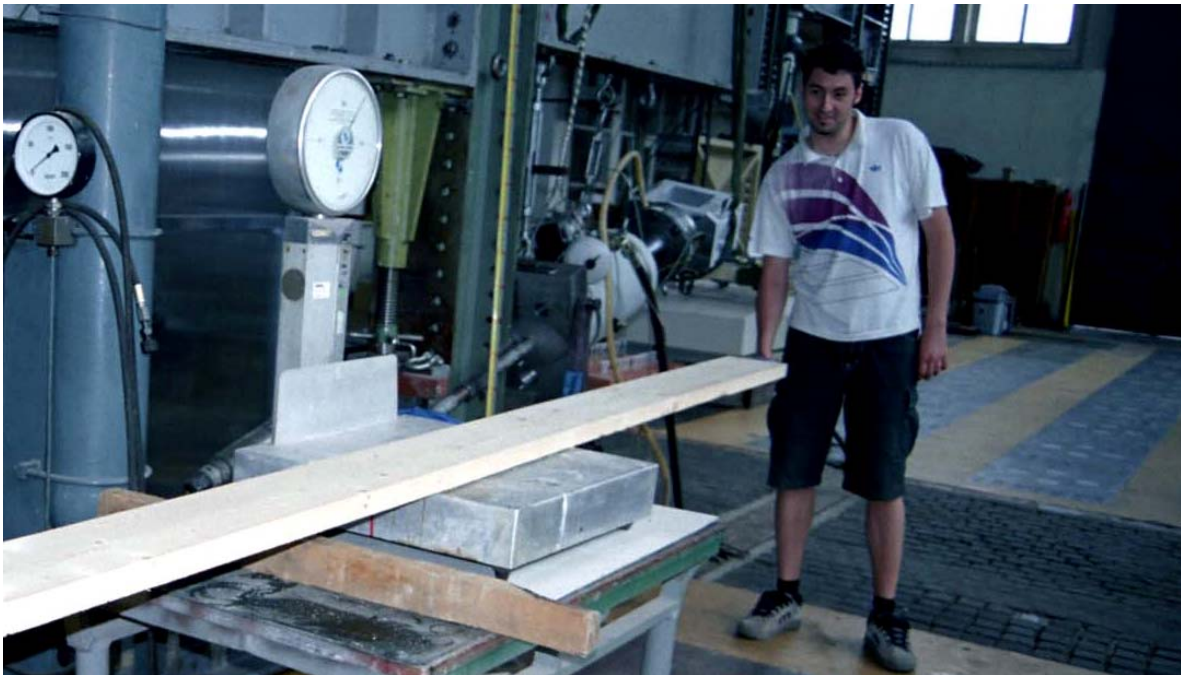
Slika 3.1: Vizualno ocenjevanje trdnostnih razredov Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete

Drugo oceno trdnostnega razreda smo dobili od inštituta TNO (Nizozemska). Ko je izvajalec meritev med merjenjem s Timber Graderjem MTG izvršil vizualno ocenjevanje in razvrstil elemente v trdnostne razrede standarda DIN 4074-1 (S7, S10 S13).

### 3.1.2 Longitudinalno širjenje valov

Preizkuse elementov je izvajal inštitut TNO (Nizozemska), ki je sodeloval pri razvijanju inštrumenta Timber Grader MTG. To je naprava, katere osnova je zgoraj omenjena nedestruktivna metoda longitudinalnega širjenja valov z dvojnim preletom. Timber Grader

MTG je izjemno priročna naprava, namenjena izključno za les in je zelo enostavna za uporabo, saj ima v inštrument vgrajena tako kladivo kot senzor (slika 3.3). Naprava ob predhodnem vnosu dolžine, gostote in vlažnosti elementa razvrsti izmerjeni element tudi v trdnostni razred.



Slika 3.2: Merjenje z napravo Timber Grader MTG



Slika 3.3: Timber Grader MTG

### 3.1.3 Ultrazvok

Vse elemente smo preizkusili z dvema različnima ultrazvočnima inštrumentoma. Prvi je bil inštrument AU 2000 (CEBPT), ki se uporablja na Zavodu za gradbeništvo za preizkušanje betona, kamna in drugih materialov in ni namenjen izključno za les (slika 3.4). Druge meritve je opravila Tehnična univerza iz Gradca (Avstrija) z ultrazvočnim inštrumentom Sylvatest (Sandoz S.A. Švica), ki ga uporabljajo na Inštitutu za lesene konstrukcije in lesno tehnologijo graške tehnične univerze (slika 3.5).



Slika 3.4: Merjenje z ultrazvočno napravo AU2000, CEBPT



Slika 3.5: Merjenje z ultrazvočno napravo Sylvatest

Inštrumenta sta precej podobna in delujeta na enak način, s to razliko, da je Sylvatest namenjen prav za les in da delujeta pri različnih frekvencah (AU2000 pri 60 kHz in Sylvatest pri 30 kHz). Inštrumenta imata senzorje različnih oblik. Prvi ima senzor z ravno površino, ki se ga uporablja za večje prereze (slika 3.6) in koničaste nastavke za manjše elemente (deske). Zaradi boljšega delovanja je potrebno senzorje z ravno površino namazati z gelom.



Slika 3.6: Ultrazvočna naprava AU2000 Ultrasonic tester, CEBPT

Pri Sylvatestu so senzorji koničasti, zanje pa je potrebno pred meritvijo izvrtati luknjice premera in globine približno 4 mm, v katere se vtakne konico senzorja (slika 3.7). Pri širših elementih je treba narediti več meritev. V našem primeru smo naredili 3, kot kaže slika 3.8, in vzeli povprečno vrednost.



Slika 3.7: Ultrazvočna naprava Sylvatest



Slika 3.8: Merjenje z ultrazvočno napravo Sylvatest

#### 3.1.4 Metode frekvenčnega odziva

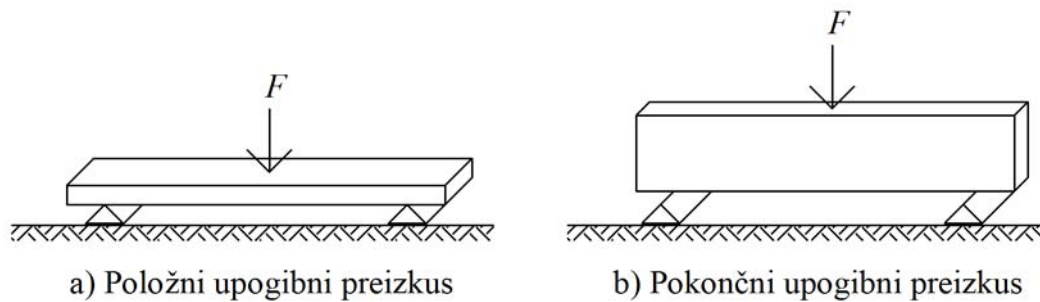
Meritve z metodo frekvenčnega odziva so opravili na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete, uporabili so prosto vibrirajoči princip z visečim elementom. Opis preizkušanja in rezultati meritev so podani v diplomski nalogi M. Čepona (2006).

#### 3.1.5 Določanje statičnega modula elastičnosti

Statični modul elastičnosti smo merili dvakrat. Obakrat smo izvajali meritve po standardu SIST EN 408, vendar z manjšimi odstopanji. Prvič so modul elastičnosti plohov in desk izmerili na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete, pri čemer so merili silo in pomik na obeh straneh elementa. Modul elastičnosti so izračunali po enačbi iz standarda SIST EN 408.

Drugič smo statični modul elastičnosti merili na Zavodu za gradbeništvo. Meritve smo na vsakem elementu napravili dvakrat in sicer položno in pokončno, kot kaže slika 3.9.





Slika 3.9: Shema pokončnega in položnega upogibnega preizkusa

Zaradi zelo majhnih višin plohov in desk bi bile pri položnem upogibnem preizkusu razpetine zelo majhne (0,66 m oziroma 0,36 m) in bi dobili le lokalno oceno trdnosti. Zato, in ker smo želeli tudi ovrednotiti naprave za upogibno testiranje (kot je Metriguard), ki se uporabljajo po svetu v velikih žagarskih obratih, smo podpore za obe skupini namesto na  $18h$  namestili na razdalji 1 m in obdržali ostala razmerja iz standarda. Pri pregledu tovrstnih naprav smo namreč ugotovili, da se razpetine gibljejo od 0.90 do 1.30 m.

Pred preizkusom smo izmerili prerez elementa v osi obremenitve na sredini razpetine, dolžino, težo, vlago ter razdaljo od osi obremenitve oziroma najšibkejšega prereza do enega od koncev elementa. Najšibkejši prerez smo določili glede na velikost in lokacijo grč ter zavrtost vlaken in širino branik. Velike grče in široke branike ter elementi z večjo zavrtostjo vlaken najbolj neugodno delujejo v natezni coni.

Obremenitev preko pomožnega elementa smo razdelili na dve sili. Ko je osna sila dosegla 40% vrednosti pričakovane trdnosti, ki smo jo izračunali po enačbi

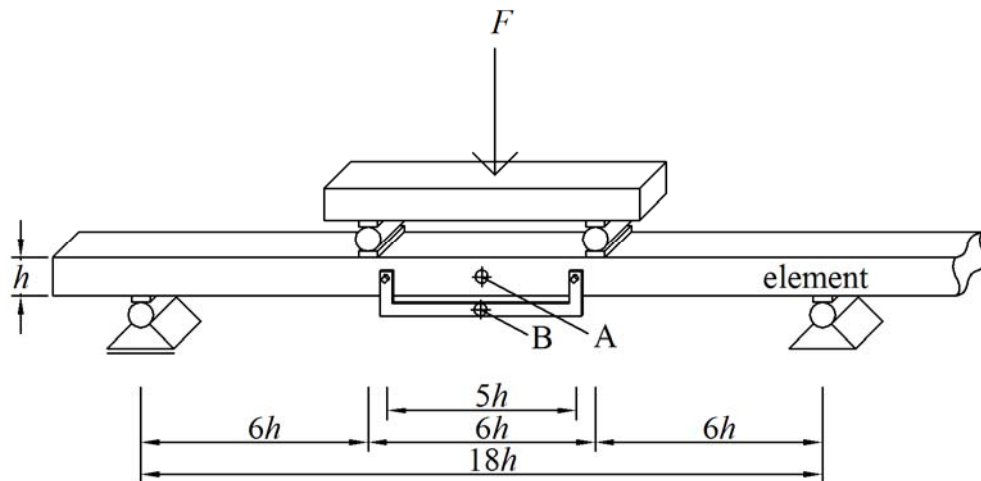
$$F_{\max} = \frac{6M_{\max}}{18h} = \frac{6W_X \sigma_{\max}}{18h} = \frac{hb \sigma_{\max}}{18}, \quad (3.1)$$

kjer so:

$F_{\max}$	maksimalna pričakovana sila,
$M_{\max}$	maksimalen pričakovan moment,
$h$	višina elementa,
$W_X$	odpornostni moment,
$\sigma_{\max}$	maksimalna pričakovana trdnost,

$b$  širina elementa,

smo preizkus ustavili. Z merilcem pomika smo merili globalni pomik elementa na sredini razpetine (točka A na sliki 3.10) in lokalni pomik,  $5h$  dolgega območja na sredini razpetine.



Slika 3.10: Skica statičnega upogibnega testa po standardu SIST EN 408

Lokalni pomik smo merili kot razliko med pomikom v sredini (točka A na sliki 3.10) in  $2,5h$  levo ter desno od sredine razpetine, pri čemer smo si pomagali s kovinsko palico, visečo na dveh žebličkih (točka B na sliki 3.10). Sprememba razdalje teh dveh točk (točke A in B na sliki 3.10) predstavlja lokalni upogib na dolžini  $5h$  na sredini razpetine, kjer je moment konstanten po dolžini.

Na osnovi izmerjenih pomikov v območju od 10% do 40% vrednosti maksimalne pričakovane trdnosti in dimenzij prereza elementa smo lahko iz globalnega pomika  $w_G$  izračunali statični modul elastičnosti  $E_G$

$$E_G = \frac{23l^3 \Delta F}{108 \Delta w_G h^3 b}, \quad (3.2)$$

kjer so

$l$  dolžina med podporama,

$\Delta F$  sprememba sile na opazovanem območju grafa,

$\Delta w_G$  sprememba globalnega pomika na opazovanem območju grafa.

Statični modul elastičnosti  $E_L$ , izračunan iz lokalnega pomik  $w_L$ , smo izračunali po enačbi

$$E_L = \frac{25l^3 \Delta F}{1296 \Delta w_L h^3 b}, \quad (3.3)$$

kjer je  $\Delta w_L$  sprememba lokalnega pomika na opazovanem območju grafa.

Enačbi (3.2) in (3.3) je mogoče dobiti iz splošne enačbe za pomik

$$w = \frac{F_1(l-a)x}{6EI} (l^2 - (l-a)^2 - x^2), \quad (3.4)$$

kjer so

$F_1$  točkovna sila,

$E$  modul elastičnosti,

$I$  vztrajnostni moment,

$a$  razdalja od levega konca do sile,

$x$  razdalja od levega konca do točke kjer merimo pomik,

ki velja za prosto ležeči nosilec z eno točkovno silo (Stanek, M. in Turk, G., Trdnost, 2003, str. 56). Če v enačbo (3.4) vstavimo naše dolžine ( $x$  in  $b$ ) in upoštevamo obe sili, ki delujeta, dobimo za globalni pomik  $w_G$  enačbo

$$w_G = \frac{23l^3 F}{1296 E_G I}, \quad (3.5)$$

in za lokalni pomik  $w_L$  enačbo

$$w_L = \frac{25l^3 F}{15552 E_L I}. \quad (3.6)$$

Izpeljave enačb smo naredili s pomočjo programa Mathematica, postopek je podan v prilogi A.

Globalni pomik smo merili z induktivnim merilcem pomika, lokalni pomik pa z video ekstenzometrom. V podporah smo predpostavili ničelni pomik.

Module elastičnosti smo izračunali po enačbah, podanih v preglednici (3.1). Postopek izračuna je podan v prilogi A.

Preglednica 3.1: Statični modul elastičnosti za globalni in lokalni pomik po skupinah

Skupina ( $b/h$ )	Trami (60/80 mm)	Plohi (175/38 mm)	Deske (120/30 mm)
Globalni modul elastičnosti	$E_G = \frac{1242\Delta F}{\Delta wb}$	$E_G = \frac{23\Delta F}{108\Delta wh^3 b}$	$E_G = \frac{23\Delta F}{108\Delta wh^3 b}$
Lokalni modul elastičnosti	$E_L = \frac{225\Delta F}{2\Delta wb}$	$E_L = \frac{25\Delta F}{1296\Delta wh^3 b}$	$E_L = \frac{25\Delta F}{1296\Delta wh^3 b}$

### 3.2 UGOTAVLJANJE TRDNOSTI

Trdnost vzorcev smo ugotovili upogibno in sicer v skladu s standardom SIST EN 408. Postopek preizkusa je bil enak kot pri določanju statičnega modula elastičnosti, le da smo tudi pri deskah in plohih razdaljo med podporama vzeli po standardu, elemente pa smo obremenjevali do porušitve. Na osnovi izmerjene osne sile pri porušitvi in dimenzij prereza elementa smo izračunali trdnost posameznega elementa po enačbi

$$f = \frac{18F_{\max}}{hb}, \quad (3.7)$$

kjer so

- $f$  upogibna trdnost,
- $F_{\max}$  maksimalna sila,
- $h$  višina elementa,
- $b$  širina elementa.

Da bi ugotovili točno gostoto in vsebnost vlage elementov, smo po porušitvi iz vsakega elementa v bližini prereza porušitve izrezali približno 5 – 10 cm dolge kose. Te smo natančno premerili in stehali, z gravimetrično metodo (sušenjem) pa tudi ugotovili vsebnost vlage.

#### 4 ANALIZA REZULTATOV MERITEV

Na elementih smo opravili različna nedestruktivna ocenjevanja trdnosti in trdnostnih razredov. Število preizkusov na posameznih skupinah se razlikuje. Na tramih (60/80 mm) je bilo opravljenih šest preizkusov:

- vizualno razvrščanje Biotehniške fakultete, Oddelka za lesarstvo (Viz-BF),
- vizualno razvrščanje inštituta TNO (Nizozemska) (Viz-TNO),
- preizkusi longitudinalnega širjenja valov inštituta TNO (Nizozemska) ( $E$ -TNO),
- ultrazvočni preizkusi Zavoda za gradbeništvo ( $E_U$ -ZAG),
- ultrazvočni preizkusi Tehnične univerze Gradec ( $E_U$ -Sylvatest),
- položni preizkusi upogibne togosti Zavoda za gradbeništvo ( $E_{POL}$ -ZAG),
- pokončni preizkusi upogibne togosti Zavoda za gradbeništvo ( $E_{POK}$ -ZAG).

Na plohih (175/38) in deskah (130/20) sta bila poleg vseh zgoraj omenjenih opravljena še dva preizkusa Biotehniške fakultete, Oddelka za lesarstvo :

- položni preizkus upogibne togosti ( $E_{POL}$ -BF),
- preizkus frekvenčnega odziva ( $E_{DIN}$ -BF).

Preglednice rezultatov vseh preizkusov so podane v prilogi B. Rezultati so podani v obliki trdnostnih razredov (Viz-BF, Viz-TNO), statičnih modulov elastičnosti ( $E$ -TNO,  $E_{POL}$ -ZAG,  $E_{POK}$ -ZAG in  $E_{POK}$ -BF), dinamičnih modulov elastičnosti ( $E_{DIN}$ -BF) in dinamičnih modulov elastičnosti, določenih z ultrazvokom ( $E_U$ -ZAG,  $E_U$ -Sylvatest). Kot smo že povedali v poglavju 3.1.5, smo pri metodi upogibne togosti položno in pokončno merili dva pomika, lokalnega in globalnega ter tako dobili tudi po dva statična modula elastičnosti, lokalnega ( $E_{L-POL}$ -ZAG,  $E_{L-POK}$ -ZAG) in globalnega ( $E_{G-POL}$ -ZAG,  $E_{G-POK}$ -ZAG). Dodatno razvrščanje v trdnostne razrede so opravili na inštitutu TNO, kjer so na osnovi nam neznanih empiričnih izrazov iz izmerjenih modulov elastičnosti ( $E$ -TNO) izračunali trdnost  $f_{mod}$ , na osnovi katere so potem skupaj z že znano gostoto in izmerjenim modulom

elastičnosti v skladu s standardom EN 338 razvrstili elemente v trdnostne razrede (Raz-TNO).

Izmerjenih je bilo 300 elementov, vendar smo zaradi slabih meritev lokalnega modula pri pokončnem upogibnem preizkusu ( $E_{L-POK-ZAG}$ ) morali 7 rezultatov črtati (5 iz skupine tramov in po en iz obeh drugih skupin). Glede na to, da smo pri določanju razredov obravnavali vse tri skupine skupaj kot celoto, je bilo 293 dovolj veliko število elementov za analizo.

## 4.1 KORELACIJE

### 4.1.1 Korelacije količin izmerjenih z nedestruktivnimi in destruktivno metodo

Posamezne nedestruktivne metode in njihovo ustreznost za ocenjevanje lastnosti ter napovedovanje razredov smo ocenili tako, da smo preverjali linearno povezanost med napovedmi in dejanskimi vrednostmi, izmerjenimi z destruktivno metodo. Linearno povezanost med dvema slučajnima spremenljivkama imenujemo tudi kovarianca ali korelacija. Oceno parametra korelacije smo izračunali s programom Microsoft Excel, z vgrajeno funkcijo CORREL.

Če se vrednost parametra korelacije približuje ena, govorimo o močni linearni povezanosti (sorazmerje), če pa se približuje vrednosti minus ena, sta spremenljivki močno negativno linearno povezani (obratno sorazmerje). V primeru, da je vrednost parametra blizu nič, lahko govorimo o zelo slabi linearni povezanosti. O pravi linearni povezanosti lahko govorimo le v primeru, da je vzorec, ki ga preizkušamo, dovolj velik. Vzorci, ki smo jih imeli na voljo (pri posameznih skupinah okoli 100, skupaj 293), so bili zadosti veliki.

Rezultate vseh nedestruktivnih metod smo za vsako skupino posebej in vse skupaj primerjali z rezultati destruktivnega preizkusa. Tako kot pri večini drugih materialov, je

tudi pri lesu najpomembnejša mehanska lastnost trdnost. Zato so nas najbolj zanimale korelacije rezultatov nedestruktivnih metod s trdnostjo. Kot je razvidno iz preglednic 4.1, 4.2, 4.3 in 4.4, se je večina teh korelacij gibala okoli 0,50, kar kaže na precej dober odnos med njimi.

Korelacije pri tramih so bile občutno slabše kot pri ostalih dveh skupinah. Razlogi za to niso točno znani. Mogoče je za to kriva razmeroma majhna višina, in posledično zaradi nje tudi majhna razpetina pri upogibnem obremenjevanju. Elemente smo obremenjevali na razmeroma majhnem območju, zato smo dobili lokalno upogibno trdnost elementa. Ker pa večina nedestruktivnih metod deluje na celotnem elementu, je prišlo do precejšnih razhajanj napovedanih lastnosti in dejanske trdnosti. Pri deskah in plohih, kjer je bila razpetina v primerjavi s celotno dolžino večja, so bile vrednosti korelacij precej višje. Ker je bila pri plohih dolžina razpetine kar 80 odstotkov celotne dolžine, torej smo elemente obremenili skoraj na celotni dolžini, so bile nedestruktivne metode najbolj natančne prav pri ocenjevanju te skupine.

Preglednica 4.1: Korelacije za trame med moduli elastičnosti, dobljenimi z različnimi nedestruktivnimi metodami, in tremi lastnostmi, ki določajo trdnostne razrede

Trami	$f$ - trdnost	$E_{L-POK-ZAG}$	$\rho$ - gostota
$f$ - trdnost	1,00		
$E_{L-POK-ZAG}$	0,64	1,00	
$\rho$ - gostota	0,19	0,40	1,00
$E_{G-POK-ZAG}$	0,71	0,82	0,48
$E_{L-POL-ZAG}$	0,31	0,45	0,48
$E_{G-POL-ZAG}$	0,40	0,63	0,66
$E-TNO$	0,36	0,56	0,79
$E_U-ZAG$	0,30	0,54	0,85
$E_U-Sylvatest$	0,32	0,53	0,84

Najboljšo korelacijo s trdnostjo smo pri vseh skupinah skupaj in tudi pri vsaki posebej dobili za statični modul elastičnosti pri pokončnem upogibnem preizkusu. Ker se v praksi ta metoda ne uporablja, smo raje ocenjevali druge in ugotovili, da je naslednja najboljša metoda določanje statičnega modula elastičnosti pri upogibu položno. Pri vseh skupinah skupaj in vsaki posebej so bile korelacije globalnih statičnih modulov elastičnosti vedno,

razen v primeru pokončnega upogiba pri deskah, boljše od lokalnih. Ta ugotovitev se sklada z nekaterimi drugimi podobnimi testiranjmi (Hanhijärvi, et. al., 2005) in ne pa tudi s standardom SIST EN 14081-1, ki predpisuje uporabo lokalnega modula za določitev trdnostnega razreda (glej poglavje 4.2).

Preglednica 4.2: Korelacije za deske med moduli elastičnosti, dobljenimi z različnimi nede­struk­ti­vni­mi metodami, in tremi lastnostmi, ki določajo trdnostne razrede

Deske	$f$ - trdnost	$E_{L-POK-ZAG}$	$\rho$ - gostota
$f$ - trdnost	1,00		
$E_{L-POK-ZAG}$	0,75	1,00	
$\rho$ - gostota	0,22	0,41	1,00
$E_{G-POK-ZAG}$	0,66	0,87	0,61
$E_{L-POL-ZAG}$	0,50	0,57	0,34
$E_{G-POL-ZAG}$	0,58	0,68	0,53
$E_{POL-BF}$	0,46	0,64	0,68
$E_{DIN-BF}$	0,51	0,68	0,76
$E-TNO$	0,54	0,71	0,77
$E_U-ZAG$	0,47	0,67	0,81
$E_U-Sylvatest$	0,45	0,66	0,87

Preglednica 4.3: Korelacije za plohe med moduli elastičnosti, dobljenimi z različnimi nede­struk­ti­vni­mi metodami, in tremi lastnostmi, ki določajo trdnostne razrede

Plohi	$f$ - trdnost	$E_{L-POK-ZAG}$	$\rho$ - gostota
$f$ - trdnost	1,00		
$E_{L-POK-ZAG}$	0,81	1,00	
$\rho$ - gostota	0,31	0,47	1,00
$E_{G-POK-ZAG}$	0,82	0,95	0,47
$E_{L-POL-ZAG}$	0,61	0,70	0,29
$E_{G-POL-ZAG}$	0,70	0,81	0,44
$E_{POL-BF}$	0,68	0,86	0,58
$E_{DIN-BF}$	0,72	0,87	0,61
$E-TNO$	0,63	0,81	0,60
$E_U-ZAG$	0,54	0,71	0,74
$E_U-Sylvatest$	0,59	0,77	0,74



Preglednica 4.4: Korelacije za vse skupine skupaj med moduli elastičnosti, dobljenimi z različnimi nedestruktivnimi metodami, in tremi lastnostmi, ki določajo trdnostne razrede (korelacije za  $E_{POL-BF}$  in  $E_{DIN-BF}$  veljajo samo za deske in plohe)

Vsi podatki	$f$ - trdnost	$E_{L-POK-ZAG}$	$\rho$ - gostota
$f$ - trdnost	1,00		
$E_{L-POK-ZAG}$	0,71	1,00	
$\rho$ - gostota	0,30	0,45	1,00
$E_{G-POK-ZAG}$	0,72	0,87	0,49
$E_{L-POL-ZAG}$	0,52	0,54	0,37
$E_{G-POL-ZAG}$	0,50	0,64	0,42
$E_{POL-BF}$	0,58	0,75	0,63
$E_{DIN-BF}$	0,64	0,79	0,68
$E-TNO$	0,54	0,71	0,71
$E_U-ZAG$	0,47	0,60	0,78
$E_U-Sylvatest$	0,50	0,65	0,83

V najslabši korelaciji s trdnostjo  $f$  je bila gostota  $\rho$ . Ta je bila od 0,2 do 0,3, kar potrjuje trditve, da je trdnost lesa v veliki meri odvisna od lokalnih napak in poškodb. Odlične korelacije med gostoto in parametri nekaterih nedestruktivnih metod (dinamični modul elastičnosti:  $E_{DIN-BF}$ ,  $E-TNO$ ,  $E_U-ZAG$ ,  $E_U-Sylvatest$ ) gre pripisati dejstvu, da je le-ta prisotna pri izračunih teh parametrov in tako, razumljivo, tudi v dobri korelaciji z njimi. Ker smo pri računih dinamičnih modulov elastičnosti surove izmerjene vrednosti, kot je na primer hitrost preleta ali lastna frekvenca, množili z gostoto, ki je od njih samih v slabši korelaciji s trdnostjo, smo kasneje dobili slabše korelacije tudi za izračunane dinamične module elastičnosti. Zanimiva je tudi korelacija položnega statičnega modula elastičnosti, izmerjenega na Biotehniški fakulteti, in gostote, ki je precej boljša od vseh ostalih statičnih modulov elastičnosti.

Med dinamičnimi moduli elastičnosti sta najvišje korelacije izkazovala dinamični modul, merjen s Timber grader-jem TNO ( $E-TNO$ ), in dinamični modul, merjen na Biotehniški fakulteti ( $E_{DIN-BF}$ ).  $E_{DIN-BF}$  je bil boljši samo pri plohih.

#### 4.1.2 Korelacije modulov elastičnosti

Med seboj smo primerjali rezultate vseh nedestruktivnih metod za vsako skupino posebej in za vse elemente skupaj. V preglednicah 4.5, 4.6, 4.7 in 4.8 smo s korelacijami želeli pokazati povezanost različnih statičnih in različnih dinamičnih modulov elastičnosti ter povezanost prvih z drugimi. Moč je bilo videti zelo dobro povezanost med moduli.

Preglednica 4.5: Korelacije vseh modulov elastičnosti za trame

Trami	$E_{L-POK-ZAG}$	$E_{G-POK-ZAG}$	$E_{L-POL-ZAG}$	$E_{G-POL-ZAG}$	$E-TNO$	$E_U-ZAG$	$E_U-Sylvatest$
$E_{L-POK-ZAG}$	1,00						
$E_{G-POK-ZAG}$	0,82	1,00					
$E_{L-POL-ZAG}$	0,45	0,46	1,00				
$E_{G-POL-ZAG}$	0,63	0,66	0,83	1,00			
$E-TNO$	0,56	0,66	0,72	0,88	1,00		
$E_U-ZAG$	0,54	0,60	0,61	0,81	0,94	1,00	
$E_U-Sylvatest$	0,53	0,63	0,60	0,81	0,95	0,96	1,00

Preglednica 4.6: Korelacije vseh modulov elastičnosti za deske

Deske	$E_{L-POK-ZAG}$	$E_{G-POK-ZAG}$	$E_{L-POL-ZAG}$	$E_{G-POL-ZAG}$	$E_{POL-BF}$	$E_{DIN-BF}$	$E-TNO$	$E_U-ZAG$	$E_U-Sylvatest$
$E_{L-POK-ZAG}$	1,00								
$E_{G-POK-ZAG}$	0,87	1,00							
$E_{L-POL-ZAG}$	0,57	0,55	1,00						
$E_{G-POL-ZAG}$	0,68	0,70	0,86	1,00					
$E_{POL-BF}$	0,64	0,76	0,64	0,78	1,00				
$E_{DIN-BF}$	0,68	0,84	0,68	0,81	0,92	1,00			
$E-TNO$	0,71	0,87	0,65	0,80	0,91	0,98	1,00		
$E_U-ZAG$	0,67	0,83	0,63	0,77	0,89	0,97	0,98	1,00	
$E_U-Sylvatest$	0,66	0,84	0,57	0,74	0,86	0,95	0,96	0,97	1,00

Preglednica 4.7: Korelacije vseh modulov elastičnosti za plohe

Plohi	$E_{L-POK-ZAG}$	$E_{G-POK-ZAG}$	$E_{L-POL-ZAG}$	$E_{G-POL-ZAG}$	$E_{POL-BF}$	$E_{DIN-BF}$	$E-TNO$	$E_U-ZAG$	$E_U-Sylvatest$
$E_{L-POK-ZAG}$	1,00								
$E_{G-POK-ZAG}$	0,95	1,00							
$E_{L-POL-ZAG}$	0,70	0,69	1,00						
$E_{G-POL-ZAG}$	0,81	0,83	0,88	1,00					
$E_{POL-BF}$	0,86	0,83	0,68	0,79	1,00				
$E_{DIN-BF}$	0,87	0,89	0,75	0,90	0,91	1,00			
$E-TNO$	0,81	0,80	0,69	0,79	0,82	0,90	1,00		
$E_U-ZAG$	0,71	0,74	0,63	0,77	0,79	0,90	0,84	1,00	
$E_U-Sylvatest$	0,77	0,80	0,64	0,80	0,82	0,93	0,84	0,97	1,00

Tudi pri teh korelacijah se je izkazalo, da so najslabše korelacije pri tramih.

Povprečna vrednost za korelacije za vse elemente je znašala kar 0,7. Ti rezultati kažejo na to, da izbira metode določitve modula elastičnosti ne vpliva odločilno na kvaliteto razvrščanja lesa. Zato je odločitev glede izbire metode odvisna od drugih lastnosti: priročnost naprave, hitrost delovanja, zapletenost priprave preizkušancev ...

Preglednica 4.8: Korelacije vseh modulov elastičnosti za vse elemente (korelacije za  $E_{POL-BF}$  in  $E_{DIN-BF}$  veljajo samo za deske in plohe)

Vsi podatki	$E_{L-POK-ZAG}$	$E_{G-POK-ZAG}$	$E_{L-POL-ZAG}$	$E_{G-POL-ZAG}$	$E_{POL-BF}$	$E_{DIN-BF}$	$E-TNO$	$E_U-ZAG$	$E_U-Sylvatest$
$E_{L-POK-ZAG}$	1,00								
$E_{G-POK-ZAG}$	0,87	1,00							
$E_{L-POL-ZAG}$	0,54	0,57	1,00						
$E_{G-POL-ZAG}$	0,64	0,72	0,80	1,00					
$E_{POL-BF}$	0,75	0,78	0,64	0,74	1,00				
$E_{DIN-BF}$	0,79	0,86	0,70	0,80	0,91	1,00			
$E-TNO$	0,71	0,78	0,67	0,75	0,86	0,94	1,00		
$E_U-ZAG$	0,60	0,57	0,51	0,46	0,69	0,79	0,80	1,00	
$E_U-Sylvatest$	0,65	0,73	0,61	0,67	0,84	0,93	0,90	0,88	1,00

Najboljše korelacije so med zvočnimi ( $E$ -TNO) in ultrazvočnimi preizkusi ( $E_U$ -ZAG,  $E_U$ -Sylvatest). To dejstvo je razumljivo, saj obe metodi temeljita na istem principu delovanja. Tako s slednjimi, kot tudi z vsemi drugimi, ima dobre korelacije dinamični modul elastičnosti, dobljen z metodo frekvenčnega odziva ( $E_{DIN}$ -BF). Morda se razlog za to skriva v tem, da je nihanje elementa odvisno od precej podobnih dejavnikov kot valovanje in da so bili elementi podprti na podoben način kot pri upogibnih preizkusih. Tudi z dinamičnim modulom, dobljenim z metodo frekvenčnega odziva, so globalni modul elastičnosti v boljši korelaciji kot lokalni.

Dobre korelacije so razvidne tudi med lokalnimi ( $E_{L-POK}$ -ZAG,  $E_{L-POL}$ -ZAG) in globalnimi statičnimi moduli elastičnosti ( $E_{G-POK}$ -ZAG,  $E_{G-POL}$ -ZAG) za položno in pokončno obremenjevanje. Najboljša je pri plohih. Razlog, za to se ponovno zdi dolžina razpetine. Zaradi visoke višine elementov je pri pokončnem upogibnem obremenjevanju lokalna meritev potekala skoraj na enem metru in tako zajela večino slabosti, ki so vplivale na globalno meritev. Pri pokončnem obremenjevanje kažejo globalni in lokalni moduli elastičnosti dobre korelacije, enako velja tudi pri položnem obremenjevanju. Korelacije med pokončnim in položnim obremenjevanjem pa so malo slabše. Razlog za to se spet skriva v različnih mestih obremenjevanja, kar se najbolj pozna pri tramih.

Kar je bilo razvidno že iz preglednic 4.1, 4.2, 4.3 in 4.4, se ponovno kaže v zadnjih štirih preglednicah. Globalni modul kaže boljšo povezanost od lokalnega.

Zanimivo bi se bilo vprašati, zakaj so ravno trami dali najslabše korelacije in zakaj so plohi dali najboljše? Mogoče leži odgovor v grčah. Verjetno je, da so bile prav grče tiste, ki so pri kompaktnem prerezu tramov bolj neugodno vplivale na trdnost kot pri drugih dveh razredih.

## 4.2 RAZVRŠČANJE V TRDNOSTNE RAZREDE IN CENOVNE MATRIKE

### 4.2.1 Trdnostni razredi

Iz rezultatov porušnih preizkusov, narejenih na Zavodu za gradbeništvo, smo izračunali trdnost  $f$ , ki smo jo uporabili za razvrstitev elementov v trdnostne razrede po standardu SIST EN 338 (preglednica 4.9). Upoštevali smo dejansko trdnost  $f$ , dobljeno s porušnim poskusom, lokalni modul elastičnosti, dobljen pri pokončnem preizkusu ( $E_{L-POK-ZAG}$ ) in gostoto  $\rho$ . V trdnostne razrede smo razvrščali dvakrat: prvič v razrede C30, C24 in C16, da smo lahko dejanske razrede primerjali z vizualno ocenjenimi trdnostnimi razredi po DIN 4074-1 (Viz-BF, Viz-TNO), povezava je prikazana v SIST EN 1912, drugič pa v razrede C30, C24 in C18, v katere so razvrstili elemente raziskovalci inštituta TNO s Timber grader-jem (Raz-TNO).

Preglednica 4.9: Zahtevane lastnosti za posamezne razrede po SIST EN 338

Razred	$f_r$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_r$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho_r$ [kg/m <sup>3</sup> ]
C30	30	11400	380
C24	24	10450	350
C18	18	8550	320
C16	16	7600	310

Optimalno razvrščanje je način razvrščanja elementov v trdnostne razrede, na osnovi s odločilnih lastnosti: trdnosti  $f$ , dobljene s porušno metodo, modula elastičnosti  $E$  in gostote  $\rho$ . Razvrščanje se izvaja od zgoraj navzdol: najprej preverimo, koliko elementov ustreza zahtevam najvišjega razreda, za ostanek elementov preverimo, koliko jih ustreza naslednjemu razredu in tako naprej. Ker na ta način razvrščanja dobimo največ možnih elementov v najvišjih razredih, se tudi imenuje optimalno.

Odločilne lastnosti morajo zadoščati postavkam iz standarda SIST EN 14081-2:

- trdnost 95-ih odstotkov elementov razreda mora presegati zahtevano trdnost  $f_r$ , oziroma, vrednost 5 odstotnega kvantila za trdnost  $f_{0,05}$  mora biti višja od  $f_r$

- povprečje modulov elastičnosti elementov razreda  $E_m$  mora presegati zahtevani modul elastičnosti  $E_r$ ,
- vrednost 5 odstotnega kvantila za gostoto  $\rho_{0,05}$  mora biti višja od  $\rho_r$

Vrednosti  $f_{0,05}$ ,  $E_m$ ,  $\rho_{0,05}$  imenujemo karakteristične vrednosti.

V programu EXCEL smo napisali elektronsko preglednico, ki avtomatično določi optimalno razvrstitev za nek vzorec preizkušancev v trdnostne razrede. Postopek razvrščanja je v skladu s postopkom, ki ga podaja standard SIST EN 14081-2 in ga lahko povzamemo v nekaj točkah:

1. preizkušance razvrstimo najprej v najvišji trdnostni razred;
2. preizkušance razporedimo po velikosti glede na vrednost odločilnih lastnosti;
3. del vzorca, za katerega velja, da vse tri karakteristične vrednosti presegajo zahtevane vrednosti, predstavlja skupino v določenem razredu;
4. preostali del vzorca, za katerega velja, da vse tri karakteristične vrednosti ne presegajo zahtevanih vrednosti, poskusimo uvrstiti v drugi najvišji razred;
5. če karakteristične vrednosti dela vzorca na presegajo zahtevanih vrednosti za noben razred, ga ne uvrstimo v noben razred.

Pri razvrščanju v optimalne razrede je potrebno velikokrat ponoviti izračun karakterističnih vrednosti. Pri določanju povprečja nekega vzorca nimamo posebnih težav, medtem ko te nastopijo pri določanju različnih kvantilov nekega vzorca. Zato bomo na tem mestu podali postopek za določitev 5 odstotnega kvantila nekega vzorca preizkušancev.

Za določitev 5 odstotnega kvantila  $y_k$  iz vzorca  $y_i = 1, \dots, n$ , kjer je  $n$  velikost vzorca, moramo vzorec najprej razvrstiti po velikosti, tako da je  $y_i \leq y_{i+1}$ . Tisti element  $y_j$ , ki zadovoljuje pogoj

$$j = \lfloor 0,05n \rfloor, \quad (4.1)$$

ima najvišjo vrednost izmed elementov, ki so pod karakteristično vrednostjo. Zapis  $j = \lfloor x \rfloor$  opredeljuje celi del števila  $x$ , t.j. največje celo število, ki je enako ali manjše od  $x$ . Karakteristično vrednost določimo po enačbi

$$y_k = y_j + (0,05n - j)(y_{j+1} - y_j), \quad (4.2)$$

kar predstavlja linearno interpolacijo med dvema vrednostma, ki oklepata karakteristično vrednost. Za določitev karakteristične vrednosti po enačbi (4.2), mora biti  $n \geq 20$ , v nasprotnem primeru je 5 odstotni kvantil zelo težko določiti oziroma je precej nenatančen. V primeru, ko smo imeli manj kot 20 elementov, smo karakteristično vrednost izračunali po enačbi

$$y_k = 0,05ny_1. \quad (4.3)$$

Na osnovi zgoraj opisanega postopka smo dobili dve razvrstitvi, kot jih prikazujeta preglednici 4.10 in 4.11.

Preglednica 4.10: Optimalna razvrstitev elementov v trdnostne razrede C30, C24 in C18 po standardu SIST EN 338

Razred	C30	C24	C18	Ostane
Št. elementov	209	33	28	23

Preglednica 4.11: Optimalna razvrstitev elementov v trdnostne razrede C30, C24 in C16 po standardu SIST EN 338

Razred	C30	C24	C16	Ostane
Št. elementov	209	33	35	16

Za primerjavo razredov, dodeljenih z nedestruktivnimi metodami, in razredov, dobljenih z optimalnim razvrščanjem, smo uporabili t.i. frekvenčne in globalne cenovne matrike. V obeh matrikah se lahko vidi, kako dobro je posamezna metoda razvrstila elemente. Postopek za izračun matrik, ki smo ga povzeli po diplomski nalogi D. Reščiča (2004), je v skladu s standardom SIST EN 14081-2.

#### 4.2.2 Frekvenčne matrike

Iz frekvenčne matrike je razvidno, koliko elementov smo z nedestruktivno metodo glede na optimalno razvrščanje razvrstili pravilno, koliko smo jih precenili (oziroma dali v višji razred) in koliko podcenili (dali v nižji razred).

V vrstici Skupaj, ki predstavljata vsote, je zapisano število elementov, razvrščenih v dodeljene razrede, torej razrede dobljene z nedestruktivno metodo. V stolpcu Skupaj, ki prav tako predstavlja vsote, je moč razbrati število elementov, ki smo jih razvrstili v razrede z optimalnim razvrščanjem. Na diagonali matrike so zapisani elementi, ki so bili z nedestruktivno metodo razvrščeni v pravilne (optimalne) razrede. Nad diagonalo so tisti elementi, ki so bili podcenjeni (razvrščeni v nižji razred kot z optimalnim razvrščanjem), pod njo pa tisti, ki so bili precenjeni (razvrščeni v višji razred).

Preglednica 4.12: Primerjava trdnostnih razredov naprave Timber Grader MTG (Raz-TNO) z optimalnimi trdnostnimi razredi (frekvenčna matrika)

Optimalni razredi	Dodeljeni razredi (Raz-TNO)				
	C30	C24	C18	Ostanek	Skupaj
C30	100	61	37	11	209
C24	7	14	9	3	33
C18	6	4	13	5	28
Ostanek	4	4	10	5	23
Skupaj	117	83	69	24	293

Iz preglednice 4.12 je razvidno, da so z napravo Timber Grader MTG 45 odstotkov elementov razvrstili pravilno, 43 odstotkov podcenili in 12 precenili, kar so zelo dobri rezultati.



Preglednica 4.13: Primerjava trdnostnih razredov vizualnega razvrščanja inštituta TNO (Viz-TNO) z optimalnimi trdnostnimi razredi (frekvenčna matrika)

Optimalni razredi	Dodeljeni razredi (Viz-TNO)				
	C30	C24	C16	Ostane	Skupaj
C30	49	135	20	5	209
C24	8	22	2	1	33
C16	4	22	6	3	35
Ostane	4	7	4	1	16
Skupaj	65	186	32	10	293

Strokovnjak iz Nizozemske, ki je vizualno ocenil razrede, je 27 odstotkov elementov ocenil pravilno, 57 odstotkov podcenil in 17 precenil.

Preglednica 4.14: Primerjava trdnostnih razredov vizualnega razvrščanja Biotehniške fakultete, Oddelek za lesarstvo (Viz-BF) z optimalnimi trdnostnimi razredi (frekvenčna matrika)

Optimalni razredi	Dodeljeni razredi (Viz-BF)				
	C30	C24	C16	Ostane	Skupaj
C30	14	71	85	39	209
C24	3	7	15	8	33
C16	0	5	19	11	35
Ostane	0	1	5	10	16
Skupaj	17	84	124	68	293

Na Biotehniški fakulteti so po standardu DIN 4074-1 pravilno ocenili le 17 odstotkov elementov, kar 78 odstotkov so jih podcenili in samo 5 precenili, kar kaže na precejšno konzervativnost standarda.

Pri vrednotenju posameznih metod razvrščanj v trdnostne razrede, smo dodali še eno razvrstitev v razrede (Raz- $E_{DIN-BF}$ ), ki so jo le na osnovi meritev elastičnega modula elastičnosti naredili na Biotehniški fakulteti ( $E_{DIN-BF}$ ). Metoda sicer ni popolnoma pravilna, ker je po standardu SIST EN 338 treba razvrščanje izvesti na osnovi treh odločilnih lastnosti in ne le ene.

Preglednica 4.15: Primerjava trdnostnih razredov razvrščanja skupine desk in plohov, na osnovi dinamičnih modulov elastičnosti ( $Raz-E_{DIN-BF}$ ) z optimalnimi trdnostnimi razredi (frekvenčna matrika)

Optimalni razredi	Dodeljeni razredi ( $Raz-E_{DIN-BF}$ )				
	C30	C24	C16	Ostane	Skupaj
C30	89	18	16	1	124
C24	14	6	8	0	28
C16	5	6	19	0	30
Ostane	2	0	11	3	16
Skupaj	110	30	54	4	198

Čeprav je iz preglednice 4.15 razvidno, da so na Biotehniški fakulteti s tem načinom določanja najbolj ocenili razrede, saj je kar 59 odstotkov elementov ocenjenih pravilno in 22 podcenjenih, je potrebno pred odločitvijo pogledati še cenovne matrike. Že takoj pa lahko vidimo, da je ta način premalo konzervativen, saj je kar 19 odstotkov elementov precenjenih, kar je največ od vseh štirih načinov.

#### 4.2.3 Globalne cenovne matrike

Poleg frekvenčne matrike je v standardu SIST EN 14081-2 podan postopek za izračun globalne cenovne matrike. Precenjeni elementi vplivajo na varnost zgradbe, medtem ko podcenjeni vplivajo na količino neizkoriščenega in odpadnega lesa. Zato je dosti hujša napaka, če elemente precenimo, kot če jih podcenimo. To je upoštevano v osnovni cenovni matriki, na osnovi katere se izračuna globalna.

Globalne cenovne matrike smo izračunali na naslednji način: procente elementov nekega dodeljenega razreda, ki pripadajo določenemu optimalnemu razredu, smo pomnožili z ustreznim faktorjem iz preglednice 4.16. Vrednosti za ostanek smo izračunali po standardu SIST EN 14081-2. Postopek za izračun je prikazan v diplomski nalogi D. Reščiča (2004).

Primer: Poglejmo preglednico 4.15. 6 elementov od skupnih 30, torej 20 odstotkov, dodeljenega razreda C24 spada v optimalen razred C16. Če teh 20 odstotkov pomnožimo z vrednostjo za ustrezni dodeljeni in optimalni razred, 1,67, dobimo 0,334.

Preglednica 4.16: Delna osnovna cenovna matrika povzeta po standardu SIST EN 14081-2

Optimalni razredi	Dodeljeni razredi			
	C30	C24	C18	C16
C30	0,00	0,29	1,01	1,45
C24	0,83	0,00	0,69	1,12
C18	2,22	1,11	0,00	0,40
C16	2,92	1,67	0,42	0,00

Preglednica 4.17: Primerjava trdnostnih razredov naprave Timber Grader MTG (Raz-TNO) z optimalnimi trdnostnimi razredi (globalna cenovna matrika)

Optimalni razredi	Dodeljeni razredi (Raz-TNO)		
	C30	C24	C18
C30	0,000	0,213	0,542
C24	0,050	0,000	0,090
C18	0,114	0,053	0,000
Ostanek	0,130	0,115	0,138

Preglednica 4.18: Primerjava trdnostnih razredov vizualnega razvrščanja inštituta TNO (Viz-TNO) z optimalnimi trdnostnimi razredi (globalna cenovna matrika)

Optimalni razredi	Dodeljeni razredi (Viz-TNO)		
	C30	C24	C16
C30	0,000	0,210	0,906
C24	0,102	0,000	0,070
C16	0,180	0,198	0,000
Ostanek	0,308	0,126	0,139

Preglednica 4.19: Primerjava trdnostnih razredov vizualnega razvrščanja Biotehniške fakultete, Oddelka za lesarstvo (Viz-BF) z optimalnimi trdnostnimi razredi (globalna cenovna matrika)

Optimalni razredi	Dodeljeni razredi (Viz-BF)		
	C30	C24	C16
C30	0,000	0,245	0,994
C24	0,146	0,000	0,135
C16	0,000	0,099	0,000
Ostanek	0,000	0,040	0,045

Preglednica 4.20: Primerjava trdnostnih razredov razvrščanja skupine desk in plohov, na osnovi meritev dinamičnih modulov elastičnosti Biotehniške fakultete, Oddelka za lesarstvo (Raz- $E_{DIN}$ -BF) z optimalnimi trdnostnimi razredi (globalna cenovna matrika)

Optimalni razredi	Dodeljeni razredi (Raz- $E_{DIN}$ -BF)		
	C30	C24	C16
C30	0,000	0,174	0,430
C24	0,106	0,000	0,166
C16	0,133	0,334	0,000
Ostanek	0,091	0,000	0,226

Eden od pogojev standarda SIST EN 14081-2 je, da precenjene vrednosti cenovnih matrik ne smejo biti večje od 0,2. Temu pogoju ni bilo zadoščeno v treh primerih: dvakrat v primeru razvrščanja zgolj na osnovi dinamičnega modula elastičnosti (Raz- $E_{DIN}$ -BF), enkrat pa v primeru vizualnega razvrščanja strokovnjaka z inštituta TNO (Viz-TNO). Pri meritvah na osnovi dinamičnega modula elastičnosti znaša vrednost globalne cenovne matrike pri dodeljenem razredu C24 in optimalnem razredu C18 kar 0,334, pri dodeljenem razredu C16 in ostanku optimalnega razvrščanja pa 0,226 (preglednica 4.20). Čeprav se je ta način razvrščanja pri frekvenčnih matrikah odrezal najbolje, ga ne moremo uporabiti, saj je več kot očitno, da preceni preveč elementov. V primeru vizualnega razvrščanja strokovnjaka s TNO-ja je vrednost globalne cenovne matrike pri dodeljenem razredu C30 in ostanku optimalnega razvrščanja enaka 0,308.

Iz preglednice 4.17 je moč ugotoviti, da napravi Timber Grader, ki se je pri frekvenčnih matrikah dobro odrezala, tudi v globalni cenovni matriki kaže dobro. Ker je nekaj vrednosti

pod mejo 0,2, bi lahko z modifikacijami zvišali svoje ocene razredov in tako dobili več precejenih elementov. To pa bi pomenilo tudi manj podcejenih in, kar je najpomembnejše, več točnih napovedi razredov.

Poleg zgoraj omenjenega pogoja za cenovne matrike (0,2), standard SIST EN 14081-2 podaja še tri pogoje:

- vrednost 5 odstotnega kvantila za (dejansko) upogibno trdnost ( $f_{0,05}$ ) elementov v dodeljenem trdnostnem razredu mora biti višja od zahtevane modificirane upogibne trdnosti ( $f_r$ ) za ta trdnostni razred;
- srednja vrednost (dejanskega) modula elastičnosti ( $E_m$ ) elementov v dodeljenem trdnostnem razredu mora biti višja od zahtevane modificirane vrednosti za modul elastičnosti ( $E_r$ ) za ta trdnostni razred;
- vrednost 5 odstotnega kvantila za (dejansko) gostoto ( $\rho_{0,05}$ ) elementov v dodeljenem trdnostnem razredu mora biti višja od zahtevane modificirane vrednosti za gostoto ( $\rho_r$ ) za ta trdnostni razred.

#### 4.2.4 Karakteristične vrednosti dodeljenih razredov

Ker smo hoteli preveriti še ostale tri pogoje, smo izračunali še karakteristične vrednosti odločilnih lastnosti za preizkušance dodeljenih razredov. Standard SIST EN 384 dopušča, da se pri strojnem razvrščenem lesu zahtevana trdnost modificira (zmanjša) s faktorjem  $k_V$ , ki znaša za razrede C30 in manj 1,12. Modificirane trdnosti so prikazane v preglednicah 4.21 in 4.23. V primeru vizualnih razvrščanj trdnosti ne moremo modificirati, preglednica 4.22. Karakteristične vrednosti odločilnih parametrov smo določili po predlogu standarda prEN 14358. Prikazane so v preglednicah 4.24 – 4.27.

Preglednica 4.21: Minimalne modificirane zahtevane vrednosti odločilnih parametrov za razrede, dodeljene z napravo Timber Grader MTG (Raz-TNO)

Raz-TNO	Minimalne modificirane zahtevane vrednosti odločilnih parametrov		
Razredi	Trdnost - $f_r$	Modul elastičnosti - $E_r$	Gostota - $\rho_r$
C30	26,8	11400	380
C24	21,4	10450	350
C18	16,1	8550	320

Preglednica 4.22: Minimalne zahtevane vrednosti odločilnih parametrov za vizualno dodeljene razrede (Viz-TNO, Viz-BF)

Viz-TNO, Viz-BF	Minimalne modificirane zahtevane vrednosti odločilnih parametrov		
Razredi	Trdnost - $f_r$	Modul elastičnosti - $E_r$	Gostota - $\rho_r$
C30	30	11400	380
C24	24	10450	350
C16	16	7600	310

Preglednica 4.23: Minimalne modificirane zahtevane vrednosti odločilnih parametrov za razrede, dodeljene na osnovi meritev dinamičnih modulov elastičnosti Biotehniške fakultete, Oddelka za lesarstvo (Raz- $E_{DIN}$ -BF)

Raz- $E_{DIN}$ -BF	Minimalne modificirane zahtevane vrednosti odločilnih parametrov		
Razredi	Trdnost - $f_r$	Modul elastičnosti - $E_r$	Gostota - $\rho_r$
C30	26.8	11400	380
C24	21.4	10450	350
C16	14.3	7600	310

Preglednica 4.24: Dejanske karakteristične vrednosti odločilnih parametrov elementov razredov, razvrščenih z napravo Timber Grader MTG (Raz-TNO)

Raz-TNO	Karakteristične vrednosti odločilnih parametrov		
Dodeljeni razredi	Trdnost - $f_{0,05}$	Modul elastičnosti - $E_m$	Gostota - $\rho_{0,05}$
C30	21,9	13226	460
C24	18,4	11262	423
C18	10,2	9281	389

Preglednica 4.25: Dejanske karakteristične vrednosti odločilnih parametrov elementov razredov vizualnega razvrščanja strokovnjaka iz Nizozemske (Viz-TNO)

Viz-TNO	Karakteristične vrednosti odločilnih parametrov		
Dodeljeni razredi	Trdnost - $f_{0,05}$	Modul elastičnosti - $E_m$	Gostota - $\rho_{0,05}$
C30	13,5	12541	397
C24	17,1	11116	392
C16	13,1	10191	394

Preglednica 4.26: Dejanske karakteristične vrednosti odločilnih parametrov elementov razredov vizualnega razvrščanja Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete (Viz-BF)

Viz-BF	Karakteristične vrednosti odločilnih parametrov		
Dodeljeni razredi	Trdnost - $f_{0,05}$	Modul elastičnosti - $E_m$	Gostota - $\rho_{0,05}$
C30	22,1	13034	326
C24	23,3	12402	408
C16	16,3	10976	394

Preglednica 4.27: Dejanske karakteristične vrednosti odločilnih parametrov elementov razredov, razvrščenih na osnovi dinamičnih modulov elastičnosti Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete (Raz- $E_{DIN}$ -BF)

Raz- $E_{DIN}$ -BF	Karakteristične vrednosti odločilnih parametrov		
Dodeljeni razredi	Trdnost - $f_{0,05}$	Modul elastičnosti - $E_m$	Gostota - $\rho_{0,05}$
C30	22,3	12914	425
C24	17,9	11029	411
C16	10,1	8684	381

Ugotovili smo, da so vse karakteristične trdnosti premajhne. Torej so vse metode kljub rezultatom, ki smo jih dobili pri frekvenčnih in globalnih cenovnih matrikah, premalo konzervativne. To je moč popraviti z modifikacijami razvrščanja s pomočjo nedestruktivnih metod. Potrebno bi bilo zvišati meje, postavljene za različne razrede, tako bi več slabših elementov padlo v nižji razred in bi imel višji razred večjo karakteristično trdnost.

Velja opomniti, da je bilo v nekaterih razredih izredno malo elementov, ponekod tudi pod 20, kar seveda vpliva na točnost izračuna karakteristične vrednosti.

Iz preglednic 4.24 - 4.27 je moč opaziti, da trdnost in modul elastičnosti nista povsem sorazmerno povezana. V preglednici 4.25 je denimo pri razredu C24 razmerje med karakteristično vrednostjo modula elastičnosti in karakteristično vrednostjo trdnosti precej manjše kot pri razredu C30.

Na izredno nenatančno ocenjevanje vizualnih metod kaže dejstvo, da je pri obeh ocenjevanjih karakteristična vrednost trdnosti razreda C24 večja od karakteristične vrednosti razreda C30. Še posebej je nezanesljivost opaziti v preglednici 4.25 (pri strokovnjaku iz Nizozemske), kjer je karakteristična trdnost najslabšega razreda C16 skoraj enaka trdnosti najboljšega razreda C30.

Način, na kakršen je ocenjeval strokovnjak iz Nizozemske, je primerljiv z načinom razvrščanja lesa v slovenskih žagarskih obratih. Torej bi povsem verjetno pri analizi le-teh dobili podobno slabe rezultate.

Vizualno ocenjevanje Biotehniške fakultete, Oddelka za lesarstvo sicer nima tako slabih rezultatov kot pri strokovnjaku iz Nizozemske, vendar je prepočasno za uporabo v praksi.

Skoraj vse karakteristične vrednosti modula elastičnosti in gostote so dosegle zahtevane vrednosti.





## 5 ZAKLJUČEK

V Sloveniji v večini primerov edini način razvrščanja konstrukcijskega lesa temelji na osnovu vizualnega ocenjevanja. To samo po sebi še ne bi bilo tako zaskrbljujoče, če bi ocenjevanje potekalo v skladu s standardi. Ker pa se izvaja zelo različno in bolj po kriterijih, ki zadevajo videz, je takšno ocenjevanje neustrezno. Z vstopom v Evropsko Unijo (EU) je Slovenija sprejela pravni red Unije, ki zahteva uvedbo enotnih tehničnih specifikacij za gradbene proizvode. Tako v EU kot v Sloveniji bo v kratkem postal obvezen standard EN 14081-1, ki obravnava žagani les kot gradbeni proizvod in bo zahteval označevanje konstrukcijskega lesa z oznako CE. Ta oznaka bo razen identifikacijske številke, kraja proizvodnje in vrste lesa morala vsebovati tudi trdnostni razred elementa, ki ga bo možno določiti le z eno od metod nedestruktivnega ocenjevanja. Ker z vizualnim ocenjevanjem, ki je sedaj v uporabi, ocenimo le površino elementa, je pa tudi precej subjektivno, nenatančno, zamudno in zahteva usposobljeno osebje ter zunanji nadzor nad izvajanjem, je smotrno razmišljati o alternativah.

Da bi ugotovili, katere metode razvrščanja lesa bi lahko ekonomsko, časovno ter predvsem kvalitativno nadomestile razvrščanje na osnovi vizualnega ocenjevanja, je nastala tudi ta raziskava.

Opisali smo vse nedestruktivne metode, ki smo jih uporabili za razvrstitev 300 elementov dolžine 4000 mm s tremi različnimi prerezi. Označili smo jih kot trame (60/80 mm), plohe (175/38 mm) in deske (130/20 mm), v vsaki skupini pa je bilo po 100 vzorcev.

Nedestruktivne metode, ki smo jih izvajali, so bile:

- vizualno razvrščanje Biotehniške fakultete, Oddelka za lesarstvo (Viz-BF),
- vizualno razvrščanje inštituta TNO (Nizozemska) (Viz-TNO),
- preizkusi longitudinalnega širjenja valov inštituta TNO (Nizozemska) (E-TNO),
- ultrazvočni preizkusi Zavoda za gradbeništvo ( $E_U$ -ZAG),

- ultrazvočni preizkusi Tehnične univerze Gradec ( $E_U$ -Sylvatest),
- položni preizkusi upogibne togosti Zavoda za gradbeništvo ( $E_{POL}$ -ZAG),
- pokončni preizkusi upogibne togosti Zavoda za gradbeništvo ( $E_{POK}$ -ZAG).

Na plohih in deskah sta bila dodatno opravljena še dva preizkusa Biotehniške fakultete, Oddelka za lesarstvo :

- položni preizkus upogibne togosti ( $E_{POL}$ -BF),
- preizkus frekvenčnega odziva ( $E_{DIN}$ -BF).

Posamezne nedestruktivne metode smo ocenili glede na njihove korelacije z odločilnimi lastnostmi, upogibno trdnostjo, statičnim modulom elastičnosti in gostoto. Primerjali smo tudi korelacije vseh modulov elastičnosti. Preizkušance smo z optimalnim razvrščanjem razvrstili v trdnostne razrede in te primerjali s trdnostnimi razredi, dobljenimi z nedestruktivnimi metodami. Izračunali smo tudi frekvenčne in cenovne matrike ter izračunali karakteristične vrednosti odločilnih lastnosti posameznih elementov, razvrščenih v trdnostne razrede z nedestruktivnimi metodami.

Ugotovili smo naslednje:

- pri tramih, kjer je bil razpon pri ugotavljanju upogibne trdnosti razmeroma majhen, so dale nedestruktivne metode najslabše ocene;
- ocenjevanje trdnosti na osnovi določanja statičnega modula elastičnosti pri položnem upogibu, ki jo izvajajo razne naprave, kot je Metriguard, se je izkazala za zelo dobro;
- v večini primerov so bili globalni statični moduli elastičnosti v boljši korelaciji s trdnostjo kot lokalni;
- v najslabši korelaciji s trdnostjo je bila gostota, kar je posledica dejstva, da na trdnost lesa močno vplivajo anomalije (grče, zavitost vlaken), ki se pri meritvi gostote ne izrazijo (grče celo povečajo gostoto);
- zelo dobro sta se izkazali metoda frekvenčnega odziva in metoda longitudinalnega valovanja (Timber Grader MTG);
- povprečna vrednost korelacij modulov elastičnosti je znašala okoli 0,7;

- zvočni in ultrazvočni modul elastičnosti so bili dobro korelirani;
- dinamični moduli elastičnosti, izmerjeni s frekvenčnim odzivom, so bili z drugimi moduli najboljše povezani;
- iz globalnih cenovnih matrik smo potrdili domneve, da je razvrščanje po zahtevah standarda DIN 4074-1 zelo konzervativno ter da elementov ne moremo ustrezno razvstiti v razrede zgolj na osnovi meritev frekvenčnega dinamičnega modula elastičnosti. V tem primeru sta glede na zahtevane trdnosti iz standarda EN 338 kar dve vrednosti globalne cenovne matrike presegle dovoljene vrednosti;
- karakteristične trdnosti elementov, razvrščenih v razrede s pomočjo vseh nedestruktivnih metod, so le v enem primeru dosegle zahtevane modificirane vrednosti standarda SIST EN 14081-2, pri vseh ostalih pa so bile nižje;
- vizualne metode niso dober način ocenjevanja, saj karakteristične trdnosti dodeljenih razredov niso kvalitativno sovpadale s trdnostnimi razredi.

Iz korelacij modulov elastičnosti smo ugotovili, da je izbira nedestruktivne metode irelevantna, saj bomo s katerokoli metodo dobili enako dobre rezultate. Ker pa se priročnost, praktičnost, ekonomičnost in čas, ki ga potrebujemo, za oceno po različnih metodah precej razlikujejo, so nekatere metode dosti bolj sprejemljive.

Najhitrejša, najbolj priročna in najcenejša so naprave, ki delujejo na principu širjenja longitudinalnega valovanja v zvočnem in ultrazvočnem področju:

- Timber Grader MTG (longitudinalno valovanje – dvojni prelet)
- AU2000 CEBPT (ultrazvok)
- Sylvatest (ultrazvok)

Kvaliteta meritev z vsemi tremi napravami je bila zelo podobna, zato je najbolje, da izberemo napravo, ki bo najbolj priročna. Če primerjamo ultrazvočne meritve, je bolj enostavna meritev z napravo AU2000 CEBPT, saj zahteva naprava Sylvatest zamudno vrtanje lukenj. Najbolj primeren pa je Timber Grader MTG, saj lahko meritve izvajajo samo ena oseba.

## 6 VIRI

CEN. 2006. prEN 14358 Timber structures - Calculation of characteristic 5-percentile values and acceptance criteria for a sample

Čepon, M. 2006. Nedestruktivne metode določanja relevantnih gradacijskih lastnosti žaganega lesa. Diplomaska naloga. Ljubljana, UL, BF.

Hanhijärvi, A., Ranta-Maunus, A., Turk, G. 2005. Potential of strength grading of timber with combined measurement techniques: Report of the Combigrade-project – phase 1. Espoo, VTT Publications 568.

Jayne, B. A. (1959) Vibrational Properties of Wood. Forest Products Journal. 413-416.

Pellerin, F. R. (1965) A Vibrational Approach to Nondestructive Testing of Structural Timber. Forest Products Journal XV(3), 93-101.

Reščič, D. 2004. Strojno razvrščanje lesa z uporabo nevronske mreže. Diplomaska naloga. Ljubljana, UL, FGG.

Ross, R. J., Brashaw, B. K., Pellerin, R. F. 1998. Nondestructive Evaluation of Wood. Forest Products Journal 48(1), 14-19.

Ross, R. J., Pellerin, R. F. 1994. Nondestructive Testing for Assessing Wood Members in Structures: A Review. <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr70.pdf>.

Slovenski inštitut za standardizacijo. 2004. SIST EN 338. Konstrukcijski les - Trdnostni razredi - *Structural timber – Strength classes*.

Slovenski inštitut za standardizacijo. 2004. SIST EN 384. Konstrukcijski les - Ugotavljanje značilnih vrednosti mehanskih lastnosti in gostote - *Structural timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density*.

Slovenski inštitut za standardizacijo. 2004. SIST EN 408. Lesene konstrukcije - Konstrukcijski les in lepljeni lamelirani les - Ugotavljanje nekaterih fizikalnih in mehanskih lastnosti - *Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties*

Slovenski inštitut za standardizacijo. 2005. SIST EN 1912. Konstrukcijski les - Trdnostni razredi - Določitev trdnostnih razredov na podlagi vizualnega razvrščanja in vrste lesa - *Structural timber - Strength classes - Assignment of visual grades and species*.

Slovenski inštitut za standardizacijo. 2006. SIST EN 14081-1. Lesene konstrukcije - Razvrščanje konstrukcijskega lesa s pravokotnim prečnim presekom po trdnosti - 1. del:

Splošne zahteve - *Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 1: General requirements*

Slovenski inštitut za standardizacijo. 2006. SIST EN 14081-2. Lesene konstrukcije - Razvrščanje konstrukcijskega lesa s pravokotnim prečnim presekom po trdnosti - 2. del: Strojno razvrščanje; dodatne zahteve za začetni preskus proizvodnje - *Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 2: Machine grading; additional requirements for initial type testing.*

Stanek, M., Turk, G. 2003. Trdnost. Ljubljana, <http://www.km.fgg.uni-lj.si/predmeti/Trdnost-VSS/literat/ucbenik/trdnost1.pdf>.

Turk, G., Ranta-Maunus, A. 2003. Analysis of strength grading of sawn timber based on numerical simulation. Espoo, VTT Research notes 2224.

Zorko, B. 2005. Metode razvrščanja lesa po trdnosti. Diplomski naloga. Ljubljana, UL, FGG.

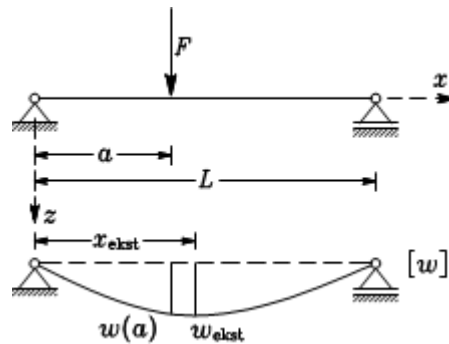


## **7 PRILOGE**

- Priloga A:** Izpeljave enačb za lokalni in globalni statični modul elastičnosti
- Priloga B:** Slike preizkušanja in naprav
- Priloga C:** Rezultati meritev



**PRILOGA A: IZPELJAVE ENAČB ZA LOKALNI IN GLOBALNI  
 STATIČNI MODUL ELASTIČNOSTI**



Slika A.1: Prosto ležeči nosilec obremenjen s točkovno silo  $F$

Iz splošne enačbe za pomik  $w_1$  zaradi sile v levem polju

$$w_1 = \frac{F}{6LEI} (ax(L^2 - a^2 - x^2) + L(x - (L - a))^3), \quad (\text{A.1})$$

ki velja za prosto ležeči nosilec z eno točkovno silo (Stanek, M. in Turk, G., Trdnost, 2003, str. 56) in enačbe za pomik  $w_2$  zaradi sile v desnem polju

$$w_2 = \frac{F(L - a)x}{6LEI} (L^2 - (L - a)^2 - x^2), \quad (\text{A.2})$$

je ob vnosu količin  $a = \frac{L}{3}$ ,  $x = \frac{L}{2}$  in upoštevanju delovanja obeh sil  $F$  hkrati mogoče dobiti enačbo za globalni pomik  $w_G$

$$w_G = \frac{23L^3 P}{1296E_G I}, \quad (\text{A.3})$$

kjer je obremenilna sila  $P = 2F$  in  $E_G$  globalni modul elastičnosti.

Če v enačbi (A.1) in (A.2) vstavimo dolžine  $a = \frac{L}{3}$ ,  $x = \frac{13L}{36}$  in upoštevanju delovanja dveh sil  $F$ , dobimo enačbo za pomik  $w_{2,5}$  na razdalji  $2,5h$  od sredine razpetine

$$w_{2,5} = \frac{251L^3 P}{15552EI}. \quad (\text{A.4})$$

Enačbo

$$w_L = \frac{25L^3 P}{15552E_L I}, \quad (\text{A.5})$$

za lokalni pomik  $w_L$ , dobimo tako, da od globalnega pomika  $w_G$ , odštejemo pomik na razdalji  $2,5h$  od sredine razpetine  $w_{2,5}$ . Če v enačbi (A.3) in (A.5) vnesemo v enačbo vztrajnostni moment

$$I = \frac{bh^3}{12}, \quad (\text{A.6})$$

kjer je

$b$  širina elementa,

$h$  višina elementa,

in dolžino  $L$ , ki znaša  $18h$  pri standardnem preizkusu in  $1$  m pri nestandardnem (deske in plohi), ter enačbo zasukamo, dobimo enačbe za statične module elastičnosti. Za standardni preizkus dobimo globalni modul elastičnosti  $E_G$  po enačbi

$$E_G = \frac{1242P}{w_G b} \quad (\text{A.7})$$

in statični modul elastičnosti  $E_L$  po enačbi

$$E_L = \frac{225P}{2w_L b}. \quad (\text{A.8})$$

Za nestandardni preizkus z razpetino  $1$  m pa dobimo globalni modul elastičnosti  $E_G$  po enačbi

$$E_G = \frac{23P}{108w_G h^3 b} \quad (\text{A.9})$$

in statični modul elastičnosti  $E_L$  po enačbi

$$E_L = \frac{25P}{1296w_L h^3 b}. \quad (\text{A.10})$$

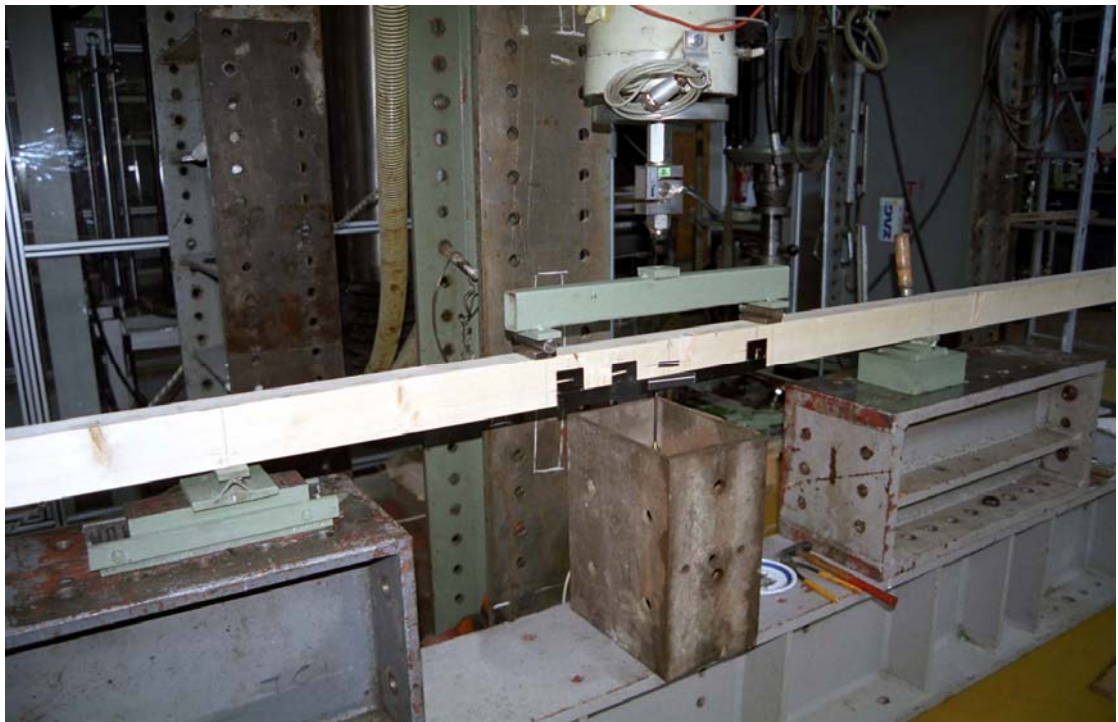
**PRILOGA B: SLIKE PREIZKUŠANJA IN NAPRAV**



Slika B.1: Priprava - vrtanje lukenj za meritev z ultrazvočno napravo Sylvatest



Slika B.2: Merjenje z napravo Timber Grader MTG



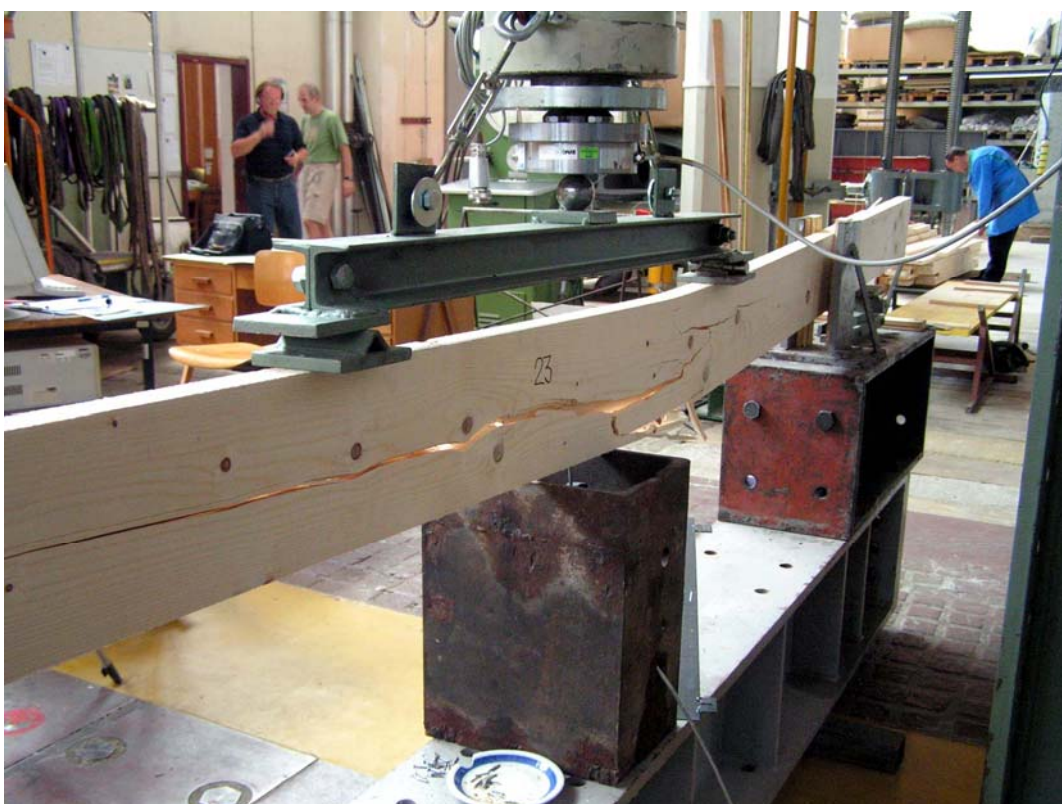
Slika B.3: Postavitev pokončnega upogibnega preizkusa (trami)



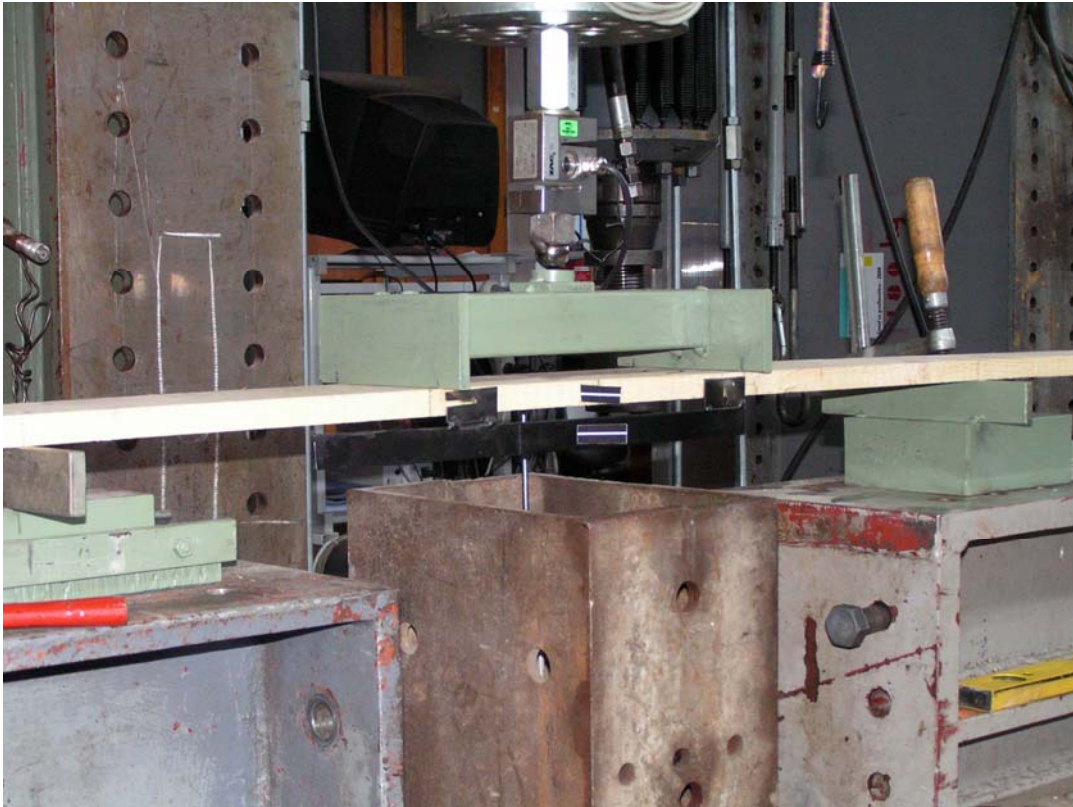
Slika B.4: Porušitev trama (ugotavljanje trdnosti)



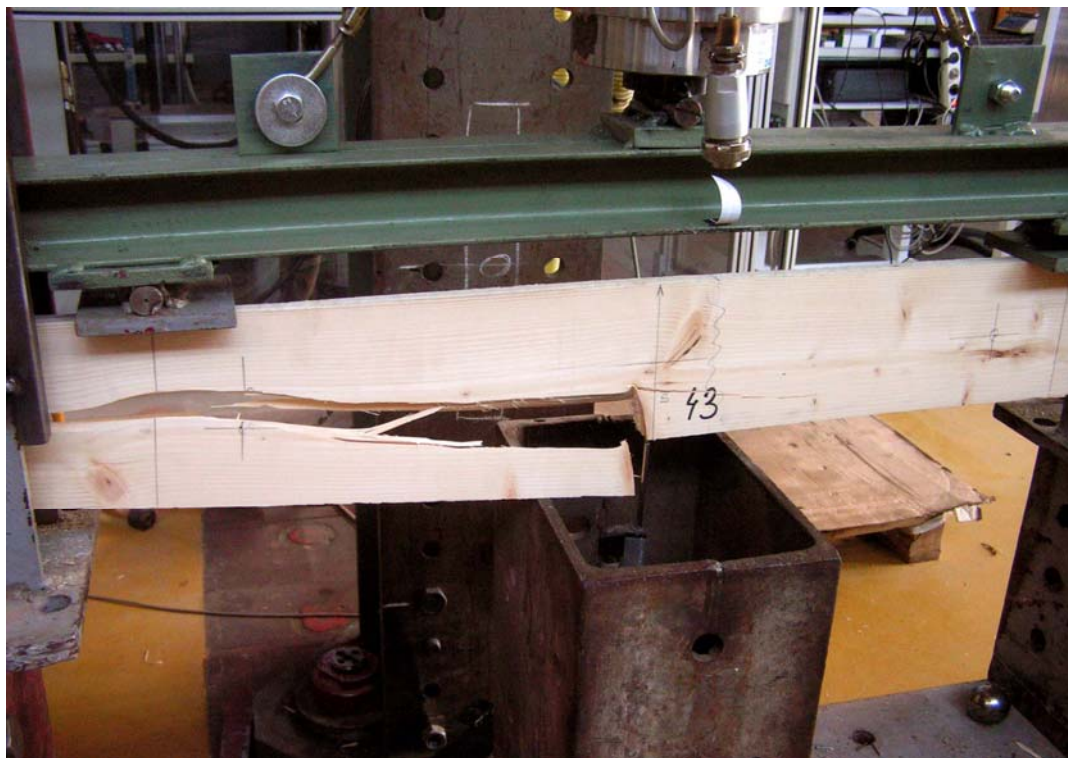
Slika B.5: Postavitev pokončnega upogibnega preizkusa (plohi)



Slika B.6: Porušitev ploha (ugotavljanje trdnosti)



Slika B.7: Postavitev položnega upogibnega preizkusa (deske)



Slika B.8: Porušitev deske (ugotavljanje trdnosti)

## PRILOGA C: REZULTATI MERITEV

Preglednica C.1: Rezultati meritev za trame

Št. trama	f	E <sub>L</sub> -POK-ZAG	ρ	E <sub>G</sub> -POK-ZAG	E <sub>L</sub> -POL-ZAG	E <sub>G</sub> -POL-ZAG	E-TNO	E <sub>U</sub> -ZAG	E <sub>U</sub> -Sylvatest
1	43,01	14214	531	12897	14379	12532	15284	18666	21025
2	51,33	10219	432	10439	8686	10462	11746	13893	15459
3	40,77	13945	510	12072	14452	12365	13076	15906	17510
4	27,87	11090	448	10147	12597	10035	12171	14681	16274
5	52,39	9744	385	9584	9617	9004	10022	12225	13414
6	32,30	7421	396	8796	10474	9792	10600	12660	14045
7	33,43	12796	521	11469	10637	11979	14358	17830	19750
8	41,75	13237	505	12711	15111	12935	15576	18061	20314
9	61,16	15305	536	14429	9586	12047	16540	20828	21767
10	52,95	16028	541	14067	16126	12886	17158	20648	21900
11	37,93	11608	484	12123	17551	12983	14330	16386	17850
12	39,69	11889	427	11308	9407	10211	12114	14939	15844
13	45,24	9077	448	9363	8221	9309	11305	13550	15114
14	40,66	11869	448	11159	11787	11427	12526	14618	16225
15	50,99	10517	474	10549	12076	11085	12142	16207	16274
16	46,20	10467	448	10996	12127	9582	12171	14383	15701
17	27,86	10727	458	10945	11941	12243	12817	15082	16488
18	31,29	9506	484	10560	9355	11074	12782	15938	18461
19	54,92	15262	521	14252	14833	14075	16277	19029	21091
20	48,17	13057	484	12826	16319	12939	13545	16973	18013
21	32,07	13495	510	11800	18953	13064	14684	16989	18415
22	40,22	9635	526	12063	13881	12689	16663	19399	20762
23	33,21	7998	401	9042	10690	9362	10122	13003	13412
24	36,23	12194	510	11143	22893	14188	16386	19954	20978
25	48,45	11348	458	10610	13391	11420	12817	14675	16538
26	37,13	12094	495	11199	13556	10858	13057	16758	18311
27	71,13	19332	474	13609	18506	13830	14022	16821	17804
28	75,55	17065	521	14449	16757	14229	15840	18489	20245
29	52,03	10809	416	10560	13244	11309	11819	13574	14580
30	35,18	10841	453	10616	15355	12137	12671	14815	15971
31	42,90	12775	505	12284	16004	13671	14740	17543	19381
32	49,00	13585	500	12691	14810	13360	14999	18763	20305
33	70,14	14048	500	13592	19450	14383	15416	17914	19249
34	37,61	10870	495	10865	13232	10652	11748	15302	16700
35	35,13	9375	489	10506	10644	10420	13303	15615	16987
36	41,16	11275	479	8796	10608	9687	11741	15276	16567
37	38,22	8632	390	9137	9288	9061	9866	12540	13139
38	33,43	11384	479	8979	11301	9026	11921	15126	16279
39	19,27	10522	395	7621	8301	8121	9699	11857	12820
40	38,85	9662	427	8596	9199	8600	9681	11746	12407
41	55,01	13756	505	12875	16167	13275	14139	17482	18262
42	32,80	10969	468	11222	8961	8810	9478	12841	13239
43	21,33	10368	499	7804	11771	12705	14193	18719	19359
44	30,07	8618	395	8639	12031	8873	10454	12530	13783
45	40,02	10838	385	10510	12212	10160	10179	12372	13238
46	45,43	12493	479	11489	14048	11159	13991	16704	18354

se nadaljuje...

... nadaljevanje

47	28,09	10557	494	10282	14416	10322	12497	15158	16452
48	70,25	17528	473	14931	8377	9894	11971	15042	16701
49	38,05	11717	505	11425	19796	14284	16015	19398	20152
50	48,46	11446	463	10002	13800	11130	12062	15109	15967
51	47,66	10037	473	10115	10994	10284	11791	15178	16408
52	26,64	7263	453	8254	9100	9563	11273	14438	15130
53	50,22	12677	494	11308	16700	11796	13067	15852	16838
54	31,45	8712	473	9600	14186	11810	12334	14907	16851
55	36,54	8565	473	9882	10316	10355	11971	16871	17208
56	48,81	10487	447	10992	11729	10677	11484	13596	15191
57	42,07	11252	505	10889	16140	11592	13342	16060	17415
58	39,29	9433	510	8676	14990	12016	13480	16449	17954
59	49,50	10255	416	10833	6345	8149	9148	11184	13425
60	44,10	10330	453	10301	10945	10176	11273	14394	14914
61	30,39	6573	489	7925	14579	10666	12930	16494	17063
62	38,64	9909	390	10729	7712	8851	10165	11967	13026
63	47,98	21951	484	12482	15360	14867	14143	18789	19132
64	29,66	10072	411	11001	7766	8383	9929	12636	13454
65	47,70	14531	463	13305	8938	11564	13158	16951	18245
66	25,01	6494	505	8072	13671	12248	14139	16503	17991
67	44,52	10437	427	10703	13349	10707	12124	13827	14812
68	70,26	13645	489	13575	18759	13536	14901	16993	18227
69	69,99	15386	536	14009	15422	13663	15883	19101	20538
70	37,46	12838	541	12552	15201	13616	15816	18866	20794
71	34,64	11031	432	9405	10528	9894	10592	12425	13367
72	44,67	12199	489	11638	11286	11364	12740	16351	17578
73	29,98	11315	468	10676	9867	11133	12018	14424	15952
74	48,11	9787	442	9567	12312	9569	10848	12651	13676
75	34,42	11107	453	10322	12987	10903	11445	13688	15043
76	37,66	12223	510	11414	11261	11161	13266	17380	18676
77	34,65	9214	516	10092	11004	11072	14003	16368	18557
78	40,86	8150	469	9606	7784	8777	10113	14058	14637
79	26,01	9115	458	9715	14169	10650	12628	15811	17081
80	42,23	10785	490	10375	12450	10543	12165	14998	16420
81	39,91	12840	526	12332	12717	11208	13875	17905	19262
82	36,48	12602	469	11352	12512	11522	13102	15149	16617
83	56,21	13387	510	11577	14132	12042	13662	16625	17699
84	34,42	9336	469	9644	9401	9749	11297	14276	13340
85	28,61	11868	499	9168	10019	10352	11697	15923	13292
86	32,26	11203	479	10417	11202	10129	12270	14533	16005
87	32,23	10188	443	9665	9766	9589	11336	12867	14759
88	32,67	9303	536	10142	10639	10776	11201	15552	16406
89	45,44	10562	495	11036	10895	9745	13051	17622	18746
90	35,02	9641	510	10474	9382	10639	12301	16777	18016
91	47,62	10811	498	9992	9756	9677	12218	15457	16868
92	48,61	10789	416	9893	7110	8225	11486	14059	14798
93	38,88	10990	510	11239	12132	11380	12307	15412	16388
94	51,01	14630	453	12954	15994	12305	12853	14256	15462
95	25,75	7269	453	8198	5129	7497	9781	11619	13213



Preglednica C.2: Rezultati meritev za plohe

Št. ploha	f	E <sub>L-pok-ZAG</sub>	ρ	E <sub>G-pok-ZAG</sub>	E <sub>L-POL-ZAG</sub>	E <sub>G-POL-ZAG</sub>	E <sub>POL-BF</sub>	E <sub>DIN-BF</sub>	E-TNO	E <sub>U-ZAG</sub>	E <sub>U-Sylvatest</sub>
1	55,06	16187	505	14015	16477	15433	14673	15928	15990	18093	18326
2	55,66	11301	446	10966	11586	10848	10376	12305	11959	14421	15585
3	28,05	11493	483	9235	11355	8647	8974	10171	9867	12988	13193
4	36,92	11553	501	11143	9680	11400	10493	12061	12265	16631	16821
5	37,24	11257	435	9237	8820	9883	10137	10944	10649	13488	14273
6	39,43	13803	524	11444	11078	13642	12362	14053	13032	17226	18221
7	37,16	13066	435	11571	8024	9955	9616	11525	11309	13689	15336
8	26,61	11111	489	9538	7520	9868	9994	11171	10908	13175	14497
9	47,72	15214	485	13403	15184	13702	13308	15260	15170	17211	18217
10	18,45	6969	454	7389	6974	8611	9099	9835	9648	12940	13533
11	16,83	8035	431	7830	7198	8417	8199	9374	9609	12078	12606
12	56,18	18363	539	14984	12342	14668	14786	18199	17568	19828	21086
13	13,57	9449	497	8903	5401	8728	8438	10394	11081	15632	16229
14	37,58	14303	505	13339	16604	13683	13231	14814	14728	16939	17321
15	43,57	13924	435	11876	11138	11299	10525	11803	11817	13299	14761
16	27,41	8425	427	8015	6653	7874	8050	9061	9071	11912	12061
17	22,13	11531	481	10821	10377	10016	10261	11796	11958	14632	16804
18	24,07	10813	427	11125	9731	11207	11148	12680	12339	15493	15779
19	32,13	13652	493	12568	17782	13645	13414	14665	14188	17579	17433
20	43,55	17531	489	14602	13999	13041	14160	15128	14476	16103	17377
21	47,73	12477	493	11693	10727	13223	12652	14077	13400	15376	16521
22	40,23	12959	423	11544	8803	10156	9993	11561	11501	12960	15213
23	37,30	14332	470	11898	10991	12294	11856	13780	13709	16600	17726
24	52,27	16735	493	14713	14138	13801	14144	15576	15832	17663	18979
25	35,04	11869	505	11459	11249	11208	11534	15055	14728	18445	19046
26	47,73	15064	485	12672	10172	13730	13209	14522	14162	15575	16733
27	48,83	15259	485	13274	12328	12934	12929	14913	14162	15934	17133
28	40,60	13910	474	12059	9838	13885	12539	14415	13438	15753	16564
29	54,09	14408	497	12400	13883	13365	12192	13503	13310	16217	16639
30	31,86	12214	485	11185	13141	13049	12684	13831	13189	15194	16300
31	43,58	11652	485	11665	7960	10599	11392	12832	12251	14860	15511
32	26,01	11082	499	11286	6152	10003	10285	13118	12478	14887	16272
33	55,87	14629	474	12901	13290	13307	13516	14167	13822	14685	16290
34	34,05	17838	539	14460	16456	15055	15413	17405	17328	20470	20880
35	41,38	11444	442	10002	9887	10846	10830	12119	11855	14455	15087
36	52,18	13597	442	12487	10902	11800	13038	13468	13648	15836	16334
37	29,90	13077	439	11604	8729	10905	12284	13673	13163	15143	15788
38	58,20	15743	493	13529	14532	14403	13399	15349	14999	16537	17109
39	16,05	7384	477	8986	3624	7663	7294	10988	10819	15423	16297
40	42,44	13118	520	12564	9354	11939	13249	15295	15182	18992	19392
41	35,94	12995	470	11361	9319	10423	13665	13421	12767	16443	16886
42	26,62	11969	462	10241	9081	8876	12699	12320	11488	14904	16018
43	39,39	12888	439	11159	9028	10585	11668	12661	12271	14863	15601
44	36,05	11234	439	10363	10686	10245	10905	11833	11580	13940	14782
45	22,63	9712	423	9127	10473	9926	11067	11686	11335	13929	14752
46	37,71	14443	505	12521	11543	13117	13492	15506	15353	18726	19104
47	48,23	15217	474	12309	8447	10565	13408	14957	12872	16350	17184
48	30,33	13096	466	11432	7222	11329	12332	14026	13406	16074	16911

se nadaljuje...

... nadaljevanje

49	37,12	12470	477	11400	4950	8424	11718	12595	11517	15944	16171
50	52,05	17653	532	13834	12970	15581	14884	16981	17078	18701	20673
51	29,93	11150	415	9658	9790	10395	10204	11411	11127	14050	14151
52	22,74	10239	415	9074	9484	9899	9886	10694	10804	12493	13335
53	10,88	9398	481	9869	6026	10608	11137	13086	13658	17172	17213
54	18,04	6061	458	6777	7249	7452	7164	8977	9891	12774	13169
55	10,31	8672	470	7079	1230	2707	10842	9057	9493	12663	13623
56	25,87	9496	512	9674	5513	8970	10367	12885	12360	17016	17856
57	29,90	12425	481	12170	10210	12170	13123	15184	14846	17568	18460
58	22,09	8243	411	8199	8882	8256	9236	10379	10233	11950	12721
59	25,87	10244	411	8768	8150	8554	9740	10363	10233	12265	12924
60	36,18	10369	485	7996	4596	5592	10209	10201	13574	13463	13354
61	6,88	3421	458	4879	7139	7002	8669	7544	7071	11934	12297
62	28,72	10995	524	10779	12737	12154	11414	14642	14038	18075	18940
63	10,10	8000	470	6518	1897	4220	10959	8831	8866	12456	13722
64	61,32	16452	489	13942	12802	13616	14263	16404	15707	17189	17657
65	13,03	9232	470	8027	6804	6365	8741	9604	18031	12849	12964
66	18,70	8421	474	7895	6152	8958	9075	10473	9733	14060	14194
67	27,84	12905	481	11799	13384	12501	12145	14069	13465	17675	17333
68	20,93	9053	454	8775	8130	7788	9768	10433	9967	13157	13620
69	14,33	3077	431	5067	4934	6694	7931	7947	8133	11517	12261
70	10,06	6359	477	6581	5577	8524	8038	9195	8856	13538	13913
71	36,89	11418	423	10432	10963	11847	10448	11480	11668	14058	14608
72	33,31	11151	435	10872	12059	10415	9171	12514	12162	15888	16140
73	7,82	8686	466	6200	2837	6373	9849	9040	8640	12827	12469
74	46,36	13941	474	12359	11963	12294	11877	14092	14016	16350	17184
75	32,30	14409	485	8593	20160	15444	13618	16210	15791	17886	18633
76	53,94	17798	508	14927	15519	13810	15113	17577	16549	19245	19557
77	52,45	15952	508	13885	11161	12558	12802	13997	13822	17395	18945
78	44,55	14772	485	13561	13569	13726	13156	15947	15170	17211	18032
79	46,43	13947	474	12671	11479	11494	11716	14170	13822	16662	17098
80	35,04	12106	474	11893	10101	11516	11984	14613	13822	16573	17013
81	32,23	10011	408	9489	13316	11002	9415	11195	10760	12282	13185
82	24,78	7843	470	8217	4202	6684	9995	9093	8866	12494	14387
83	60,84	15483	481	13528	14208	14062	13804	15805	15458	17233	17902
84	45,50	11982	442	11671	12260	12232	11398	13821	13280	15247	16334
85	22,76	6419	474	6621	2436	4730	8402	8207	7452	11200	11696
86	30,82	8250	481	8244	8293	8036	9144	9822	9086	15478	15427
87	39,22	14683	408	12938	7108	8331	9106	9477	8945	11085	12443
88	39,22	14683	485	12938	19579	15599	13738	16218	14762	17377	19992
89	40,02	14542	481	12916	11696	11571	11815	14036	13083	14869	16402
90	53,45	16177	501	13614	11967	11029	12154	14038	14008	16805	18346
91	15,03	13961	477	12111	12608	12528	11920	12555	12420	15078	16345
92	27,65	14227	474	11535	11171	10918	12823	13205	12502	14652	15732
93	26,69	8970	408	7657	7290	7708	7341	8409	8659	12522	12559
94	58,34	16684	520	13757	11325	10933	13287	14158	14139	17006	18406
95	28,96	10346	427	9061	12890	10034	10220	11613	11439	15596	15940
96	35,09	11647	427	10718	9457	11053	10577	12904	12814	15738	16253
97	30,92	11119	439	10920	12440	11575	10752	13436	12982	15579	16659
98	12,94	5615	408	6252	4734	7484	8561	9016	9531	10815	12512
99	23,46	12023	446	10262	10351	11115	10156	11802	11271	14951	15493

Preglednica C.3: Rezultati meritev za deske

Št. deske	f	E <sub>L-pok-ZAG</sub>	ρ	E <sub>G-pok-ZAG</sub>	E <sub>L-POL-ZAG</sub>	E <sub>G-POL-ZAG</sub>	E <sub>POL-BF</sub>	E <sub>DIN-BF</sub>	E-TNO	E <sub>U-ZAG</sub>	E <sub>U-Sylvatest</sub>
1	39,50	8454	423	9639	12138	11278	10214	11917	11666	11373	14155
2	31,03	9150	538	10619	13520	13552	11469	15502	13798	13834	17695
3	22,57	10487	500	11472	9168	11777	11329	12632	13005	13353	18081
4	32,29	11357	423	11066	10391	11215	10812	12136	11834	11766	15099
5	13,22	4683	394	4386	8017	10070	8785	8047	7834	8596	11509
6	36,39	8728	413	9626	8140	12037	10812	11000	11075	10996	13596
7	58,64	14633	519	14899	17451	16584	15549	17761	17120	16405	20304
8	31,32	10615	509	12938	10394	12867	14579	15790	15291	14959	18876
9	33,92	8204	384	9429	9603	11176	10068	10649	10302	10031	12498
10	22,00	12235	509	11414	9687	9468	11540	12737	12291	12960	16302
11	17,31	6711	500	8228	7410	9657	10212	10937	10795	11681	14397
12	41,82	11647	471	9875	10760	11927	12728	13225	12991	12869	16085
13	33,00	11673	423	10682	9861	11043	10106	11512	11834	11465	14361
14	45,66	13785	442	11679	10745	12983	10149	11285	10999	11031	14607
15	13,38	5787	423	8762	6311	8583	8144	9858	9284	9813	13296
16	28,02	10369	471	10544	9571	11513	11058	12018	11716	12136	15243
17	46,29	13530	432	12775	9042	11717	11573	11582	12451	11782	15059
18	29,98	11131	500	11588	16344	17146	15563	16163	15003	15163	18866
19	25,38	10268	413	10120	16427	14832	11220	11517	11237	11422	13914
20	30,71	12753	452	12122	9023	12211	12935	13341	13005	13700	16428
21	33,16	10658	423	10591	9182	10455	9624	9791	10048	10085	13321
22	27,14	8194	423	9020	12737	13307	9998	10410	10362	10633	13535
23	17,06	7403	404	9019	9930	9836	9858	10699	10504	10767	13480
24	10,25	5298	423	5924	4468	6686	8627	7989	7847	8839	11018
25	33,27	11384	490	11371	16367	16316	13213	14066	13914	13052	16980
26	35,54	11217	432	11690	12117	12166	11828	12193	12451	12280	15268
27	40,22	12115	519	13902	10493	14396	14052	15381	14732	14063	18471
28	36,39	10678	375	9955	10392	11562	9080	9443	9467	9515	12033
29	17,06	8377	500	10046	11559	12241	10786	13311	12813	13203	16943
30	45,24	12599	413	12065	9385	10915	9262	11105	11401	11168	14173
31	40,49	9969	490	12401	7322	10878	10011	12632	13522	13243	17422
32	15,56	6097	394	8204	5737	7744	7915	8580	8512	8918	12304
33	49,02	15160	500	14242	12746	13307	13420	14105	14186	13640	18468
34	32,62	9882	413	9192	9236	9347	9177	9287	9368	9188	11999
35	37,83	9665	423	8362	10153	11699	10415	9910	9738	9638	11975
36	51,08	15558	452	13572	14932	13933	12247	14724	13937	13902	17178
37	26,45	9254	442	10731	9844	11961	12382	12816	12372	12382	15514
38	14,48	4694	461	6639	7100	7697	8429	8679	8711	9530	12959
39	18,06	6338	423	8827	7268	10047	9848	11024	10362	10423	13586
40	35,07	11974	471	11553	14022	13889	13779	15013	14728	14256	17628
41	25,63	8669	413	8299	7348	9501	9147	9301	8927	9011	11924
42	22,62	8906	384	7964	9200	10385	9200	9525	9564	9629	11782
43	45,40	13081	461	13046	15207	13971	13226	14639	14233	14210	17574
44	37,55	13456	461	12724	13669	14899	11770	13152	12910	12382	16456
45	33,29	10255	452	11572	9330	11796	10276	11336	11068	11244	15038
46	47,63	11843	480	11868	9724	12163	11523	13597	13066	13226	16965
47	33,27	10249	500	11343	8109	10892	12232	12238	12433	12709	16587
48	24,52	10300	432	10820	10403	10214	8394	11479	11254	11804	14540

se nadaljuje...

... nadaljevanje

49	34,53	12469	471	12568	10313	13145	11646	13730	13750	12890	17067
50	24,98	9739	423	9614	8968	11066	10518	11088	11168	11300	13754
51	34,57	9513	423	10825	12318	11923	10346	12249	12175	12315	15405
52	28,94	14212	442	10990	14510	14389	11404	12278	12196	12373	15168
53	27,06	10521	423	10552	9270	10286	8502	11461	11332	11147	14141
54	36,44	13470	490	12715	12751	15744	12858	14724	14311	13844	17971
55	16,70	8613	423	9419	6899	9030	9998	10634	10520	10757	13754
56	22,35	10899	442	11054	9165	10696	10728	11488	11504	11349	14920
57	41,25	12759	413	12447	15359	14477	13514	15271	12236	13036	15712
58	27,15	10006	500	11514	9028	11539	12190	13334	13005	12642	16540
59	28,66	8881	423	9763	12581	11921	12135	12655	12520	11967	14488
60	29,06	9028	384	9316	9880	9861	9529	10356	10152	10011	12522
61	24,69	11489	480	11655	10743	12377	12489	13913	13066	13344	16848
62	42,05	11460	461	12372	10802	13132	13022	13766	13469	12776	16165
63	17,79	10562	442	11403	8510	10343	10494	11594	11504	11801	14496
64	41,29	12792	452	12251	11173	13218	12494	14056	13374	12980	16329
65	22,31	9616	413	9873	10606	10149	9925	10398	10281	10445	13714
66	40,35	10022	413	10104	19720	14718	11376	11806	11565	11356	13927
67	34,01	10178	384	9802	9191	10218	10515	10593	10605	10432	12912
68	43,92	13239	509	13239	14898	15600	14977	16946	15930	16062	19707
69	30,09	11163	413	9858	7588	10342	7833	9087	9368	9190	12362
70	27,91	10618	432	10429	8714	10389	10808	11583	11421	11355	15074
71	34,46	7974	423	9379	13492	12511	7945	10424	10362	11332	13027
72	23,05	10193	471	11771	15356	13059	12878	14668	13750	13902	17396
73	24,00	10772	471	11944	15625	15786	12968	12844	12620	12431	16069
74	43,96	12946	471	13532	15635	14699	14750	15436	15129	14383	17574
75	28,11	8631	423	8547	8115	9162	8228	8378	8694	8674	12158
76	44,38	13815	442	12152	13842	13000	12234	13323	13272	12909	15872
77	38,33	11604	500	11886	12204	13551	11022	13661	13589	14459	17637
78	34,78	11940	461	11604	12534	14051	10758	12710	12363	12696	16456
79	38,40	10566	413	9508	10678	9968	10637	11046	10914	10503	13067
80	39,39	10519	423	10009	10735	12015	8358	10642	10362	10711	13075
81	24,85	8558	413	7729	8635	9682	7605	8145	7940	8243	12250
82	32,43	11654	471	12002	11253	13056	13312	14058	13943	13865	17309
83	31,13	12100	471	11733	11514	13192	11946	14198	14137	14351	17790
84	22,04	10975	509	12970	13184	11498	12599	13940	13452	13587	17518
85	21,17	8280	356	9289	7194	8341	8099	8486	8581	8639	10588
86	49,58	15479	471	12751	16000	16404	13392	15675	14928	14426	17992
87	38,52	12795	461	12448	11175	14597	12588	13952	13658	13112	16522
88	27,65	10040	461	10374	11168	11931	11583	13016	12544	12786	16117
89	31,56	8403	365	8058	9670	9096	6753	7851	8018	8273	11768
90	33,65	7697	442	9141	6479	8874	7829	9069	9395	9146	13051
91	26,06	9784	432	10107	8473	10554	9637	10736	10923	11061	14047
92	41,54	10593	423	11432	9940	12451	11384	13361	12695	12712	15655
93	49,61	13529	452	12221	11148	11491	10850	11771	11754	12191	15587
94	35,53	13615	490	12250	12422	14937	11728	13721	12944	13319	17131
95	37,25	10969	480	11147	13774	15675	11276	14279	13835	13718	17254
96	24,51	9130	413	10445	9628	11410	9269	10626	10438	10816	13622
97	28,70	10930	413	10089	10258	10159	10174	10843	10754	10455	13042
98	47,80	14599	461	13330	11534	10468	10648	12816	12363	12274	17044
99	39,84	10225	394	10318	8618	8610	9056	10034	9952	9714	12702

Preglednica C.4: Trdnostni razredi za trame (optimalno razvrščanje je navedeno dvakrat: za razrede C30-C24-C18 in razrede C30-C24-C16)

Št. trama	C30-C24-C18	Raz-TNO	C30-C24-C16	Viz-TNO	Viz-BF
1	30	35	30	24	16
2	30	18	30	24	16
3	30	24	30	30	16
4	24	24	24	24	24
5	30	0	30	30	16
6	30	18	30	30	16
7	30	30	30	30	16
8	30	35	30	24	16
9	30	35	30	30	24
10	30	35	30	24	24
11	30	30	30	30	0
12	30	18	30	30	24
13	30	18	30	24	16
14	30	24	30	30	16
15	30	24	30	16	0
16	30	24	30	24	16
17	24	24	24	30	16
18	30	24	30	24	0
19	30	35	30	30	24
20	30	24	30	24	24
21	30	30	30	30	16
22	30	35	30	24	24
23	30	0	30	30	16
24	30	35	30	30	16
25	30	24	30	24	16
26	30	24	30	24	16
27	30	30	30	30	24
28	30	35	30	30	24
29	30	18	30	30	24
30	30	24	30	24	16
31	30	30	30	24	24
32	30	30	30	30	24
33	30	30	30	16	0
34	30	24	30	30	0
35	30	24	30	24	0
36	30	24	30	16	16
37	30	0	30	24	0
38	30	24	30	24	0
39	18	0	16	24	16
40	30	0	30	16	0
41	30	30	30	24	24
42	30	18	30	24	0
43	18	30	16	24	24
44	30	18	30	16	16
45	30	0	30	24	16
46	30	30	30	24	16
47	24	24	24	24	0
48	30	24	30	24	16

se nadaljuje...

... nadaljevanje

49	30	35	30	24	24
50	30	24	30	16	16
51	30	24	30	16	16
52	18	18	16	24	24
53	30	24	30	24	24
54	30	24	30	24	16
55	30	24	30	24	24
56	30	18	30	24	16
57	30	30	30	24	16
58	30	30	30	24	16
59	30	0	30	24	16
60	30	18	30	24	0
61	30	24	30	24	16
62	30	0	30	24	16
63	30	30	30	0	16
64	30	0	30	24	0
65	30	24	30	24	16
66	18	30	16	24	24
67	30	18	30	24	16
68	30	30	30	24	16
69	30	35	30	24	24
70	30	35	30	24	16
71	30	18	30	24	0
72	30	24	30	24	24
73	30	24	30	16	16
74	30	18	30	24	0
75	30	18	30	24	16
76	30	30	30	24	16
77	30	30	30	24	16
78	30	18	30	30	0
79	24	24	24	24	16
80	30	24	30	24	16
81	30	30	30	24	16
82	30	24	30	24	16
83	30	30	30	24	24
84	30	18	30	24	16
85	24	24	24	16	0
86	30	24	30	16	16
87	30	18	30	24	0
88	30	24	30	30	16
89	30	24	30	24	16
90	30	24	30	24	16
91	30	24	30	24	0
92	30	18	30	30	0
93	30	24	30	24	16
94	30	24	30	24	16
95	18	18	16	30	16

Preglednica C.5: Trdnostni razredi za plohe (optimalno razvrščanje je navedeno dvakrat: za razrede C30-C24-C18 in razrede C30-C24-C16)

Št. ploha	C30-C24-C18	Raz-TNO	C30-C24-C16	Viz-TNO	Viz-BF	Raz- $E_{DIN}$ -BF
1	30	35	30	30	30	30
2	30	24	30	24	30	30
3	24	18	24	0	0	16
4	30	30	30	24	0	30
5	30	18	30	24	24	16
6	30	30	30	24	24	30
7	30	24	30	24	24	24
8	24	24	24	30	16	24
9	30	35	30	24	30	30
10	18	18	16	24	24	16
11	0	18	16	0	0	16
12	30	35	30	24	24	30
13	0	24	0	24	16	16
14	30	35	30	30	24	30
15	30	24	30	24	24	24
16	18	18	16	30	16	16
17	18	24	16	24	16	24
18	24	24	24	30	24	30
19	30	35	30	30	24	30
20	30	35	30	24	24	30
21	30	30	30	30	0	30
22	30	24	30	30	24	24
23	30	30	30	24	16	30
24	30	35	30	30	0	30
25	30	35	30	30	0	30
26	30	35	30	24	30	30
27	30	35	30	16	16	30
28	30	30	30	30	24	30
29	30	30	30	0	24	30
30	30	30	30	24	0	30
31	30	30	30	24	0	30
32	24	30	24	30	30	30
33	30	30	30	0	24	30
34	30	35	30	30	30	30
35	30	24	30	30	24	30
36	30	30	30	30	24	30
37	30	30	30	24	16	30
38	30	35	30	30	0	30
39	0	24	16	24	16	16
40	30	35	30	30	24	30
41	30	30	30	16	16	30
42	24	24	24	24	30	30
43	30	24	30	24	16	30
44	30	24	30	24	16	24
45	18	24	16	16	16	24
46	30	35	30	24	0	30
47	30	30	30	24	24	30
48	30	30	24	16	16	24

se nadaljuje...

... nadaljevanje

49	30	24	30	24	16	30
50	30	35	30	24	24	30
51	30	18	30	24	16	24
52	18	18	16	0	16	16
53	0	30	0	30	16	30
54	18	18	16	16	0	16
55	0	18	0	30	0	16
56	24	30	24	30	0	30
57	30	35	30	24	30	30
58	18	18	16	24	16	16
59	24	18	24	24	16	16
60	30	30	30	24	0	16
61	0	0	0	0	0	0
62	24	35	24	24	16	30
63	0	18	0	24	0	16
64	30	35	30	30	16	30
65	0	35	0	30	0	16
66	18	18	16	24	16	16
67	24	30	24	30	16	30
68	18	18	16	24	0	16
69	0	0	0	24	0	0
70	0	18	0	24	24	16
71	30	24	30	24	24	24
72	30	24	30	24	24	30
73	0	18	0	24	0	16
74	30	30	30	30	16	30
75	30	35	30	24	24	30
76	30	35	30	30	24	30
77	30	35	30	24	24	30
78	30	35	30	30	24	30
79	30	30	30	24	24	30
80	30	30	30	24	30	30
81	30	18	30	24	24	24
82	18	18	16	16	16	16
83	30	35	30	24	30	30
84	30	30	30	24	30	30
85	18	0	16	0	0	16
86	30	18	30	24	16	16
87	30	0	30	24	24	16
88	30	35	30	30	0	30
89	30	30	30	30	16	30
90	30	35	30	30	0	30
91	0	30	0	30	16	30
92	24	30	24	24	16	30
93	24	0	24	24	16	16
94	30	35	30	30	16	30
95	30	24	30	24	24	24
96	30	24	30	24	24	30
97	30	24	30	24	24	30
98	0	18	0	16	16	16
99	18	24	16	30	16	24



Preglednica C.6: Trdnostni razredi za deske (optimalno razvrščanje je navedeno dvakrat: za razrede C30-C24-C18 in razrede C30-C24-C16)

Št. deske	C30-C24-C18	Raz-TNO	C30-C24-C16	Viz-TNO	Viz-BF	Raz- $E_{DIN}$ -BF
1	30	24	30	24	24	24
2	30	35	30	24	16	30
3	18	30	16	24	0	30
4	30	24	30	16	16	30
5	0	0	0	16	0	16
6	30	18	30	24	16	24
7	30	35	30	16	16	30
8	30	35	30	24	16	30
9	30	18	30	24	24	16
10	18	30	16	24	0	30
11	0	24	16	24	16	16
12	30	30	30	24	24	30
13	30	24	30	24	0	24
14	30	18	30	24	16	24
15	0	18	0	24	0	16
16	24	24	24	24	0	30
17	30	24	30	16	0	24
18	30	35	30	16	24	30
19	24	18	24	24	16	24
20	30	24	30	16	24	30
21	30	18	30	30	0	16
22	18	18	16	16	0	16
23	0	18	16	24	16	16
24	0	0	0	24	0	0
25	30	30	30	16	24	30
26	30	24	30	24	24	30
27	30	35	30	24	0	30
28	30	0	30	24	24	16
29	0	30	16	24	16	30
30	30	18	30	0	30	24
31	30	30	30	16	16	30
32	0	0	0	16	16	16
33	30	35	30	24	24	30
34	30	18	30	24	0	16
35	30	18	30	24	16	16
36	30	30	30	24	0	30
37	24	24	24	24	24	30
38	0	18	0	16	0	16
39	18	18	16	24	16	24
40	30	35	30	24	16	30
41	24	0	24	24	16	16
42	18	0	16	24	0	16
43	30	30	30	24	30	30
44	30	24	30	24	16	30
45	30	24	30	24	16	24
46	30	30	30	24	24	30
47	30	30	30	24	24	30
48	24	18	24	16	16	24

se nadaljuje...

... nadaljevanje

49	30	30	30	24	16	30
50	24	18	24	24	16	24
51	30	24	30	24	16	30
52	30	24	30	24	24	30
53	24	18	24	24	0	24
54	30	35	30	24	16	30
55	0	18	16	16	0	16
56	18	24	16	24	0	24
57	30	24	30	24	24	30
58	24	30	24	24	16	30
59	24	24	24	24	30	30
60	30	18	30	24	24	16
61	24	30	24	24	24	30
62	30	30	30	30	16	30
63	0	24	16	16	16	24
64	30	30	30	0	24	30
65	18	18	16	30	16	16
66	30	18	30	24	16	24
67	30	18	30	24	30	16
68	30	35	30	24	30	30
69	30	18	30	30	16	16
70	24	24	24	30	24	24
71	30	18	30	24	16	16
72	18	30	16	24	24	30
73	24	24	24	24	16	30
74	30	35	30	24	30	30
75	24	0	24	30	0	16
76	30	24	30	24	24	30
77	30	30	30	24	24	30
78	30	24	30	24	16	30
79	30	18	30	24	24	24
80	30	18	30	16	16	16
81	18	0	16	24	16	16
82	30	30	30	24	24	30
83	30	30	30	24	16	30
84	18	30	16	24	0	30
85	18	0	16	24	16	16
86	30	35	30	30	0	30
87	30	30	30	24	24	30
88	24	24	24	24	24	30
89	30	0	30	30	16	0
90	30	18	30	24	0	16
91	24	18	24	24	24	16
92	30	24	30	24	24	30
93	30	24	30	30	24	24
94	30	30	30	30	24	30
95	30	30	30	24	24	30
96	24	18	24	24	0	16
97	24	18	24	24	16	16
98	30	24	30	30	0	30
99	30	18	30	16	0	16