

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. 2012. Razvrščanje konstrukcijskega lesa v različne kombinacije trdnostnih razredov. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Turk, G., somentor Pazlar, T.): 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. 2012. Razvrščanje konstrukcijskega lesa v različne kombinacije trdnostnih razredov. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Turk, G., co-supervisor Pazlar, T.): 66 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidat:

MITJA PLOS

**RAZVRŠČANJE KONSTRUKCIJSKEGA LESA V
RAZLIČNE KOMBINACIJE TRDNOSTNIH RAZREDOV**

Diplomska naloga št.: 3241/KM

**STRENGTH GRADING OF STRUCTURAL TIMBER IN
DIFFERENT GRADE COMBINATIONS**

Graduation thesis No.: 3241/KM

Mentor:

prof. dr. Goran Turk

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor:

dr. Tomaž Pazlar

Član komisije:

doc. dr. Alma Zavodnik Lamovšek

prof. dr. Boštjan Brank

Ljubljana, 20. 09. 2012

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **MITJA PLOS** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
**»RAZVRŠČANJE KONSTRUKCIJSKEGA LESA V RAZLIČNE KOMBINACIJE
TRDNOSTNIH RAZREDOV«**

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.
Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 12.9.2012

Mitja Plos

POPRAVKI:**Stran z napako****Vrstica z napako****Namesto****Naj bo**

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.011.1:691.11(043.2)
Avtor:	Mitja Plos
Mentor:	prof. dr. Goran Turk
Somentor:	dr. Tomaž Pazlar
Naslov:	Razvrščanje konstrukcijskega lesa v različne kombinacije trdnostnih razredov
Tip dokumenta:	Diplomska naloga - univerzitetni študij
Obseg in oprema:	66 str., 28 pregl., 39 sl., 21 en.
Ključne besede:	nedestruktivne metode, konstrukcijski les, razvrščanje, trdnostni razredi

Izvleček:

V gradbeništvu je dobro poznavanje vgrajenega materiala zelo pomembno pri statičnih izračunih. Lastnosti kosa lesa se lahko razlikujejo glede na rastišče, glede na hlod in glede na razrez. Zato je treba vsak kos lesa pregledati posebej. Temu pregledovanju rečemo razvrščanje na osnovi nedestruktivnih meritev. V našem primeru razvrščamo v trdnostne razrede. Evrokod 5 se sklicuje na standard EN 14081, ki dopušča vizualno in strojno razvrščanje. Z namenom ugotovitve razlik med obema, smo naredili več meritev in jih primerjali. Opisali smo več nedestruktivnih metod, ki smo jih uporabili (vizualno razvrščanje, vzdolžno širjenje valov, ultrazvok, upogibni preizkus in vzdolžno nihanje). Vse nedestruktivne metode smo primerjali s trdnostjo, pridobljeno s porušno metodo. Naredili smo nekaj korelacij in jih ovrednotili. Preizkušance smo na podlagi standarda optimalno razvrstili v trdnostne razrede in te primerjali s trdnostnimi razredi, dobljenimi z nekaterimi nedestruktivnimi metodami. Preizkusili smo tudi prototip naprave, razvite med projektom, in jo primerjali z ostalimi napravami ter z vizualnim standardom. Naprava se je dobro izkazala. Ob predpostavki, da je naš vzorec reprezentativen za Slovenijo, lahko zaključimo, da spada večina slovenskega lesa v trdnostni razred C30. Glede na to, da se v praksi pri projektiranju še vedno večinoma uporablja stara oznaka iz JUS standardov, II. klasa oziroma današnja C24, je projektiranje kljub nepoznavanju dejanskih lastnosti lesa na zelo varni strani. Nikakor pa ni ekonomično, saj vgrajen les ni dovolj izkoriščen. Ob uporabi naprav za razvrščanje hitro ugotovimo, da lahko brez večjih ostankov pri razvrščanju pri projektiranju uporabljamo trdnostni razred C30.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 624.011.1:691.11(043.2)

Author: Mitja Plos

Supervisor: Prof. Goran Turk, Ph.D.

Co-Supervisor: Tomaž Pazlar, Ph.D.

Title: Strength grading of structural timber in different grade combinations

Document type: Graduation Thesis - University studies

Notes: 66 p., 28 tab., 39 fig., 21 eq.

Key words: non-destructive methods, strength grading, structural timber

Abstract:

Good knowledge of the characteristics of building material is of the utmost importance in static calculations in civil engineering. The characteristics of a piece of timber may vary depending on the growth area, log, and cutting. Therefore, each piece of timber should be examined separately. The examination is based on non-destructive testing, distinguishing – as in our case – between different strength grades. Eurocode 5 refers to the EN 14081 standard, which allows visual and machine grading. In order to identify the differences between the two, we carried out several measurements and compared them. We used several non-destructive methods (visual grading, longitudinal wave propagation, ultrasound, bending test and longitudinal frequency). Results of each non-destructive method were compared to the bending strength obtained with the destruction method. We made some correlations and evaluated them. The specimens were classified into optimal strength grades and the results compared with strength grades obtained by selected non-destructive methods. We also tested a prototype device developed during the project and compared it with other devices and visual standards. The device did well. Assuming that our sample is representative for Slovenia, we can conclude that the majority of Slovene timber can be classified into strength grade C30. Considering that in civil engineering the mark most widely used in practice is the old mark from the JUS Standard – class II or today's C24 –, structural design is on the safe side despite the lack of knowledge concerning the actual characteristics of wood. However, this is certainly not economical, since the timber is not used to its full potential. With the use of grading machines, most construction timber can be classified into strength grade C30 without major reject.

ZAHVALA

KAZALO VSEBINE

1. UVOD	1
2. NEDESTRUKTIVNO RAZVRŠČANJE.....	3
2.1 Metode nedestruktivnega razvrščanja.....	3
2.1.1 Vizualno razvrščanje	4
2.1.2 Delež ploščin grč - KAR	6
2.1.3 Ultrazvočna metoda.....	8
2.1.4 Metoda vzdolžnega nihanja.....	9
2.1.5 Metoda statičnega modula elastičnosti	10
2.1.6 Rentgen.....	12
2.2 Proizvajalci in naprave.....	12
2.2.1 Timber Grader MTG	12
2.2.2 ViSCAN	15
2.2.3 GoldenEye.....	18
2.2.4 E-Scan	20
2.2.5 CombiScan	23
2.2.6 TRIOMATIC.....	25
2.2.7 AU 2000	27
2.2.8 Naprava GT-PRO razvita v okviru projekta ARRS: Razvrščanje lesenih konstrukcijskih elementov po trdnosti.....	29
3. MERJENJE.....	31
3.1 KAR.....	31
3.2 Vlažnost	32
3.3 Masa.....	33
3.4 Gostota	33
3.5 Statični modul elastičnosti	33
3.6 Trdnost.....	36
4. ANALIZA REZULTATOV MERITEV	39
4.1 Korelacije.....	40
4.1.1 Korelacije količin, izmerjenih z nedestruktivnimi in destruktivno metodo.....	40
4.1.2 Korelacije med posameznimi indikativnimi lastnostmi naprav.....	50
4.2 Razvrščanje v trdnostne razrede in cenovne matrike.....	52
4.2.1 Trdnostni razredi	52

4.2.2	Frekvenčne matrike	55
4.2.3	Globalne cenovne matrike.....	57
4.2.4	Karakteristične vrednosti dodeljenih razredov.....	58
4.2.5	Primerjava rezultatov vizualnega razvrščanja in naprave GT-PRO.....	60
5.	ZAKLJUČEK.....	63
VIRI	65

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1: Kriteriji razvrščanja po vizualnem standardu DIN 4074-1:2008 za tramove ter deske in plohe, ki so pretežno upogibno obremenjeni po robu.....	5
Preglednica 2.2: Kriteriji za razvrščanje v trdnostne razrede po BS 4978	7
Preglednica 4.1: Korelacije za skupino elementov 140×140 mm med indikativnimi lastnostmi, dobljenimi z različnimi nedestruktivnimi metodami, in odločilnimi lastnostmi, ki določajo trdnostne razrede	41
Preglednica 4.2: Korelacije za skupino elementov 40×100 mm med indikativnimi lastnostmi, dobljenimi z različnimi nedestruktivnimi metodami, in odločilnimi lastnostmi, ki določajo trdnostne razrede	42
Preglednica 4.3: Korelacije za skupino elementov 44×210 mm med indikativnimi lastnostmi, dobljenimi z različnimi nedestruktivnimi metodami, in odločilnimi lastnostmi, ki določajo trdnostne razrede	43
Preglednica 4.4: Korelacije za skupino elementov 50×150 mm med indikativnimi lastnostmi, dobljenimi z različnimi nedestruktivnimi metodami, in odločilnimi lastnostmi, ki določajo trdnostne razrede	44
Preglednica 4.5: Korelacije za vse skupine skupaj med indikativnimi lastnostmi, dobljenimi z različnimi nedestruktivnimi metodami, in odločilnimi lastnostmi, ki določajo trdnostne razrede (korelacije za MOR_2 , MOR_3 in $dens_3$ ne veljajo za trame -140×140 mm)	45
Preglednica 4.6: Korelacije za vse skupine med indikativnimi lastnostmi, dobljenimi z različnimi nedestruktivnimi metodami, in trdnostjo (pri tramih -140×140 mm ni podatkov za MOR_2 , MOR_3 in $dens_3$)	46
Preglednica 4.7: Korelacije za vse skupine med indikativnimi lastnostmi, dobljenimi z različnimi nedestruktivnimi metodami, in globalnim modulom elastičnosti (pri tramih -140×140 mm ni podatkov za MOR_2 , MOR_3 in $dens_3$)	48
Preglednica 4.8: Korelacije za vse skupine med indikativnimi lastnostmi, dobljenimi z različnimi nedestruktivnimi metodami, in gostoto (pri tramih -140×140 mm ni podatkov za MOR_2 , MOR_3 in $dens_3$)	49
Preglednica 4.9: Korelacije za vse skupine med indikativno lastnostjo gostote naprave 4 ($dens_4$) in odločilnimi lastnostmi	49
Preglednica 4.10: Korelacije modulov elastičnosti za vse elemente	50
Preglednica 4.11: Korelacije vseh trdnosti za vse elemente	51
Preglednica 4.12: Korelacije gostot za vse elemente	51
Preglednica 4.13: Korelacije meritev frekvenc lastnega vzdolžnega nihanja za vse elemente	51
Preglednica 4.14: Zahtevane lastnosti za posamezne razrede po SIST EN 338	52
Preglednica 4.15: Optimalne razvrstitve elementov v različne kombinacije trdnostnih razredov po standardu SIST EN 338	54
Preglednica 4.16: Optimalne razvrstitve elementov v različne kombinacije trdnostnih razredov po standardu SIST EN 338 v odstotkih	55
Preglednica 4.17: Frekvenčna matrika sortiranja po vizualnem standardu DIN 4074-1:2003 za kombinacijo C30-C24-C18	56
Preglednica 4.18: Frekvenčna matrika naprave GT-PRO za kombinacijo C30-C24-C18	56
Preglednica 4.19: Frekvenčna matrika naprave GT-PRO za kombinacijo C35-C24	57
Preglednica 4.20: Osnovna cenovna matrika za izbrane razrede (EN 14081-2)	57
Preglednica 4.21: Globalna cenovna matrika naprave GT-PRO za kombinacijo C35-C24	58
Preglednica 4.22: Karakteristične vrednosti razredov razvrščenih po vizualnem standardu DIN 4074-1:2003 za kombinacijo C30-C24-C18	58
Preglednica 4.23: Karakteristične vrednosti razredov naprave GT-PRO za kombinacijo C30-C24-C18	59

Preglednica 4.24: Karakteristične vrednosti razredov naprave GT-PRO za kombinacijo C35-C24.	59
Preglednica 4.25: Minimalne spremenjene zahtevane karakteristične vrednosti razredov za vizualno razvrščanje	59
Preglednica 4.26: Minimalne spremenjene zahtevane karakteristične vrednosti razredov za strojno razvrščanje	60

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Delež ploščin grč - KAR (BS 4978).....	6
Slika 2.2: Skupni delež ploščin grč - TKAR in robni delež ploščin grč - MKAR	7
Slika 2.3: Shematski prikaz delovanja ultrazvočne metode	8
Slika 2.4: Shematski prikaz merjenja hitrosti ultrazvočnega preleta s strani	9
Slika 2.5: Shematski prikaz delovanja metode vzdolžnega nihanja	10
Slika 2.6: Prostoležeči nosilec obremenjen s točkovno silo F.....	11
Slika 2.7: Shematski prikaz delovanja upogibne naprave v tekočem traku	11
Slika 2.8: Slika upogibne naprave M 7200 (Metriguard).....	11
Slika 2.9: Fotografije naprave Timber Grader MTG.....	13
Slika 2.10: Meritev naprave Timber Grader MTG z uporabo ročnega kladiva (za večje kose).....	14
Slika 2.11: Prikaz izpisa meritve z napravo Timber Grader MTG.....	14
Slika 2.12: Naprava ViSCAN za umestitev v proizvodno linijo (MiCROTEC).....	15
Slika 2.13: Prikaz izpisa meritve naprave ViSCAN.....	16
Slika 2.14: Prenosna naprava ViSCAN.....	17
Slika 2.15: Shema naprave GoldenEye	18
Slika 2.16: Shematski prikaz senzorjev naprave GoldenEye	19
Slika 2.17: Naprava GoldenEye nameščena v proizvodno linijo	20
Slika 2.18: Naprava E-Scan, Cluny, Francija.....	21
Slika 2.19: Prikaz izpisa meritve naprave E-Scan (www.luxscan.com, 1. 5. 2011).....	22
Slika 2.20: Prikaz laserske meritve smeri vlaken naprave CombiScan.....	23
Slika 2.21: Naprava CombiScan.....	24
Slika 2.22: Primer označevanja delov lesa za odstranitev	25
Slika 2.23: Prikaz razreza lesa glede na kvaliteto (rezultat meritev naprave CombiScan)	25
Slika 2.24: Meritev hitrosti ultrazvočnega preleta z napravo Triomatic, Gent, Belgija.....	26
Slika 2.25: Meritev vlažnosti z napravo Triomatic, Gent, Belgija	27
Slika 2.26: Naprava AU 2000	28
Slika 2.27: Merilni senzor naprave AU 2000 s koničnim nastavkom za les in brez njega.....	28
Slika 2.28: Meritev z napravo GT-PRO	30
Slika 3.1: Lega in območje meritev TKAR.....	31
Slika 3.2: Uporovni vlagomer M 4050 proizvajalca GANN (Tomaž Pazlar, ZAG).....	32
Slika 3.3: Skica položaja merjenja po standardu SIST EN 13183-2	33
Slika 3.4: Postavitev preizkusa za določitev lokalnega in globalnega modula elastičnosti po standardu SIST EN 408.....	34
Slika 3.5: Postavitev preizkusa za določitev globalnega modula elastičnosti	35

Slika 3.6: Postavitev dejanskega preizkusa za določitev lokalnega modula elastičnosti	36
Slika 3.7: Primer porušitve (vzorec 2961 dimenzij 140 × 140 mm)	37
Slika 3.8: Graf porušitve vzorca 2961, dimenzij 140 × 140 mm.	37
Slika 4.1: Grafična primerjava koeficientov determinacije po skupinah med indikativnimi lastnostmi, dobljenimi z različnimi nedestruktivnimi metodami, in trdnostjo (pri tramih - 140 × 140 mm ni podatkov za MOR ₂ , MOR ₃ in dens ₃).....	47
Slika 4.2: Primerjava med optimalnim razvrščanjem in razvrščanjem z napravo GT-PRO za kombinacijo C35-C24.....	61
Slika 4.3: Primerjava med optimalnim razvrščanjem, razvrščanjem z napravo GT-PRO in razvrščanjem z vizualnim standardom SIST DIN 4074-1 za kombinacijo C30-C24-C18	60

1. UVOD

Slovenija je ena izmed bolj gozdnatih dežel sveta, saj več kot polovico površin prekrivajo gozdovi. Les se v gradbeništvu v primerjavi z ostalimi materiali uporablja razmeroma malo, vendar pa v zadnjih letih, ob vse večjem ekološkem osveščanju, njegova uporaba raste.

V gradbeništvu je dobro poznavanje vgrajenega materiala zelo pomembno pri statičnih izračunih. Od poznavanja materiala so odvisni tudi varnostni faktorji pri izračunih. Zaradi velike nezanesljivosti pri določitvi lastnosti je varnostni faktor določen v družini standardov Evrokod za material pri lesu relativno velik.

Lastnosti kosa lesa se lahko razlikujejo glede na rastišče, glede na hlod in glede na razrez. Ko govorimo o masivnem žaganem lesu, je praktično nemogoče upoštevati vse dejavnike in z zadovoljivo gotovostjo določiti lastnosti nekega kosa lesa. Zato je potrebno vsak kos lesa pregledati posebej. Temu pregledovanju rečemo razvrščanje na osnovi nedestruktivnih meritev. V našem primeru razvrščamo v trdnostne razrede.

Stanje glede razvrščanja žaganega lesa v evropski uniji je nezadovoljivo, saj se kljub zakonskim obvezam, ki ponekod veljajo že nekaj let, ne razvršča. Podobno je tudi v Sloveniji, kjer je trenutno ena sama žaga, ki razvršča konstrukcijski les po zahtevah standarda SIST EN 14080 in ima za to pridobljen EC certifikat.

Zaradi nepoznavanja lesa se lesene konstrukcije pogosto predimenzionirajo. Les ima sicer zelo visoko upogibno trdnost glede na lastno težo, kar pomeni, da je idealen za gradnjo na potresnem območju. Zaradi krčenja lesa pri sušenju, še posebej, če vgradimo moker les, je potrebno posebno paziti pri stikanju elementov.

V Evropski uniji se od leta 2005 (v Sloveniji od leta 2006) dalje za razvrščanje masivnega žaganega konstrukcijskega lesa uporablja standard EN 14081:2005 (s štirimi deli). Poleg dejstva, da gre za harmoniziran standard se nanj sklicuje tudi Evrokod 5, torej je obvezen za vse lesene elemente, ki so zajeti v statičnem izračunu kot nosilni elementi in računani po Evrokodu 5. Evrokod 5 predpisuje pravilnik o mehanski odpornosti in stabilnosti.

Standard dopušča dve možnosti razvrščanja vizualno in strojno. Pri vizualnem razvrščanju je potrebno razvrščati po enem izmed nacionalnih vizualnih standardov, ki so navedeni v standardu EN 1912:2010, kjer je za vsakega izmed njih navedeno, za katere vrste lesa, iz katere države in razvrščanje, v katere trdnostne razrede se ga sme uporabiti.

Pri strojnem razvrščanju se sme uporabljati zgolj naprave, ki so navedene v četrtem delu standarda EN 14081-4, kjer so navedene tudi njihove nastavitve in države, iz katerih les smemo razvrščati z njimi ter tudi kombinacije trdnostnih razredov, v katere smemo razvrščati.

Trenutno se lahko od slovenskih vrst lesa razvršča bor, jelko in smreko. Razvrščamo lahko v razrede C30, C24, C18, C16 z dvema vizualnima standardoma. Poleg teh razredov pa lahko z nekaterimi napravami, ki se smejo uporabljati pri razvrščanju slovenskega konstrukcijskega lesa, razvrščamo še v višja razreda C35 in C40. Ostalih vrst lesa iz Slovenije po trenutnih standardih ni mogoče razvrščati v trdnostne razrede in jih tudi ne bi smeli uporabljati kot konstrukcijski les brez laboratorijskih meritev mehanskih lastnosti.

V nadaljevanju bomo opisali nekaj različnih metod za razvrščanje in nekaj naprav za razvrščanje. Kasneje bomo opisali potek raziskave in podali analizo rezultatov raziskave.

2. NEDESTRUKTIVNO RAZVRŠČANJE

Materiali, ki se uporabljajo v gradbeništvu imajo zelo natančno določene fizikalne lastnosti. Točno poznavanje lastnosti materialov, kot je na primer trdnost, je izredno pomembno pri izdelavo pravilnega statičnega izračuna konstrukcije in s tem zagotovitev varne uporabe objektov.

V nasprotju z nekaterimi drugimi materiali, kot sta na primer jeklo ali beton, je lastnosti lesa težje določiti, saj je les nehomogen anizotropen material občutljiv na vlažnost. V primeru betona, se kontrolira receptura ob postavitvi proizvodnje, med obratovanjem proizvodnje (periodično, večkrat letno) in celo med vgradnjo na samih objektih.

Od preklica večine jugoslovanskih JUS standardov leta 1995, ko je bil preklican tudi do takrat pri nas edini priznan standard za vizualno razvrščanje JUS U.D0.001:1983, pa vse do leta 2009 v Sloveniji nismo imeli slovenskega standarda za razvrščanje. Z vstopom v Evropsko unijo leta 2004, so v Sloveniji začeli veljati evropski standardi. Od leta 2009 imamo v Sloveniji privzeti nemški standard SIST DIN 4074-1:2009 Razvrščanje lesa po trdnosti – 1. Del: Žagani les iglavcev.

Vse od vstopa v Evropsko unijo dalje veljajo harmonizirani evropski standardi tudi v Sloveniji. Od 31.12.2011 se je končalo prehodno obdobje med še dovoljeno uporabo nacionalnih standardov za razvrščanje in obvezno uporabo harmoniziranega evropskega standarda EN 14081-1:2005. Prehodno obdobje je trajalo kar šest let, vendar pa v Sloveniji ta čas nismo imeli nacionalnega standarda, kar pomeni, da bi morali že šest let razvrščati po evropskem standardu.

Od leta 2006 dalje bi morali sleherni kos lesa, vgrajen kot nosilni konstrukcijski element, razvrstiti v trdnostni razred in označiti s CE oznako. Trenutno ima v Sloveniji EC certifikat za žagan les zgolj ena žaga in trije proizvajalci lepljenih nosilcev.

2.1 Metode nedestruktivnega razvrščanja

V poglavju opišemo nekaj najbolj razširjenih nedestruktivnih metod. Pri metodah za strojno razvrščanje naprave izmerijo tako imenovano indikativno lastnost (IP - indicating property). Preko predhodnih testov in potrjevanj je poznana empirična povezava med indikativno lastnostjo in

trdnostnim razredom. Naprednejše in bolj sofisticirane naprave lahko v empirični povezavi do razreda upoštevajo več IP-jev in tako večajo zanesljivost razvrstitve.

2.1.1 Vizualno razvrščanje

Vizualno razvrščanje je najstarejši način razvrščanja masivnega žaganega lesa po trdnosti. S časom so ugotovili določene vzorce ponavljanja in določili pravila, ki so jih podajali skozi generacije. Danes ta pravila za vizualno ocenjevanje poznamo v obliki standardov za vizualno razvrščanje (britanski BS 4978, skandinavski INSTA 142, nemški DIN 4074-1, francoski NF B 52-001, kanadski NLGA, standard združenih držav Amerike NGRDL idr.). Sprva so na evropskem komiteju za standardizacijo načrtovali sprejeti enotni standard za vizualno razvrščanje, ki bi veljal na celotnem območju evropske unije, vendar so projekt zaradi prevelikega odpora držav z že uveljavljenimi lastnimi standardi in tradicijo vizualnega razvrščanja opustili. Zaradi različnosti standardov se pri primerjavah raziskav najpogosteje uporablja metoda deleža ploščin grč KAR (angleško: »knot area ratio«), ki je podrobneje opisana v naslednjem poglavju.

Zaradi tradicionalne navezanosti na Avstrijo in Nemčijo je slovenski vizualni standard SIST DIN 4074-1:2009 Razvrščanje lesa po trdnosti – 1. Del: Žagani les iglavcev pravzaprav privzeti nemški standard DIN 4074-1:2008, ki pa uradno še ni preveden v slovenščino.

V Sloveniji se sicer sme za razvrščanje konstrukcijskega smrekovega lesa v trdnostne razrede uporabljati zgoraj omenjena nemški in britanski standard.

Standard SIST DIN 4074-1:2009 razvršča konstrukcijski les v tri razrede: S7, S10 in S13. Prevedbo iz vizualnih razredov v trdnostne razrede določa standard SIST EN 1912.

Preglednica 2.1: Kriteriji standarda za vizualno razvrščanje DIN 4074-1:2008 za tramove ter deske in plohe, ki so pretežno upogibno obremenjeni po robu

Značilnosti razvrščanja	Vizualni razredi		
	S7, S7K	S10, S10K	S13, S13K
1. Grče	do 3/5	do 2/5 ^a	do 1/5
2. Naklon vlaken	do 12 %	do 12 %	do 7 %
3. Stržen	dovoljen	dovoljen	ni dovoljen ^b
4. Širina branike - splošno - duglazija	do 6 mm do 8 mm	do 6 mm do 8 mm	do 4 mm do 6 mm
5. Razpoke - zaradi krčenja ^c - zaradi strele, kolesivost	do 1/2 ni dovoljeno	do 1/2 ni dovoljeno	do 2/5 ni dovoljeno
6. Lisičavost	do 1/4	do 1/4	do 1/5
7. Ukrivljenost^c - vzdolžna ukrivljenost - zvitost	do 8 mm 1 mm / 25 mm širine	do 8 mm 1 mm / 25 mm širine	do 8 mm 1 mm / 25 mm širine
8. Obarvanost, trohnoba¹ - modrikavost - rjave in rdeče proge - rjava in bela trohnoba	dovoljena do 2/5 ni dovoljena	dovoljena do 2/5 ni dovoljena	dovoljena do 1/5 ni dovoljena
9. Kompresijski les	do 2/5	do 2/5	do 1/5
10. Obžrtost zaradi žuželk	dopustni rovi premera do 2 mm		
11. Ostale značilnosti	je potrebno smiselno upoštevati		
^a pri smreki in duglaziji do 1/2 pri širini branik do 4 mm pri smreki in 5 mm pri duglaziji. Delež v pošiljki (partiji) ne sme preseči 25 %.			
^b pri tramovih s širino > 120 mm dovoljen			
^c pri lesu, ki se ne razvršča v suhem stanju, značilnosti ne upoštevamo			

Prevedbe za Slovenijo so trenutno sprejete za vizualna razreda S10 in S7. Prevedemo ju v trdnostna razreda C24 (S10) in C18 (S7). Veljajo pa za smreko.

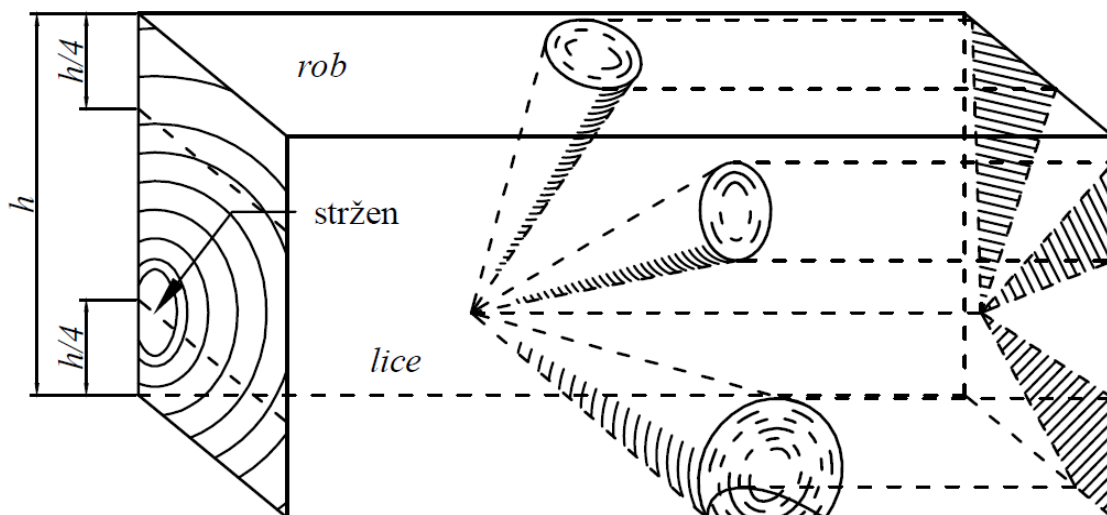
Najbolj vplivni kriteriji standarda SIST DIN 4074-1:2009 za razvrščanje v vizualne razrede so: velikost grč, naklon vlaken, prisotnost stržena in širina branike. Standard navaja različne kriterije za različne dimenzije, vrsto rabe in smer obremenitve. Kriteriji, podani v preglednici 2.1, so namenjeni tramom in pokončno postavljenim deskam ter plohom. Pokončno postavljene deske in plohe razvrščamo v razrede S 7K, S 10K in S 13K. V standardu sta še preglednica s kriteriji za letve in preglednica za deske ter plohe, ki niso postavljeni pokončno.

2.1.2 Delež ploščin grč - KAR

Upogibno nosilnost lesa v veliki meri določajo grče. Delež grč v prerezu močno zmanjšuje upogibno trdnost, saj grče ne prevzemajo nateznih sil. Metoda KAR (angleško: »knot area ratio«), ki jo v slovenščino lahko prevedemo kot delež ploščin grč, je še en vizualni način za določitev trdnostnih lastnosti. Velja za najbolj običajen način vizualnega razvrščanja v raziskovalne namene. Metoda je del britanskega standarda za vizualno razvrščanje, v Združenih državah Amerike pa se uporablja za vizualno kontrolo pri strojnem razvrščanju. Če želimo metodo izvajati z natančnim merjenjem, je dokaj zamudna, če pa bi jo želeli izvajati brez točnih meritev, bi bilo to skoraj neizvedljivo, saj si je velikost grč v prerezu in razmerja ploščin težko predstavljati.

Metodo KAR je moč zaslediti v britanskem standardu za vizualno razvrščanje BS 4978 Visual strength grading of softwood. V standardu je za določitev trdnostnih razredov potrebno določiti dva deleža ploščin grč, MKAR (»margin knot area ratio«), ki bi ga v slovenščini lahko imenovali robni delež ploščin grč, in TKAR (»total knot area ratio«) oziroma skupni delež ploščin grč.

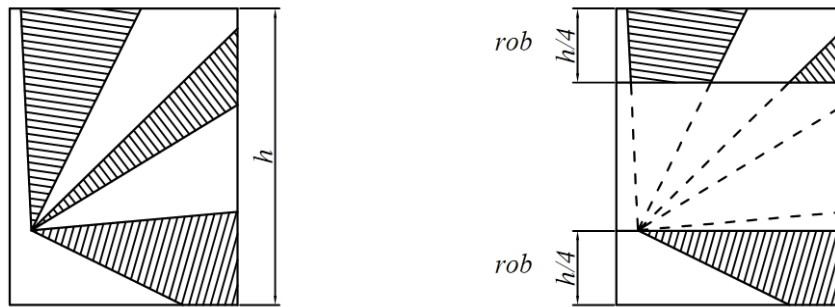
TKAR predstavlja delež ploščine prereza grč glede na ploščino prereza, kot je prikazano na sliki 2.2.



Slika 2.1: Delež ploščin grč - KAR (BS 4978)

Pri računu deleža se upoštevajo zgolj grče znotraj enega venca. Za določitev trdnostnih razredov po standardu BS 4978 potrebujemo še podatek MKAR.

Kot je prikazano na sliki 2.2, se pri določevanju MKAR opazuje deleže ploščin grč v natezni ali tlačni četrtini prereza.



Slika 2.2: Skupni delež ploščin grč - TKAR in robni delež ploščin grč - MKAR

Po standardu BS 4978 se razvršča v dva trdnostna razreda, GS (general structural grade) in SS (special structural grade). Zahteve za razvrščanje kosov lesa na podlagi izmerjenih MKAR in TKAR so razvidne s preglednice 2.2.

Preglednica 2.2: Kriteriji za razvrščanje v trdnostne razrede po BS 4978

	MKAR	TKAR
SS	$< 1/2$	$< 1/3$
SS	$1/2 >$	$< 1/2$
GS	$< 1/2$	$< 1/5$
GS	$1/2 >$	$< 1/3$

	TKAR			
MKAR	$< 1/5$	$< 1/3$	$< 1/2$	$> 1/2$
$< 1/2$		SS	GS	odpadek
$> 1/2$	SS	GS	odpadek	

Nekatere naprave za strojno razvrščanje merijo tudi velikost grč oziroma nekaj podobnega KAR, vendar je točen način delovanja skrbno varovan. Lahko predpostavimo, da so tovrstne naprave sposobne izdelati natančno tri dimenzionalno sliko grč, ki lahko ponudi dobre povezave s trdnostjo oziroma trdnostnimi razredi.

2.1.3 Ultrazvočna metoda

Trenutno najbolj razširjeni metodi strojnega razvrščanja sta ultrazvočna metoda in metoda vzdolžnega nihanja. Ultrazvočna metoda deluje na principu hitrosti širjenja valovanja, v tem primeru ultrazvočnega. Hitrost potovanja valov oziroma zvoka je sorazmerna z gostoto medija. Tako je hitrost zvoka v zraku okoli 340 m/s, v lesu pa od 3300 do 3900 m/s.

Naprave, ki delujejo na podlagi ultrazvočne metode, merijo čas preleta oziroma čas potovanja zvoka od oddajnika do sprejemnika Δt . Ob poznavanju dolžine elementa l , lahko hitrost v izračunamo po enačbi

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

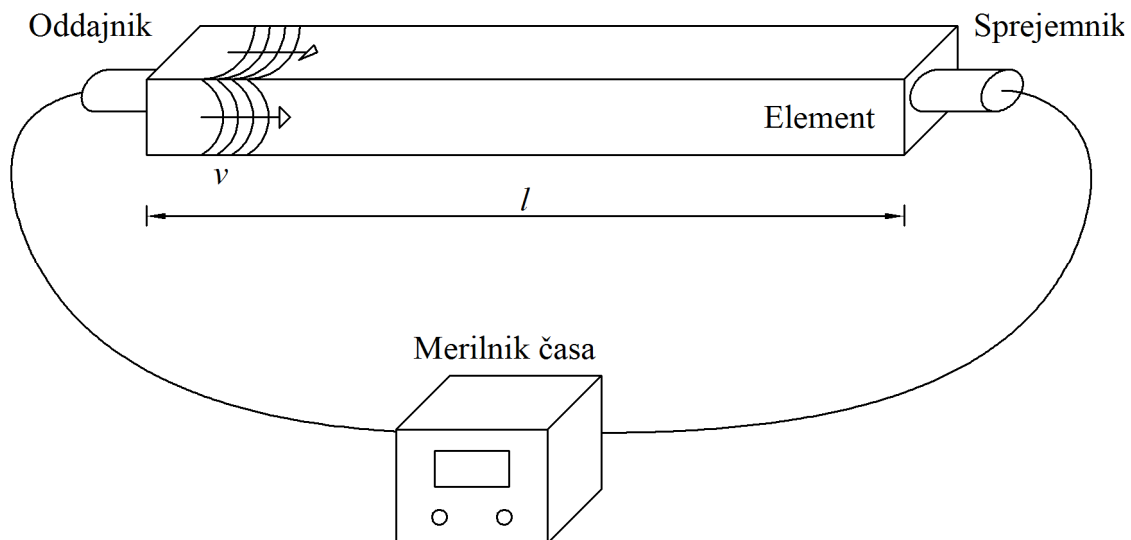
Dinamični modul elastičnosti izračunamo po enačbi

$$E_{\text{dyn}} = \rho v^2, \quad (2.2)$$

kjer je

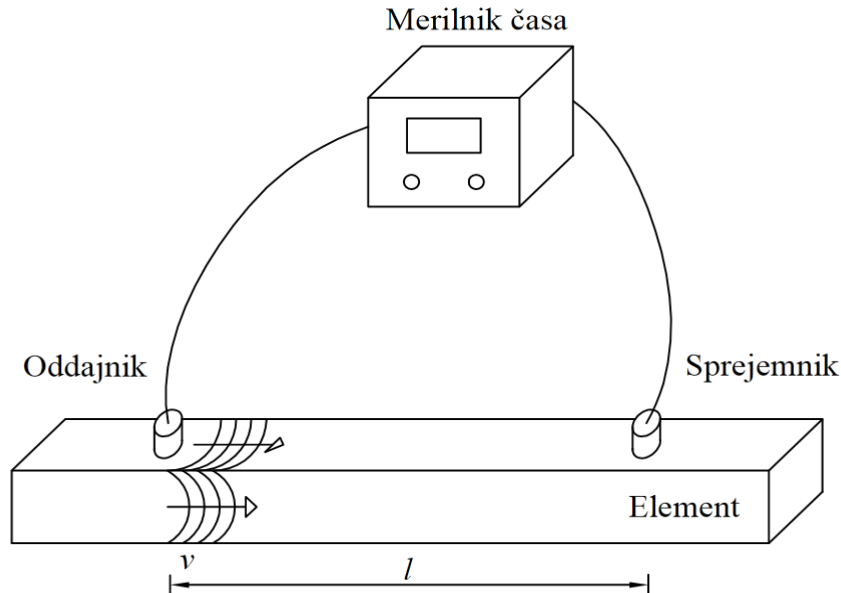
ρ gostota lesa,

ki jo dobimo z merjenjem dimenzij kosa lesa in tehtanjem. Za izračun dinamičnega modula elastičnosti se pri ultrazvočni metodi praviloma uporablja gostoto celega kosa lesa.



Slika 2.3: Shematski prikaz delovanja ultrazvočne metode

Meritve z ultrazvočnimi napravami ni potrebno opraviti na celotni dolžini kosov, temveč lahko s strani merimo tudi zgolj odseke. Tako lahko na primer izmerimo spodnji, dostopni del drevesa ali stoječega električnega droga.



Slika 2.4: Shematski prikaz merjenja hitrosti ultrazvočnega preleta s strani

2.1.4 Metoda vzdolžnega nihanja

Metoda vzdolžnega nihanja temelji na zvezi med lastnimi frekvencami in dinamičnim modulom elastičnosti. Kos lesa z udarcem kladiva vzbudimo v vzdolžno nihanje. Nihanje lahko merimo na različne načine. Poznamo naprave, ki merijo neposredno nihanje lesa s piezometričnimi senzorji ali laserskimi senzorji ter take z mikrofoni, ki nihanje lesa merijo posredno, preko nihanja zraka oziroma zvoka.

Opazujemo torej nihanje lesa in z nihajnega časa izračunamo lastno frekvenco nihanja f . Običajno opazujemo prvo lastno frekvenco, lahko pa bi opazovali tudi ostale, saj so te v poznanem razmerju s prvo. Valovna dolžina λ prve nihajne oblike je $2l$, valovne dolžine za vse oblike lahko izračunamo po enačbi

$$\lambda = \frac{2l}{n}, \quad (2.3)$$

kjer je

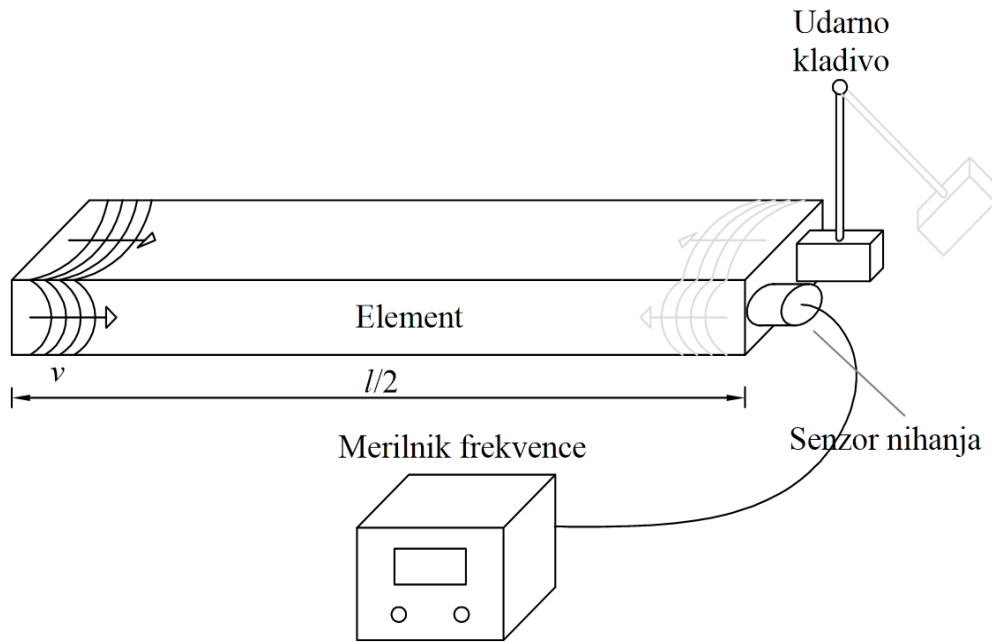
l dolžina kosa lesa,

n nihajna oblika (zaporedna številka nihajne oblike).

Način podpiranja pri vzdolžnem nihanju ni tako pomemben, če les ni na kakršen koli način vpet oziroma pritrjen. Ko poznamo lastno frekvenco nihanja in pripadajočo valovno dolžino, lahko hitrost valovanja v izračunamo po enačbi

$$v = \lambda f . \quad (2.4)$$

Dinamični modul elastičnosti izračunamo na enak način kot pri ultrazvočni metodi, po enačbi (2.2).



Slika 2.5: Shematski prikaz delovanja metode vzdolžnega nihanja

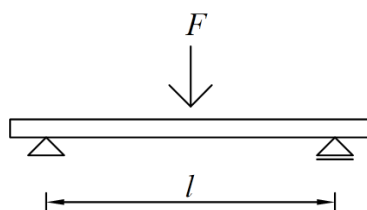
2.1.5 Metoda statičnega modula elastičnosti

Pri metodi statičnega modula elastičnosti kos lesa obremenimo z določeno silo znotraj elastičnega območja in merimo pomik, ki je pri tem nastal. Razmerje med silo in pomikom odvisno od dimenzij in modula elastičnosti je podano z enačbo

$$w = \frac{Fl^3}{48EI_y} , \quad (2.5)$$

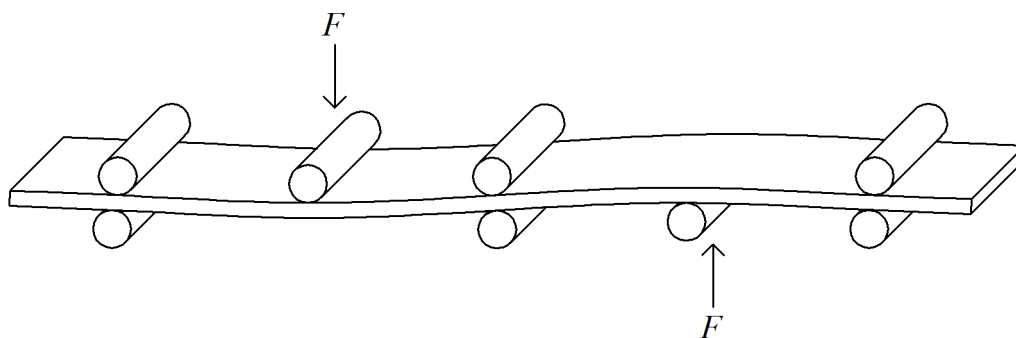
kjer so

- F sila na sredini razpona,
- l razdalja med podporami,
- E statični modul elastičnosti,
- I_y vztrajnostni moment.



Slika 2.6: Prostoležeči nosilec obremenjen s točkovno silo F

Stroji, ki razvrščajo po tej metodi, kos lesa vzdolžno pošljejo v napravo z obremenilnimi valji. Možna sta dva načina merjenja. Lahko imamo konstantno silo na valjih in merimo deformacije ali pa les vedno obremenimo do določene deformacije in merimo silo, ki je bila zato potrebna. Pogostejše je merjenje s konstantno silo.



Slika 2.7: Shematski prikaz delovanja upogibne naprave v tekočem traku

Naprave, ki delujejo na podlagi te metode, je najpogosteje najti v Severni Ameriki. Eden najbolj razširjenih proizvajalcev je podjetje Metriguard iz Združenih držav Amerike.



Slika 2.8: Slika upogibne naprave M 7200 (Metriguard)

2.1.6 Rentgen

Naprave, ki delujejo na principu rentgena, za določitev trdnostnega razreda potrebujejo predhodno meritev naprave, ki deluje na principu metode nihanja ali ultrazvočne metode. Običajno za izračune uporabljamo povprečno gostoto ali gostoto celotnega kosa lesa. Z rentgenskimi napravami pa lahko gostoto določimo bolj natančno, tako da upoštevamo grče. Tovrstne naprave kos lesa razdelijo na odseke z enako gostoto in za vsak odsek ločeno izračunajo dinamični modul elastičnosti.

Take naprave so zelo uporabne predvsem v proizvodnjah lepljenih nosilcev, vendar so zaradi za enkrat še zelo visoke cene dokaj redke.

2.2 Proizvajalci in naprave

Pri projektu Gradewood je sodelovalo pet različnih proizvajalcev naprav za strojno razvrščanje s skupaj sedmimi napravami. Poleg teh smo na Zavodu za gradbeništvo na preizkušancih uporabili še dve dodatni. Prototip naprave, namenjene razvrščanju lesa, in napravo, namenjeno nedestruktivnemu testiranju kamnov in betona.

2.2.1 Timber Grader MTG

Naprava Timber Grader MTG je produkt sodelovanja nizozemske raziskovalne organizacije TNO in nizozemskega podjetja Brookhuis, ki je sicer vodilni proizvajalec vlagomerov v lesni industriji. To je bila prva in do nedavnega edina naprava, s katero je bilo v Sloveniji dovoljeno strojno razvrščanje. Pogoj za uporabo naprave za razvrščanje slovenskega lesa je navedba v standardu SIST EN 14081-4:2009 Lesene konstrukcije - Razvrščanje konstrukcijskega lesa pravokotnega prečnega prereza po trdnosti - 4. del: Strojno razvrščanje - Nastavitve strojev za razvrščanje pri strojno kontroliranih sistemih. Naprave do danes ni kupil še noben slovenski žagarski obrat. Kupili pa so jo na Zavodu za gradbeništvo.

Naprava je zelo priročna, saj jo lahko držimo in z njo izvajamo meritve z eno roko. Pred meritvijo je potrebno vsak kos lesa položiti na dve podpori. Namenjena je predvsem manjšim žagam in deluje na principu metode vzdolžnega nihanja. Frekvenco oziroma nihanje lesa naprava meri s piezoelektričnim akcelerometrom, ki ga moramo prisloniti na preizkušanec, saj deluje na dotik. Za natančno določitev dinamičnega modula elastičnosti je preizkušance potrebno predhodno izmeriti in stehtati.



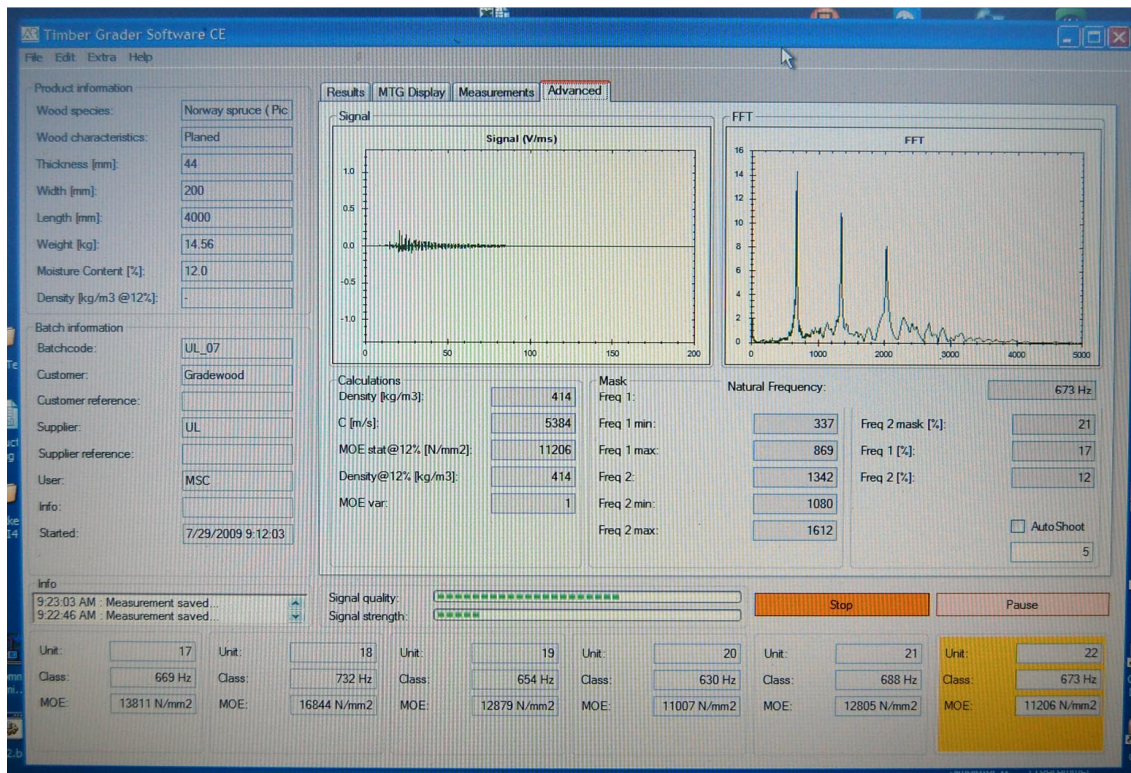
Slika 2.9: Fotografije naprave Timber Grader MTG

Za kose lesa manjših dimenzij ima naprava za vzbujanje nihanja vgrajeno majhno vzmetno udarno iglo (slika 2.8 – desno zgoraj). Pri večjih dimenzijah, kjer vzmetna igla nima dovolj moči, je treba nihanje preizkušanca vzbuditi z ročnim kladivom.

Testiranje smo izvedli v laboratoriju za konstrukcije na Zavodu za gradbeništvo. Glede na to, da je naprava zasnovana za ročno delo, je hitrost delovanja naprave povsem odvisna od spretnosti uporabnika, vendar pa nikakor ni niti primerljiva z napravami, namenjenimi za umestitev v proizvodno linijo. Hitrost je odvisna tudi od zelene natančnosti, saj lahko na vsakem preizkušancu izmerimo točne dimenzije in maso, kar vzame precej časa. Za skupino enakih dimenzij preizkušancev lahko vzamemo povprečne vrednosti dimenzij, vendar lahko to nekoliko pokvari natančnost določanja dinamičnega modula elastičnosti in posledično trdnostnega razreda.



Slika 2.10: Meritev naprave Timber Grader MTG z uporabo ročnega kladiva (za večje kose)



Slika 2.11: Prikaz izpisa meritve z napravo Timber Grader MTG

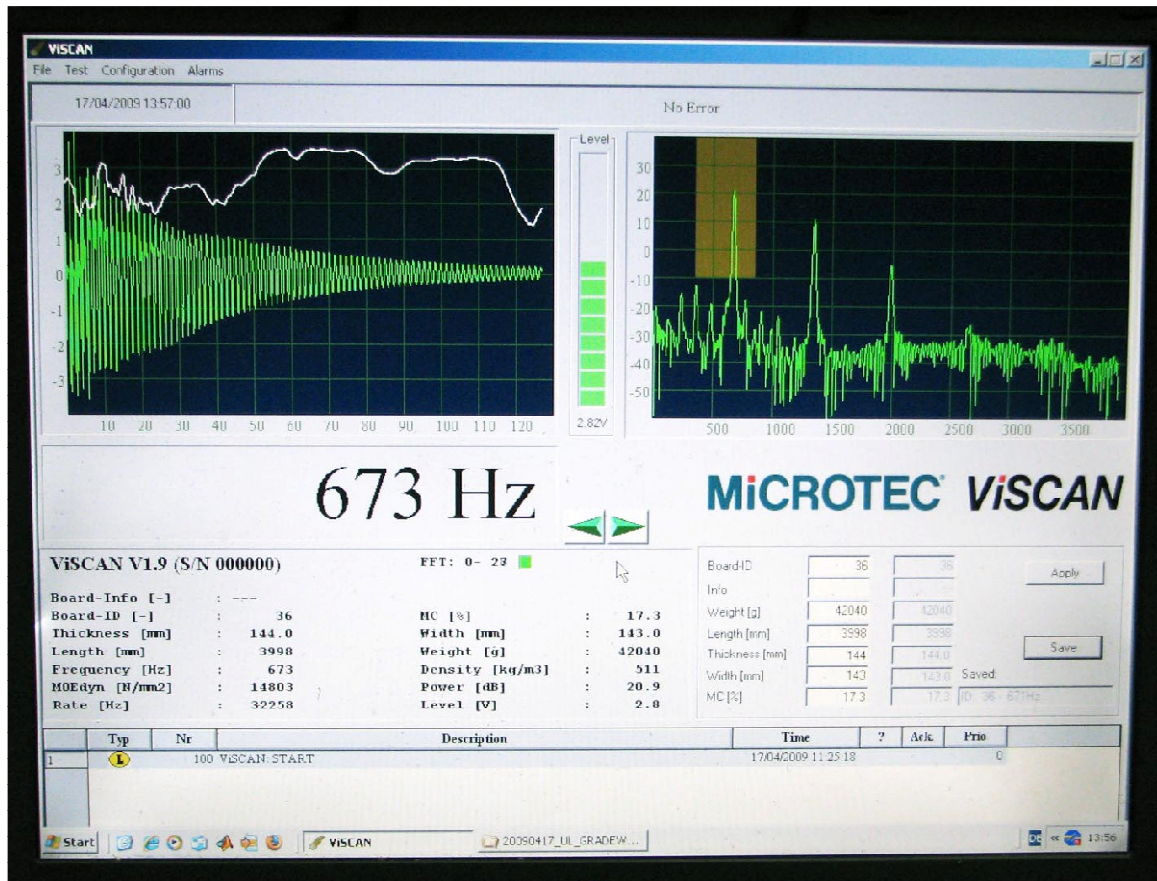
Pri naši raziskavi smo vse elemente stehali in vsakemu desetemu preizkušancu izmerili vlažnost z ročnim uporovnim vlagomerom. Dimenzij posameznih preizkušancev nismo merili, temveč smo upoštevali povprečne vrednosti posameznih skupin. Deklarirane dimenzijske omejitve naprave z uporabo vgrajene vzmetne udarne igle so: širina 5 – 25 cm, debelina 1,5 – 11,5 cm in dolžina 1,5 – 8 m; z uporabo ročnega kladiva pa: širina 5 – 40 cm, debelina 1,5 – 30 cm, dolžina pa 1,5 – 10 m.

2.2.2 ViSCAN

Naprava ViSCAN je proizvod italijanskega podjetja MiCROTEC, ki je locirano na skrajnem severu Italije v južnotirolskem mestu Bressanone/Brixen. MiCROTEC je vodilno in najbolj razširjeno podjetje na področju strojnega razvrščanja na območju Evropske Unije. Kot smo že omenili, gre za eno od treh v Sloveniji trenutno veljavnih naprav. Je trenutno najcenejša opcija za proizvodnjo. Namenjena je preizkušanju celotnih dolžin elementov in je najbolj primerna za umestitev v proizvodno linijo s prečnim transportom lesa. Trdnostni razred določi na podlagi dinamičnega modula elastičnosti, ki ga določi po metodi vzdolžnega nihanja. Naprava ima pnevmatsko kladivo, ki se sproži, ko element pride v območje senzorja. Frekvenca nihanja je izmerjena z vgrajenim laserskim vibrometrom in je izredno natančna. Za natančno določitev dinamičnega modula elastičnosti je potrebno določiti še gostoto, zato se pred napravo v proizvodni liniji vgradi merilce dimenzij, tehtnico in kapacitivni vlagomer.

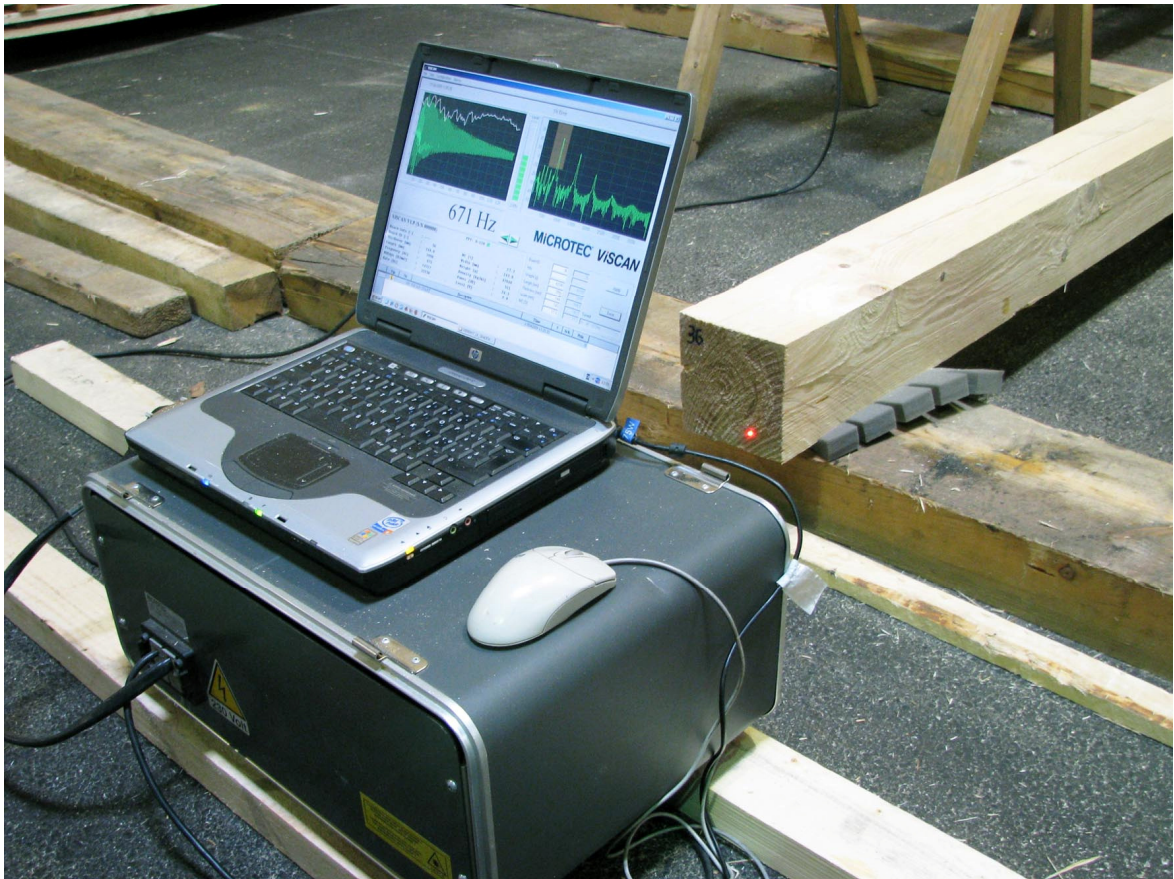


Slika 2.12: Naprava ViSCAN za umestitev v proizvodno linijo (MiCROTEC)



Slika 2.13: Prikaz izpisa meritve naprave ViSCAN

Na razpolago je tudi prenosna različica naprave, ki pa nima lastnega udarnega mehanizma, temveč je nihanje potrebno vzbuditi z ročnim kladivom, podobno kot pri večjih dimenzijah pri napravi Timber Grader MTG.

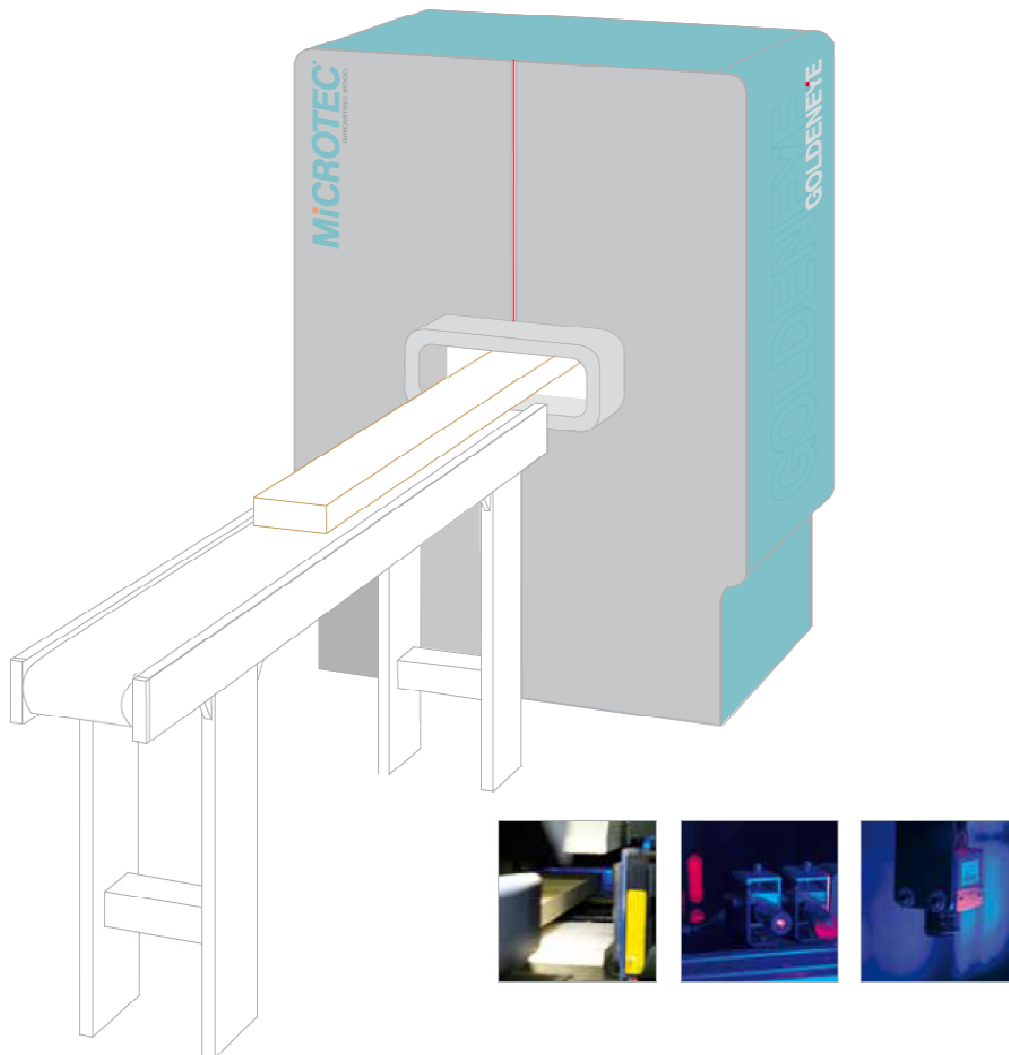


Slika 2.14: Prenosna naprava ViSCAN

Testiranje naših preizkušancev je potekalo na avstrijskem koroškem v mestecu Sachsenburg blizu mesta Spital v sortirnici žage podjetja Hasslacher. Tam podjetje MiCROTEC preizkuša svoje v proizvodnjo umeščene prototipe in novosti, preden jih ponudi trgu. Ker je sortirnica namenjena sortiranju lamel lepljenih nosilcev, smo morali trame zaradi prevelikih dimenzij sortirati z ročno napravo in je hitrost podajanja za te kose težko določljiva. Vse ostale dimenzije pa smo brez večjih zapletov izmerili z napravo, umeščeno v proizvodno linijo. Hitrost preizkušanja je bila okrog 90 kosov na minuto. V našem primeru je to pomenilo 360 tekočih metrov na minuto, elementi so bili namreč povprečne dolžine štirih metrov. Trenutne dimenzijske omejitve (le-te so odvisne od števila in dimenzij do sedaj preizkušenih kosov lesa) naprave ViSCAN za Slovenijo so: širina 5,8 – 30,9 cm in debelina 1,8 – 18,2 cm. Pri vseh skupinah smo na vsakem desetem kosu izmerili vlažnost z ročnim uporovnim vlagomerom. Poleg tega je bila za vse dimenzije razen tramov vlažnost na vseh kosih izmerjena še z enostranskimi kapacitivnimi vlagomeri.

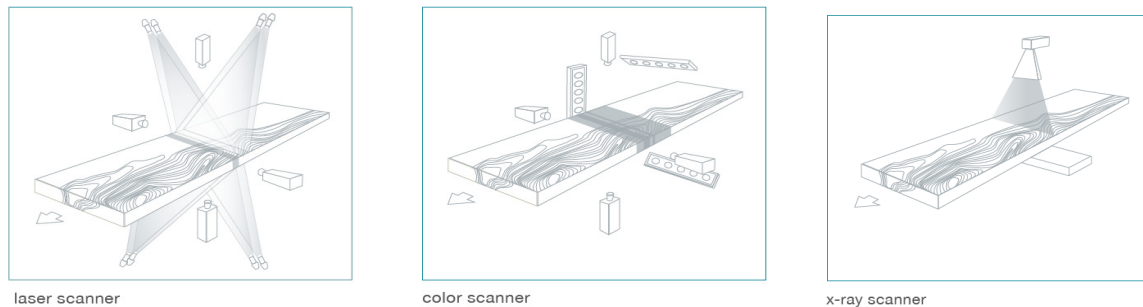
2.2.3 GoldenEye

Naprava GoldenEye podjetja MiCROTEC deluje na podlagi optične metode razvrščanja. Je ena od treh naprav, ki so veljavne v Sloveniji. Je najbolj dovršena naprava za razvrščanje lesa v trdnostne razrede, ne samo med vsemi veljavnimi v Sloveniji, temveč tudi sicer. Zato je tudi najdražja.



Slika 2.15: Shema naprave GoldenEye

V kombinaciji z napravo ViSCAN kose lesa razdeli na dele z enakimi mehanskimi lastnostmi in trdnostnimi razredi. Trdnostni razred določa na podlagi metode vzdolžnega nihanja in meritvah optičnih lastnosti. Poleg lastnosti, potrebnih za razvrščanje v trdnostne razrede, naprava meri tudi nekatere vizualne lastnosti kot so velikost grč, lokalno gostoto, barvo lesa in druge vizualne lastnosti. Potrebne lastnosti določi z zelo kompleksnim sistemom, ki vsebuje štiri barvne kamere, linijsko in točkovno lasersko kamero ter rentgensko kamero.



Slika 2.16: Shematski prikaz senzorjev naprave GoldenEye

Barvne kamere so namenjene za določanje obarvanosti, trohnobe, modrikavosti in prisotnosti stržena, torej lastnosti, ki jih sicer pregleduje oseba, zaposlena na proizvodni liniji z vizualnim ocenjevanjem oziroma v primeru strojnega razvrščanja z naknadno vizualno kontrolo. Linijska laserska kamera služi določevanju širin branik, medtem ko je točkovna laserska kamera namenjena določanju smeri oziroma poteka branik in posledično tudi velikosti in lokacij grč. Z rentgenom naprava določa lokalne gostote elementa, na podlagi katerih se z uporabo frekvence, izmerjene z napravo ViScana določijo deli z enakim trdnostnim razredom in odpadki.

Preizkušanje je potekalo na isti lokaciji kot za napravo ViSCAN. Zaradi dimenzijskih omejitev, proizvodna linija je namreč namenjena lamelam lepljenih nosilcev, so testiranje tramov z napravo GoldenEye naredili kasneje na sedežu podjetja MiCROTEC.



Slika 2.17: Naprava GoldenEye nameščena v proizvodno linijo

Na vsakem desetem kosu smo izmerili vlažnost z ročnim uporovnim vlagomerom. Poleg tega je bila za vse dimenzije razen izločenih tramov vlažnost na vseh kosih izmerjena še z dvostranskim kapacitivnim vlagomerom, ki je vlažnost meril vzdolžno. Hitrost meritev je bila omejena s podajalnim trakom, naprava GoldenEye 706 je namreč sposobna samostojno delovati pri hitrosti kar 450 tekočih metrov na minuto. V našem primeru je bila največja dosežena hitrost okoli 300 tekočih metrov na minuto.

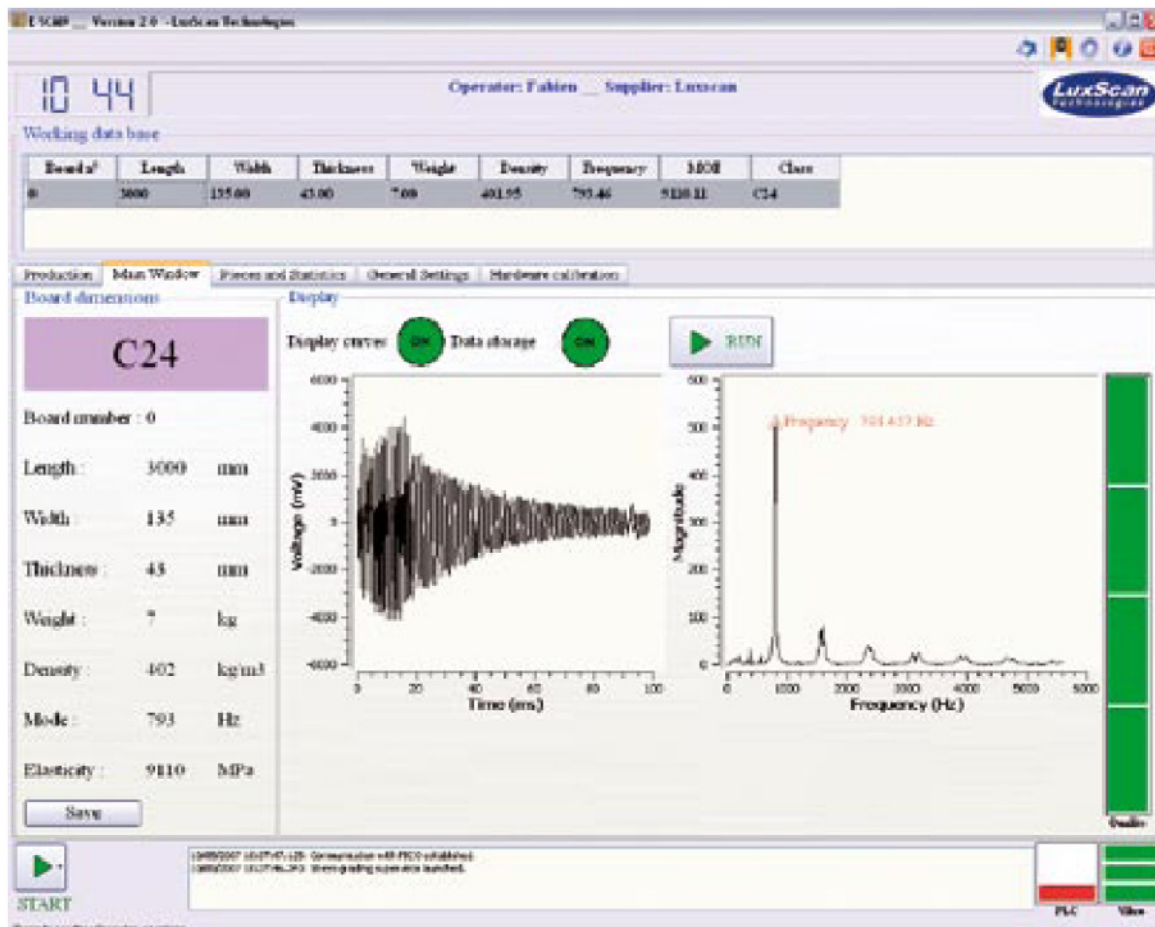
2.2.4 E-Scan

Podjetje LuxScan Technologies z Luksemburga se v preteklosti ni ukvarjalo z razvrščanjem lesa v trdnostne razrede, temveč s površinskim izgledom lesa (barva, napake, grče, ...) povezanim z zadovoljnostjo končnega kupca. K projektu Gradewood je pristopilo s prototipno napravo E-Scan in prototipno različico naprave CombiScan+, ki jo bomo podrobneje opisali v naslednjem poglavju. Obe napravi sta podobni že omenjenima napravama ViSCAN in GoldenEye podjetja MICROTEC.

Naprava E-Scan deluje na enakem principu kot ViSCAN. Trdnostni razred določi na podlagi dinamičnega modula elastičnosti, ki ga izmerijo po metodi vzdolžnega nihanja.



Slika 2.18: Naprava E-Scan, Cluny, Francija



Slika 2.19: Prikaz izpisa meritve naprave E-Scan (www.luxscan.com, 1. 5. 2011)

Testiranje z napravo E-Scan je potekalo v majhnem univerzitetnem laboratoriju na vzhodu Francije v mestu Cluny, kjer se nahaja eden izmed izobraževalnih centrov pariške univerze ENSAM. Hitrost testiranja je težko določiti, saj smo kose lesa napravi podajali ročno. Deklarirana hitrost naprave je 120 elementov na minuto. Dimenzijske omejitve kosov lesa so: širina 7,5 – 28 cm, debelina 2 – 12 cm in dolžina 2,4 – 6 m. Na vsakem desetem kosu smo z uporovnim vlagomerom izmerili vlažnost.

Vlagomer je imel kratko dolžino igel (1 centimeter), ki smo jih v les zabili z zgolj enkratnim udarcem. Posledično vlažnost pri večjih dimenzijah elementov ni bila merjena na tretjini debeline, kot veleva standard SIST EN 13183-2:2003 Delež vlage v žaganem lesu - 2. del: Ocena z metodo električne upornosti. Pričakovati je bilo rezultate z nekoliko nižjo vlažnost, saj je les v notranjosti bolj vlažen. Dimenzije posameznih elementov nismo merili, temveč jih je proizvajalec opreme pridobil naknadno z napravo CombiScan. Masa elementov je bila izmerjena s tehtnico vgrajeno na tekočem traku (slika 2.17).

2.2.5 CombiScan

Naprava CombiScan podjetja LuxScan deluje enako kot naprava GoldenEye podjetja MiCROTEC. Na podlagi optične metode razvrščanja. Deluje v kombinaciji z napravo E-Scan. Trdnostni razred določa na podlagi gostote, dimenzij prereza, dolžine elementa in lastne frekvence vzdolžnega nihanja, ki jo dobi od naprave E-Scan.



Slika 2.20: Prikaz laserske meritve smeri vlaken naprave CombiScan

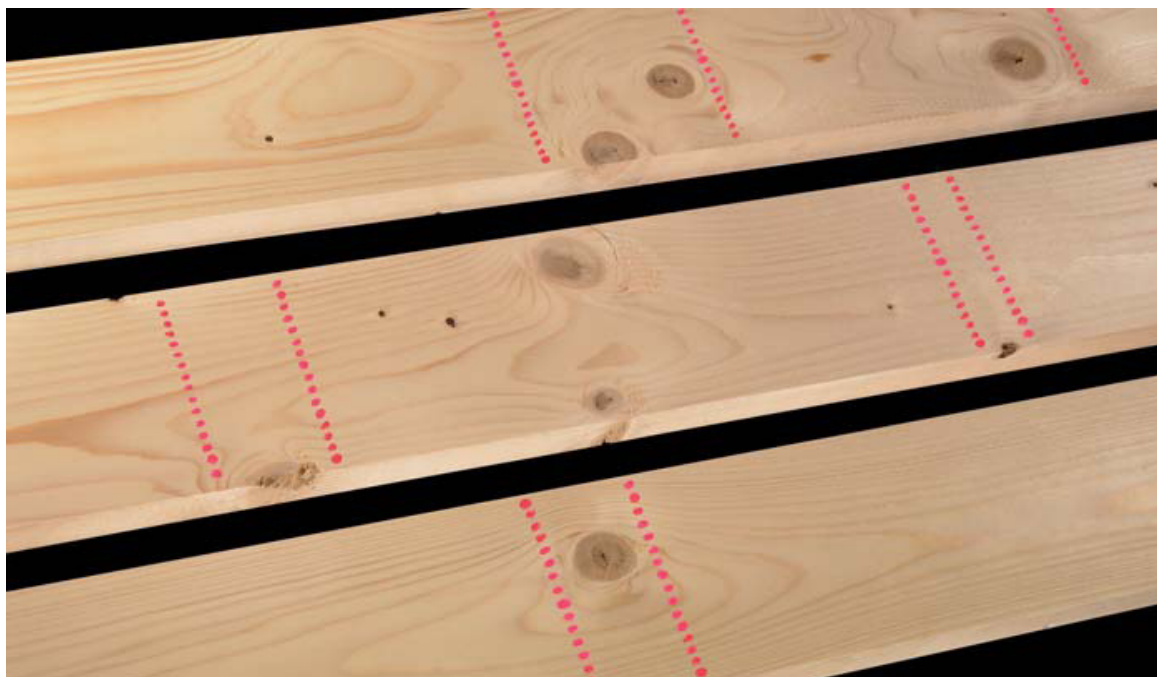
Sistem senzorjev in merilcev znotraj naprave ter princip zajemanja lastnosti in uporabe le-teh pri razvrščanju je enak kot pri napravi GoldenEye, zato ga ne bomo še enkrat opisovali.



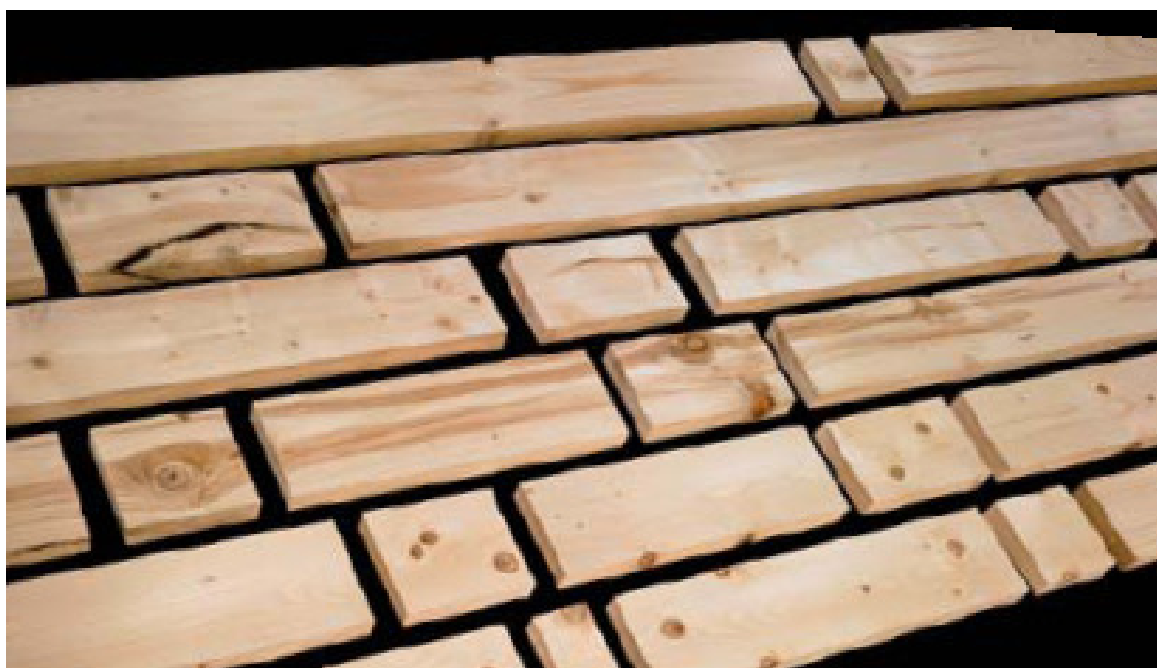
Slika 2.21: Naprava CombiScan

Na enak način kot naprava GoldenEye, tudi naprava CombiScan identificira dele, ki vsebujejo preveč ali prevelike grče. Neposredno za napravo se v tekoči trak lahko vgradi žaga, ki les razreže na dele in jih sortira po trdnostnih razredih ter loči odpadek, ali napravo za označevanje, ki posamezne dele lesa označi z različnimi oznakami, na podlagi katerih jih bo kasneje žaga razrezala in sortirala v razrede in ločila odpadek. Obe napravi sta zato zelo primerni za podjetja, ki proizvajajo lepljene nosilce, saj s tovrstnim razrezom omogočita optimalno izrabo lesa in boljšo kvaliteto izdelkov.

Testiranje je potekalo v istem laboratoriju kot testiranje z napravo E-Scan. Tudi za to napravo je hitrost testiranja težko določiti, saj smo tudi tokrat kose lesa podajali ročno. Tako nam ostane zgolj deklarirana hitrost naprave, ki je namenjena predvsem umestitvi v tekoči trak z vzdolžnim transportom in je 200 tekočih metrov na minuto. Dimenzijske omejitve kosov lesa so: širina 2,5 – 31 cm, debelina 1,2 – 10 cm in dolžina 0,8 – 6,5 m.



Slika 2.22: Primer označevanja delov lesa za izžaganje



Slika 2.23: Prikaz razreza lesa glede na kvaliteto (rezultat meritev naprave CombiScan)

2.2.6 TRIOMATIC

Naprava TRIOMATIC je proizvod francosko švicarskega podjetja CBS-CBT. Naprava predstavlja naslednika ročne naprave Sylvatest. Deluje na principu ultrazvočne metode. Primerna je za

umestitev v proizvodno linijo s prečnim transportom. Na vsaki strani ima dvoje klešč, ki kos lesa dvignejo in istočasno z merjenjem hitrosti ultrazvočnega preleta izmerijo še debelino, dolžino in maso. Širino določijo vgrajeni laserski senzor.



Slika 2.24: Meritev hitrosti ultrazvočnega preleta z napravo Triomatic, Gent, Belgija

Vsakemu kosu lesa se z uporovnim vlagomerom predhodno izmeri tudi vlažnost. Zaradi težav z vlagomerom, nekaj kosom vlažnosti niso izmerili. Merjenje vlažnosti ni bilo v skladu s standardom SIST EN 13183-2, ki določa točno lokacijo in globino meritve vlažnosti z uporovnim vlagomerom. Podrobnejši opis je v poglavju 3.2. Naprava je vlažnost ves čas merila na istem mestu ne glede na dimenzije elementov, poleg tega pa vedno zgolj deset centimetrov od čela in le dva centimetra od roba. Meritev je bila sicer narejena z zgornje in spodnje strani, vendar ne v globini, zahtevani v standardu. Posledično gre pričakovati nekoliko nižjo vlažnost. Napaka je bila tudi v napačnih konicah, saj te niso bile izolirane, kot to zahteva standard, kar pomeni, da električni upor merijo na celotni dolžini in ne samo na konicah.



Slika 2.25: Meritev vlažnosti z napravo Triomatic, Gent, Belgija

Testiranje je potekalo v mestu Gent na severu Belgije v odprtem pokritem objektu pri temperaturi 16°C. Hitrost testiranja je bila približno 8 kosov na minuto, kar pomeni 32 tekočih metrov na minuto.

2.2.7 AU 2000

Naprava AU 2000 francoskega podjetja Ginger CEBPT je namenjena merjenju lastnosti betonskih konstrukcijskih sklopov in kamna, vendar se jo da uporabiti tudi za ugotavljanje lastnosti drugih materialov. Za uporabo za razvrščanje lesa v trdnostne razrede bi jo bilo potrebno najprej verificirati, oziroma vključiti v standard SIST EN 14081-4:2009.

Podobno kot TRIOMATIC deluje na principu ultrazvočne metode, s to razliko, da je namenjena za ročno uporabo, tako kot njeno predhodnica naprava Sylvatest.



Slika 2.26: Naprava AU 2000

Med dodatki se poleg naprave dobi konične nastavke za senzorje, ki so namenjeni za les, vendar so bile razlike pri meritvah zanemarljive.



Slika 2.27: Merilni senzor naprave AU 2000 s koničnim nastavkom za les in brez njega

Testirali smo v laboratoriju za konstrukcije Zavoda za gradbeništvo. Tako kot pri napravi Timber Grader MTG tudi v tem primeru ni smiselno govoriti o hitrosti preizkušanja, saj je precej odvisno od upravljalcev naprave.

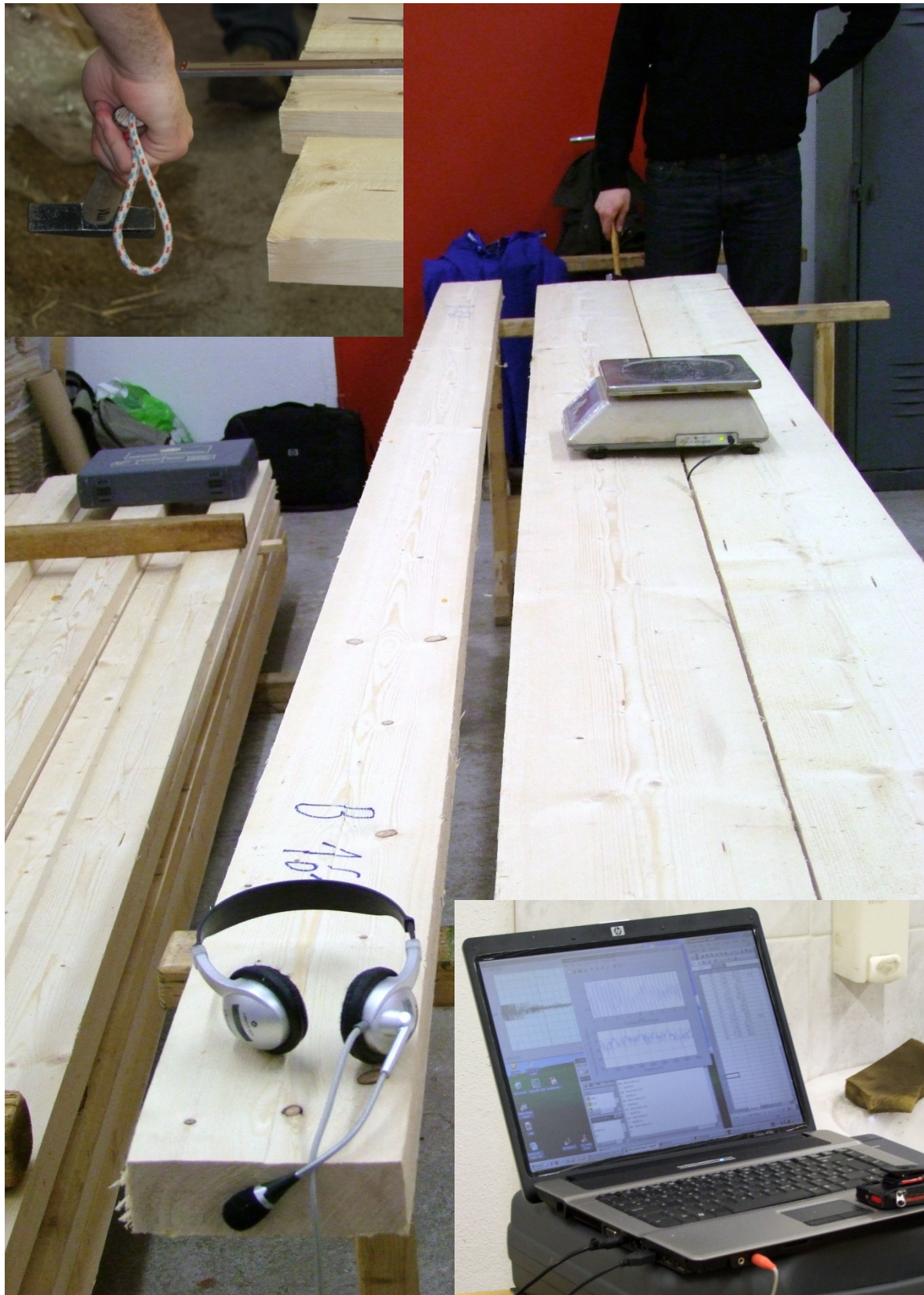
2.2.8 Naprava GT-PRO razvita v okviru projekta ARRS: Razvrščanje lesenih konstrukcijskih elementov po trdnosti

Ker smo želeli spremljati morebitne poškodbe preizkušancev, smo se odločili, da bomo za kontrolo, pred odvozom do posameznih proizvajalcev naprav za nedestruktivno testiranje in ob povratku v Slovenijo izmerili dinamične module elastičnosti in jih primerjali. Odločili smo se, da napravo naredimo kar sami. Tako je vodja laboratorija za konstrukcije na oddelku za konstrukcije Zavoda za gradbeništvo dr. Uroš Bohinc napisal program, ki nam je omogočil, da smo z osnovno računalniško opremo in mikrofonom na podlagi metode vzdolžnega nihanja dobili napravo za ugotavljanje dinamičnega modula elastičnosti. Kasneje smo izdelali nastavitve, ki so izmerjene dinamične module elastičnosti povezale s trdnostnimi razredi.

Enako kot ultrazvočna naprava AU 2000, tudi te naprave ni možno uporabiti za uradno certificirano strojno razvrščanje v praksi, saj bi bil za to potreben vpis le-te v že omenjeni standard SIST EN 14081-4. Za doseg tega bi morali rezultate skupaj z opisi naprave poslati na CEN. Za vpis v standard je ločeno za vsako državo potrebno preizkusiti vsaj 900 kosov lesa, jih porušiti, določiti nastavitve naprave za te kose in vse podatke poslati na CEN v odobritev. Mogoče bomo v bodoče to naredili in tako ponudili slovenskim majhnim žagam ekonomsko sprejemljivo opcijo za razvrščanje lesa v trdnostne razrede. Pri vgradnji naprave v proizvodno linijo bi lahko problem predstavljali šumi oziroma hrup na žagah, ki bi motili meritve zvoka in bi jih bilo potrebno izolirati. Poleg tega bi bilo potrebno vključiti tudi druge podporne naprave za zajem drugih lastnosti, kot so dimenzije, vlažnost in masa.

Naprava je izredno enostavna za uporabo, primerljive natančnosti z napravama ViScan ali E-Scan in bistveno bolj natančna kot vizualno razvrščanje. Lahko bi jo uporabili le kot dodatno pomoč pri vizualnem razvrščanju, saj je pri vsaki napravi tako ali tako potreba naknadna vizualna kontrola.

Testiranje je potekalo na dveh lokacijah. Prvič smo kose izmerili v prostorih podjetja Hoja d.d. preden so ti odšli na pot po Evropi do vseh proizvajalcev naprav za razvrščanje, ki so sodelovala. Po vrnitvi v Slovenijo smo vse kose ponovno preizkusili na Zavodu za gradbeništvo tik pred porušnimi preizkusi. Ker gre za napravo z ročnim podajanjem je hitrost merjenja težko oceniti, saj je ta odvisna od hitrosti merilcev. V našem primeru je bila ta okoli 4 kose na minuto, oziroma 16 tekočih metrov na minuto. Pri nekoliko boljši organizaciji dela bi se ta hitrost lahko še povečala.



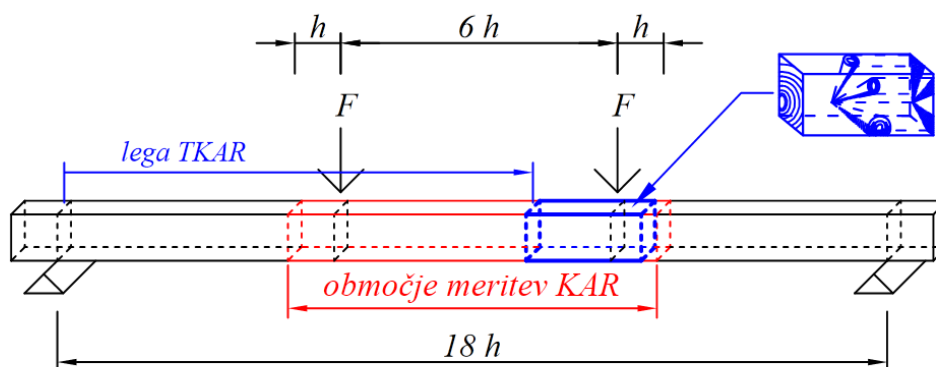
Slika 2.28: Meritev z napravo GT-PRO

3. MERJENJE

Za določitev optimalnih trdnostnih razredov potrebujemo tri lastnosti: trdnost, statični modul elastičnosti in gostoto. Imenujemo jih odločilne lastnosti za optimalno razvrščanje, dobimo pa jih z ustreznimi preizkusi. Poleg odločilnih lastnosti smo merili tudi druge, ki lahko vplivajo na razvrščanje.

3.1 KAR

Pri projektu smo metodo KAR uporabljali malce drugače, kot je zapisana v standardu BS 4978. Merili smo zgolj TKAR, vendar smo le-tega merili na odseku petnajstih centimetrov. (glej sliko 3.1). Petnajst centimetrsko območje smo določili tako, da smo poiskali mesto z največ grčami, ki je bilo na območju s konstantnim in maksimalnim momentom. Območje opazovanja je znašalo osem višin: dolžina med obema vnosoma sil ter še ena enota višine na vsako stran (glej sliko 3.1).



Slika 3.1: Lega in območje meritev TKAR

Beležili smo tudi lega območja TKAR in sicer tako, da smo izmerili razdaljo od začetka testiranja do začetka petnajst centimetrskega območja, kjer smo merili TKAR.

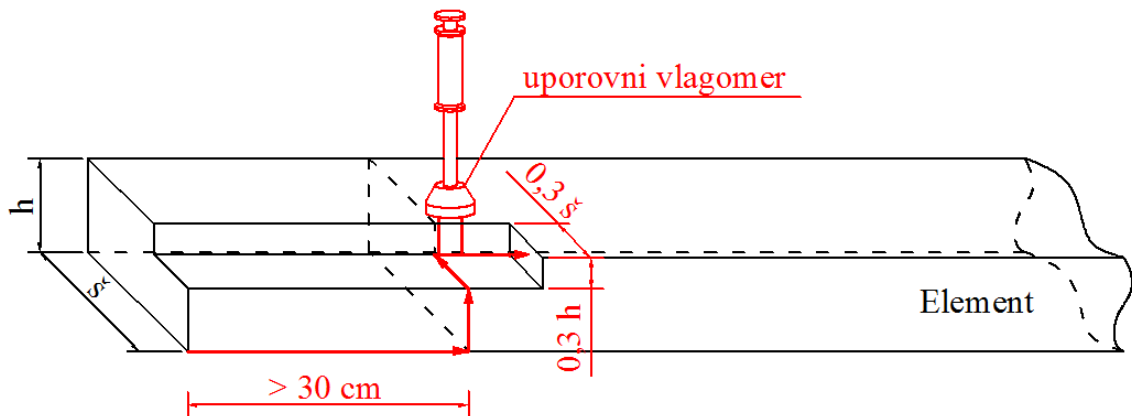
3.2 Vlažnost

Vlažnost smo merili dvakrat in sicer pred in po poružitvi. Pred poružitvijo smo vlažnost merili na podlagi standarda SIST EN 13183-2. Merili smo z napravo M 4050 proizvajalca GANN (slika 3.2), ki deluje na podlagi uporovne metode.



Slika 3.2: Uporovni vlagomer M 4050 proizvajalca GANN (Matjaž Zupanc, ZAG)

Po standardu je merilno mesto odvisno od dimenzij kosa lesa. Biti mora na tretjini širine in debeline ter vsaj 30 centimetrov od čela kosa. Igle morajo biti postavljene v smeri vlaken, razen če proizvajalec v navodilih ne zahteva drugače.



Slika 3.3: Skica položaja merjenja po standardu SIST EN 13183-2

Po porušitvi smo od porušenih preizkušancev v neposredni bližini mesta porušitve (znotraj območja konstantnega momenta, če je bilo mogoče) odžagali deset centimetrov dolge kose in jim določili vlažnost na podlagi postopka opisanega v standardu SIST EN 13183-1. Odžagane kose smo stehali na 0,01 g natančno in natančno premerili s kljunastim merilom. Nato smo vzorce postavili v peč in jih posušili ter ponovno stehali. Iz razlike tež smo lahko določili količino izparele vode in tako določili vlažnost. Preizkušance smo sušili pri temperaturi $103 \pm 2^\circ\text{C}$ toliko časa, da je bila sprememba mase v dveh urah manjša od enega promila.

3.3 Masa

Vsak kos lesa smo pred porušitvijo stehali na gram natančno.

3.4 Gostota

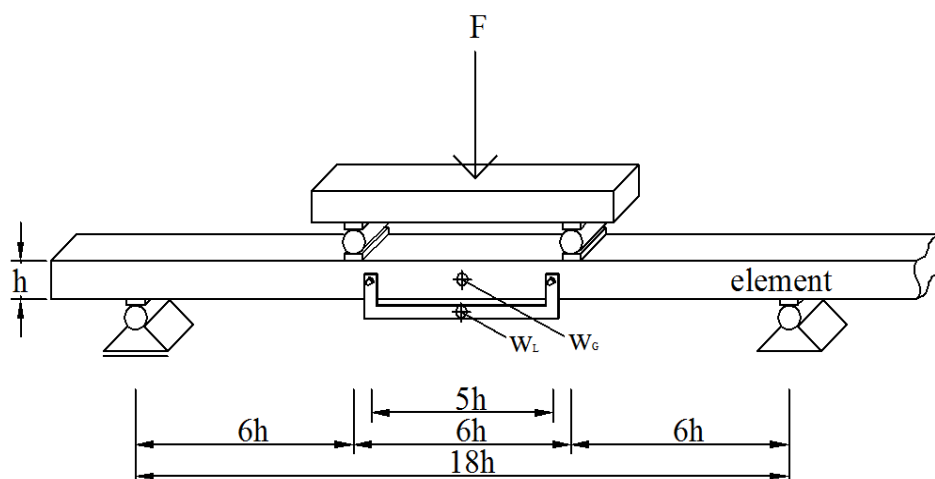
Gostoto smo določali dvakrat, na celotnih preizkušancih preko povprečnih izmerjenih dimenzij prereza, dolžine in izmerjenih mas ter na deset centimetrskih kosih čistega lesa brez grč. Za optimalno razvrščanje moramo uporabiti gostoto čistega lesa, ki smo jo izmerili pri 0% vlažnosti in jo nato prevedli na 12% vlažnost, kot zahteva standard SIST EN 384:2004.

3.5 Statični modul elastičnosti

Statični modul elastičnosti smo določili s pokončno upogibno obremenitvijo na podlagi standarda SIST EN 408:2004.

Nekaj navodil iz standarda SIST EN 408:

- element, podprt kot prostoležeči nosilec na razponu $18 h$, simetrično obremenimo z dvema točkovnima silama kot kaže slika 3.4;
- če predvidevamo, da lahko pride do bočnega uklona, element bočno podpremo;
- hitrost obremenjevanja določamo na podlagi merjenih pomikov, tako da se pomiki spreminjajo enakomerno ($0,003 h$ mm/s);
- maksimalna sila ne sme preseči $0,4 F_{\max}$ (40 % pričakovane maksimalne sile);
- na sredini razpona merimo pomik w_G za izračun globalnega modula elastičnosti (Δw je v tem primeru kar enak Δw_G);
- na sredini na razdalji $5 h$ merimo pomik w_L za izračun lokalnega modula elastičnosti (Δw je v tem primeru kar enak $\Delta w_G - \Delta w_L$);
- za izračun modulov uporabimo le območje med $0,1 F_{\max}$ in $0,4 F_{\max}$;



Slika 3.4: Postavitev preizkusa za določitev lokalnega in globalnega modula elastičnosti po standardu SIST EN 408

Ker smo preizkus opravili hkrati s preizkusom za določitev upogibne trdnosti oziroma porušnim preizkusom, ki je opisan v naslednjem poglavju, se nismo ustavili pri štiridesetih odstotkih računске obremenitve, kot to zahteva standard, temveč smo obremenjevanje nadaljevali do porušitve. Merili smo dva statična modula elastičnosti, globalni modul elastičnosti in lokalni modul elastičnosti. Modula elastičnosti smo izračunali na intervalu med desetimi in štiridesetimi odstotki dejanske

trdnosti. Zaradi zanemarljivih razlik, smo pomike merili na spodnjem robu (slika 3.5) in ne na $h/2$ kot to zahteva standard (slika 3.4).

Globalni modul elastičnosti smo izračunali na osnovi spremembe pomika na sredini razpetine po enačbi

$$E_G = \frac{207\Delta Fh^3}{2\Delta w_2 I_y}, \quad (3.1)$$

kjer so

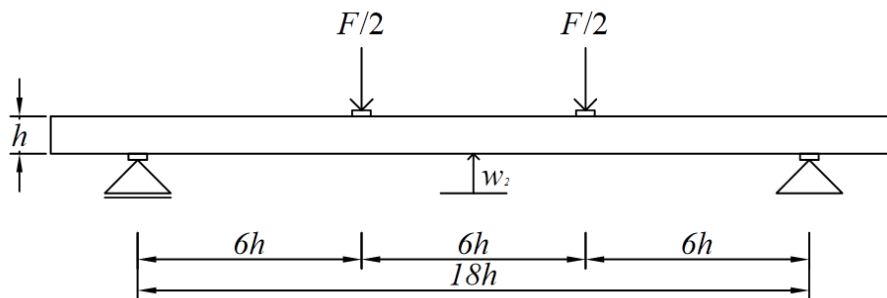
ΔF sprememba sile,

h nominalna višina,

Δw_2 sprememba pomika na sredini (glej sliko 3.5),

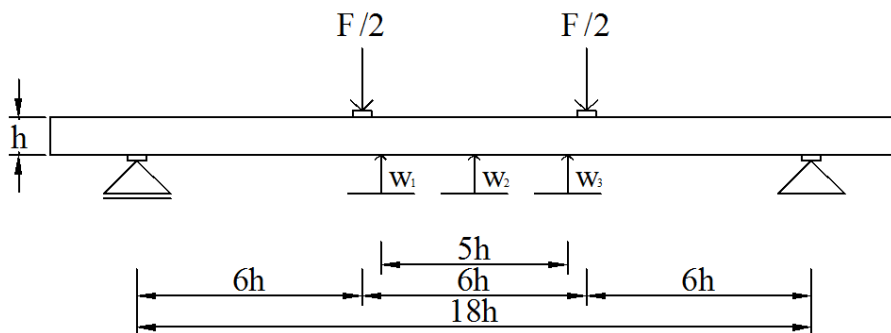
I_y vztrajnostni moment.

Pri določevanju globalnega modula elastičnosti smo predpostavili, da so pomiki podpor enaki nič.



Slika 3.5: Postavitev preizkusa za določitev globalnega modula elastičnosti

Lokalni modul elastičnosti se meri na sredini razpetine med vnosom obeh sil in sicer na dolžini $5h$. Kot je razvidno iz slike 3.6 smo tudi tokrat merili pomike na spodnji strani elementa in ne na sredini, kot bi morali po standardu (slika 3.4).



Slika 3.6: Postavitev dejanskega preizkusa za določitev lokalnega modula elastičnosti

Lokalni modul izračunamo po enačbi

$$E_L = \frac{75\Delta Fh^3}{8I_y \left(\Delta w_2 - \left(\frac{\Delta w_1 + \Delta w_3}{2} \right) \right)}, \quad (3.2)$$

kjer so

$\Delta w_1, \Delta w_2, \Delta w_3$ spremembe pomikov (glej sliko 3.6).

Lokalni modul sicer za razvrščanje ni več pomemben, je pa to nekoč bil. Trenutno se sicer v standardu za razvrščanje SIST EN 14081-2 uporablja globalni modul, vendar se ga spremeni z enačbo

$$MOE = E_G 1,3 - 2690 \quad (3.3)$$

ki predstavlja empirično povezavo med E_G in E_L . Ta korekcija je v standardu zaradi zgodovinske uporabe lokalnega modula. Snovalci standarda so želeli obdržati meje za določitev trdnostnih razredov, ki so veljale pred vpeljavo E_G ter narediti rezultate bodočih raziskav primerljive s prejšnjimi. Prehod z lokalnega na globalni modul so opravili zato, ker je določitev globalnega modula bolj zanesljiva od določitve lokalnega, saj je dosti lažje meriti zgolj pomik na sredini. Globalni modul ima tudi manjši raztros kot lokalni. Poleg tega dobimo pri globalnem manj večjih napak.

3.6 Trdnost

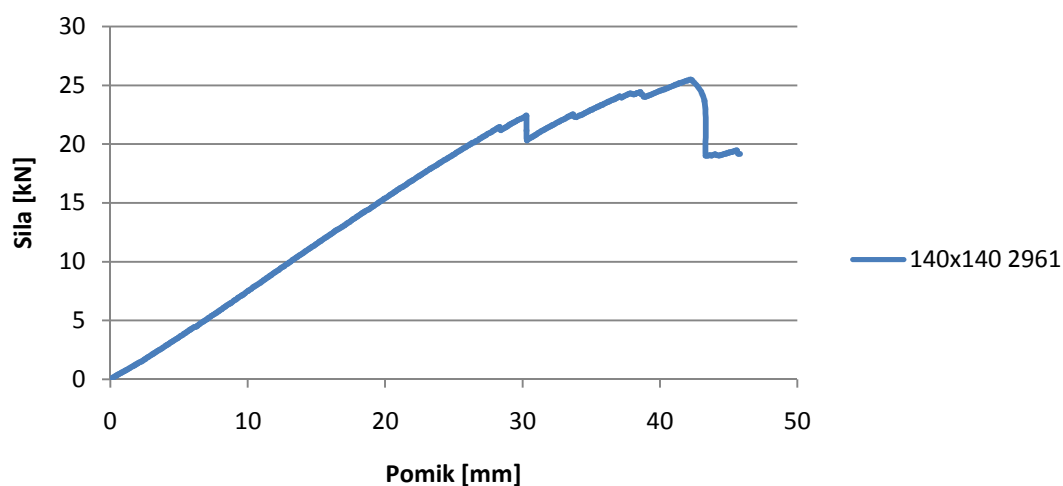
Trdnost preizkušancev smo določili ob upoštevanju standarda SIST EN 408. Postopek je podoben kot pri določevanju modula elastičnosti s to razliko, da predpisana hitrost obremenjevanja ni več $0,003 h$ mm/s, torej odvisna od hitrosti deformiranja, temveč je potrebno porušitev izvesti med 180

in 420 sekundah. Obremenjevali smo do popolne porušitve preizkušancev, kot je na primer prikazano na sliki 3.7.



Slika 3.7: Primer porušitve (vzorec 2961 dimenzij 140×140 mm)

Potek preizkusa - št. kosa 2961



Slika 3.8: Upogibni preizkus vzorca 2961, dimenzij 140×140 mm.

4. ANALIZA REZULTATOV MERITEV

Na elementih smo opravili različna nedestruktivna in destruktivna ocenjevanja trdnosti. Število preizkusov posameznih skupin se razlikuje. Opravljeni so bili naslednji preizkusi:

- meritve trdnosti (f),
- meritve globalne modula elastičnosti (E_G),
- meritve gostote (ρ),
- meritve lokalnega modula elastičnosti (E_L),
- ocena trdnosti z napravo GoldenEye podjetja MiCROTEC,
- meritve modula elastičnosti z napravo ViScan podjetja MiCROTEC,
- meritve gostote podjetja MiCROTEC,
- ocena trdnosti z napravo Combiscan podjetja Luxscan,
- meritve modula elastičnosti z napravo Escan podjetja Luxscan,
- meritve gostote podjetja Luxscan,
- ocena trdnosti z napravo Triomatic podjetja CBS-CBT,
- meritve gostote podjetja CBS-CBT,
- meritve frekvence vzdolžnega nihanja z napravo Rosegrader podjetja Rosen,
- meritve frekvence vzdolžnega nihanja z napravo GT-PRO razvito znotraj projekta ($freq$),
- meritve modula elastičnosti z napravo GT-PRO razvito znotraj projekta (MOE_{freq}),
- meritve hitrosti preleta ultrazvoka z napravo AU 2000,
- meritve modula elastičnosti z napravo AU 2000,
- meritve vzdolžnega nihanja podjetja Brookhuis z napravo Timber Grader MTG;
- meritve TKAR po navodilih projekta Gradewood ($tKAR$) in
- vizualno razvrščanje po nemškem standardu DIN 4074-1:2003 (Viz-DIN).

Zaradi dimenzijskih omejitev na tramovih nismo opravili:

- ocene trdnosti z napravo Combiscan podjetja Luxscan,
- meritve modula elastičnosti z napravo Escan podjetja Luxscan,
- meritve gostote podjetja Luxscan.

Preizkušanih je bilo 1074 elementov, vendar smo jih morali 25 odstraniti zaradi slabih meritev, predvsem lokalnega statičnega modula (E_L). Precejšnje probleme nam je delal bočni uklon pri

dimenzijah 44×210 mm. Glede na to, da smo pri določanju odločilnih lastnosti in optimalnih razredov obravnavali vse skupine skupaj kot celoto, je bilo 1059 dovolj veliko število elementov za analizo. Standard 14081-1:2010 jih za dokazovanje skladnosti naprav za razvrščanje za določeno vrsto lesa zahteva 900. Nadaljnjih 200 je potrebnih za dokazovanje iste vrste lesa na drugem območju oziroma državi ali za druge dimenzije prereza, ki močno odstopajo od tistih iz obstoječega vzorca.

4.1 Korelacije

Sodelujoče naprave delujejo na osnovi različnih principov, ki smo jih podrobneje opisali v drugem poglavju in jih je med seboj najlažje primerjati s korelacijami oziroma kovariancami. Pri izračunu korelacij smo uporabili vgrajeno funkcijo programa Excel, t.j. funkcijo Correl.

Če se vrednost parametra korelacijskega koeficienta 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 koeficienta blizu nič, lahko govorimo o zelo slabi linearni povezanosti oziroma linearni neodvisnosti. O linearni povezanosti lahko govorimo le v primeru, ko je vzorec, ki ga preizkušamo, dovolj velik. Vzorci, ki smo jih imeli na voljo (pri posameznih skupinah čez 250, skupaj pa 1059), so bili zadosti veliki.

4.1.1 Korelacije količin, izmerjenih z nedestruktivnimi in destruktivno metodo

Odločilne lastnosti smo primerjali z indikativnimi lastnostmi, pridobljenimi z napravami.

Rezultate vseh nedestruktivnih metod smo za vsako skupino posebej in vse skupaj primerjali z rezultati destruktivnega preizkusa. Tako kot pri večini drugih materialov v gradbeništvu, je tudi pri lesu najpomembnejša mehanska lastnost trdnost. Zato so nas najbolj zanimale korelacije rezultatov nedestruktivnih metod s trdnostjo. Kot je razvidno iz naslednjih nekaj preglednic, se je večina teh korelacij gibala nad 0,60, kar kaže na precej dober odnos med njimi.

Korelacije pri skupini elementov 140×140 mm so bile nekaj boljše kot pri ostalih skupinah. Razlog za to je lahko širina elementov, ki je bila vsaj trikrat večja kot pri drugih skupinah. Tako je pri tej skupini vpliv grč na trdnost manjši, prav tako ne pride do bočne zvrnitve. Dolžina razpetine obremenjevanja je bila 252 cm, kar je le dobrih 60 % dolžine. Korelacije bi bile verjetno boljše, če

bi bila dolžina elementov pod tremi metri, saj naprave merijo indikativne lastnosti na celotni dolžini in ne zgolj na območju razpetine.

Ker je bila dolžina razpetine pri skupini elementov 44×210 mm skoraj 95 odstotkov celotne dolžine, torej smo elemente obremenili praktično na celotni dolžini, bi morale biti nedestruktivne metode najbolj natančne prav pri ocenjevanju te skupine. Izkazalo se je da ni tako. Razlog za to je lahko majhna širina in posledično velik vpliv grč.

Preglednica 4.1: Korelacije za skupino elementov 140×140 mm med indikativnimi lastnostmi, dobljenimi z različnimi nedestruktivnimi metodami, in odločilnimi lastnostmi, ki določajo trdnostne razrede

Trami	f - trdnost	E_G - globalni modul	ρ - gostota
f - trdnost	1,00		
E_G - globalni modul	0,84	1,00	
ρ - gostota	0,68	0,85	1,00
E_L - lokalni modul	0,67	0,88	0,78
MOR_1	0,82	0,93	0,83
MOE_1	0,80	0,94	0,90
$dens_1$	0,68	0,85	0,98
MOR_4	0,80	0,89	0,71
$dens_4$	0,83	0,93	0,87
$freq_5$	0,77	0,83	0,61
$freq$	0,74	0,82	0,58
MOE_{freq}	0,80	0,94	0,88
$Runtime_6$	-0,70	-0,80	-0,55
MOE_6	0,78	0,94	0,90
$tKAR$	-0,59	-0,60	-0,40
MOR_7	0,71	0,87	0,86
MOE_7	0,72	0,87	0,83
$dens_7$	0,62	0,77	0,93

V preglednici 4.1 lahko vidimo, da ima skupni delež ploščin grč enako korelacijo z modulom elastičnosti kot s trdnostjo. Če pogledamo ti dve korelaciji še za ostale skupine, vidimo, da je pri vseh korelacija s trdnostjo bistveno večja kot z modulom elastičnosti. Sklepamo lahko, da je pri skupini tramov vpliv grč na togost enako velik kot na trdnost. Pri ostalih skupinah je vpliv grč na togost manjši kot na trdnost.

Preglednica 4.2: Korelacije za skupino elementov 40×100 mm med indikativnimi lastnostmi, dobljenimi z različnimi nedestruktivnimi metodami, in odločilnimi lastnostmi, ki določajo trdnostne razrede

Letve	f - trdnost	E_G – globalni modul	ρ - gostota
f – trdnost	1,00		
E_G – globalni modul	0,82	1,00	
ρ – gostota	0,56	0,77	1,00
E_L – lokalni modul	0,73	0,88	0,62
MOR_1	0,80	0,94	0,74
MOE_1	0,75	0,94	0,82
$dens_1$	0,55	0,75	0,96
MOR_2	0,73	0,90	0,75
MOR_3	0,69	0,89	0,79
$dens_3$	0,40	0,62	0,85
MOR_4	0,68	0,85	0,59
$dens_4$	0,62	0,79	0,73
$freq_5$	0,72	0,84	0,52
$freq$	0,71	0,84	0,53
MOE_{freq}	0,74	0,93	0,81
$Runtime_6$	-0,60	-0,77	-0,50
MOE_6	0,68	0,89	0,84
$tKAR$	-0,55	-0,48	-0,18
MOR_7	0,74	0,94	0,84
MOE_7	0,75	0,94	0,81
$dens_7$	0,49	0,69	0,95

Preglednica 4.3: Korelacije za skupino elementov 44×210 mm med indikativnimi lastnostmi, dobljenimi z različnimi nedestruktivnimi metodami, in odločilnimi lastnostmi, ki določajo trdnostne razrede

Plohi	f - trdnost	E_G - globalni modul	ρ - gostota
f - trdnost	1,00		
E_G - globalni modul	0,76	1,00	
ρ - gostota	0,52	0,73	1,00
E_L - lokalni modul	0,64	0,86	0,59
MOR_1	0,74	0,88	0,71
MOE_1	0,67	0,93	0,79
$dens_1$	0,48	0,70	0,92
MOR_2	0,67	0,87	0,71
MOR_3	0,60	0,86	0,74
$dens_3$	0,28	0,51	0,76
MOR_4	0,56	0,78	0,51
$dens_4$	0,54	0,79	0,70
$freq_5$	0,61	0,81	0,48
$freq$	0,63	0,81	0,46
MOE_{freq}	0,65	0,91	0,78
$Runtime_6$	-0,50	-0,74	-0,49
MOE_6	0,54	0,85	0,81
$tKAR$	-0,51	-0,42	-0,22
MOR_7	0,63	0,89	0,80
MOE_7	0,64	0,89	0,76
$dens_7$	0,39	0,63	0,85

Preglednica 4.4: Korelacije za skupino elementov 50×150 mm med indikativnimi lastnostmi, dobljenimi z različnimi nedestruktivnimi metodami, in odločilnimi lastnostmi, ki določajo trdnostne razrede

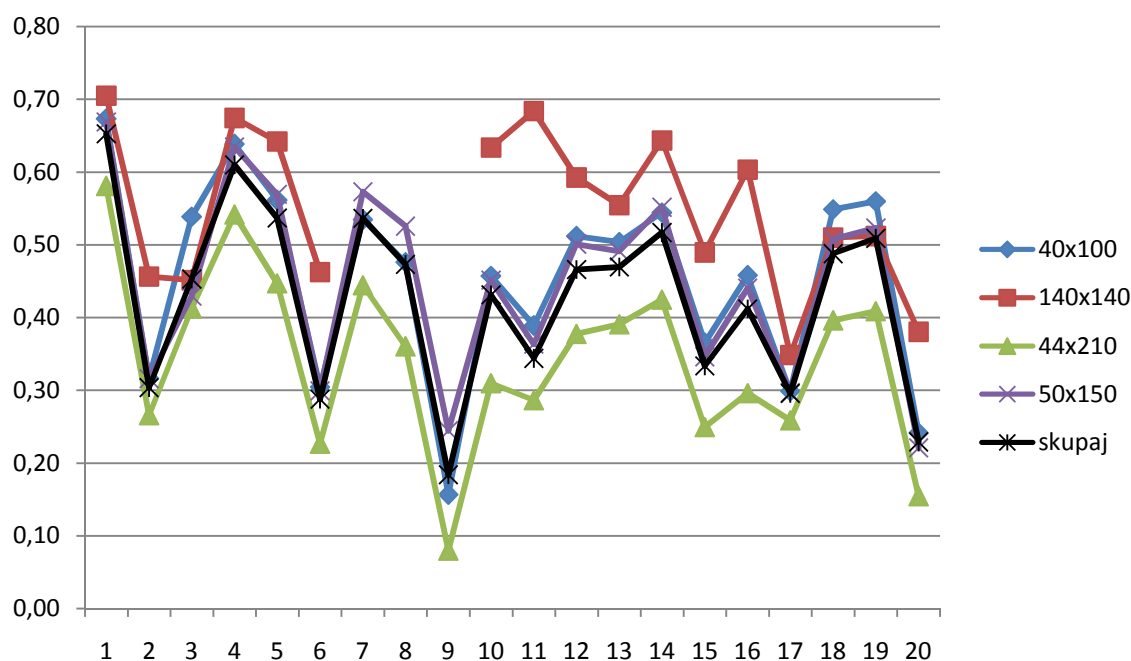
Grede	f - trdnost	E_G - globalni modul	ρ - gostota
f - trdnost	1,00		
E_G - globalni modul	0,82	1,00	
ρ - gostota	0,56	0,78	1,00
E_L - lokalni modul	0,66	0,80	0,62
MOR_1	0,80	0,92	0,72
MOE_1	0,75	0,95	0,82
$dens_1$	0,55	0,75	0,94
MOR_2	0,76	0,92	0,73
MOR_3	0,72	0,91	0,77
$dens_3$	0,49	0,67	0,79
MOR_4	0,67	0,85	0,60
$dens_4$	0,60	0,79	0,73
$freq_5$	0,71	0,86	0,54
$freq$	0,70	0,85	0,54
MOE_{freq}	0,74	0,94	0,83
$Runtime_6$	-0,59	-0,79	-0,55
MOE_6	0,66	0,90	0,86
$tKAR$	-0,54	-0,42	-0,23
MOR_7	0,71	0,92	0,84
MOE_7	0,72	0,93	0,81
$dens_7$	0,47	0,68	0,94

Preglednica 4.5: Korelacije za vse skupine skupaj med indikativnimi lastnostmi, dobljenimi z različnimi nedestruktivnimi metodami, in odločilnimi lastnostmi, ki določajo trdnostne razrede (korelacije za MOR_2 , MOR_3 in $dens_3$ ne veljajo za trame -140×140 mm)

Cela populacija	f - trdnost	E_G - globalni modul	ρ - gostota
f - trdnost	1,00		
E_G - globalni modul	0,81	1,00	
ρ - gostota	0,55	0,76	1,00
E_L - lokalni modul	0,67	0,83	0,59
MOR_1	0,78	0,91	0,73
MOE_1	0,73	0,93	0,82
$dens_1$	0,54	0,73	0,93
MOR_2	0,73	0,90	0,72
MOR_3	0,69	0,89	0,76
$dens_3$	0,43	0,63	0,78
MOR_4	0,66	0,83	0,57
$dens_4$	0,59	0,75	0,64
$freq_5$	0,68	0,83	0,52
$freq$	0,69	0,83	0,52
MOE_{freq}	0,72	0,92	0,81
$Runtime_6$	-0,58	-0,78	-0,52
MOE_6	0,64	0,89	0,84
$tKAR$	-0,54	-0,46	-0,21
MOR_7	0,69	0,90	0,78
MOE_7	0,71	0,91	0,78
$dens_7$	0,47	0,67	0,87

Preglednica 4.6: Korelacije za vse skupine med indikativnimi lastnostmi, dobljenimi z različnimi nedestruktivnimi metodami, in trdnostjo (pri tramih -140×140 mm ni podatkov za MOR_2 , MOR_3 in $dens_3$)

Primerjava napovedovalnih količin s trdnostjo		f - trdnost				
		40x100	50x150	44x210	140x140	skupaj
-	E_G – globalni modul	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	f – trdnost	0,82	0,82	0,76	0,84	0,81
2	ρ – gostota	0,56	0,56	0,52	0,68	0,55
3	E_L – lokalni modul	0,73	0,66	0,64	0,67	0,67
4	MOR_1	0,80	0,80	0,74	0,82	0,78
5	MOE_1	0,75	0,75	0,67	0,80	0,73
6	$dens_1$	0,55	0,55	0,48	0,68	0,54
7	MOR_2	0,73	0,76	0,67	-	0,73
8	MOR_3	0,69	0,72	0,60	-	0,69
9	$dens_3$	0,40	0,49	0,28	-	0,43
10	MOR_4	0,68	0,67	0,56	0,80	0,66
11	$dens_4$	0,62	0,60	0,54	0,83	0,59
12	$freq_5$	0,72	0,71	0,61	0,77	0,68
13	$freq$	0,71	0,70	0,63	0,74	0,69
14	MOE_{freq}	0,74	0,74	0,65	0,80	0,72
15	$Runtime_6$	-0,60	-0,59	-0,50	-0,70	-0,58
16	MOE_6	0,68	0,66	0,54	0,78	0,64
17	$tKAR$	-0,55	-0,54	-0,51	-0,59	-0,54
18	MOR_7	0,74	0,71	0,63	0,71	0,70
19	MOE_7	0,75	0,72	0,64	0,72	0,71
20	$dens_7$	0,49	0,62	0,39	0,47	0,48



Slika 4.1: Grafična primerjava koeficientov determinacije po skupinah med indikativnimi lastnostmi, dobljenimi z različnimi nedestruktivnimi metodami, in trdnostjo (pri tramih 140×140 mm ni podatkov za MOR_2 , MOR_3 in $dens_3$)

V zgornji preglednici in sliki lahko opazimo, da so korelacije za trame (140×140 mm) v večini primerov najboljše. Prav tako lahko vidimo, da so korelacije za plohe (44×210 mm) v vseh primerih najslabše.

Od indikativnih lastnosti naprav ima najslabšo korelacijo s trdnostjo gostota naprave 3, medtem ko ima najboljšo naprava 1. Pri tramih je zanimiva korelacija med trdnostjo in gostoto naprave 4, ki je največja v skupini. Korelacija trdnosti te iste naprave je slabša, kar na prvi pogled zgloda narobe. V najslabši korelaciji s trdnostjo f je tKAR. Ta je bila od 0,4 do 0,6, kar kaže velikost vpliva grč na nosilnost. Pri tramih so razlike majhne, kar pet indikativnih lastnosti naprav ima korelacije le za 0,03 drugačne.

Naprava GT-PRO ($freq$, MOE_{freq}) ima dobre rezultate glede na preprostost tehnologije delovanja.

Preglednica 4.7: Korelacije za vse skupine med indikativnimi lastnostmi, dobljenimi z različnimi nedestruktivnimi metodami, in globalnim modulom elastičnosti (pri tramih -140×140 mm ni podatkov za MOR_2 , MOR_3 in $dens_3$)

Primerjava napovedovalnih količin z modulom elastičnosti		E_G – globalni modul				
		40x100	50x150	44x210	140x140	skupaj
-	E_G – globalni modul	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	f – trdnost	0,82	0,82	0,76	0,84	0,81
2	ρ – gostota	0,77	0,78	0,73	0,85	0,76
3	E_L – lokalni modul	0,88	0,80	0,86	0,88	0,83
4	MOR_1	0,94	0,92	0,88	0,93	0,91
5	MOE_1	0,94	0,95	0,93	0,94	0,93
6	$dens_1$	0,75	0,75	0,70	0,85	0,73
7	MOR_2	0,90	0,92	0,87	-	0,90
8	MOR_3	0,89	0,91	0,86	-	0,89
9	$dens_3$	0,62	0,67	0,51	-	0,63
10	MOR_4	0,85	0,85	0,78	0,89	0,83
11	$dens_4$	0,79	0,79	0,79	0,93	0,75
12	$freq_5$	0,84	0,86	0,81	0,83	0,83
13	$freq$	0,84	0,85	0,81	0,82	0,83
14	MOE_{freq}	0,93	0,94	0,91	0,94	0,92
15	$Runtime_6$	-0,77	-0,79	-0,74	-0,80	-0,78
16	MOE_6	0,89	0,90	0,85	0,94	0,89
17	$tKAR$	-0,48	-0,42	-0,42	-0,60	-0,46
18	MOR_7	0,94	0,87	0,89	0,92	0,90
19	MOE_7	0,94	0,87	0,89	0,93	0,91
20	$dens_7$	0,69	0,77	0,63	0,68	0,68

Tudi pri korelacijah z modulom elastičnosti se je najbolj odrezala naprava 1. Pri tramih, ki imajo največjo širino in bi moral biti vpliv grč najmanjši, imajo enake korelacije kot naprava 1 še naprava GT-PRO in naprava 6. Ponovno ima pri tramih nenavadno visoko korelacijo gostota naprave 4, medtem ko ima pri ostalih skupinah dosti nižjo.

Preglednica 4.8: Korelacije za vse skupine med indikativnimi lastnostmi, dobljenimi z različnimi nedestruktivnimi metodami, in gostoto (pri tramih -140×140 mm ni podatkov za MOR_2 , MOR_3 in $dens_3$)

Primerjava napovedovalnih količin z gostoto		ρ - gostota				
		40x100	50x150	44x210	140x140	skupaj
-	E_G – globalni modul	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	f – trdnost	0,56	0,56	0,52	0,68	0,55
2	ρ – gostota	0,77	0,78	0,73	0,85	0,76
3	E_L – lokalni modul	0,62	0,62	0,59	0,78	0,59
4	MOR_1	0,74	0,72	0,71	0,83	0,73
5	MOE_1	0,82	0,82	0,79	0,90	0,82
6	$dens_1$	0,96	0,94	0,92	0,98	0,93
7	MOR_2	0,75	0,73	0,71	-	0,72
8	MOR_3	0,79	0,77	0,74	-	0,76
9	$dens_3$	0,85	0,79	0,76	-	0,78
10	MOR_4	0,59	0,60	0,51	0,71	0,57
11	$dens_4$	0,73	0,73	0,70	0,87	0,64
12	$freq_5$	0,52	0,54	0,48	0,61	0,52
13	$freq$	0,53	0,54	0,46	0,58	0,52
14	MOE_{freq}	0,81	0,83	0,78	0,88	0,81
15	$Runtime_6$	-0,50	-0,55	-0,49	-0,55	-0,52
16	MOE_6	0,84	0,86	0,81	0,90	0,84
17	$tKAR$	-0,18	-0,23	-0,22	-0,40	-0,21
18	MOR_7	0,84	0,86	0,80	0,84	0,78
19	MOE_7	0,81	0,83	0,76	0,81	0,78
20	$dens_7$	0,95	0,93	0,85	0,94	0,87

Zanimiva je korelacija pri tramih med $tKAR$ in gostoto, saj je ta v $tKAR$ največji pri tramih, kar ni povsem logično glede na to, da naj bi bil vpliv grč pri tramih najmanjši. Pri celotni populaciji ima najboljše korelacije naprava 1 in ji druge naprave niso blizu.

Preglednica 4.9: Korelacije za vse skupine med indikativno lastnostjo gostote naprave 4 ($dens_4$) in odločilnimi lastnostmi

$dens_4$	40x100	50x150	44x210	140x140	skupaj
f – trdnost	0,62	0,60	0,54	0,83	0,59
E_G – globalni modul	0,79	0,79	0,79	0,93	0,75
ρ – gostota	0,73	0,73	0,70	0,87	0,64

Indikativna lastnost gostote naprave 4 ($dens_4$) ima najboljše korelacije z modulom elastičnosti. Glede na to, da gre za indikativno lastnost gostote, bi pričakovali najboljše korelacije z gostoto in ne modulom elastičnosti.

4.1.2 Korelacije med posameznimi indikativnimi lastnostmi naprav

Med seboj smo primerjali rezultate vseh nedestruktivnih metod za vsako skupino posebej in za vse elemente skupaj. V preglednicah 4.10, 4.11, 4.12 in 4.13 smo s korelacijami želeli pokazati povezanost različnih indikativnih lastnosti. Pričakovano so najvišje korelacije med indikativnimi lastnostmi, ki delujejo na podlagi iste metode.

Preglednica 4.10: Korelacije modulov elastičnosti za vse elemente

vsi	E_G – globalni modul	E_L – lokalni modul	MOE_{GE706}	MOE_{freq}	MOE_{AU}	MOE_7
E_G – globalni modul	1,00					
E_L – lokalni modul	0,83	1,00				
MOE_1	0,93	0,74	1,00			
MOE_{freq}	0,92	0,73	0,98	1,00		
MOE_6	0,89	0,70	0,95	0,96	1,00	
MOE_7	0,91	0,76	0,96	0,96	0,93	1,00

Lokalni modul elastičnosti ima slabšo korelacijo z globalnim kot indikativne lastnosti naprav. Indikativni lastnosti naprave 1 in naprave GT-PRO imata izredno visoko korelacijo. Sicer gre za isto nedestruktivno metodo, vendar so natančnost merjenja in tehnološka zahtevnost ter posledično proizvodni stroški naprav, precej različna.

Preglednica 4.11: Korelacije vseh trdnosti za vse elemente

vsi	f – trdnost	MOR_1	MOR_2	MOR_3	MOR_4	MOR_7
f – trdnost	1,00					
MOR_1	0,78	1,00				
MOR_2	0,73	0,90	1,00			
MOR_3	0,69	0,89	0,97	1,00		
MOR_4	0,66	0,84	0,85	0,86	1,00	
MOR_7	0,70	0,86	0,89	0,90	0,86	1,00

Preglednica 4.12: Korelacije gostot za vse elemente

vsi	ρ – gostota	$dens_1$	$dens_3$	$dens_4$	$dens_7$
ρ – gostota	1,00				
$dens_1$	0,93	1,00			
$dens_3$	0,78	0,81	1,00		
$dens_4$	0,64	0,62	0,55	1,00	
$dens_7$	0,87	0,89	0,75	0,68	1,00

Korelacije indikativne lastnosti gostote naprave 4 so glede na indikativne lastnosti gostote ostalih naprav slabe. Zaradi tega naprava 4 verjetno slabše razvršča v trdnostne razrede, kot bi to lahko z boljšimi meritvami gostote.

Preglednica 4.13: Korelacije meritev frekvenc lastnega vzdolžnega nihanja za vse elemente

vsi	$freq_5$	$freq$	$runtime$
$freq_5$	1,00		
$freq$	0,98	1,00	
$Runtime_6$	-0,92	-0,92	1,00

Korelacija med indikativnima lastnostma naprave 5 in naprave razvite GT-PRO je izredno visoka, kar je pričakovati, saj gre za isto metodo preizkušanja in enak način merjenja nihanja (z mikrofonom).

4.2 Razvrščanje v trdnostne razrede in cenovne matrice

4.2.1 Trdnostni razredi

Iz rezultatov porušnih preizkusov, narejenih na Zavodu za gradbeništvo, smo določili trdnost f , ki smo jo uporabili za razvrstitev elementov v trdnostne razrede po standardu SIST EN 338 (preglednica 4.14). Upoštevali smo dejansko trdnost f , dobljeno s porušnim poskusom, globalni modul elastičnosti E_G , dobljen pri upogibnem pokončnem preizkusu in gostoto ρ dobljeno iz deset centimetrskih kosov čistega lesa brez grč, ki smo jo izmerili pri 0% vlažnosti in jo nato prevedli na 12% vlažnost. V trdnostne razrede smo razvrščali dvakrat: prvič v razrede C30, C24 in C18, da smo lahko dejanske razrede primerjali z vizualno ocenjenimi trdnostnimi razredi po SIST DIN 4074-1 (Viz-DIN), povezava je podana v standardu SIST EN 1912 in razredi določenimi z napravo GT-PRO. Drugič pa v razreda C35 in C24, v katera smo razvrstili elemente z napravo GT-PRO.

Preglednica 4.14: Zahtevane lastnosti za posamezne razrede po SIST EN 338

Razred	f_r [N/mm ²]	E_r [N/mm ²]	ρ_r [kg/m ³]
C50	50	16000	460
C45	45	15000	440
C40	40	14000	420
C35	25	13000	400
C30	30	12000	380
C27	27	11500	370
C24	24	11000	350
C18	18	9000	320
C16	16	8000	310

Optimalno razvrščanje je način razvrščanja elementov v trdnostne razrede, na osnovi odločilnih lastnosti: trdnosti f , dobljene s porušno metodo, modula elastičnosti E in gostote ρ . 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 dobimo na ta način razvrščanja največ možnih elementov v najvišjih razredih, se imenuje optimalno.

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

- trdnost 95 odstotkov elementov razreda mora presegati zahtevano trdnost f_r , oziroma, vrednost 5. centila 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. centila za gostoto $\rho_{0,05}$ mora biti višja od ρ_r

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

V programu EXCEL smo izdelali 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 14081-2:2011 in ga lahko povzamemo v nekaj točkah:

1. preizkušance najprej trikrat razvrstimo po vsaki od lastnosti v najvišji trdnostni razred, da ugotovimo kje jih je največ (recimo tej skupini a);
2. vzamemo preizkušance iz skupine a in jih razvrstimo po lastnosti, ki je dala druga največ preizkušancev v točki 1. (recimo tej skupina b);
3. točko 2. ponovimo še za zadnjo skupino c in preverimo, da vse tri karakteristične vrednosti presegajo zahtevane vrednosti;
4. s preostalimi preizkušanci ponovimo postopek za naslednje razrede.

5. centil določimo v skladu s standardom SIST EN 384.

Na osnovi zgoraj opisanega postopka smo dobili razvrstitve, kot jih prikazujeta preglednici 4.15 in 4.16.

Zaradi zaokroževanja eksperimentalnih rezultatov je ob premikanju meje z uporabljenim algoritmom nemogoče v nižji razred premikati samo po en kos, temveč se jih večinoma premakne več, torej vsi tisti, ki imajo enako trdnost. Posledica tega je, da je število elementov v razredu nekaj manjše, vendar to ne vpliva bistveno.

Preglednica 4.15: Optimalne razvrstitve elementov glede na standard SIST EN 14081-2 v različne kombinacije trdnostnih razredov standarda SIST EN 338

razred	C50	C50	C50	C50	C50	C50	C50	C50	C50	C50	C50	C50	C50	C50	
	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	
	C40	C40	C40	C40	C40	C40	C40	C40	C40	C40	C40	C40	C40	C40	
	C35	C35	C35	C35	C35	C35	C35	C35	C35	C35	C35	C35	C35	C35	
	C30	C30	C30	C30	C30	C30	C30	C30	C30	C30	C30	C30	C30	C30	
	C28	C27	C28	C28	C27	C28	C27	C28	C28	C28	C28	C28	C28	C28	
	C24	C24	C24	C24	C24	C24	C24	C24	C24	C24	C24	C24	C24	C24	C24
	C18	C18	C18	C18	C18	C18	C18	C18	C18	C18	C18	C18	C18	C18	C18
	C16	C16	C16	C16	C16	C16	C16	C16	C16	C16	C16	C16	C16	C16	C16
	C50												221	221	221
C45									362	362	362				
C40						545	545	545						224	
C35				760	760					243	243	448	448		
C30			993					241	483					298	
C27		1044			103		334								
C24	1059		0	156		427					256	191	191		
C18			49		169			272	184	454			144	316	
C16				143		59	180				198	199			
ostanek	0	15	17	0	27	28	0	1	30	0	0	0	55	0	

Iz zgornje preglednice je razvidno, da ob razvrščanju le v razred C24, vsi elementi ustrezajo pogojem tega razreda. Če predpostavimo, da je naš vzorec reprezentativen za ves slovenski smrekov les, to pomeni, da je ves slovenski smrekov les vsaj kvalitete razreda C24.

Iz preglednice 4.16 se vidi, da lahko kar 99 odstotkov elementov razvrstimo v razred C27 in kar 94 odstotkov v razred C30. Če je vzorec reprezentativen, imamo v Sloveniji zelo kvalitetno smrekovino. 72 odstotkov elementov lahko razvrstimo v razred C35 in več kot polovico v razred C40.

Če bi lahko naprave za razvrščanje dovolj dobro razvrščale bi bila najboljša kombinacija razredov C40-C24-C16. Razred C24 je primerljiv z razredom II. klasa po JUS standardu, ki se v večini primerov še vedno uporablja v Sloveniji pri statičnem računu in predpisovanju zahtevane nosilnosti konstrukcijskega lesa.

Preglednica 4.16: Optimalne razvrstitve elementov glede na standard SIST EN 14081-2 v različne kombinacije trdnostnih razredov standarda SIST EN 338

razred	C50	C50	C50	C50	C50	C50	C50	C50	C50	C50	C50	C50	C50	C50	
	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	C45	
	C40	C40	C40	C40	C40	C40	C40	C40	C40	C40	C40	C40	C40	C40	
	C35	C35	C35	C35	C35	C35	C35	C35	C35	C35	C35	C35	C35	C35	
	C30	C30	C30	C30	C30	C30	C30	C30	C30	C30	C30	C30	C30	C30	
	C28	C27	C28	C28	C27	C28	C27	C28	C28	C28	C28	C28	C28	C28	C28
	C24	C24	C24	C24	C24	C24	C24	C24	C24	C24	C24	C24	C24	C24	C24
	C18	C18	C18	C18	C18	C18	C18	C18	C18	C18	C18	C18	C18	C18	C18
	C16	C16	C16	C16	C16	C16	C16	C16	C16	C16	C16	C16	C16	C16	C16
C50												21%	21%	21%	
C45									34%	34%	34%				
C40						51%	51%	51%						21%	
C35				72%	72%					23%	23%	42%	42%		
C30			94%					23%	46%					28%	
C27		99%			10%		32%								
C24	100%			15%		40%						24%	18%	18%	
C18			5%		16%			26%	17%	43%			14%	30%	
C16				14%		6%	17%				19%	19%			
ostanek	0%	1%	2%	0%	3%	3%	0%	0%	3%	0%	0%	0%	5%	0%	

Za primerjavo razredov, dodeljenih z nedestruktivnimi metodami, in razredov, dobljenih z optimalnim razvrščanjem, smo uporabili frekvenčne in globalne cenovne matrike. V obeh matrikah se lahko vidi, kako dobro je posamezna metoda razvrstila elemente.

4.2.2 Frekvenčne matrike

Pravilnost razvrščanja naprav se dokazuje s frekvenčnimi matrikami in globalnimi cenovnimi matrikami, ki so opisane v naslednjem poglavju. Postopek je opisan v standardu SIST EN 14081-2. Gre za primerjavo med dodeljenimi razredi naprav in razredi optimalnega razvrščanja. Po diagonali je število pravilno razvrščenih elementov, nad diagonalo so podcenjeni elementi, pod njo pa precenjeni.

V preglednici 4.17 so v spodnji vrstici (skupaj) elementi razvrščeni v razrede po vizualnem standardu v skrajno desnem stolpcu (skupaj) so elementi razvrščeni z optimalnim razvrščanjem.

Preglednica 4.17: Frekvenčna matrika sortiranja po vizualnem standardu DIN 4074-1:2003 za kombinacijo C30-C24-C18

Optimalni razredi	Dodeljeni razredi – Viz-DIN				
	C30	C24	C18	ostanek	Skupaj
C30	97	305	222	368	992
C24	0	0	0	0	0
C18	0	6	8	35	49
ostanek	0	1	2	14	17
Skupaj	97	312	232	417	1058

Pri optimalnem razvrščanju v kombinacijo razredov C30-C24-C18 je kar 992 kosov (94 odstotkov) razvrščenih v razred C30. Iz zgornje preglednice je razvidno, da smo z vizualnim razvrščanjem v razred C30 razvrstili zgolj 97 (9 odstotkov), večina kosov pa smo sortirali v nižje razrede (88 odstotkov). Od tega je bilo 527 kosov (50 odstotkov) razvrščenih v nižja razreda (C24 in C18), kar 368 kosov (35 odstotkov) pa je bilo razvrščenih v ostanek namesto v C30. Vseh pravilno razvrščenih kosov je bilo zgolj 11 odstotkov.

Po standardu DIN 4074-1 razvrščamo v razrede S13, S10 in S7, ki jih lahko po standardu SIST EN 1912 prevedemo v C30, C24 in C18. Pri razvrščanju v kombinacijo razredov C30-C24-C18 je pri optimalnem razvrščanju in razvrščanju z napravo GT-PRO število elementov v razredu C24 nič, zato ta kombinacija ni smiselna.

Preglednica 4.18: Frekvenčna matrika naprave GT-PRO za kombinacijo C30-C24-C18

Optimalni razredi	GT-PRO				
	C30	C24	C18	ostanek	Skupaj
C30	772	0	220	0	992
C24	0	0	0	0	0
C18	18	0	31	0	49
ostanek	0	0	11	6	17
Skupaj	790	0	262	6	1058

Iz preglednice 4.18 lahko izračunamo, da je 76 odstotkov kosov razvrščenih pravilno (večina v C30). V nižji razred (C18 namesto C30) je razvrščenih 21 odstotkov kosov. Z uporabo naprave bi imeli zgolj po standardu zahtevanih 0,5 odstotkov zavrženih kosov.

Preglednica 4.19: Frekvenčna matrika naprave GT-PRO za kombinacijo C35-C24

Optimalni razredi	GT-PRO			
	C35	C24	ostanek	Skupaj
C35	314	446	0	760
C24	12	143	0	155
ostanek	0	137	6	143
Skupaj	326	726	6	1058

Pri razvrščanju v kombinacijo razredov C35-C24 je 44 odstotkov kosov razvrščenih v pravilni razred. V razred C24 namesto v C35 je razvrščenih 42 odstotkov kosov, v razred C24 namesto v ostanek je razvrščenih 14 odstotkov kosov. Ostanek pri uporabi naprave GT-PRO pri razvrščanju v kombinacijo razredov C35-C24 je 0,5 odstoten, kar je minimalen zahtevan delež kosov v ostanku po standardu SIST EN 14081-2.

4.2.3 Globalne cenovne matrike

Za pravilnost razvrščanja naprave je potrebno zadostiti pogojem standarda SIST EN 14081-2. En od teh pogojev je vezan na globalne cenovne matrike. Globalne cenovne matrike izračunamo tako, da vrednosti v frekvenčnih matrikah delimo s skupnim številom elementov v dotičnem dodeljenem razredu in pomnožimo z ustrežno utežjo iz osnovne cenovne matrike (preglednica 4.20) glede na dodeljen razred in optimalni razred.

Preglednica 4.20: Osnovna cenovna matrika za izbrane razrede (EN 14081-2)

Optimalni razredi	Dodeljeni razred								
	C50	C45	C40	C35	C30	C27	C24	C18	C16
C50	0	0,22	0,45	0,72	1,01	1,16	1,33	2,11	2,60
C45	0,37	0	0,23	0,49	0,77	0,92	1,09	1,85	2,33
C40	0,83	0,42	0	0,25	0,53	0,68	0,84	1,59	2,05
C35	1,43	0,95	0,48	0	0,27	0,42	0,57	1,30	1,76
C30	2,22	1,67	1,11	0,56	0	0,14	0,29	1,01	1,45
C27	2,84	2,22	1,60	0,99	0,37	0	0,15	0,85	1,29
C24	3,61	2,92	2,22	1,53	0,83	0,42	0	0,69	1,12
C18	5,93	5,00	4,07	3,15	2,22	1,67	1,11	0	0,40
C16	7,08	6,04	5,00	3,96	2,92	2,29	1,67	0,42	0

Enačbe za izračun uteži za ostanek je dokaj zapleten in ga ne bomo podrobneje opisovali. Vrednost je odvisna od karakterističnih vrednosti trdnosti optimalnih in dodeljenih razredov, ko gre za

razvrščanje v višje trdnostne razrede od optimalnih in od povprečnih vrednosti modulov elastičnosti optimalnih in dodeljenih razredov, ko gre za razvrščanje v nižje razrede.

Za izračun vrednosti globalne cenovne matrike v preglednici 4.22 za elemente, ki so bili z napravo GT-PRO razvrščeni v razred C24, pri optimalnem razvrščanju pa so bili razvrščeni med ostanek, smo uporabili utež z vrednostjo 0,63.

Preglednica 4.21: Globalna cenovna matrika naprave GT-PRO za kombinacijo C35-C24

Optimalni razredi	GT-PRO		
	C35	C24	ostanek
C35	0,00	0,35	0,00
C24	0,06	0,00	0,00
ostanek	0,00	0,12	0,00

Odebeljeno so označene vrednosti globalne cenovne matrike, ki po standardu 14081-2 ne smejo presegati vrednosti 0,2. Omejitev je zaradi varnosti, saj preprečuje, da bi bilo veliko število kosov glede na vzorec razvrščenih v višji razred, kot pri optimalnem razvrščanju.

4.2.4 Karakteristične vrednosti dodeljenih razredov

V preglednicah 4.22, 4.23 in 4.24 so podane karakteristične vrednosti dodeljenih razredov za kombinaciji razredov C30-C24-C18 in C35-C24 za vizualno razvrščanje in razvrščanje z napravo GT-PRO.

Preglednica 4.22: Karakteristične vrednosti razredov razvrščenih po vizualnem standardu DIN 4074-1:2003 za kombinacijo C30-C24-C18

DIN 4074-1	Trdnost	Elastični modul	Gostota
C30	31,63	12702	390
C24	28,14	12091	390
C18	24,80	11284	384
Ostanek	20,79	10122	372

Preglednica 4.23: Karakteristične vrednosti razredov naprave GT-PRO za kombinacijo C30-C24-C18

GT-PRO	Trdnost	Elastični modul	Gostota
C30	26,85	12958	404
C24	-	-	-
C18	19,04	8634	355
Ostanek	-	-	-

Ob primerjavi vrednosti v preglednicah 4.22 in 4.23 vidimo, da je vizualno razvrščanje očitno bolj konzervativno, kot razvrščanje z napravo GT-PRO.

Preglednica 4.24: Karakteristične vrednosti razredov naprave GT-PRO za kombinacijo C35-C24

GT-PRO	Trdnost	Elastični modul	Gostota
C35	35,37	15043	433
C24	21,60	10489	374

Vrednosti v preglednici 4.22 lahko primerjamo z zahtevanimi vrednostmi v preglednici 4.25, vrednosti v preglednicah 4.23 in 4.24 pa z vrednostmi v preglednici 4.26.

Po standardu SIST EN 338 in standardu SIST EN 384 lahko karakteristične vrednosti iz preglednice 4.14 spremenimo glede na način razvrščanja. Pri vizualnem smemo mejo modula elastičnosti za posamezni razred zmanjšati za 5 odstotkov. Pri strojnem pri razredih manjših ali enakih C30 mejo trdnosti delimo z vrednostjo 1,12. V spodnjih dveh preglednicah so podane spremenjene zahtevane karakteristične vrednosti.

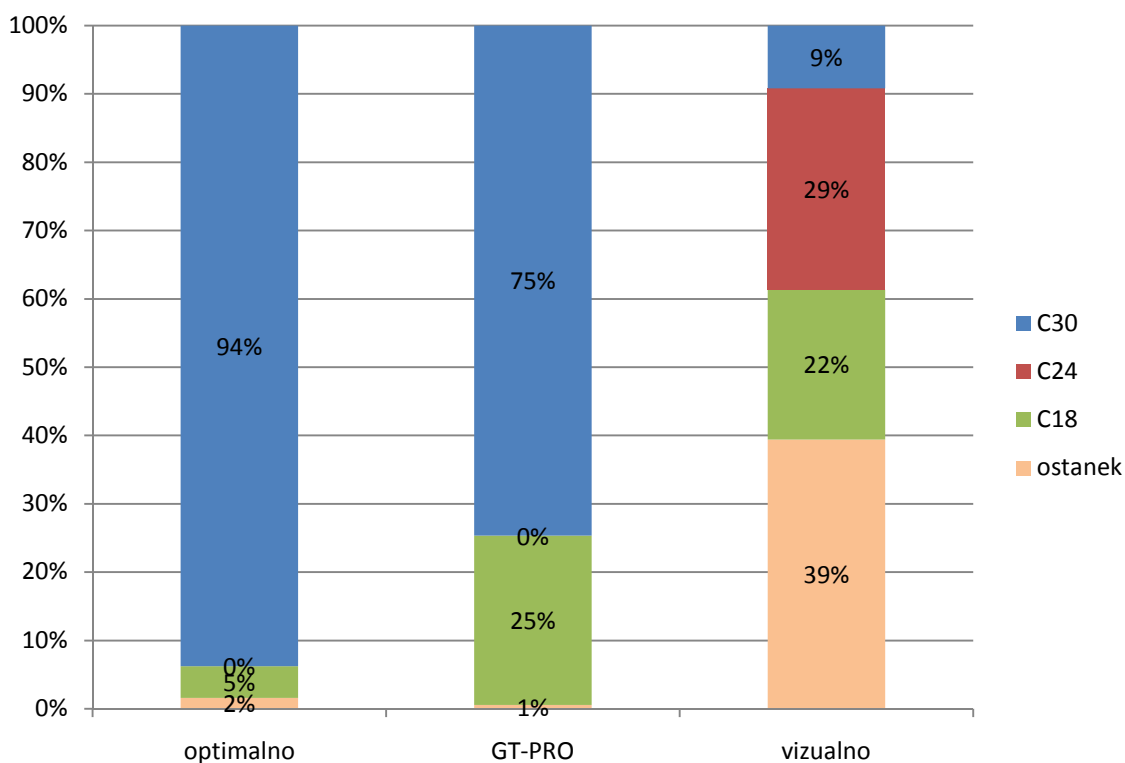
Preglednica 4.25: Minimalne spremenjene zahtevane karakteristične vrednosti razredov za vizualno razvrščanje

Vizualno	Trdnost	Elastični modul	Gostota
C30	30	11400	380
C24	24	10450	350
C18	18	8550	320

Preglednica 4.26: Minimalne spremenjene zahtevane karakteristične vrednosti razredov za strojno razvrščanje

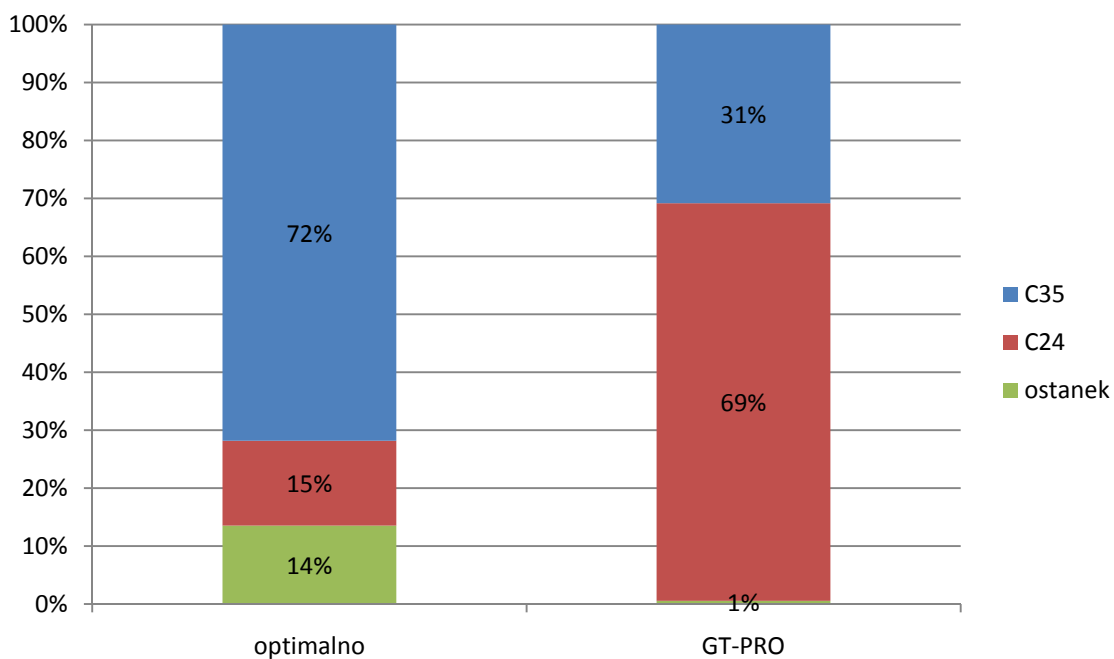
Strojno	Trdnost	Elastični modul	Gostota
C35	35	12350	400
C30	26,79	11400	380
C24	21,43	10450	350
C18	16,07	8550	320

4.2.5 Primerjava rezultatov vizualnega razvrščanja in naprave GT-PRO



Slika 4.3: Primerjava med optimalnim razvrščanjem, razvrščanjem z napravo GT-PRO in razvrščanjem z vizualnim standardom SIST DIN 4074-1 za kombinacijo C30-C24-C18

V slikah 4.2 in 4.3 je pri napravi GT-PRO 1 odstotek ostanka umetno narejen, saj gre zgolj za izpolnjevanje zahtev standarda po minimalnem odpadku.



Slika 4.2: Primerjava med optimalnim razvrščanjem in razvrščanjem z napravo GT-PRO za kombinacijo C35-C24

Na slikah 4.2 in 4.3 se vidi razlika v zanesljivosti in posledično konservativnost vizualnega razvrščanja v primerjavi s strojnimi. Vidimo lahko tudi, kaj praktično pomeni 72 odstotna korelacija med izmerjenim modulom elastičnosti naprave GT-PRO in dejansko trdnostjo, pri razvrščanju v trdnostne razrede.

5. ZAKLJUČEK

Pravila pri vizualnem razvrščanju so zelo obširna ter podrobna in jih je težko upoštevati v redni proizvodnji. Obravnavali smo standard DIN 4074-1 in del standarda BS 4978, vezan na delež ploščin grč. Pri standardu DIN 4074-1 se nam je pojavilo vprašanje glede smiselnosti kombinacije vizualnih razredov S13-S10-S7 in posledično trdnostnih razredov C30-C24-C18, saj je pri optimalnem razvrščanju razred C24 prazen. Ob meritvah deleža ploščin grč smo ugotovili, da je dosledna uporaba standarda BS 4978 praktično nemogoča.

Preizkušance smo preizkusili z več različnimi napravami. Večina teh deluje po metodi vzdolžnega nihanja. V sklopu raziskave ARRS smo razvili napravo GT-PRO, ki deluje po isti metodi.

Po nedestruktivnih meritvah smo izvedli še destruktivne preizkuse in tako določili fizikalne in mehanske lastnosti elementov. Pri meritvah globalnega in lokalnega modula elastičnosti se nismo dosledno upoštevali zahtev standarda SIST EN 408. Pomike smo namesto na sredini višine elementov merili na dnu, vendar to ni bistveno vplivalo na rezultate. Merili smo pomik na sredini razpona in 2,5 h levo ter desno od sredine razpona. Lokalni modul elastičnosti smo izračunali iz razlike srednjega pomika ter povprečja levega in desnega pomika.

Od 1074 elementov smo jih zaradi slabih meritev ali poškodb izločili 25. Večino smo jih izločili zaradi slabe meritve lokalnega modula in zaradi vzdolžne strižne porušitve plohov, ki so bili obremenjeni po celotni dolžini.

Pri pregledu korelacij med različnimi indikativnimi lastnostmi in odločilnimi lastnostmi smo ugotovili, da so najboljše korelacije pri tramih in najslabše pri plohah. Od indikativnih lastnosti naprav ima najslabšo korelacijo s trdnostjo gostota naprave 3, medtem ko ima najboljšo naprava 1. Med posameznimi napravami ima naprava 1 najvišje korelacije pri vseh skupinah in vseh odločilnih lastnostih. Korelacija naprave 1 s trdnostjo pri tramih je 0,82.

Naprava GT-PRO se je izkazala za dobro, saj ima dokaj dobre korelacije v vseh skupinah. Korelacija s trdnostjo pri tramih je 0,80, kar je odlično glede na preprostost naprave.

Naredili smo več različnih kombinacij optimalnih razvrščanj. Ugotovili smo:

- pri razvrščanju samo v razred C24 se vsi elementi uvrstijo v ta razred,

- pri razvrščanju samo v razred C27 se vanj uvrsti 99 odstotkov elementov,
- pri razvrščanju samo v razred C30 je kar 94 odstotkov elementov znotraj meja,
- pri razredu C35 je 72 odstotkov elementov ustreznih.

Če bi znali dovolj dobro razvrščati, bi lahko skoraj ves les razvrstili v razred C30. V praksi je to izredno težko doseči.

Z optimalnimi razredi smo primerjali različne kombinacije razvrščanj naprave GT-PRO. S tako ali boljšo napravo lahko vse kose razvrstimo v razred C24 in skoraj vse v C27. Če razvrščamo v kombinacijo C30-C24-C18 primerljivo z vizualnimi razredi, jih naprava 75 odstotkov razvrsti razred C30 in 25 odstotkov v C18. Tako kot pri optimalnem razvrščanju je tudi pri tej kombinaciji razredov, razred C24 prazen.

Z rezultati vizualnega razvrščanja po DIN 4074-1:2008 smo primerjali optimalno razvrščanje. Pri optimalnem razvrščanju v kombinacijo C30-C24-C18, je bilo 992 kosov v C30, 0 kosov v C24, 49 kosov v C18 in 17 kosov odpadka. Od 992 kosov smo jih z vizualnim standardom v C30 razvrstili zgolj 97. Z vizualnim razvrščanjem smo jih pravilno razvrstili zgolj 11 odstotkov, 88 odstotkov smo jih razvrstili v nižje razrede, od tega jih je kar 35 odstotkov namesto v razredu C30 pristalo v ostanku.

Če je naš vzorec reprezentativen za Slovenijo, lahko zaključimo, da večina slovenskega žaganega lesa smreke sodi v trdnostni razred C30. Glede na to, da se v praksi pri projektiranju še vedno večinoma uporablja stara oznaka, iz JUS standardov, II. klasa oziroma današnja C24, je projektiranje ob nepoznavanju dejanskih lastnosti lesa zelo na varni strani. Nikakor pa ni ekonomsko, saj vgrajen les ni izkoriščen. Ob uporabi naprav za razvrščanje bi hitro ugotovili, da lahko brez večjih ostankov pri razvrščanju pri projektiranju uporabljamo trdnostni razred C30.

VIRI

BS 4978:2007+A1:2011. Visual strength grading of softwood. Specification.

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 15: 93-101.

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

Ross, R. J., Pellerin, R. F. 1994. Nondestructive Testing for Assessing Wood Members in Structures: A Review.

www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr70.pdf. (Pridobljeno 14.4.2009.)

SIST EN 338:2010. Konstrukcijski les - Trdnostni razredi.

SIST EN 384:2010. Konstrukcijski les - Ugotavljanje značilnih vrednosti mehanskih lastnosti in gostote.

SIST EN 408:2010. Lesene konstrukcije - Konstrukcijski les in lepljeni lamelirani les - Ugotavljanje nekaterih fizikalnih in mehanskih lastnosti.

SIST EN 1912:2004+A4:2010. Konstrukcijski les - Trdnostni razredi - Določitev trdnostnih razredov na podlagi vizualnega razvrščanja in vrste lesa.

SIST EN 13183-1:2003/AC:2004. Delež vlage v žaganem lesu - 1. del: Določevanje s sušenjem v pečici.

SIST EN 13183-2:2003/AC:2004. Delež vlage v žaganem lesu - 2. del: Ocena z metodo električne upornosti.

SIST EN 14081-1:2006+A1:2011. Lesene konstrukcije - Razvrščanje konstrukcijskega lesa pravokotnega prečnega prereza po trdnosti - 1. del: Splošne zahteve.

SIST EN 14081-2:2011. Lesene konstrukcije - Razvrščanje konstrukcijskega lesa pravokotnega prečnega prereza po trdnosti - 2. del: Strojno razvrščanje; dodatne zahteve za začetni preskus proizvodnje.

SIST EN 14081-3:2006. Lesene konstrukcije - Razvrščanje konstrukcijskega lesa pravokotnega prečnega prereza po trdnosti - 3. del: Strojno razvrščanje; dodatne zahteve za notranjo kontrolo proizvodnje.

SIST EN 14081-4:2009. Lesene konstrukcije - Razvrščanje konstrukcijskega lesa pravokotnega prečnega prereza po trdnosti - 4. del: Strojno razvrščanje - Nastavitve strojev za razvrščanje pri strojno kontroliranih sistemih.

SIST EN 14358:2007. Lesene konstrukcije - Računske lastnosti 5-percentilne vrednosti in privzemni kriteriji za vzorce.

Stanek, M., Turk, G. 2003. Trdnost. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

www.km.fgg.uni-lj.si/predmeti/Trdnost-VSS/literat/ucbenik/trdnost1.pdf. (Pridobljeno 1.3.2009.)

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