

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Marko PIRMAN

**KORELACIJE MED UDARNO ŽILAVOSTJO IN
NEDESTRUKTIVNO DOLOČENIMI MEHANSKIMI
LASTNOSTMI SMREKOVINE**

DIPLOMSKO DELO
Visokošolski strokovni študij

**CORRELATIONS BETWEEN IMPACT BENDING
STRENGTH AND NON-DESTRUCTIVELY
DETERMINED MECHANICAL PROPERTIES
OF SPRUCE WOOD**

GRADUATION THESIS
Higher professional studies

Ljubljana, 2011

Diplomsko delo je zaključek Visokošolskega strokovnega študija lesarstva. Opravljeno je bilo na Katedri za žagarstvo in lesna tvoriva, testiranje udarne žilavosti pa na Katedri za tehnologijo lesa Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete je za mentorico diplomskega dela imenoval doc. dr. Dominiko Gornik Bučar, somentorja izr. prof. dr. Bojana Bučarja in za recenzenta izr. prof. dr. Željka Goriška.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Marko Pirman

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Vs
DK	UDK 630*812
KG	smrekovina/udarna žilavost/mehanske lastnosti/lom
AV	PIRMAN, Marko
SA	GORNIK BUČAR, Dominika (mentorica)/BUČAR, Bojan (somentor)/GORIŠEK, Željko (recenzent)
KZ	SI-1000 LJUBLJANA, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2011
IN	KORELACIJE MED UDARNO ŽILAVOSTJO IN NEDESTRUKTIVNO DOLOČENIMI MEHANSKIMI LASTNOSTMI SMREKOVINE
TD	Diplomsko delo (visokošolski strokovni študij)
OP	X, 46 str., 46 sl., 4 pril., 14 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Pri uporabi lesa v gradbene in konstrukcijske namene so bistvenega pomena njegove mehanske lastnosti. Določali smo udarno žilavost smrekovine (<i>Picea abies</i> L.) in iskali korelacijo med udarno žilavostjo, modulom elastičnosti in trdnostjo. Ugotavljali smo tudi vpliv gostote in hitrost priraščanja na udarno žilavost. Testni vzorec je zajemal po 100 desk in 100 plohov smrekovine, z znanim modulom in trdnostjo. Iz osnovnih vzorcev smo izžagali po 2 vzorca brez napak za testiranje udarne žilavosti po standardu DIN 52189. Rezultati raziskave kažejo na določeno šibko povezavo rezultatov testiranja celih preizkušancev in preizkušancev za določanje udarne žilavosti. Potrdili smo korelacijo med gostoto, hitrostjo priraščanja in udarno žilavostjo.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Vs
DC UDC 630*812
CX spruce wood/impact bending strength/mechanical properties/fracture
AU PIRMAN, Marko
AA GORNIK BUČAR, Dominika (supervisor)/BUČAR, Bojan (co-supervisor)/
GORIŠEK, Željko (reviewer)
PP SI-1000 LJUBLJANA, Rožna dolina, c. VIII/34
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science
and Technology
PY 2011
TI CORRELATIONS BETWEEN IMPACT BENDING STRENGTH
AND NON-DESTRUCTIVELY DETERMINED MECHANICAL PROPERTIES
OF SPRUCE WOOD
DT Graduation Thesis (Higher professional studies)
NO X, 46 p., 46 fig., 4 ann., 14 ref.
LA sl
AL sl/en
AB Mechanical properties are essential when using wood for building and construction purposes. We determined the impact bending strength of spruce wood (*Picea abies* L.), and searched for correlations among the impact of bending strength, modulus of elasticity and strength. We also determined the effect of density and ring width on the impact bending strength. The specimen consisted of 100 boards and 100 spruce planks, with a known modulus of elasticity and strength. To test the impact bending strength according to DIN 52189 2 samples free of defects were cut from whole boards or planks. The results show some weak link among the test results of the whole samples compared to those cut ones to determine the impact bending strength. We confirmed the correlation among density, ring width and impact bending strength.

KAZALO VSEBINE

	str.
Ključna dokumentacijska informacija	III
Key words documentation	IV
Kazalo vsebine	V
Kazalo slik	VIII
Kazalo prilog	X
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	1
1.2 CILJ NALOGE	1
1.3 DELOVNA HIPOTEZA	1
2 PREGLED OBJAV	2
2.1 UDARNA ODPORNOST OZIROMA ŽILAVOST	2
2.1.1 Splošne značilnosti	2
2.1.2 Preizkusi udarne žilavosti	2
2.1.2.1 Charpy-jev test udarne žilavosti	4
2.1.2.2 Izod-ov test udarne žilavosti	4
2.1.2.3 Test udarne žilavosti z enojnim udarcem	4
2.1.2.4 Zaporeden udarni test žilavosti	5
2.1.2.5 Primerjava rezultatov udarne žilavosti	7
2.1.3 Dejavniki, ki vplivajo na udarno žilavost	7
2.1.3.1 Potek vlaken	7
2.1.3.2 Gostota	8
2.1.3.3 Ravnovesna vlažnost	9
2.1.3.4 Temperatura	9

2.1.3.5	Anatomske lastnosti	10
2.2	VRSTE LOMOV PRI UDARNI ŽILAVOSTI	10
2.3	STANDARDIZIRANO DOLOČANJE UDARNE ŽILAVOSTI	12
2.4	STATIČNO DOLOČANJE MEHANSKIH LASTNOSTI	13
2.5	DINAMIČNO DOLOČANJE MEHANSKIH LASTNOSTI	14
2.5.1	Vizualno razvrščanje	14
2.5.2	Metoda frekvenčnega odziva	14
2.5.3	Druge nedestruktivne metode	15
3	MATERIALI IN METODE	16
3.1	PRIPRAVA PREIZKUŠANCEV	16
3.1.1	Določanje dolžine loma	17
3.1.2	Določanje gostote	19
3.1.3	Merjenje širine branik	19
3.1.4	Metoda mehanskega določanja udarne žilavosti	20
3.1.5	Metoda določanja udarne žilavosti s pospeškometerom	21
3.1.6	Obdelava podatkov	24
4	REZULTATI IN INTERPRETACIJA REZULTATOV	29
4.1	DOLŽINA LOMA	29
4.2	GOSTOTA PREIZKUŠANCEV	30
4.3	ŠIRINA BRANIK	32
4.4	UDARNA ŽILAVOST	34
4.5	KORELACIJA MED UDARNO ŽILAVOSTJO, MODULOM ELASTIČNOSTI IN TRDNOSTJO	36
4.6	KORELACIJA MED NORMALIZIRANIMI VREDNOSTMI, TRDNOSTJO CELIH VZORCEV IN MODULOM ELASTIČNOSTI	38
5	RAZPRAVA IN SKLEPI	40

5.1	RAZPRAVA	40
5.2	SKLEPI	41
6	POVZETEK	43
7	VIRI	45
	ZAHVALA	
	PRILOGE	

KAZALO SLIK

	str.
Slika 1:	Korelacije nekaterih trdnosti v odvisnosti od gostote (Gorišek 2009: 157) 8
Slika 2:	Korelacija med udarno žilavostjo in specifično težo za štiri različne drevesne vrste (Ghelmeziu 1967/68: 387) 9
Slika 3:	Primer lesa z visoko udarno žilavostjo (Kollmann 1984: 392) 10
Slika 4:	Prelom lesa s poprečnimi lastnostmi pokaže krajše, bolj vlaknate iveri (Kollmann 1984: 392) 11
Slika 5:	Ravne in gladke lomne površine nakazujejo na les z nizko udarno žilavostjo (Kollmann 1984: 392) 11
Slika 6:	Postavitev preizkušanca na podpore pri testu udarne žilavosti (DIN 52189) 13
Slika 7:	Shematski prikaz štiri-točkovnega upogibnega testa (Gorišek 2009: 161) 13
Slika 8:	Razrez preizkušanca za testiranje 16
Slika 9:	Dolg prelom preizkušancev pri testiranju udarne žilavosti. 17
Slika 10:	Običajen prelom preizkušancev pri preizkusu udarne žilavosti. 18
Slika 11:	Krški preizkušanci imajo pri testiranju udarne žilavosti zelo kratke iveri. 18
Slika 12:	Ozke branike na vzorcih nekaterih desk 19
Slika 13:	Široke branike na vzorcih nekaterih plohov 20
Slika 14:	Charpy-jevo udarno kladivo za merjenje udarne žilavosti (wikipedija). 21
Slika 15:	Geometrija udarnega kladiva za merjenje udarne žilavosti. 22
Slika 16:	Shema delovanja testa udarne žilavosti 23
Slika 17:	Odziv pospeškometra ob lomu in programska oprema za zbiranje in shranjevanje podatkov 23
Slika 18:	Odziv pospeškometra ob lomu preizkušanca D32-2 24
Slika 19:	Odziv pospeškometra na uporabnem odseku ob lomu preizkušanca D32-2 24
Slika 20:	Postavitev grafa v izhodišči položaj preizkušanca D32-2 25
Slika 21:	Graf pospeškov oz. pojemkov v času loma preizkušanca D32-2 26
Slika 22:	Odziv pospeškometra in opravljeno delo ob lomu preizkušanca D32-2 26
Slika 23:	Odziv pospeškometra in hitrosti na uporabnem odseku ob lomu preizkušanca D32-2 27
Slika 24:	Graf sile in pospeška ob lomu preizkušanca D32-2 28
Slika 25:	Korelacija med udarno žilavostjo izmerjeno s pospeškometerom in dolžino loma; deske 29
Slika 26:	Korelacija med udarno žilavostjo izmerjeno s pospeškometerom in dolžino loma; plohi 29
Slika 27:	Korelacija med gostoto preizkušancev za udarno žilavost in gostoto celih preizkušancev; deske 30
Slika 28:	Korelacija med gostoto preizkušancev za udarno žilavost in gostoto celih preizkušancev; plohi 30
Slika 29:	Primerjava gostote preizkušancev za udarno žilavost in malih preizkušancev; deske 31
Slika 30:	Primerjava gostote preizkušancev za udarno žilavost in malih preizkušancev; plohi 31

Slika 31:	Korelacija med gostoto in širino branik; deske	32
Slika 32:	Korelacija med gostoto in širino branik; plohi	32
Slika 33:	Korelacija med širino branik in udarno žilavostjo; deske	33
Slika 34:	Korelacija med širino branik in udarno žilavostjo; plohi	33
Slika 35:	Korelacija udarne žilavosti glede na različen način merjenja; deske	34
Slika 36:	Korelacija udarne žilavosti glede na različen način merjenja; plohi	34
Slika 37:	Korelacija med gostoto preizkušancev za udarno žilavost in udarno žilavostjo; deske	35
Slika 38:	Korelacija med gostoto preizkušancev za udarno žilavost in udarno žilavostjo; plohi	35
Slika 39:	Korelacija med udarno žilavostjo in MOE; deske	36
Slika 40:	Korelacija med udarno žilavostjo in MOE; plohi	36
Slika 41:	Korelacija med trdnostjo celih preizkušancev in udarno žilavostjo izžaganih vzorcev; deske	37
Slika 42:	Korelacija med trdnostjo celih preizkušancev in udarno žilavostjo izžaganih vzorcev; plohi	37
Slika 43:	Korelacija med trdnostjo celih preizkušancev in udarno žilavostjo izžaganih vzorcev; deske	38
Slika 44:	Korelacija med trdnostjo celih preizkušancev in udarno žilavostjo izžaganih vzorcev; plohi	38
Slika 45:	Normirane vrednosti žilavosti na gostoto v odvisnosti od trdnosti; deske	39
Slika 46:	Normirane vrednosti žilavosti na gostoto v odvisnosti od trdnosti; plohi	39

KAZALO PRILOG

Priloga: A1	Meritve preizkušancev za udarno žilavost za deske
Priloga: A2	Meritve preizkušancev za udarno žilavost za plohe
Priloga: B1	Izračuni trdnosti, MOE, gostote celih vzorcev in udarna žilavost za deske
Priloga: B2	Izračuni trdnosti, MOE, gostote celih vzorcev in udarna žilavost za plohe

1 UVOD

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Zahteva po določevanju trdnostnih lastnosti lesa izhaja iz potrebe po uporabi lesa v konstrukcijske namene. Zaradi heterogenosti materiala (napake lesa, usmerjenost vlaken, gostote) močno variirajo tudi njegove mehanske lastnosti, kar privede do potrebe po razvrščanju vseh elementov oziroma sestavljenih konstrukcijskih izdelkov v trdnostne razrede. Edine metode določanja mehanskih lastnosti, ki jih je glede na omenjeno zahtevo možno uporabiti, so metode, ki sodijo v skupino neporušnih oziroma nedestruktivnih metod. Problem omenjenih metod pa je v tem, da z njimi dobimo le ocenjeno vrednost in ne dejanske trdnosti materiala. Le-te je možno pridobiti samo z metodami, ki temeljijo na poružitvah preiskovanega materiala in so kot take v industrijskih razmerah neuporabne. Zaradi tega je iskanje signifikantnih korelacij med nedestruktivnimi in porušnimi metodami zelo pomembna.

Novih raziskav s področja udarne žilavosti je malo, poleg tega sodi določanje udarne žilavosti v področje porušnih meritev.

Gradbeni oz. konstrukcijski les je lahko občasno podvržen tudi udarnim obremenitvam, ki so za razliko od statičnih obremenitev hipne. Les se na hipne obremenitve odziva drugače.

1.2 CILJ NALOGE

V diplomski nalogi smo želeli preučiti, kakšne so korelacije med dinamično določenimi mehanskimi lastnostmi in udarno žilavostjo, ki sodi v skupino destruktivnih metod.

1.3 DELOVNA HIPOTEZA

Rezultati nedestruktivnih metod določanja mehanskih lastnosti lesa so v korelaciji z rezultati pridobljenimi s porušnimi metodami (štiri-točkovni upogibni test) in testi udarne žilavosti. Klasični Charpy-jev test udarne žilavosti je možno nadgraditi in meriti pojemke na udarnem kladivu med lomom preizkušanca. Omenjena modifikacija omogoča natančnejše merjenje udarne žilavosti.

2 PREGLED OBJAV

2.1 UDARNA ODPORNOST OZIROMA ŽILAVOST

2.1.1 Splošne značilnosti

Les je naraven material biološkega izvora, je zelo variabilen in heterogen material. Njegove mehanske lastnosti so predvsem odvisne od prisotnosti, velikosti in razporeditve grč, razpok, zavivosti vlaken, prisotnosti reakcijskega lesa in morebitnega razkroja. Na mestu, kjer je grča oz. napaka se spremeni smer lesnih vlaken, zato tu nastane šibko mesto za obremenitev. Zavitost vlaken ima izrazit vpliv na trdnost lesenih delov. Reakcijski les je trd in krhek. Njegova prisotnost v lesu pomeni neuravnoteženo strukturo v lesu. Razkroj je razpad lesa, ki ga povzročajo glive, njihov vpliv na trdnost lesa pa je težje ovrednotiti (Luong 2004).

Leseni deli strojev, športnega orodja, letal, ročnega orodja, kakor tudi elementi v gradbeništvu so izpostavljeni hipnim obremenitvam in prenašajo višjo udarno obremenitev kot statično obremenitev. Udarna obremenitev se izvede v zelo kratkem času, za porušitev je potrebnih le nekaj milisekund. Odpor lesa proti udarni obremenitvi je udarna žilavost, ki je sposobnost materiala za absorpcijo energije. Material z višjo udarno odpornostjo je bolj žilav oz. les z nižjo udarno žilavostjo je bolj krhek. Pri hipnem delovanju sile je les sposoben prenesti večje obremenitve (do 150 %) kot pri standardnem upogibnem testu, povprečje je pri tem do 2-krat večji.

Udarne žilavosti trdnih teles je odvisna od njihove sposobnosti akumuliranja energije in njene porazdelitve v deformacijo. V tem pogledu so žilavi materiali sposobnejši od krhkih. Delo končne obremenitve je enako celotni sprejeti energiji pri udarni obremenitvi (Kollmann 1984).

Raziskave s področja udarne žilavosti so po večini starejšega datuma. Glavne raziskave F. Kollmann-a so na kratko predstavljene v zborniku *Nondestructive evaluation of wood* iz *Forest Products Society* (Kollmann 1984). Novejših raziskav s področja udarne žilavosti lesa je razmeroma malo, z izjemo Bodig in Collins 2001 in Leijten 2004.

2.1.2 Preizkusi udarne žilavosti

Zgodovinsko gledano so bili testi udarne žilavosti prvi tip udarnih testov. Bodig in Collins (2001) omenjata Hatt-Turner test z uporabo udarnih bremen v zaporedju, pred letom 1900. Pred drugo svetovno vojno, ko so les uporabljali v velikem obsegu za sestavne dele letal in jadralnih letal je postalo očitno, da so bili dodatni testni podatki nujno potrebni za izboljšanje obnašanja lesa pod obremenitvijo (Kollmann 1940).

V ta namen je bil vpeljan splošni test v *Forest Products Laboratory, Madison ZDA* za preučevanje odziva materiala na tlačne in upogibne obremenitve. Testirane deske so bile majhnih dimenzij, brez napak in z vzporednim potekom vlaken. Čas obremenitve je bil 0,3

do 150 sekund. Upogibni testi so bili izvedeni s hidravličnim strojem za testiranje s konstantnim pomikom.

Madsen (1986) in Jansson (1992) sta preučevala udarno žilavost na enostavno podprtih lesenih tramovih s spuščanjem uteži z različnih višin. Tri točkovna obremenitev je bila izvršena s prenosom sil padajočega bremena. Bistveno pri tem testu je, da je udarna moč merjena s pomočjo merilnih celic med padcem bremena na vzorec. V analizi je dokazan pomen ločevanja obremenitev, kjer je v prvem delu vpliv upogibnih napetosti in drugi del, kjer je prikazan preizkušanelec v gibanju. Pri tem je potrebno poudariti, da so predhodni raziskovalci zanemarili vztrajnostne sile, kar ni bilo korektno.

Leijten (2004) ugotavlja, da se udarna žilavost znižuje s krajšanjem časa loma, kar se razlikuje od predhodnih raziskav, ki navajajo, da je trdnost s hitrostjo enaka. Pri krajših časih obremenitve manjših od 10 milisekund je dokazano, da trdnost pada za 15 % (Leijten 2004).

Udarne preizkusi so namenjeni merjenju odpornosti materiala ob hipni obremenitvi, kar imenujemo udarna žilavost. Za določevanje udarne žilavosti se najpogosteje uporablja metoda nihajočega udarnega kladiva. Pri udarnem preizkusu merimo količino energije, ki je potrebna, da z enim udarcem material porušimo. Absorbirana energija je enaka razliki potencialnih energij kladiva na začetku in koncu nihaja. Najbolj razširjeni metodi oz. testa za ugotavljanje udarne žilavosti sta:

- Charpy-jev test
- Izod-ov test

Oblika preizkušancev je za obe metodi enaka, principa sta podobna, razlika je le v načinu vpetja preizkušanca ter v obliki in hitrosti udarnega kladiva. Če ima preizkušanelec na sredini tudi zarezo predpisane oblike, govorimo o zarezni metodi določanja udarne žilavosti.

Izod-ov test, kot tudi Charpy-jev test se uporabljata tudi za testiranje materiala pri nizki temperaturi, s čimer simuliramo pogoje, ki se lahko pojavijo pri dejanski uporabi materiala.

Preizkušanelec vpnemo na eni strani in udarno kladivo postavimo v začetni položaj, kjer ima določeno potencialno energijo. Ko kladivo prosto spustimo, se njegova potencialna energija spreminja v kinetično. Preizkušanelec se ob dotiku kladiva najprej deformira elastično, nato plastično, pri določenem upogibu pa nastane razpoka, ki napreduje do popolne ločitve obeh delov preizkušanca. Kladivo se po lomu dvigne do neke višine, kjer ima zopet neko potencialno energijo, vendar je tu manjša kot v začetnem položaju. Rezultat udarne žilavosti oz. zarezne udarne žilavosti je razlika potencialnih energij kladiva, ki je odvisna od preizkušanca.

2.1.2.1 Charpy-jev test udarne žilavosti

Charpy-jev udarni preizkus je izumil Georges Augustin Albert Charpy (1865-1945). Charpy-jev test meri energijo, ki jo absorbira standardno izdelan vzorec medtem, ko se zlomi pod obremenitvijo. Test se uporablja za določitev udarne žilavosti inženirskih materialov.

Tako imenovano Charpy-jevo kladivo spustimo da zaniha. Pri tem kladivo udari ob preizkušanelec, ki leži med dvema podporama, kateri sta oddaljeni druga od druge za 40 mm, nato pa zaniha v nasprotni smeri in doseže končno lego, ki je nižja od začetne. Razlika med začetno in končno višino nastane zaradi porabljene energije za prelom preizkušanca. Charpy-jev test se najpogosteje uporablja za kovine, vendar se uporablja tudi za kompozite, keramiko, les in druge materiale.

2.1.2.2 Izod-ov test udarne žilavosti

Test se imenuje po angleškem inženirju Edwinu Gilbertu Izodu (1876-1946), ki je tako imenovan Izodov test iznašel leta 1903. Izod-ov preizkus sestoji iz nihala, udarnega kladiva z določeno maso, ki ob zanihanju navzdol odlomi navpično postavljen konzolno vpet preizkušanelec. Udarna trdnost je določena z izgubo energije nihala, ki jo natančno določimo z merjenjem izgube višine nihaja.

Izod-ov test je modificiral Georges Charpy s tem, da je postavil preizkušanelec v vodoravno lego. To je primarna razlika med Izod-ovim in Charpy-jevim testom. Izod-ov test se razlikuje tudi v tem, da se zareza na preizkušancu nahaja na strani udarca kladiva. Velikost in oblika vzorca se pri Izod-ovem testu razlikuje glede na material, ki se preizkuša. Vzorci kovin in lesa so ponavadi kvadratnega prereza, polimeri pa običajno pravokotnega prereza. Kladivo udari pravokotno na vzdolžno os preizkušanca.

2.1.2.3 Test udarne žilavosti z enojnim udarcem

Za določanje udarne žilavosti je primeren enojni udarni test na majhnih vzorcih dimenzij $20 \times 20 \times 280$ mm. Za testiranje so primerne in mednarodno standardizirane naprave s sredinsko obremenitvijo in razponom med podporama 24 cm. Celoten zlom na vzorcu mora biti opravljen v enem zamahu. Vzorci morajo biti orientirani tako, da je udarec izveden tangencialno na letnice. Udarna žilavost je odvisna od prečnega prereza preizkušanca in absorbirane energije po enačbi (1).

$$a = \frac{W}{A} = \left[\frac{kJ}{m^2} \right] \quad \dots(1)$$

Pri čemer je:

A – prečni prerez preizkušanca [m^2]

W – absorbirana energija [kJ/m^2]

a – opravljeno delo

Z uporabo ustrezne naprave je možno izmeriti odpornost pod podporo. Naprava ima eno togo podporo, drugo pa pomično v smeri udarca. Ob udarcu jeklena kroglica s premerom 1 cm pritise ob drog iz aluminija z znano odpornostjo H_B . Premer odtisa kroglice d je merilo za določanje odpornosti P po formuli (2).

$$P = \pi(1 - \sqrt{1 - d^2})H_B \quad \dots(2)$$

Če vrednost P vnesemo v klasično formulo za porušni modul in če so standardne mere vzorca $20 \times 20 \times 240$ mm, je dinamični moduli porušitve (3).

$$\sigma_{bbd} = 4,5P = 14,14(1 - \sqrt{1 - d^2})H_B \quad \dots(3)$$

Naprava se prilagodi pred preizkusom tako, da nihalo visi točno vertikalno. Nihalo zadene ob vzorec, 15° predenj doseže pokončno lego. Ob zamahu je dosežen popoln zlom in test je zaključen. Položaj nihala in začetni kot (30° , 45° ali 60°) je potrebno izbrati tako, da je popoln zlom vzorca opravljen v enem zamahu. Rezultati so natančni, ko je razlika med začetnim in končnim kotom vsaj 10° . Začetni in končni kot se odčita na $0,1^\circ$ natančno. Tako žilavost izračunamo po formuli (4).

$$T = W_p \times L(\cos A_2 - \cos A_1) \quad \dots(4)$$

Pri čemer je:

T – žilavost (delo na vzorcu) [J]

W_p – teža nihala [kg]

L – razdalja od središča podpore do težišča nihala [m]

A_1 – vstopni; začetni kot

A_2 – končni kot, ko nihalo naredi pot preko loma

Osnovne meritve žilavosti lesa je izvedel (James 1962) z uporabo naprave za merjenje udarne žilavosti. Preiskava upogibne trdnosti treh lesenih vzorcev različnih drevesnih vrst pod hipno obremenitvijo je pokazala, da z naraščanjem stopnje upogiba porušni modul zračno suhega lesa narašča za okoli 31 % in svežega lesa okoli 44 %. Pri tem modul elastičnosti narašča enakomerno za 14 %.

2.1.2.4 Zaporeden udarni test žilavosti

Testiranje poteka z naraščanjem udarca uteži z maso 22,5 kg ali 45 kg. Zaporedni test udarne žilavosti se izvaja na vzorcih dimenzij $5 \times 5 \times 76$ cm s sredinsko obremenitvijo in razponom med podporama 70 cm. Testiranje poteka s spustom kladiva na preizkušane z začetne višine 2,5 cm, ki se ob vsakem udarcu zviša za 2,5 cm. Postopek se ponavlja do višine 25 cm, naprej se povišuje za 5 cm do porušitve ali dokler se ne doseže končni upogib 15 cm.

Wilson je že leta 1922 izpeljal analizo obremenitev lesenega trama (Kollmann 1984) po formuli (5) pri dveh predpostavkah:

- porast absorbirane energije je sorazmeren, les so po razbremenitvi povrne v prvotni položaj
- elastični odziv materiala med udarcem je enak kot pri statični obremenitvi

$$D = \frac{y^2}{2d} \quad \dots(5)$$

D = razdalja med začetno višino padajočega kladiva do točke statično obremenjenega vzorca s kladivom

y = dodatni upogib izmerjen ob udarcu

d = upogib izmerjen, ko je vzorec statično obremenjen s kladivom

Hatt-Turner naprava je opremljena z avtomatskim zapisovalnikom za D in y vrednosti. Končna krivulja je ravna naraščajoča črta do meje proporcionalnosti. Na upogibu trama, ki ga povzroči udarec kladiva je lahko tudi del statične obremenitve P po formuli (6).

$$\Delta = d + y \quad P = \frac{2 \times W_H \times H}{\Delta} \quad \dots(6)$$

W_H = masa kladiva [kg]

L = razpon [m]

d = upogib izmerjen, ko je vzorec statično obremenjen s kladivom

y = dodatni upogib izmerjen ob udarcu

Δ = $d + y$ skupni upogib

D = razdalja med začetno višino padajočega kladiva do točke statično obremenjenega vzorca s kladivom

H = $D + y$ dolžina padca kladiva

Enačba obremenitve vlaken σ_{PL} na meji proporcionalnosti, med udarcem za tram pravokotnega prereza in obremenjen na sredini je (7).

$$\sigma_{PL} = \frac{3PL}{2w \times h^2} = \frac{3L}{2w \times h^2} \times \frac{2W_H \times H}{\Delta} = \frac{3W_H \times HL}{w \times h^2 \times \Delta} \quad \dots(7)$$

Modul elastičnosti med obremenitvijo lahko izračunamo na podoben način po formuli (8).

$$E = \frac{W_H \times H \times L^3}{2w \times h^2 \times \Delta^2} \quad \dots(8)$$

2.1.2.5 Primerjava rezultatov udarne žilavosti

Zaradi uporabe različnih metod in aparatov za test udarne žilavosti lahko pride do težav pri primerjavi rezultatov. Enačbo, ki dokazuje zvezo med najvišjim udarcem H in absorbirano energijo W prikazuje empirična enačba (9).

$$\begin{aligned} H &= 0,146W + 9,3 \quad \text{za jesen} \\ H &= 0,128W + 12,7 \quad \text{za ostale vrste predvsem listavce} \end{aligned} \quad \dots(9)$$

S poznanim pospeškom, maso kladiva in dimenzijami vzorca izračunamo potrebno moč oz. trdnost na sredini preizkušanca, ki je enakovredna statični obremenitvi. Izračun pokaže, da je lomna obremenitev v udarnem testu 75 % višja kot pri statičnem upogibu (Kollmann 1984).

Pri testu udarne žilavosti absorbirana energija doseže minimum pri vitkih elementih (10).

$$\lambda = \frac{L}{h} = 12 \quad \dots(10)$$

Teoretično je absorbirana energija proporcionalna volumnu V na razdaljo preizkušanca. V območju vitkosti $L/h=16$ pri preizkušancih izdelanih iz zelo žilavih lesov, brez vidnih letnic pride do visokih vrednosti absorbirane energije (Kollmann 1944).

2.1.3 Dejavniki, ki vplivajo na udarno žilavost

2.1.3.1 Potek vlaken

Običajno so vrednosti za udarno žilavost iglavcev višje v radialni kot v tangencialni smeri. Pri listavcih so te razlike manj izrazite. Nagibni kot vlaken zelo zmanjša udarno odpornost lesa. Kot 5° zniža udarno žilavost za 10 %, kot 10° pa prenese samo 50 % obremenitve (Kollmann 1940).

Hankinson-ova enačba za žilavost izraža absorbirano energijo W_γ pod določenim kotom vlaken γ (11).

$$W_\gamma = \frac{W_v \times W_p}{W_v \sin^n \gamma + W_p \cos^n \gamma} \quad \dots(11)$$

W_v -trdnost za γ je 0°

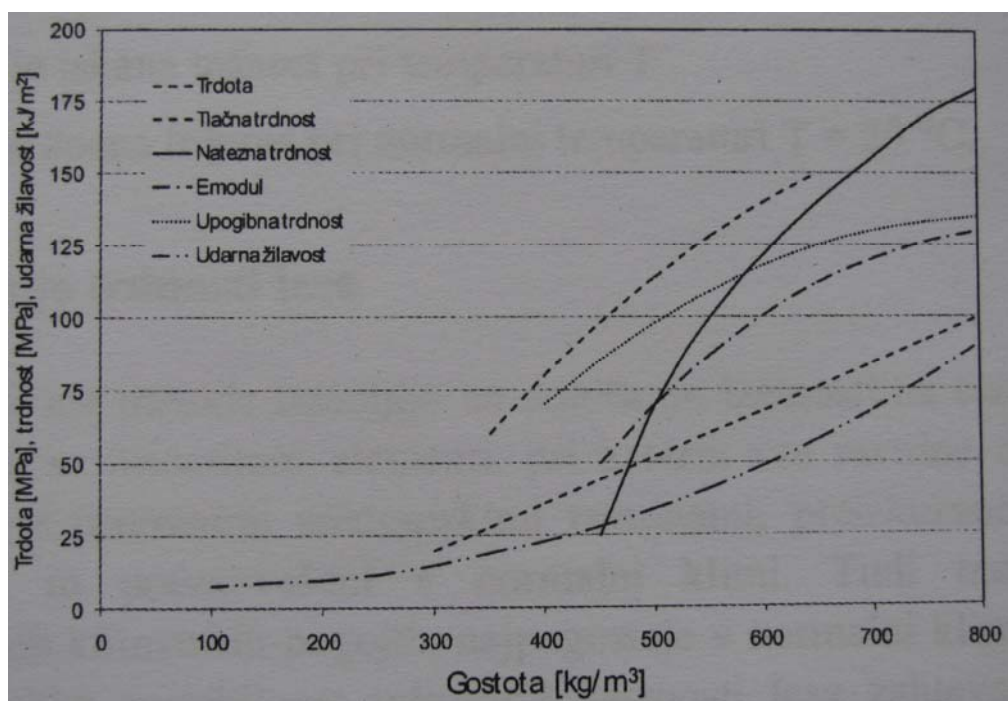
W_p -trdnost za γ je 90°

eksponent n variira med 1,5 in 2

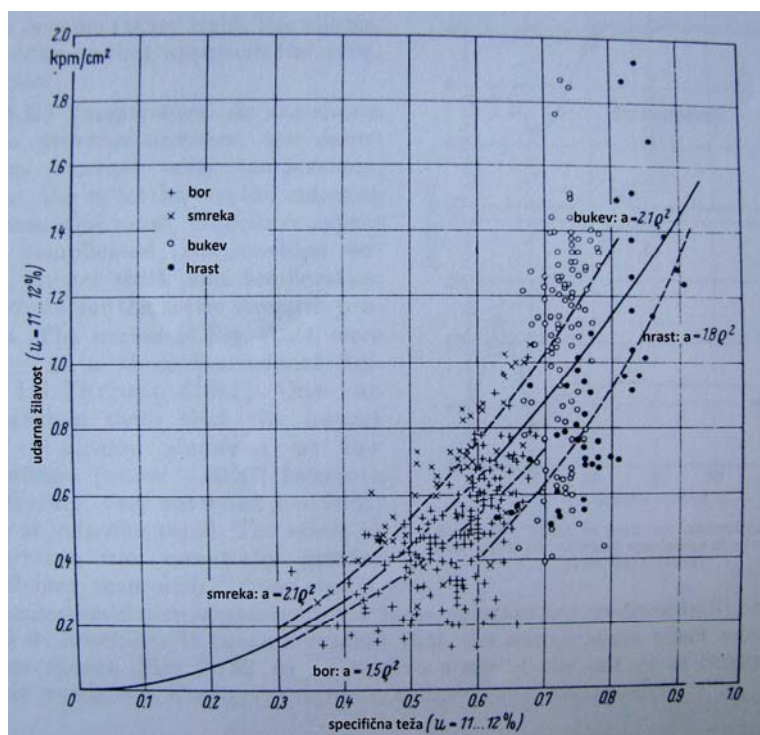
2.1.3.2 Gostota

Udarne žilavost narašča s kvadratom gostote, kar navajajo že pri Hatt-Turner testu. Monnin je predstavil koeficient k udarne trdnosti, ki se imenuje kakovostni faktor in opazil, da z večjo žilavostjo lesa narašča do vrednosti 2, za krhek (strohnel) les se vrednost zniža na 0,2.

$$k = \frac{W}{\omega \times h^{10/6}} = 0,157Wkpm \quad \dots(12)$$



Slika 1: Korelacije nekaterih mehanskih lastnosti v odvisnosti od gostote (Gorišek 2009: 157)



Slika 2: Korelacija med udarno žilavostjo in specifično težo za štiri različne drevesne vrste (Ghelmeziu 1967/68: 387)

2.1.3.3 Ravnovesna vlažnost

Pri določevanju udarne žilavosti zračno suhih vzorcev je vpliv ravnovesne vlažnosti zanemarljiv.

Novejši rezultati kažejo, da je za bukovino upogibna trdnost neodvisno od ravnovesne vlažnosti. Z naraščanjem ravnovesne vlažnosti narašča upogib. Nekateri lesovi izkazujejo večjo togost, manjšo upogibnost in večjo lomljivost, ko se približujejo absolutno suhemu stanju (Kollmann 1984).

2.1.3.4 Temperatura

Deformacije naraščajo s temperaturo, vendar po drugi strani kohezijska trdnost lesa pada. Zato je pričakovati bolj zapletene odnose med udarnim delom in temperaturo, kot pri statičnem upogibnem testu. To lahko sklepamo iz tega, ker udarno delo zračno suhega bora pri nižji temperaturi pod 20 °C hitro narašča. Zelo vlažen les $u \approx 70\%$ pa pokaže obraten trend. Vpliv temperature je bistveno večji pri gostejšem kot pri redkejšem lesu. Temperaturni učinek variira z različnimi vrstami lesa.

2.1.3.5 Anatomske lastnosti

Če si predstavljamo letni prirastek vemo, da so široke letnice pri iglavcih vedno pogoj za nižjo žilavost. To pojasnimo z izredno nizko specifično težo širokih prirastnih plasti. Pri venčasto poroznih lesovih kot so jesen in hrast so širši venci običajno značilni za gostejši les, ki je tudi bolj žilav. Kot pravilo hrastovina z zelo ozkimi branikami (manj kot 1 mm) je zelo krhka in lomljiva. Pri poroznih lesovih kot je bukev so izmerili najvišjo žilavost pri širini branike okoli 1 mm.

Lesna anatomija ne more popolnoma pojasniti notranjih vzrokov krhkosti oz. žilavosti. Vendar je nekaj trditev možnih: tankostene traheide pri iglavcih in vedno zelenih vrstah, večje število žil in parenhimskih celic ali libriformskih vlaken s tanko steno povzročajo krhkost, vendar to ni možno izraziti s kvantitativno odvisnostjo. Dolžina vlaken in premer celičnih lumnov ima majhen vpliv na trdnost.

Očitno osnovni vzrok lomljivosti ali trdnosti leži v končni strukturi lesa. Položaj srednje lamele, katera spaja posamezna vlakna je zelo pomemben. Primarni lignin je krhek, kot na primer celuloza. Clarke (1976) je pokazal, da se po testu upogibne trdnosti hrastovine prelomi pojavijo skoraj izključno v srednji lameli, medtem ko sekundarne celične stene, katere so uničene pri tlačnem testu ostanejo nepoškodovane. Razpad ali celo začetek termičnega razkroja izrazito zmanjša trdnost.

2.2 VRSTE LOMOV PRI UDARNI ŽILAVOSTI

Vrste lomov pri statičnem testu ne nakazujejo končnega stanja. Pri udarnem upogibnem ali porušnem testu načini prelomov označujejo kvaliteto lesa na sledeč način.

Les z zelo visoko udarno žilavostjo pokaže dolg razcep in grobe iveri. Pogosto je na tlačni strani debel sloj nepoškodovanih vlaken (slika 3).

Les s poprečnimi lastnostmi, med drugim tudi žilavostjo, pokaže krajše, bolj vlaknate iveri, katere so običajno daljše na natezni kot na tlačni strani (slika 4).

Pri krhkih lesovih so lomne površine ravne, raje gladke, tu in tam valovite ali stopničaste (slika 5).



Slika 3: Primer lesa z visoko udarno žilavostjo (Kollmann 1984: 392)



Slika 4: Prelom lesa s poprečnimi lastnostmi pokaže krajše, bolj vlaknate iveri (Kollmann 1984: 392)



Slika 5: Ravne in gladke lomne površine nakazujejo na les z nizko udarno žilavostjo (Kollmann 1984: 392)

Raznolikost tipov lomov pri udarni žilavosti kaže, da lomi žilavih in krhkih lesov vodijo v zelo različne načine. Porušitev krhkega lesa se odrazi z zelo majhnimi deformacijami in zelo hitro, medtem ko porušitev žilavega lesa jasno spremljajo precej večje deformacije in nihanja (Kollmann 1984).

Kollmann je uporabil piezo senzor za ugotavljanje časovnega poteka loma sil pod eno podporo stroja za merjenje udarne žilavosti, kjer je lahko videl: Lom krhkega bora in hrastovine ne zgodi v razponu 2-3 mili sekunde. Pri žilavih lesovih udarno kladivo ne more porušiti preizkušanca v trenutku. Popoln zlom se izvrši v približno 10-15 mili sekundah. Razlikovati moramo dve fazi: za prvo fazo je odločilna sposobnost materiala da absorbira energijo in jo spremeni v toploto. V drugi fazi tip zloma vodi nadaljnji razvoj do konca loma. V tej fazi iveri in odcepljeni kosi povzročajo ne napovedljivo trenje in upor.

Začetna točka za določanje mnogih inženirskih lastnosti lesa je kratkotrajni test, kjer pričakujemo porušitev v nekaj minutah. V naravi so to številne izpostavitve bremenu, kot so potresi in posamezni sunki vetra, kjer je les izpostavljen višjim stopnjam obremenitve.

V številnih državah se leseni zaščitni ograjni sistemi smatrajo kot alternativni za tradicionalne jeklene zaščitne ograje ali masivne pregrade.

2.3 STANDARDIZIRANO DOLOČANJE UDARNE ŽILAVOSTI

Standard DIN 52189 opisuje postopek testiranja udarne žilavosti preizkušancev lesa majhnih prerezov. Naprava za testiranje udarne žilavosti deluje na principu, udarca kladiva ob les in je podobna napravi za testiranje udarne žilavosti kovin.

Energija loma je odvisna od prereza preizkušanca iz katerega se računa potrebno delo W za zlom. Za določevanje je potrebno izmeriti prerez (A) vzorca na 0,1 mm natančno. Nastaviti je potrebno svetlo razdaljo med podporama na 0,1 mm natančno. Potrebno je določiti izgube na nihalu zaradi trenja na 1 J natančno. Okroglina na kladivu in podporah je $15 \pm 0,1$ mm. Svetla razdalja med podporama znaša 210 ± 1 mm. Razdalja med središčem podpor pa 240 ± 1 mm. Za test je potrebna normalna klima.

Preizkušanec ima dolžino 300 mm in je kvadratnega prereza s stranico 20 mm. Oba prereza morata bita vzporedna ter radialno in tangencialno orientirana z letnicami. Klimatizirni vzorci so tedaj, ko se njihova masa med prejšnjim in 24 ur poznejšim tehtanjem spremeni za manj kot 0,1 % njegove mase. Testni preizkušanec ustreznih dimenzij in vlažnosti je potrebno vstaviti približno na sredino med podporama. Potrebno je izmeriti prečni prerez vsakega vzorca na sredini na 0,1 mm natančno. Preizkušanec se postavi simetrično med podpore in nihalo na radialno površino lesa, nato se preizkušanec v tangencialni orientaciji poruši. Preizkušanec se zlomi z enim udarcem. Če se obe polovici preizkušanca po preizkusu še vedno z vlakni držita skupaj je to potrebno kontrolirati in podatek navesti. Prav tako je potrebno zabeležiti obliko zloma, kadar je odtrgano vlakno daljše od 3 mm. Običajno je dolžina loma kratka.

Udarne žilavost se izračuna na 1 kJ/m^2 po sledeči formuli (13).

$$\omega = \frac{1000 \times W}{A} = \frac{1000 \times W}{b \times h} \quad \dots(13)$$

Kjer je:

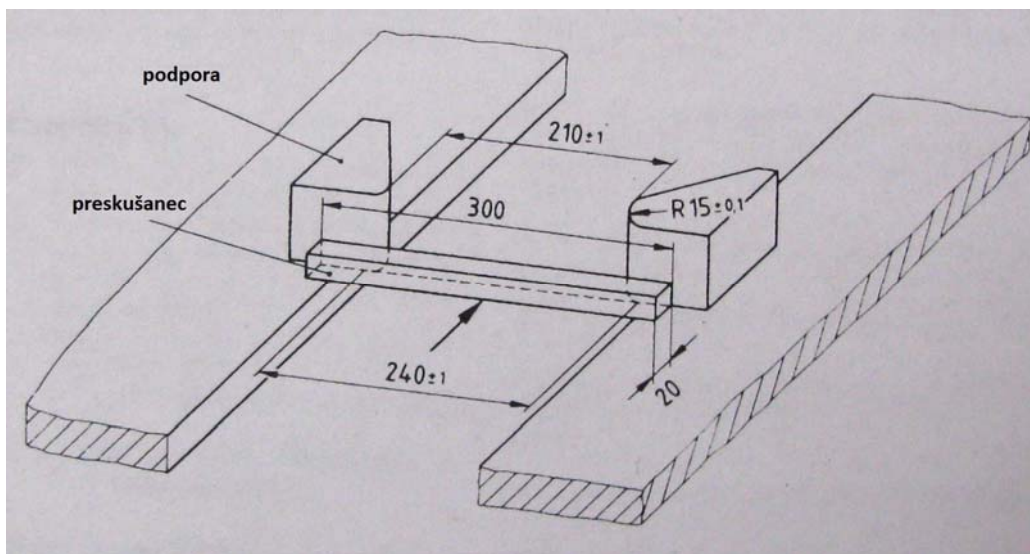
ω - udarna žilavost [kJ/m^2]

W - potrebno delo za porušitev preizkušanca [J]

b, h - prerez preizkušanca v radialni in tangencialni smeri [mm]

Standard predpisuje preizkusno poročilo, kjer je potrebno navesti:

- a.) lesno vrsto
- b.) podrobnosti za vsak preizkušanec upoštevajoč standard
- c.) posamezno in srednje vrednosti naprave za lomljenje preizkušancev, vlažnost preizkušancev, normalno neobdelano gostoto
- d.) odstopanje od standarda
- e.) datum testiranja

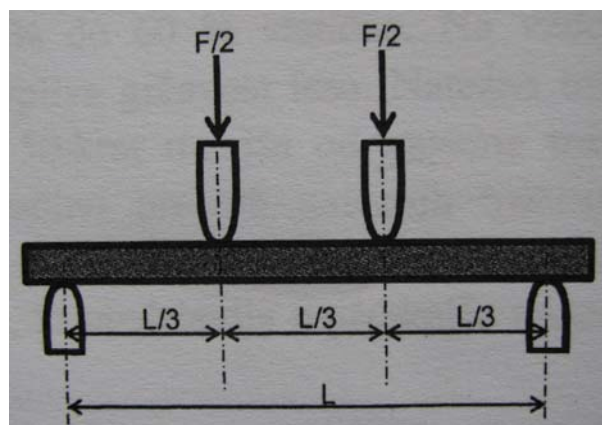


Slika 6: Postavitev preizkušanca na podpore pri testu udarne žilavosti (DIN 52189)

2.4 STATIČNO DOLOČANJE MEHANSKIH LASTNOSTI

Statično določanje mehanskih lastnosti sodi v sklop nedestruktivnih metod, na osnovi katerih poteka razvrščanje žaganega lesa v predhodno definirane trdnostne razrede. Z določenimi stroji in napravami lahko dokaj natančno definiramo določene mehanske in fizikalne lastnosti lesa.

Mehansko preverjanje trdnostnih lastnosti lesa se največkrat izvaja s upogibnimi testi. Leti se izvajajo na napravah za štiri-točkovni upogibni test. V primeru nedestruktivnih metod poteka določevanje upogiba v območju elastične deformacije kar pomeni, da se les ob prenehanju delovanja sile povrne v prvotni položaj, pri tem določamo statični elastični modul. Na osnovi te meritve določamo E modul in ob poznavanju korelacij med E modulom in trdnostjo določimo trdnost materiala. V primeru štiri-točkovnega porušnega testa pa se izvede porušitev materiala, pri čemer so rezultati natančnejši, saj dobimo dejansko trdnost, vendar je porušen material neuporaben.



Slika 7: Shematski prikaz štiri-točkovnega upogibnega testa (Gorišek 2009: 161)

2.5 DINAMIČNO DOLOČANJE MEHANSKIH LASTNOSTI

Druga možnost je fizikalno testiranje mehanskih lastnosti lesa. Fizikalne metode lahko vključujejo merjenje električne upornosti, dielektričnih lastnosti, nihajnih lastnosti, valovanja in akustičnih lastnosti. Na osnovi merjenih značilnosti ob znanih povezavah in korelacijah določimo mehanske lastnosti oz. določimo dinamični modul.

Skoraj vse nedestruktivne metode, uporabljene za različne materiale in izdelke, se lahko uporabljajo za les in lesne kompozite, izbrana metoda pa je odvisna od končne uporabe materiala.

Zahteve za gradacijske stroje in protokol umeritve strojev predpisujejo standardi:

- SIST EN 14081-1
- SIST EN 14081-2
- SIST EN 14081-3
- SIST EN 14081-4

Les, ki ga razvrstimo z upoštevanjem omenjenih standardov, lahko označimo z oznako CE, ki je s septembrom 2008 postala obvezna oznaka za ves konstrukcijski les. V proizvodnji se največkrat uporabljajo stroji za razvrščanje na osnovi upogibnega testa, vibracijskega testa, merjenje z X-žarki oz. kombinacije, ki vključujejo hkrati več različnih načinov merjenja (G. Bučar in sod 2009).

2.5.1 Vizualno razvrščanje

Najenostavnejša in najstarejša nedestruktivna metoda je vizualno razvrščanje. Mnoge ocene danes v praksi še vedno temeljijo izključno na vizualnem opazovanju in subjektivni interpretaciji posameznih značilnosti.

V mnogih primerih je pri vizualnem ocenjevanju potrebno sprejemanje odločitev o kritičnosti stanja nekega izdelka ali komponente. Vizualno razvrščanje najpogosteje temelji na odločitvah "ustreza", "ne ustreza", kar pomeni, da je izdelek zavržen ali primeren za nadaljnjo uporabo. Razvrščanje konstrukcijskega lesa po trdnosti in označevanje konstrukcijskega lesa s CE oznako je postalo nujno za vse proizvajalce in uporabnike konstrukcijskega lesa. Vizualno razvrščanje ne more več zadostiti zahtevam po zanesljivem, objektivnem in hitrem razvrščanju (G. Bučar in sod 2009).

2.5.2 Metoda frekvenčnega odziva

Metoda frekvenčnega odziva sodi med dinamične metode, ki omogočajo neporušno pridobivanje informacij o mehanskih lastnostih lesa. Gre za metodo zasnovano na širjenju motenj, ki v preskušanem materialu povzroči elastično deformacijo. Z vplivom zunanje sile povzročimo valovanje, ki se nato razširi v notranjost materiala. Hitrost širjenja valov pa je podatek s katerim se izračuna elastični modul Pellerin in Ross (2002).

Valovanje lahko povzročimo mehansko z udarcem s kladivom ali z zvočnimi valovi. Prednosti teh metod so velika stopnja ponovljivosti in hitro ter natančno določanje modula elastičnosti.

Testiranje z ultrazvočnimi udarnimi valovi je podobno kot z zvočnimi udarnimi valovi razen to, da se uporablja pri višjih frekvencah. Ultrazvočna metoda je zelo priljubljena pri homogenih, neporoznih materialih za odkrivanje napak. Čeprav se ta metoda uporablja tudi z lesa in lesne kompozite, je manj učinkovita, ker je les porozen in naraven material (Čepon 2006).

2.5.3 Druge nedestruktivne metode

Z različnimi stroji in napravami lahko dokaj točno definiramo mehanske lastnosti (upogibna, porušna, trdnost, ...) in fizikalne lastnosti (električna upornost, ...) lesa. Glede na rezultat meritve se posamezen kos razvrsti v predhodno določene trdnostne razrede. Pogosto se poleg mehanskega testiranja uporablja še vizualna kontrola lesa, kjer se upošteva še dodatne kriterije razvrščanja: razpoke, lisičavost, ukrivljenost, obarvanost, poškodbe insektov in ostale značilnosti, ki vplivajo na trdnost lesa.

Upogibna metoda se uporablja večinoma za les in pol proizvode. Pri tri oz. štiri-točkovnem upogibnem testu se meri deformacijo pri določeni sili F . Deformacija se meri na varni ravni obremenitve tako, da preizkušane ostane po testiranju nepoškodovan.

Merjenje različnih fizikalnih lastnosti lesa vključuje merjenje električne upornosti, dielektričnih lastnosti, nihajnih lastnosti, valovnih karakteristik in akustičnih lastnosti lesa. V uporabi se pojavlja metoda zasnovana na širjenju motenj, ki v preizkušnem materialu povzroči elastično deformacijo. Z zunanjo silo na površino lesa se povzroči longitudinalno valovanje. Valovanje se širi v notranjost materiala in potuje z določeno hitrostjo. Hitrost valovanja na določeni razdalji nakazuje lastnosti preizkušanca. Modul elastičnosti lahko izračunamo na podlagi izmerjene hitrosti širjenja valov v in gostote ρ po formuli (14) (Pellerin in Ross 2002).

$$MOE = v^2 \times \rho \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad \dots(14)$$

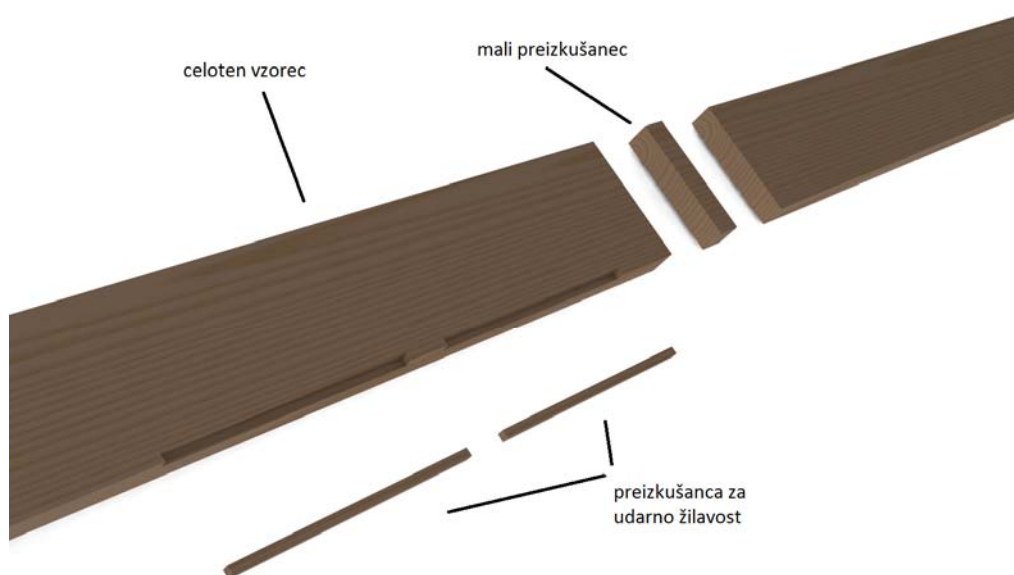
MOE-modul elastičnosti
v-hitrost širjenja valov [m/s]
 ρ -gostota [kg/m³]

3 MATERIALI IN METODE

3.1 PRIPRAVA PRIZKUŠANCEV

Za testiranje je bil uporabljen žagan les smrekovine (*Picea abies* L.). V raziskavo je bil vključen vzorec po 100 desk in 100 plohov. Les je bil po razrezu posušen in je imel povprečno vlažnost 11 % za plohe in 9,3 % za deske. Okvirne dimenzije plohov so znašale $38 \times 174 \times 4000$ mm in $20 \times 130 \times 4000$ mm dimenzije desk. Statični moduli elastičnosti so bili določeni s štiri-točkovnim upogibnim testom (Čepon 2006). Trdnost pa s standardiziranim porušnim testom (G. Bučar 2007). Iz porušenih vzorcev smo na mestih blizu loma izrezali za vsak ploh oziroma desko po dva preizkušanca za določanje udarne žilavosti in mali preizkušanec, ki je bil odrezan preko celotnega prereza vzorca deske oz. ploha dolžine 35 mm (slika 8).

Okvirne dimenzije preizkušancev za udarno žilavost so znašale $10 \times 10 \times 300$ mm, pri čemer je bilo pomembno, da so preizkušanci brez napak (grč, smolnih žepov, razpok, reakcijskega lesa, itd.), orientiranega prereza in vzporedno z vlakni. Preizkušanci za udarno žilavost so bili pred testiranjem posušeni na vlažnost $10 \% \pm 2 \%$. Natančno smo jim izmerili dimenzije, maso in določili število branik za nadaljnje izračune. Ker je bila debelina osnovnih desk majhna (20 mm) iz njih nismo mogli napraviti standardnih vzorcev za testiranje udarne žilavosti 20×20 mm. Razlog tega je bila stroga orientacija vzorcev v radialni in tangencialni smeri, zato smo se odločili za vzorce prereza 10×10 mm pri deskah, kot tudi pri plohih, zaradi primerjave.



Slika 8: Razrez preizkušanca za testiranje

3.1.1 Določanje dolžine lomov

Pri testiranju udarne žilavosti smo bili pozorni tudi na način, preloma preizkušanca. Po navedbah naj bi že vizualni pregled načina loma nakazoval na določeno žilavost. Dolg razcep, z grobimi ivermi je znak visoke žilavosti, poprečen vzorec ima nekoliko krajše iveri, krhki preizkušanci pa imajo bolj gladek prelom.

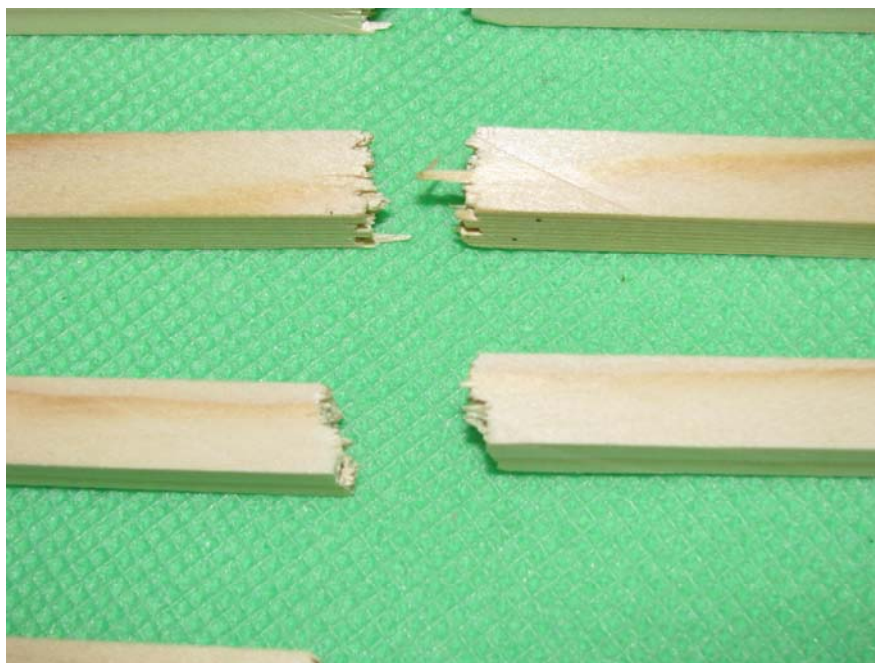
V našem primeru smo zasledili vse tri tipe: dolg prelom, običajen in krhek lom, (slika 9-11). Do odstopanja pride predvsem v primerih, kadar je les krhek, prelom pa stopničast in dolg. Za grafični prikaz dolžine loma v odvisnosti od udarne žilavosti smo pri vsakem preizkušancu izmerili dolžino odseka, na katerem je prišlo do loma. Izbrali smo odsek z najdaljšim prelomom oz. najdaljšo dolžino iveri. V izjemnih primerih vzorcev s posamezno daljšo iverjo, ki nekoliko bolj štrli od poprečja ostalih smo merili dolžino loma nekoliko manj, kot do skrajnega konca te iveri.



Slika 9: Dolg prelom preizkušancev pri testiranju udarne žilavosti.



Slika 10: Običajen prelom preizkušancev pri preizkusu udarne žilavosti.



Slika 11: Krhki preizkušanci imajo pri testiranju udarne žilavosti zelo kratke iveri.

3.1.2 Določanje gostote

Preizkušance za testiranje udarne žilavosti smo posušili na enotno vlažnost $10 \pm 2 \%$, to je tudi vlažnost, ki je določena za testiranje udarne žilavosti. Pred testiranjem smo jim izmerili dimenzije na 0,01 mm natančno in jih stehali na 0,01 g natančno. Iz podatkov smo izračunali gostoto preizkušancev po formuli (15).

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u} \quad \dots(15)$$

ρ_u - gostota pri določeni vlažnosti u [kg/m^3]

m_u - masa pri določeni vlažnosti [kg]

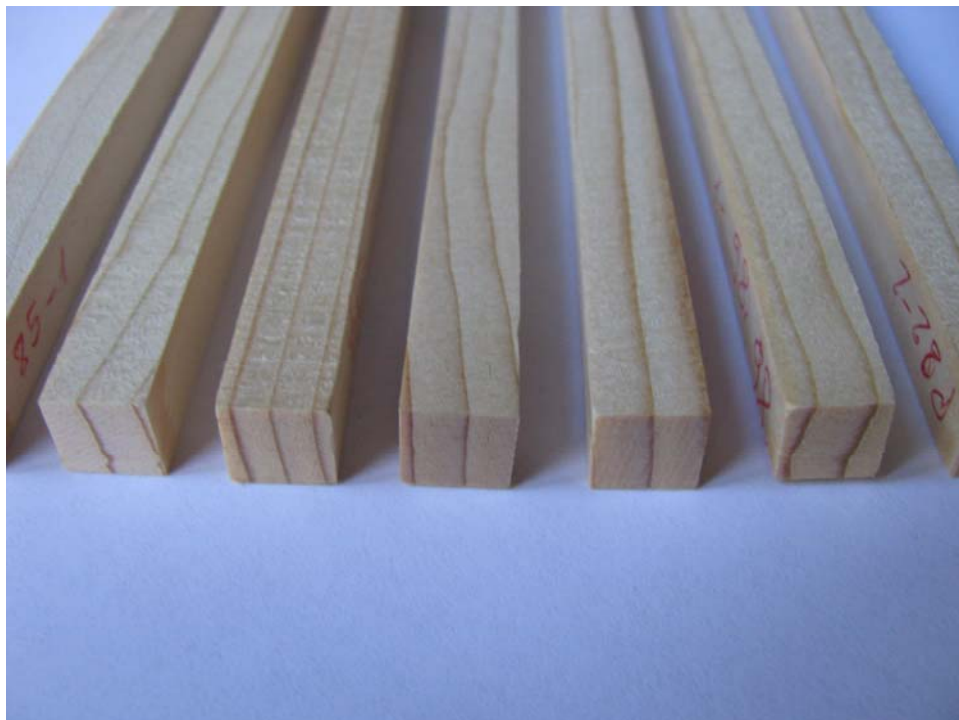
V_u - prostornina preizkušanca pri določeni vlažnosti [m^3]

3.1.3 Merjenje širine branik

Pri nalogi nas je zanimala korelacija med širino branik in gostoto oz. širino branik in udarno žilavostjo. Znano je dejstvo, da obstaja povezava med gostoto in udarno žilavostjo tako, da je običajno gostejši les enake drevesne vrste bolj žilav. Iz tega sledi, da so tudi bolj ozke branike iglavcev, v našem primeru smreke, pokazatelj gostejšega oz. bolj žilavega lesa (slika 12, 13). Na prerezu preizkušancev za udarno žilavost smo prešteli branike in izračunali širino branik.



Slika 12: Ozke branike na vzorcih nekaterih desk



Slika 13: Široke branike na vzorcih nekaterih plohov

3.1.4 Metoda mehanskega določanja udarne žilavosti

Udarne žilavost smo izvajali na napravi za določanje udarne žilavosti po standardu DIN 52180. Charpy-jevo udarno kladivo v osnovi deluje na mehanski način, pri čemer udarno kladivo ob padcu zlomi postavljen vzorec med podporama. Ob prostem padu udarnega kladiva je opravljeno delo enako nič, za zlom vzorca pa je potrebna določena energija, ki kladivo delno zaustavi. Višina odklona udarnega kladiva po lomu je nekoliko nižja, kot ob prostem padu. Tako razlika energij predstavlja opravljeno delo oziroma energijo loma, ki jo odčitamo na skali.

Zaradi majhnega prereza preizkušancev je opravljeno delo majhno, zato je bilo natančno odčitavanje dejanskih vrednosti energije težavno. Rezultati so se včasih podvajali, čeprav je dejansko malo verjetno.



Slika 14: Charpy-jevo udarno kladivo za merjenje udarne žilavosti (splet).

3.1.5 Metoda določanja udarne žilavosti s pospeškometerom

Udarno kladivo za merjenje udarne žilavosti smo nadgradili s pospeškometerom, ki je bil pritrjen nanj in je med lomom beležil trenutno stanje. Za natančen izračun smo potrebovali hitrost ob dotiku kladiva ob preizkušanelec in spremembo višine težišča h z začetnega položaja do dotika kladiva in preizkušancea, ki smo ga izračunali.

$$A = \sum_{i=1}^n A_i \quad A = 27800 \text{ mm}^2 \quad \dots(16)$$

$$y_0 = \sum_{i=1}^n (A_i y_i) / A \quad y_0 = 82,4 \text{ mm} \quad \dots(17)$$

$$V_1 = 1101760 \text{ mm}^3$$

$$V_2 = 272877 \text{ mm}^3$$

$$y_k = \sum_{i=1}^n (V_i y_i) / V \quad y_k = R = 538 \text{ mm} \quad \dots(18)$$

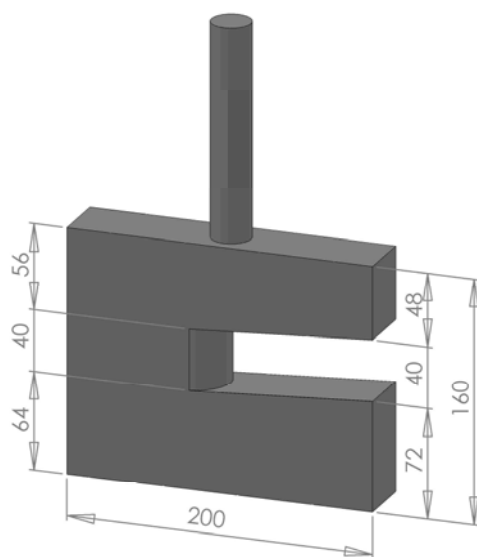
$$m = \rho \times V \quad m_k = 10,8 \text{ kg} \quad \dots(19)$$

$$\cos \alpha = \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab} \quad \alpha = 141^\circ \quad \dots(20)$$

$$h = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos \alpha} \quad h = 1014,3 \text{ mm} \quad \dots(21)$$

$$v = \sqrt{2gh} \quad v = 4,46 \text{ m/s} \quad \dots(22)$$

- A-ploščina sestavljenega lika [mm²]
- A_i-posamezne ploščine likov [mm²]
- y₀- težišče udarnega kladiva [mm]
- V₁, V₂-prostornina udarnega kladiva [mm³]
- m_k-masa udarnega kladiva [kg]
- ρ-gostota jekla 7850 [kg/m³]
- y_k, R-oddaljenost težišča od vrtilišča
- a, b- razdalja od vrtilišča do težišča kladiva [mm]
- α-kot med začetno lego kladiva in ob udaru
- v-hitrost kladiva ob dotiku preizkušanca [m/s]

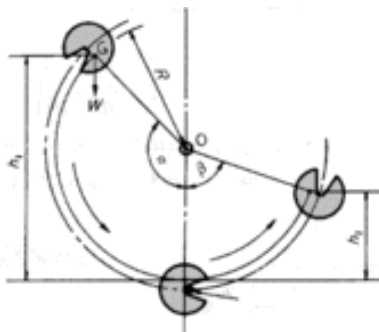


Slika 15: Geometrija udarnega kladiva za merjenje udarne žilavosti.

S spremembo višine težišča izračunamo hitrost kladiva ob dotiku na vzorec (slika 16). Opravljeno delo je v razliki začetne in končne višine udarnega kladiva h_1 , h_2 , kar je možno izračunati tudi s pomočjo izmerjenih kotov:

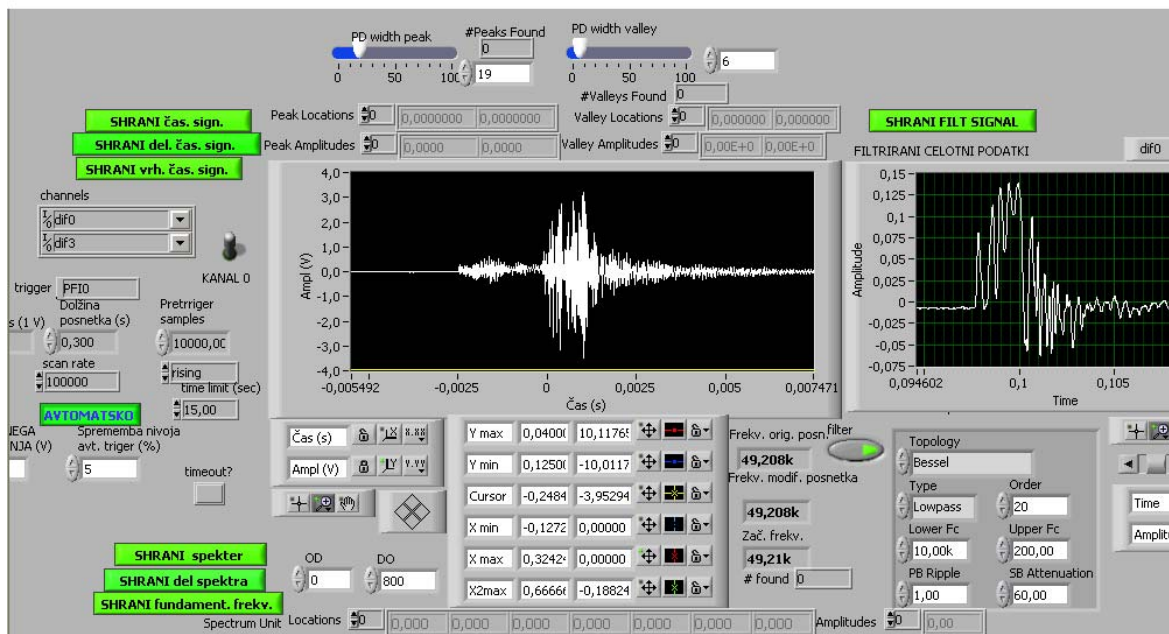
$$\Delta W_p = m \times g \times (h_1 - h_2) \quad \dots(23)$$

$$\Delta W_p = m \times g \times R(\cos \beta - \cos \alpha) \quad \dots(24)$$



Slika 16: Shema delovanja testa udarne žilavosti

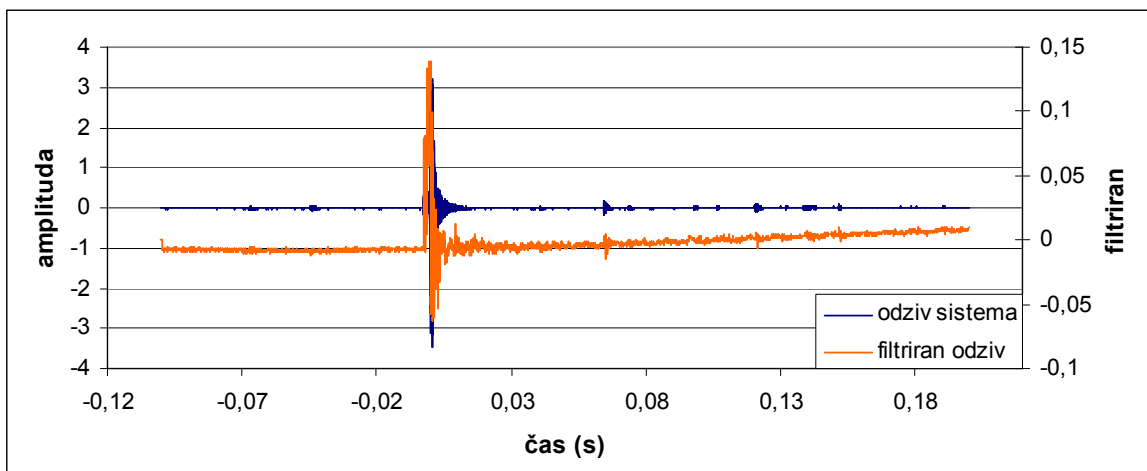
Pri testiranju smo uporabljali pospeškomer Brüel & Kjaer 4393 in kartico za zajem podatkov, ki so bili obdelani z računalniškim programom Labview (slika 17).



Slika 17: Odziv pospeškomera ob lomu in programska oprema za zbiranje in shranjevanje podatkov

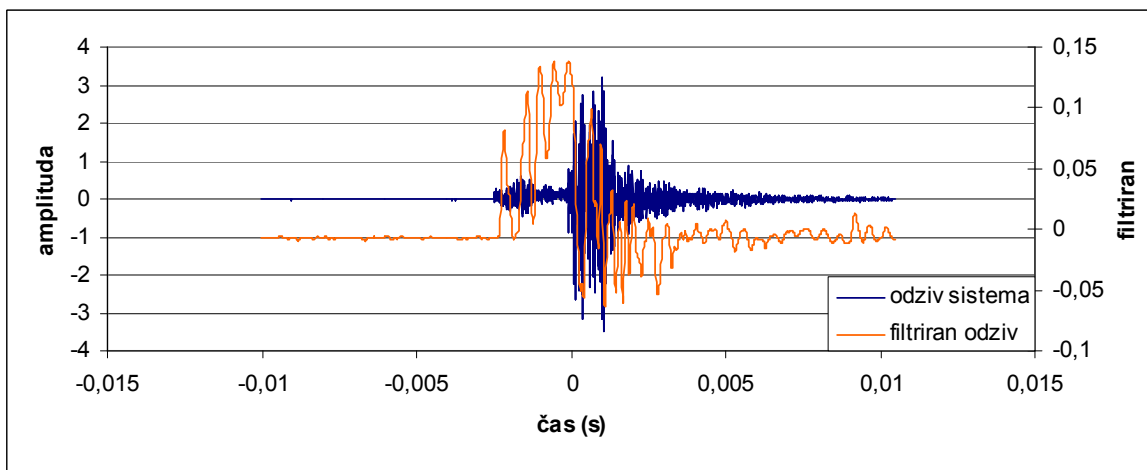
3.1.6 Obdelava podatkov

Merjenje udarne žilavosti s pospeškometerom temelji na večjem številu meritev med lomom. Vsak lom je zabeležen s 30.000 meritvami v času 0,3 sekunde in sicer 0,1 sekunde pred začetkom loma in 0,2 sekunde po tem. Izrazita sprememba nihanja amplitude ponazarja čas loma (slika 18). Filtrirana amplituda (oranžna barva) prikazuje napetost pospeškometera v milivoltih.



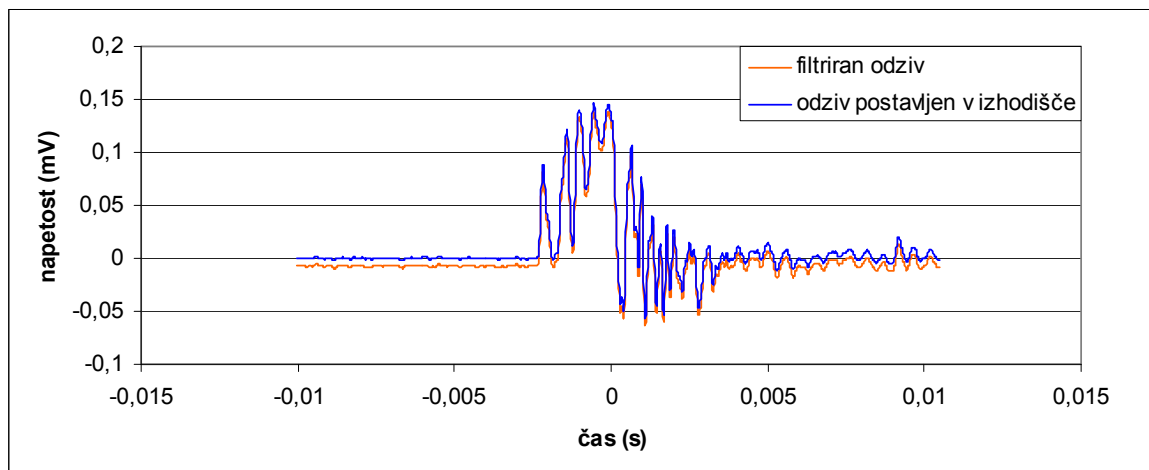
Slika 18: Odziv pospeškometera ob lomu preizkušanca D32-2

Za izračun je potrebno izbrati odsek s krajšo časovno osjo in sicer na mestu, kjer je pospeškometer zaznal močno nihanje amplitude (slika 19). Potreben pa je tudi odsek pred lomom.



Slika 19: Odziv pospeškometera na uporabnem odseku ob lomu preizkušanca D32-2

Predpostavimo, da je napetost pred lomom enaka 0, zato je potrebno izračunati povprečno vrednost odseka do začetka loma. Ta vrednost se prišteje celotnemu grafu, da se del grafa pred začetkom loma pomakne v izhodišče (slika 20). Popravljeno napetost predstavlja modra krivulja.



Slika 20: Postavitev grafa v izhodišči položaj preizkušanca D32-2

Na grafu (slika 21) je predstavljen pospešek preračunan po formuli (25).

$$a = \frac{U \times 1000}{k} \quad \dots(25)$$

Pri čemer je:

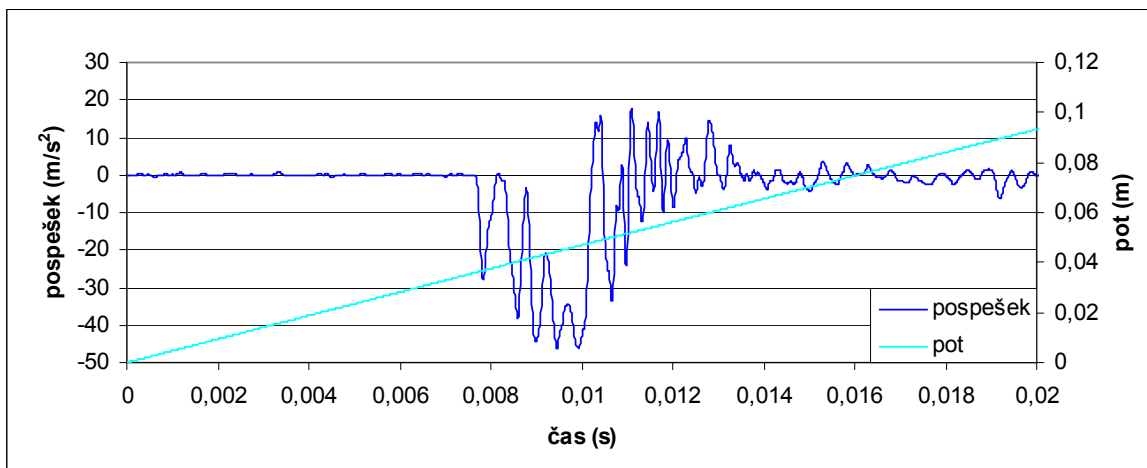
a-pospešek [m/s²]

U-napetost [mV]

k-faktor pospeškometerja 3,16 mV/m/s²

Graf je postavljen na novo časovno os, ki se prične z nič. k-faktor se računa z negativnim predznakom, da se graf obrne, kar v našem primeru prikazuje pojemek udarnega kladiča ob lomu. Pot je izračunana iz hitrosti po formuli (26).

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad x_2 = \overline{v_2} \times \Delta t + x_1 \quad \dots(26)$$



Slika 21: Graf pospeškov oz. pojemkov v času loma preizkušanca D32-2

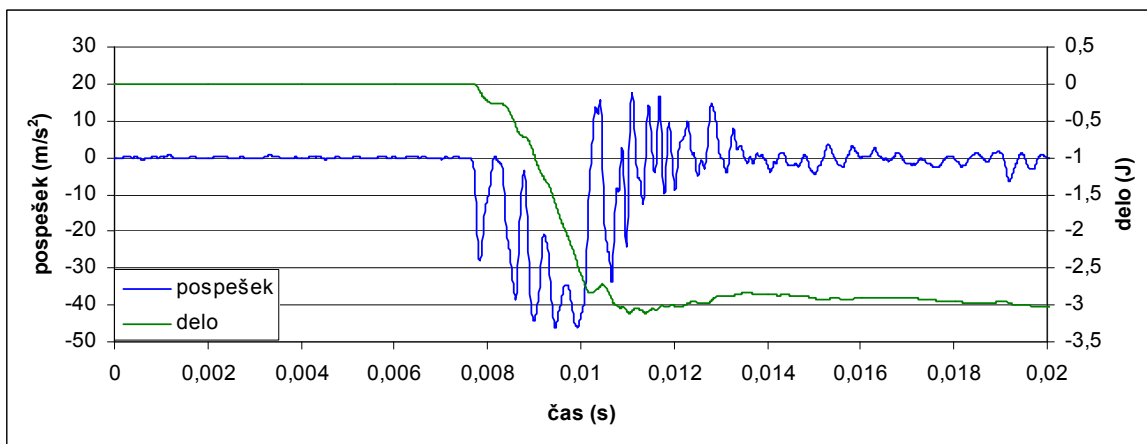
Opravljenno delo se kaže samo neposredno med lomom. Izračunano je kot produkt med izračunsko silo in spremembo hitrosti med dvema sosednjima meritvama po formuli (27).

$$\Delta A_1 = \overline{F}_1 \times \Delta x_1 \quad v = \frac{dx}{dt} \quad \dots(27)$$

Pri čemer je:

- ΔA-opravljenno delo med dvema sosednjima meritvama
- F-povprečna sila med dvema sosednjima meritvama
- Δx-dx

Na sekundarni osi je predstavljeno opravljenno delo (J) v odvisnosti od časa, ki je prikazano z zeleno (slika 22).



Slika 22: Odziv pospeškometra in opravljenno delo ob lom u preizkušanca D32-2

Na grafu (slika 23) je predstavljena hitrost v odvisnosti od časa. Hitrost kladiva se med lomom nekoliko zmanjša, kar kaže krivuljka. Le-ta ima enak profil kot krivuljka za opravljeno delo na predhodnem grafu in je izračunana po formuli (28).

$$a = \frac{dv}{dt} \quad v_1 = \overline{a_1} \times \Delta t + v_0$$

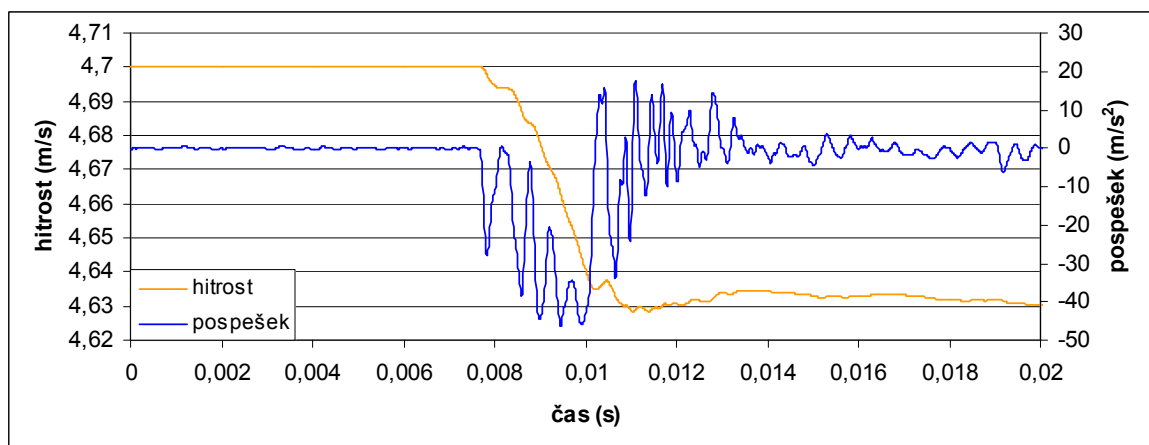
$$v_2 = \overline{a_2} \times \Delta t + v_1 \quad \dots(28)$$

v_1, v_2 – hitrost [m/s]

a_1, a_2 – pospešek pri hitrosti v_1, v_2

Δt – dt

v_0 – začetna hitrost kladiva tik pred udarcem [4,46 m/s]

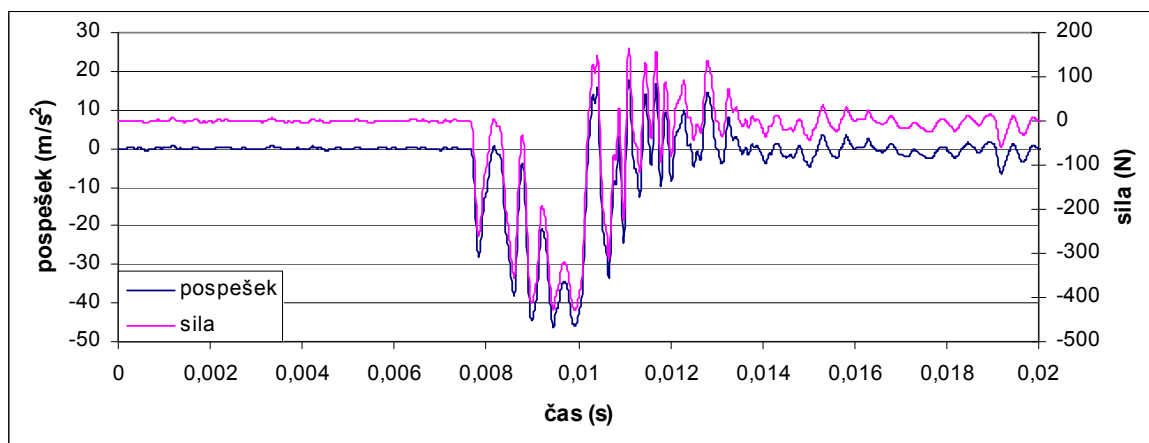


Slika 23: Odziv pospeškomera in hitrosti na uporabnem odseku ob lomu preizkušanca D32-2

Slika 24 prikazuje silo loma F , ki je izračunana po formuli (29).

$$F = m \times a \quad [\text{N}] \quad \dots(29)$$

Ker je masa konstantna ima krivuljka enak profil kot krivuljka pospeška v odvisnosti od časa.

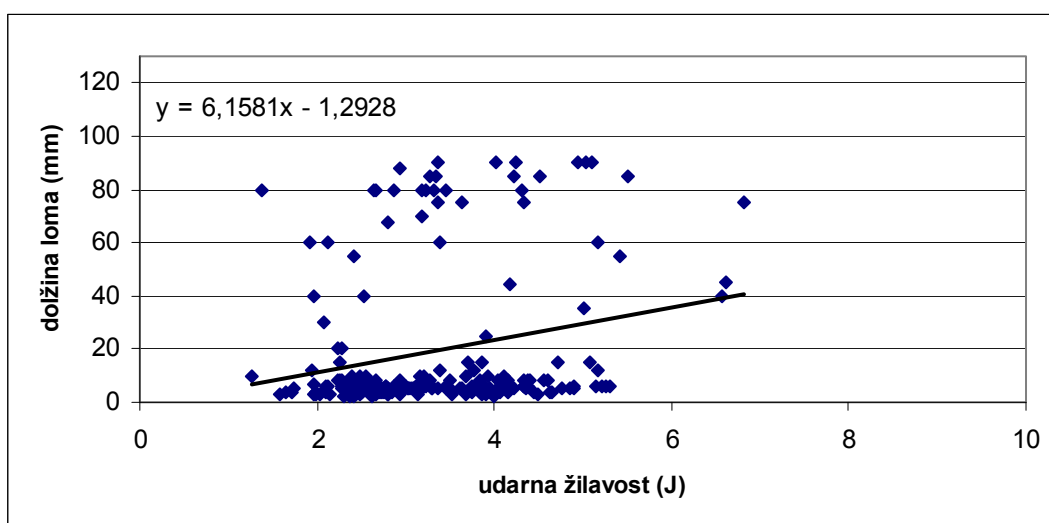


Slika 24: Graf sile in pospeška ob lomu preizkušanca D32-2

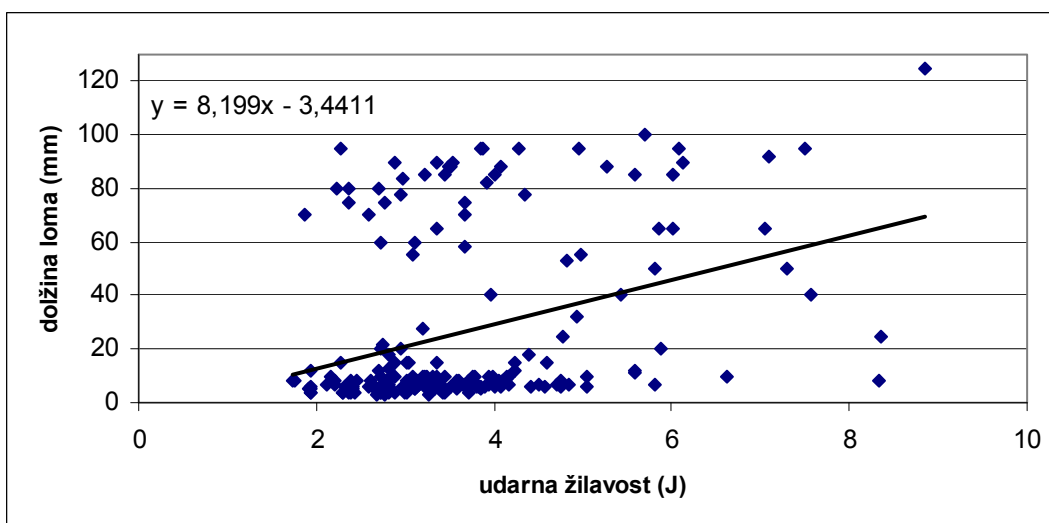
4 REZULTATI IN INTERPRETACIJA REZULTATOV

4.1 DOLŽINA LOMA

Rezultati meritev dolžine loma so podani v prilogi (priloga A1, A2). Način loma preizkušancev pri udarni žilavosti nakazuje na kvaliteto materiala. Dolg lom predstavlja visoko žilavost in kvaliteten les ter obratno. Iz (slik 25, 26) ni možno povsem sklepati na to trditev. Dejstvo je, da je največ lomov v območju do 10 mm dolžine loma, in zavzemajo širok razpon udarne žilavosti. Poseben primer so vzorci z dolgim lomom in nizko žilavostjo, ki naj jih po teoriji ne bi bilo. Tu obstaja možnost visokega nagibnega kota vlaken, ki bistveno zmanjšajo žilavost, lom pa ja dolg in gladek. Tudi grafa za deske oz. plohe se v bistvu ne razlikujeta.



Slika 25: Korelacija med udarno žilavostjo izmerjeno s pospeškometerom in dolžino loma; deske

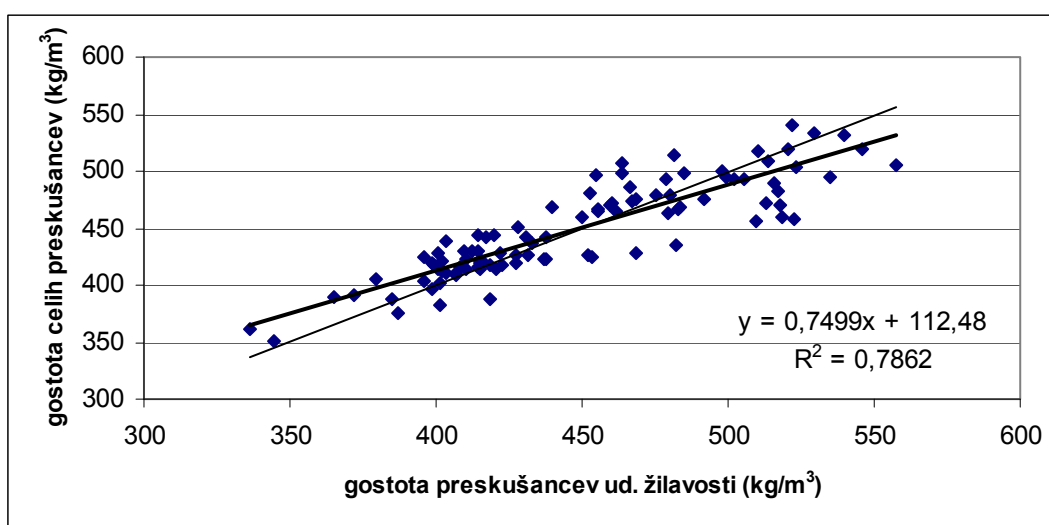


Slika 26: Korelacija med udarno žilavostjo izmerjeno s pospeškometerom in dolžino loma; plohi

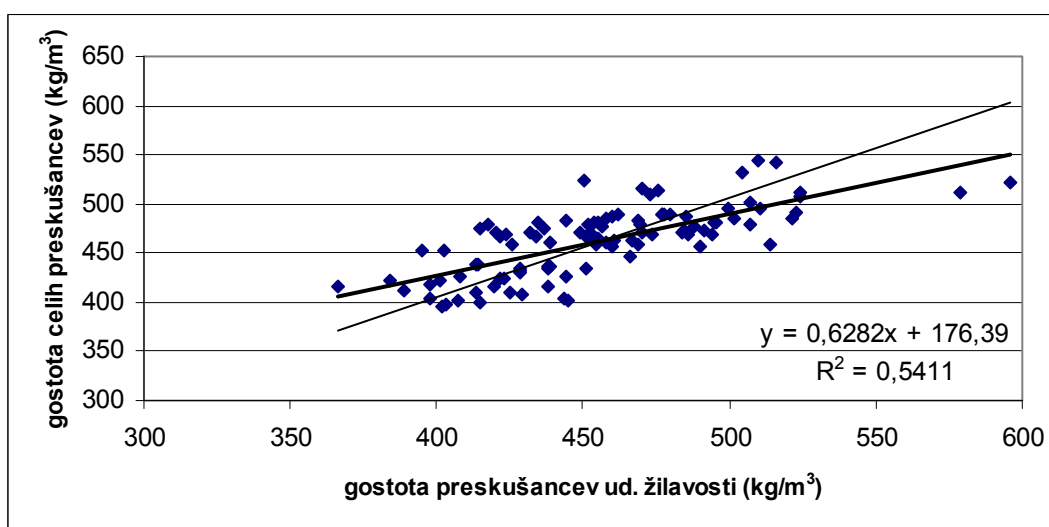
4.2 GOSTOTA PREIZKUŠANCEV

Izračuni gostote celih preizkušancev, gostote malih preizkušancev in gostote preizkušancev za udarno žilavost so podani v prilogi (priloga A1, A2).

Primerjava celih preizkušancev in preizkušancev za udarno žilavost pokaže določeno odstopanje pri medsebojnem primerjanju gostot. Razlog za to je nehomogenost materiala, kateremu se lastnosti spreminjajo glede na različna mesta merjenja. Zato imajo izrezani kosi za udarno žilavost nekoliko drugačne lastnosti od celih preizkušancev. Nekoliko boljše ujemanje je pri deskah, ker je delež lesa zavzetega v preizkušancih za udarno žilavost večji pri deskah, kot pri plohih. Tudi prisotnost napak v celih vzorcih prispevajo k odstopanju, saj so preizkušanci za udarno žilavost brez napak, pri celih preizkušancih pa se pojavljajo grče, razpoke, smolni žepi in reakcijski les.

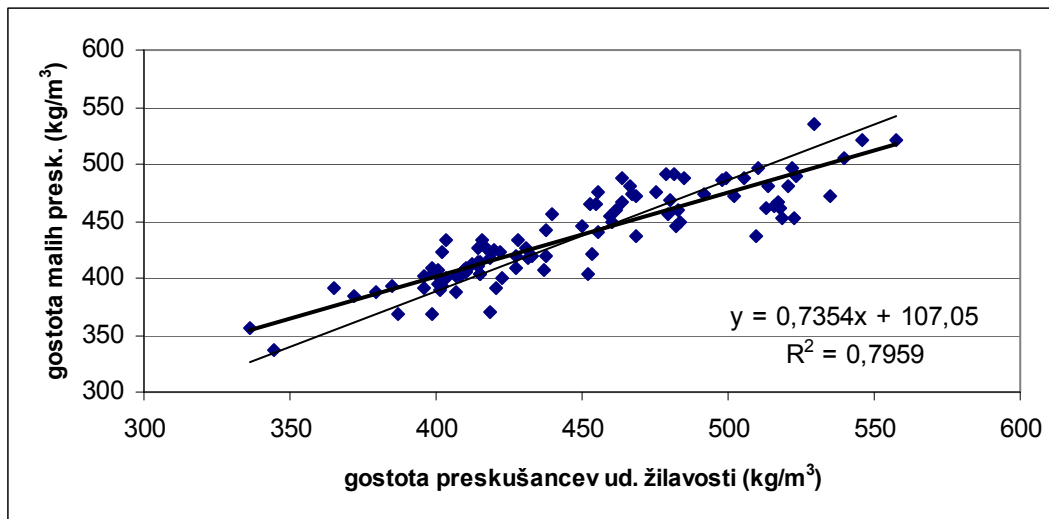


Slika 27: Korelacija med gostoto preizkušancev za udarno žilavost in gostoto celih preizkušancev; deske

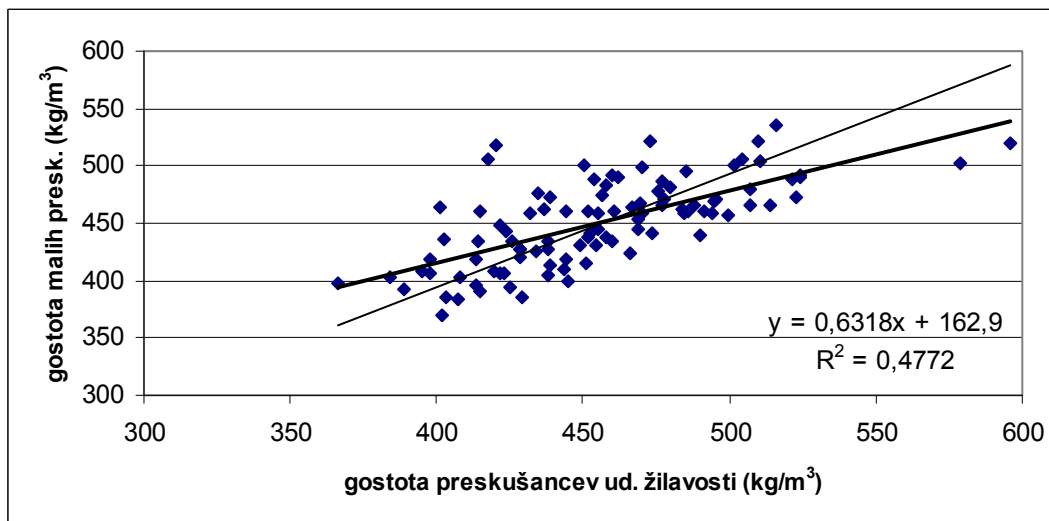


Slika 28: Korelacija med gostoto preizkušancev za udarno žilavost in gostoto celih preizkušancev; plohi

Primerjava gostote lesa vzorcev izžaganih iz istih preizkušancev, vendar drugega mesta kažejo na določeno odstopanje (slika 29, 30). Večje odstopanje je pri plohih, kot pri deskah. Les je nehomogen material, zato so ta odstopanja pričakovana. Majhni preizkušanci so pri testiranju zavzemali celoten prerez osnovnega vzorca, medtem ko so vzorci za udarno žilavost imeli prerez 10×10 mm. Na odstopanje vpliva tudi mesto, kjer je bil vzorec izžagan in morebitne napake v lesu. Rezultati so podobni tistim iz prejšnjih primerjav (slika 27, 28), kjer je bila primerjana gostota celih vzorcev.



Slika 29: Primerjava gostote preizkušancev za udarno žilavost in malih preizkušancev; deske

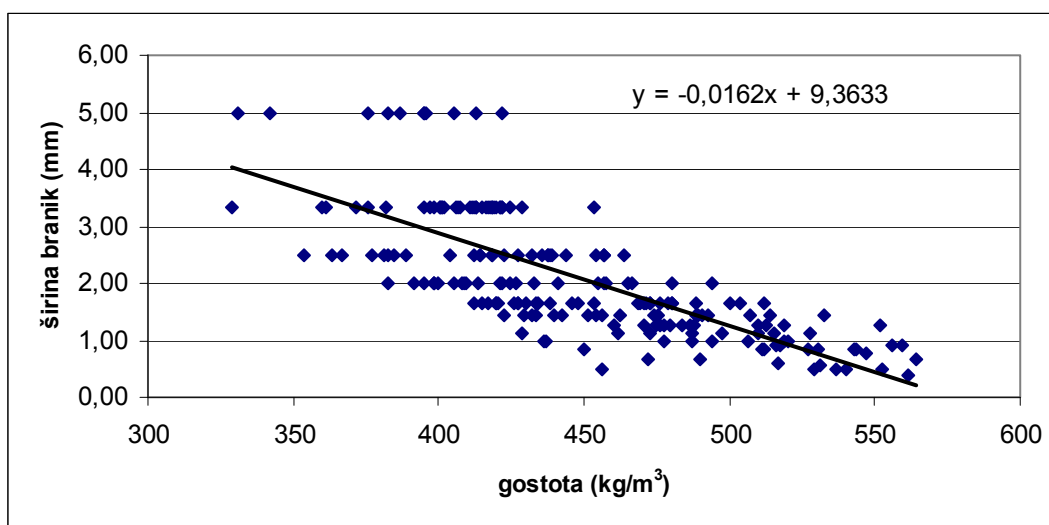


Slika 30: Primerjava gostote preizkušancev za udarno žilavost in malih preizkušancev; plahi

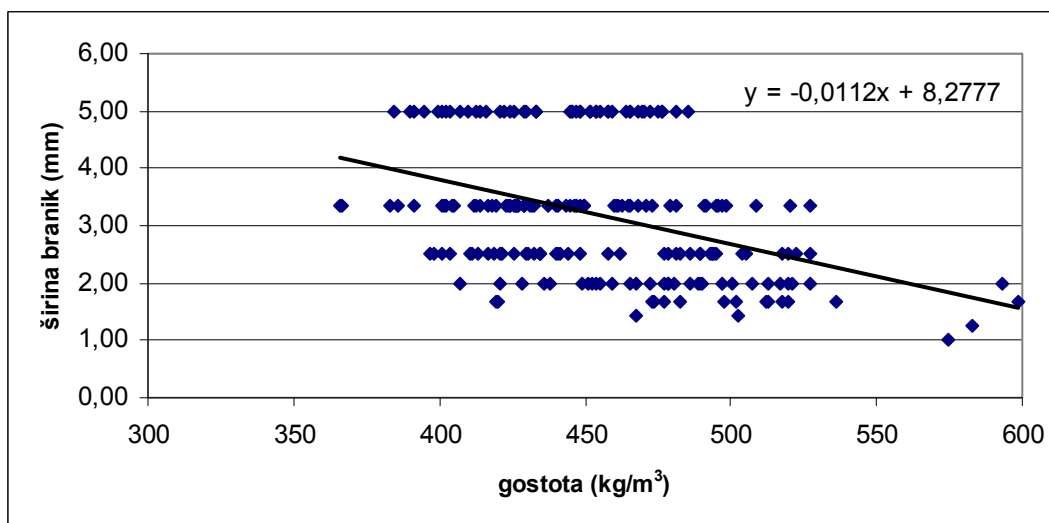
4.3 ŠIRINA BRANIK

Meritve širine branik pri posameznih preizkušancih so prikazane v prilogi (priloga A1, A2).

(Slika 31, 32) prikazujeta povezavo med gostoto in širino branik preizkušancev za udarno žilavost. Prečni prerez preizkušancev je 10×10 mm in dolžina 300 mm. Za prikaz je izračunana gostota in širina branik. Graf prikazuje precej boljšo povezavo pri deskah, kot pri plohih. Eden od razlogov za odstopanje je ta, da so pri deskah v poprečju ožje branike, kot pri plohih. Predvsem pri deskah je razviden trend višje gostote pri ožjih branikah. Vzorci imajo majhen prerez tako, da sta pri plohih na prerezu običajno le 2 do 5 branik, to pa je očitno premalo za natančno primerjavo in izračun širine posamezne branike.

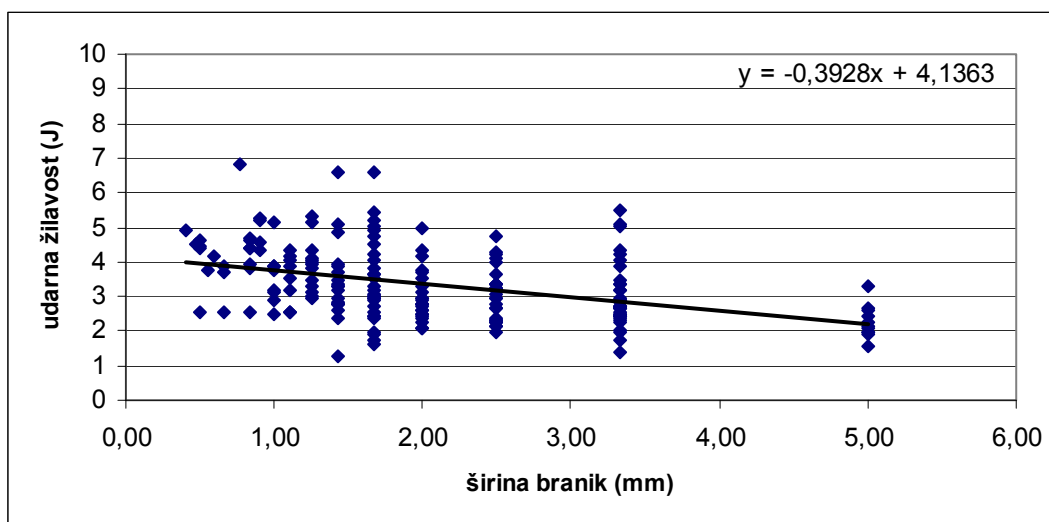


Slika 31: Korelacija med gostoto in širino branik; deske

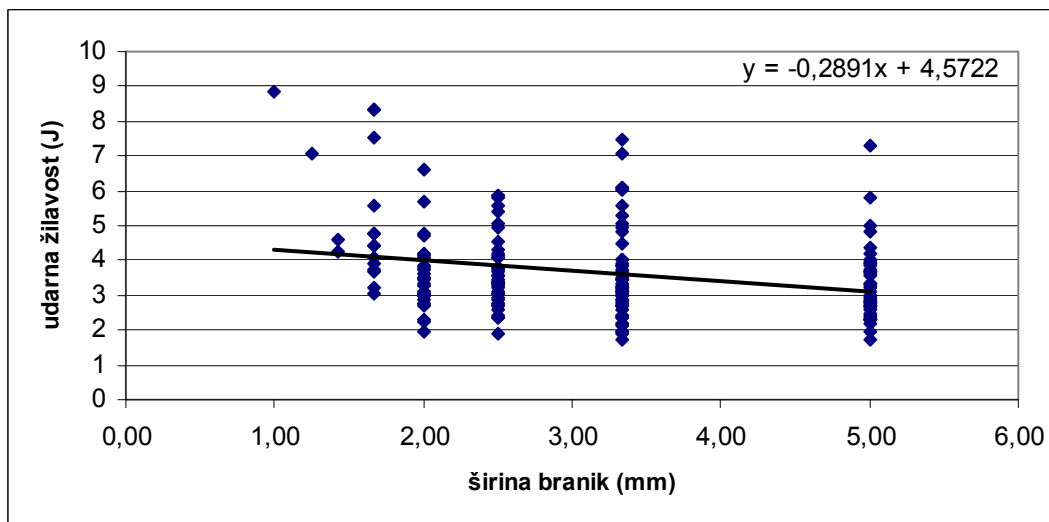


Slika 32: Korelacija med gostoto in širino branik; plohi

Korelacija med širino branik in s pospeškometerom izmerjeno udarno žilavost preizkušancev. Predpostavko, da ima bolj žilav les večje število branik ni možno potrditi z gotovostjo. Trend naraščajoče udarne žilavosti pri ozkih branikah je slabše izražen. Največ preizkušancev je v območju od 2 J do 6 J udarne žilavosti ne glede na širino branik, ki je prikazana zelo nenatančno zaradi ozkega prečnega prereza in metode določanja s štejem (slika 33, 34).



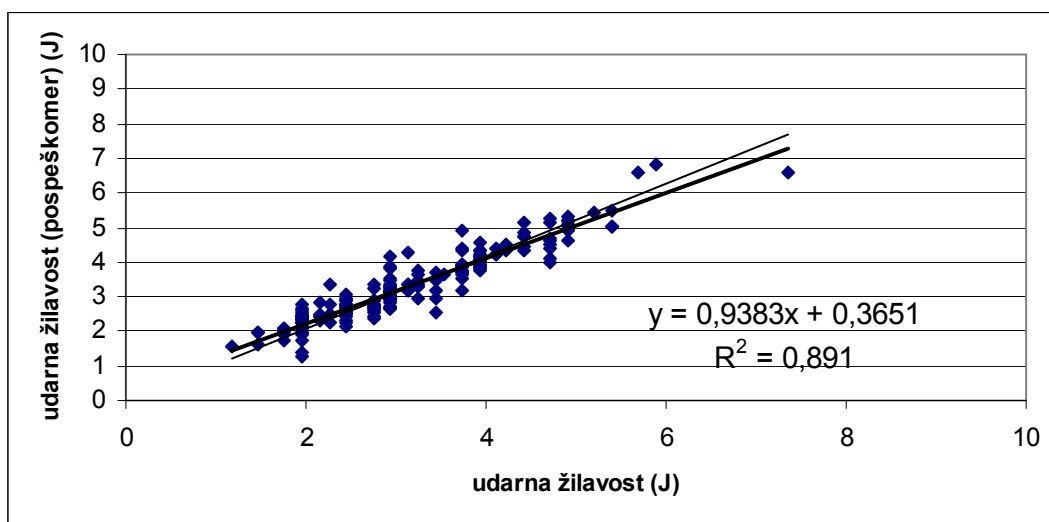
Slika 33: Korelacija med širino branik in udarno žilavostjo; deske



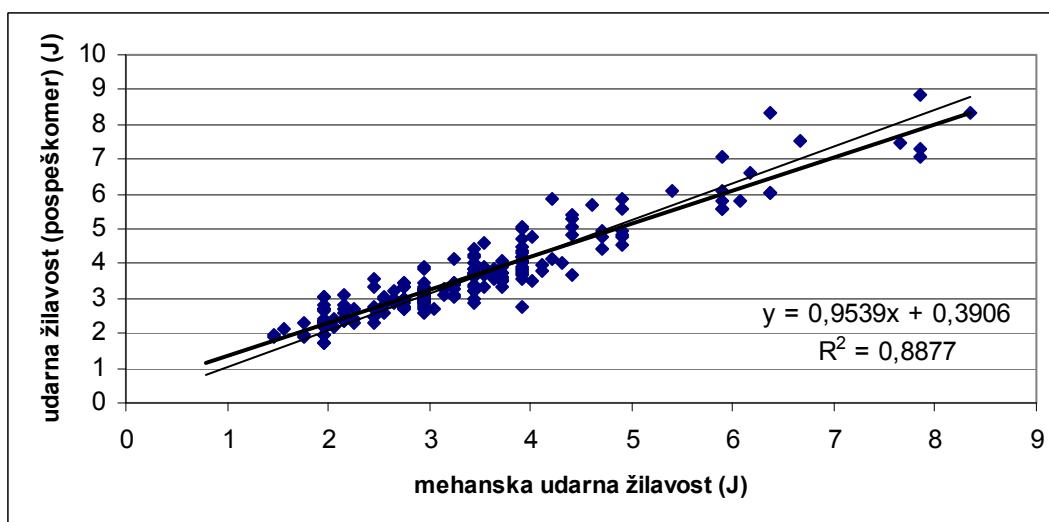
Slika 34: Korelacija med širino branik in udarno žilavostjo; plohi

4.4 UDARNA ŽILAVOST

Obstoječe merjenje udarne žilavosti na mehanski način je primerljivo z izmerjenimi meritvami pridobljenimi z merjenjem pospeškov na udarnem kladivu (slika 35, 36). Določeno odstopanje se pojavi tako pri deskah kot pri plohih. Na podlagi tega je težko oceniti, katera metoda se bolj približuje dejanskim vrednostim preizkušancev dejstvo pa je, da je merjenje na mehanski način oz. odčitavanje podatkov manj natančno, ker je rezultat zaokrožen na največ dve decimalni mesti. S tem pride več preizkušancev z enakimi vrednostmi, kar se na preglednicah vidi kot pokončen niz točk. Merjenje s pospeškomerom je s tega vidika veliko bolj natančno, odstopanja pa so možna pri obdelavi podatkov.

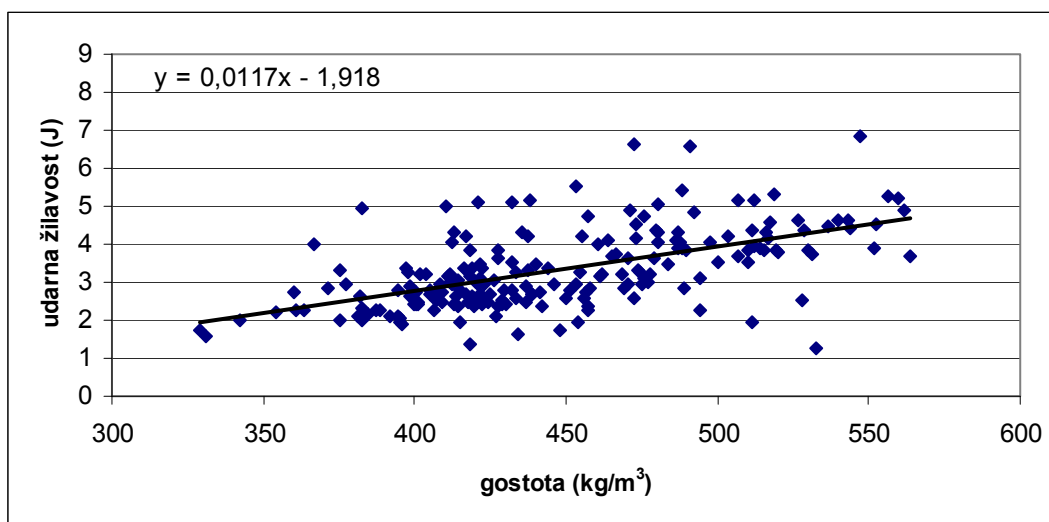


Slika 35: Korelacija udarne žilavosti glede na različen način merjenja; deske

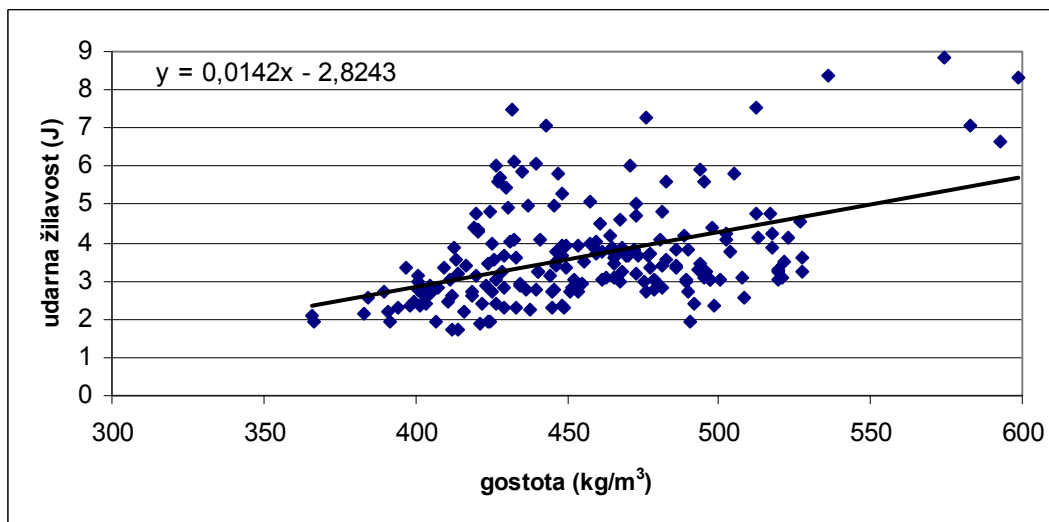


Slika 36: Korelacija udarne žilavosti glede na različen način merjenja; plohi

Nekoliko boljša povezava med udarno žilavostjo in gostoto je vidna pri deskah (slika 37) in nekoliko slabša pri plohih (slika 38). Za primerjavo smo uporabili udarno žilavost izmerjeno s pospeškometerom, za katero ocenjujemo, da je natančnejša ter gostoto. Rezultati kažejo na naraščajoč trend, kot smo pričakovali, prisotno pa je veliko odstopanje posameznih primerov. Večji vzorec preizkušancev bi pokazal bolj primerljivo sliko, z večjo zanesljivostjo.



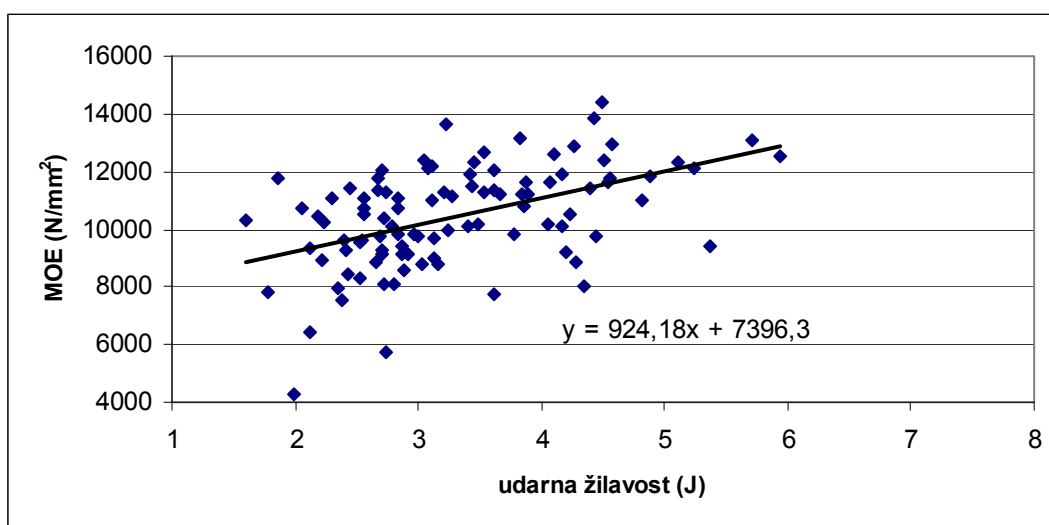
Slika 37: Korelacija med gostoto preizkušancev za udarno žilavost in udarno žilavostjo; deske



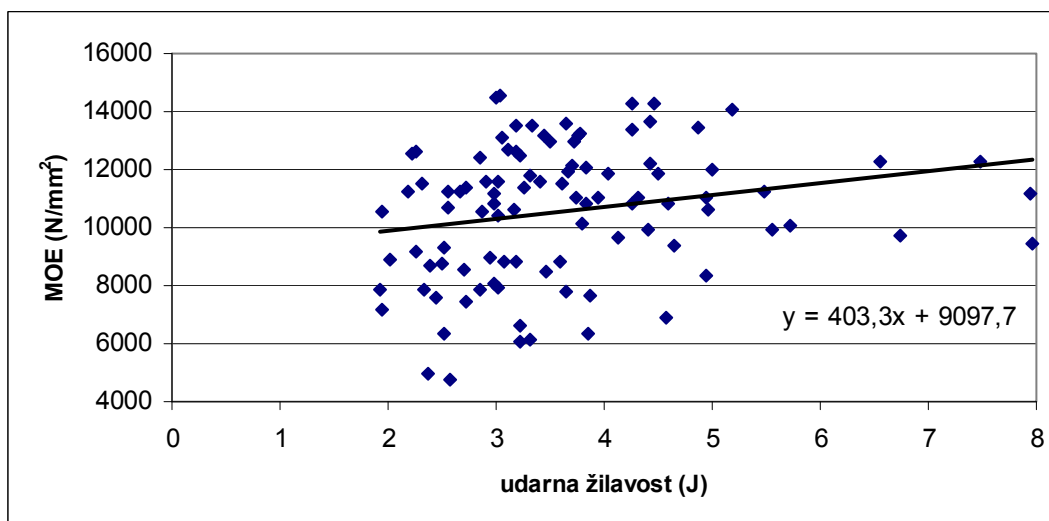
Slika 38: Korelacija med gostoto preizkušancev za udarno žilavost in udarno žilavostjo; plohi

4.5 KORELACIJA MED UDARNO ŽILAVOSTJO MODULOM ELASTIČNOSTI IN TRDNOSTJO

Prikaz korelacije med udarno žilavostjo in modulom elastičnosti (slika 39, 40). Modul elastičnosti je merjen na celih vzorcih dimenzij $38 \times 174 \times 4000$ mm za plohe in $20 \times 130 \times 4000$ mm dimenzije desk s štiri-točkovnim upogibnim testom, kot je natančno opisano v diplomski nalogi (Čepon 2006). Manjše odstopanje je opazno pri preizkusu desk, kakor pri plohih. Večje število preizkušancev bi bolj natančno pokazalo meje zaupanja. Trend kaže na naraščajočo odvisnost med spremenljivkama, kar je pričakovano. Najbolj neugodni so podatki z nizko udarno žilavostjo in visokim modulom elastičnosti, kar je močno izraženo na plohih. Vzrok nizke udarne žilavosti bi lahko bil v nepravilnem poteku vlaken.

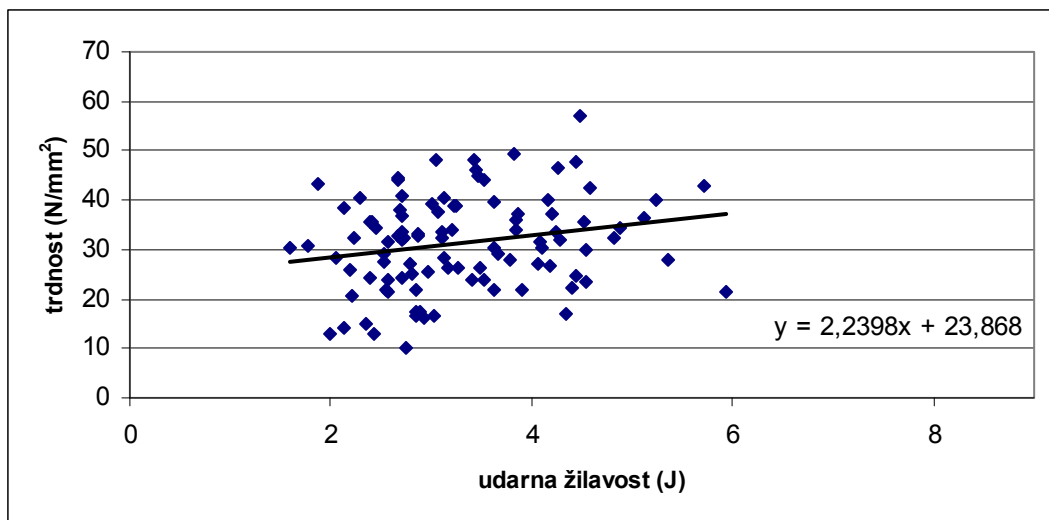


Slika 39: Korelacija med udarno žilavostjo in MOE; deske

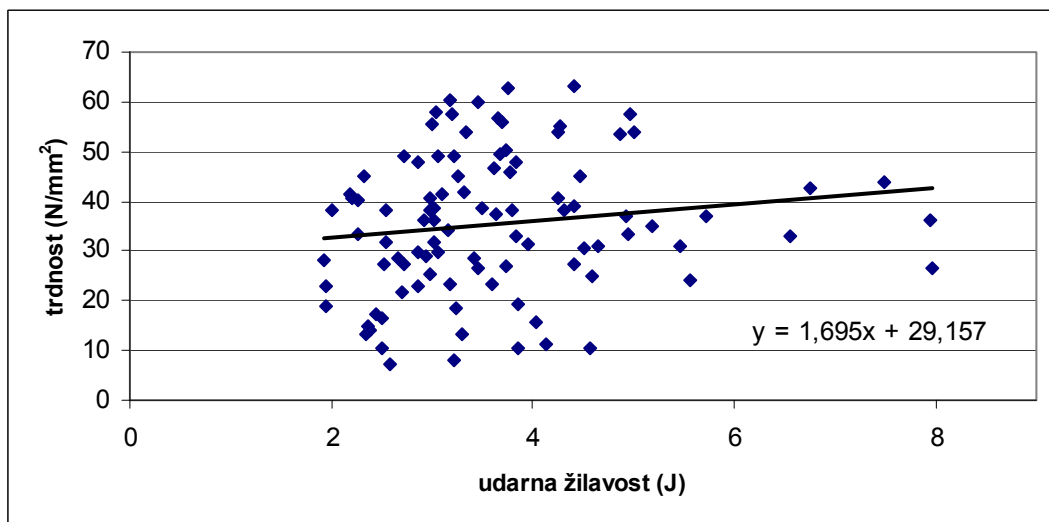


Slika 40: Korelacija med udarno žilavostjo in MOE; plohi

Sliki prikazujeta korelacijo med trdnostjo celih preizkušancev, kot je natančno opisano v (G. Bučar 2007) in preizkušancev za udarno žilavost, ki so bili izdelani po poružitvi (slika 41, 42). Korelacija je zelo slaba, kar je tudi pričakovano, zaradi variabilnosti lesa, mesta odvzema in velikosti posameznega preizkušanca. Za natančnejše rezultate bi morali istočasno z vzorci za ugotavljanje udarne žilavosti izdelati tudi vzorce za določanje trdnosti. Pri deskah lahko zaznamo nekoliko boljšo povezavo, čeprav bi šele večje število preizkušancev pokazalo bolj natančen trend in odstopanje. Pri plohih je morebitna povezava med trdnostjo in udarno žilavostjo še bolj zbrisana.



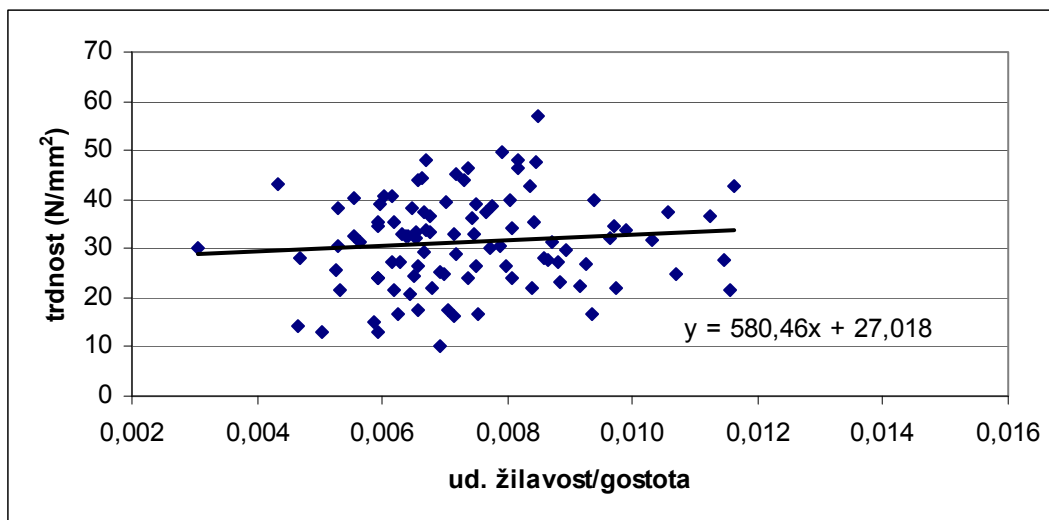
Slika 41: Korelacija med trdnostjo celih preizkušancev in udarno žilavostjo izžaganih vzorcev; deske



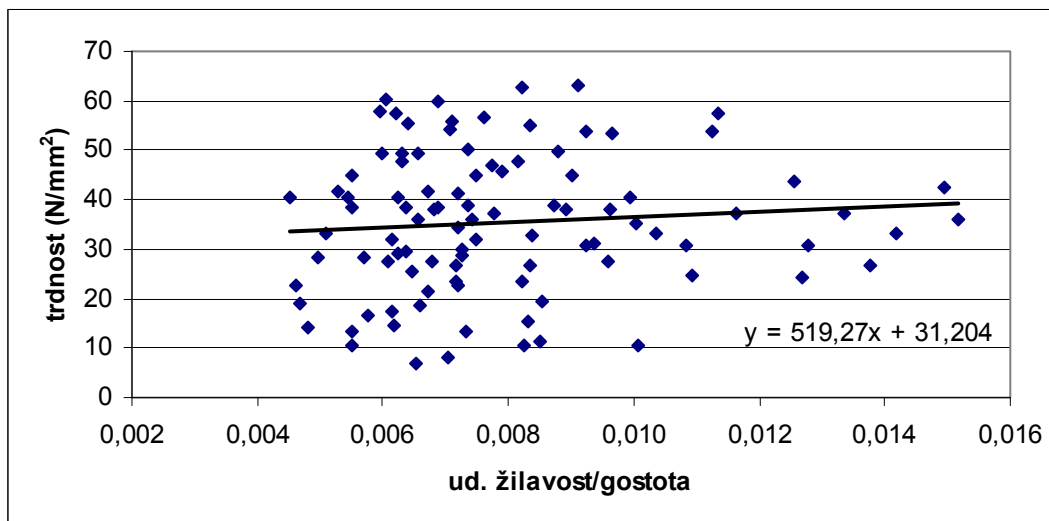
Slika 42: Korelacija med trdnostjo celih preizkušancev in udarno žilavostjo izžaganih vzorcev; plohi

4.6 KORELACIJA MED NORMALIZIRANIMI VREDNOSTMI, TRDNOSTJO CELIH VZORCEV IN MODULOM ELASTIČNOSTI

Primerjamo rezultate testiranja trdnosti celih preizkušancev in rezultate testa preizkušancev za udarno žilavost normalizirane na gostoto. Pri deskah (slika 43) lahko zaznamo nekoliko boljše povezavo, čeprav bi šele večje število preizkušancev pokazalo bolj natančen trend in odstopanje. Pri plohih je graf bolj razpršen (slika 44).

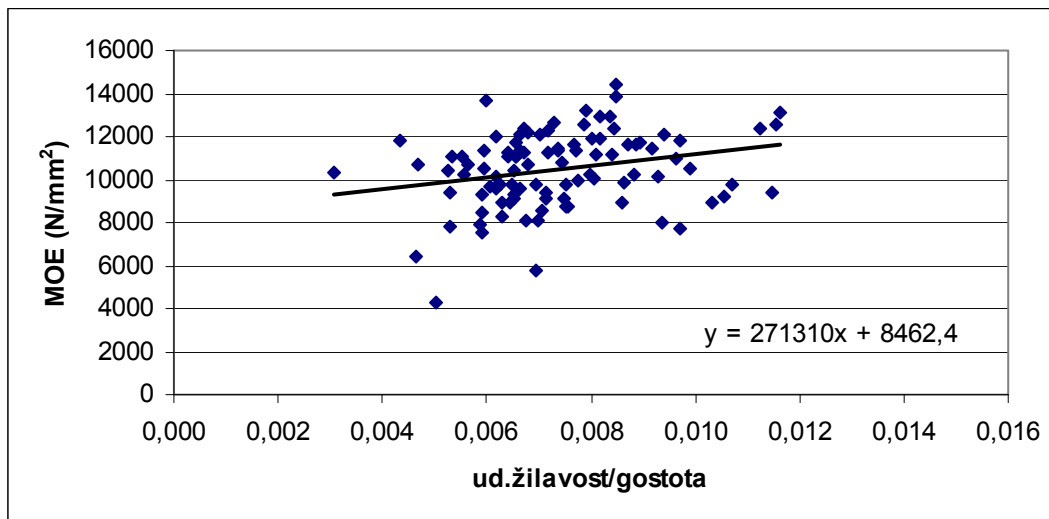


Slika 43: Korelacija med trdnostjo celih preizkušancev in udarno žilavostjo izžganih vzorcev; deske

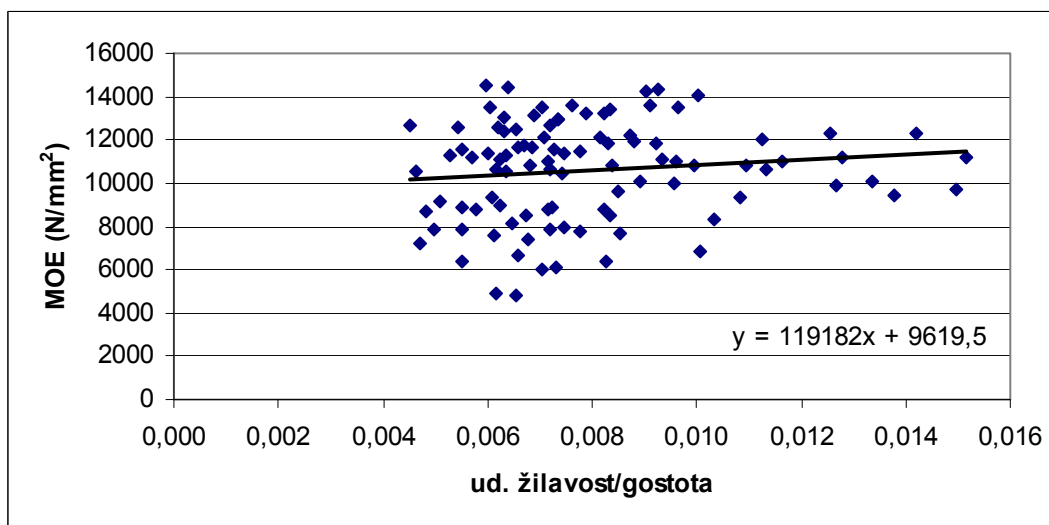


Slika 44: Korelacija med trdnostjo celih preizkušancev in udarno žilavostjo izžganih vzorcev; plohi

Grafa prikazujeta normalizirane vrednosti preizkušancev za udarno žilavost v odvisnosti od modula elastičnosti izračunanega pri testiranju celih vzorcev (slika 45, 46). Odstopanje je precejšno, podobno kot pri korelaciji med trdnostjo in udarno žilavostjo (slika 43, 44).



Slika 45: Normirane vrednosti žilavosti na gostoto v odvisnosti od trdnosti; deske



Slika 46: Normirane vrednosti žilavosti na gostoto v odvisnosti od trdnosti; plohi

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 RAZPRAVA

V diplomski nalogi smo želeli preučiti rezultate meritev, ki so pridobljeni z različnimi metodami testiranja mehanskih lastnosti lesa. Želeli smo določiti relacije med porušnimi testi, udarno žilavostjo ter ostalimi merjenimi lastnostmi preizkušancev. Pri pregledu literature smo ugotovili, da je novjših raziskav s področja udarne žilavosti zelo malo.

Vzorec 100 desk in 100 plohov, kolikor jih je vključenih v raziskavo je dokaj majhen, zato ne moremo z gotovostjo dokazati nekaterih trditev. Večjo zanesljivost bi dosegli z večjim številom vzorcev. Iz vzorcev, ki so bili že predhodno nedestruktivno razvrščeni (Čepon 2006) in jim je bil določen E modul in trdnost z upogibnimi in porušnimi testi (D. G. Bučar 2007) smo po poružitvi izdelali vzorce za ugotavljanje udarne žilavosti. Material je bil predhodno že natezno oz. tlačno preobremenjen zato je možno, da so bile prisotne razpoke v strukturi lesa, ki so v določeni meri vplivale na rezultate testiranja udarne žilavosti.

Druga težava se je pokazala pri vzorcih za udarno žilavost, ki imajo prerez $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, ker iz desk debeline 20 mm ni bilo mogoče izdelati po standardu predpisanih preizkušancev $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ s strogo orientacijo v radialni in tangencialni smeri. Zaradi majhnega prereza pa je tudi odčitana vrednost udarne žilavosti zelo majhna in jo je težko natančno odčitati iz skale. Pri napaki $0,02\text{ kgm}$, kar odčitamo s skale je po izračunu udarna žilavost napačna za $0,196\text{ J}$. Odstopanje se pokaže pri primerjavi rezultatov udarne žilavosti, ki je izmerjena na mehanski način oz. s pospeškometerom (slik2 35, 36). Predpostavili smo, da so rezultati udarne žilavosti izmerjeni s pospeškometerom bolj natančni, zato smo za nadaljnje izračune uporabljali te meritve.

Potrdimo lahko navedbe literature, da z naraščanjem gostote narašča tudi udarna žilavost. V našem primeru je gostota v odvisnosti od udarne žilavosti (slika 37, 38) precej razpršena, vendar podobna, kot je predstavil (Kollmann 1984). Bolj točne rezultate bi dobili z večjim številom vzorcev.

Zaradi majhnega prereza preizkušancev smo imeli težave pri merjenju širine branik. Pri nekaterih vzorcih plohov sta na prerezu vidni samo dve braniki, ponekod pa ni mogoče natančno opredeliti števila, ker sta na eni strani vidni dve, na drugi strani preizkušanca za udarno žilavost pa tri branike in podobno. Z merjenjem širine branik po standardu EN 1310 bi na večjem prerezu dosegli natančne vrednosti širin branik. Zato (sliki 33, 34) prikazujeta le okvirne korelacije med širino branik in udarno žilavostjo izmerjeno s pospeškometerom.

Les je nehomogen material, na njegove mehanske lastnosti močno vplivajo napake (grče, razpoke, smolni žepi, reakcijski les), ki so vključene pri testiranju celih vzorcev. Pri testu udarne žilavosti pa standard zahteva orientirane vzorce brez napak. Iz tega sledi, da je gostota celih vzorcev nekoliko drugačna od čistih vzorcev brez napak. Pri večjem deležu grč se gostota na splošno poveča in v primeru razpok zmanjša, s tem se zmanjšuje povezava med gostoto celih vzorcev in izrezanimi vzorci. Širina branik prav tako vpliva na

udarno žilavost kot gostota (slika 33, 34), vendar je graf nenatančen zaradi majhnega prereza preizkušancev, saj so bile ponekod do 5 mm široke branike, število branik na prerezu vzorca pa je majhno. Opazen pa je trend padanja udarne žilavosti z večanjem širine branik, vendar je korelacija izredno šibka.

Vzorci za udarno žilavost bi bilo potrebno predhodno testirati s štiri-točkovnim upogibnim testom. Tako bi pridobili podatke za iste vzorce merjene z nedestruktivno (štiri-točkovni upogibni test) in potem z destruktivno metodo (udarna žilavost), s čimer bi pridobili točno korelacijo med E modulom in udarno žilavostjo. Lahko bi izračunali razmerje med energijama, ki jih preizkušanelec absorbira ob hipni obremenitvi in ob statičnem upogibu, ki je lahko do 150 % višja, po navedbah avtorjev člankov.

5.2 SKLEPI

Glede na dejstvo, da je udarna žilavost destruktivna metoda testiranja lesa, je po testiranju ta les neuporaben. Testiranje se opravi na predhodno izdelanih vzorcih, zato ni primerno za testiranje končnih izdelkov, ampak za testiranje lastnosti materiala. Testiranje je primerno za ugotavljanje hipnih obremenitev lesnih delov strojev, športnega orodja, letal, ročnega orodja, kakor tudi elementov v gradbeništvu, saj les prenaša višjo udarno obremenitev kot statično obremenitev. Udarna obremenitev se izvede v zelo kratkem času, za porušitev je potrebnih le nekaj milisekund. Udarna žilavost je sposobnost materiala za absorpcijo energije.

S praktičnega vidika je udarna žilavost lesa pomembna za ugotavljanje odpornosti materiala na hipno obremenitev. Tako določimo krhkost oz. žilavost. Testi udarne žilavosti so se pogosto uporabljali pri konstruiranju lesenih letal za določanje obremenitev sestavnih delov in dimenzioniranje. V praksi je test pomemben za primerjavo z ostalimi, predvsem nedestruktivnimi testi, ki se bolj množično uporabljajo v proizvodnji, dobljeni rezultati pa se morajo čim bolj približati dejanskim lastnostim, ki jih pridobimo s porušnimi testi, med katere spada udarna žilavost.

Različni načini merjenja lastnosti lesa, ki se razlikujejo glede na metodo testiranja, velikost preizkušanca, zahteve standardov nakazujejo slabo medsebojno povezavo. Specifika lesa je nehomogenost materiala, orientiranost vlaken, napake v lesu in tudi vpliv rastišča, drevesne vrste, anatomske zgradbe... Zato se lastnosti lesa lahko zelo razlikujejo glede na mesto merjenja. Razlike so prisotne tudi pri primerjavi celih vzorcev in izdelanih čistih vzorcih, kjer je bil poudarek na eliminaciji vseh napak. Determinacijski koeficient je v primerjavi s celimi preizkušanci in preizkušanci za določanje udarne žilavosti pri deskah 0,7862 in 0,5411 za plohe. Tako rezultatov porušnih testov ne moremo prenesti iz izžaganih vzorca na celoten kos.

Za testiranje se v praksi uporablja nedestruktivne metode testiranja, ki pa se morajo čim bolj približati dejanskemu stanju, po testiranju pa mora biti preizkušanelec brez poškodb. Od metode preizkušanja je odvisno, kaj smo merili in kakšne podatke smo pridobili. Primerjava modula elastičnosti pridobljenega s štiri-točkovnim upogibnim testom in udarno žilavostjo ni v naši raziskavi pokazala znatne povezave. Če pri merjenju udarne

žilavosti pridobimo podatke za hipno prekomerno obremenitev, potem dobimo pri upogibnem testu vrednosti za dolgotrajne obremenitve. Pri uporabi lesa v konstrukcijske namene pa nas zanima predvsem dolgotrajna obremenitev.

V naši raziskavi smo Charpy-jevo udarno kladivo nadgradili z merilcem pospeškov na nihajnem kladivu. Z natančnim merjenjem pospeškov oz. pojemkov med lomom smo za vsak vzorec dobili natančen graf po katerem smo izračunali opravljeno delo. Metoda merjenja s pospeškometerom je veliko bolj natančna kot odčitavanje s skale naprave, še posebej na majhnem prerezu preizkušancev 10×10 mm, kot je bilo v našem primeru.

Pri primerjavi testa udarne žilavosti in štiri-točkovnega upogibnega testa gre namreč za dve različni metodi testiranja, z različnim preizkušancem. Pri testu udarne žilavosti smo merili lastnosti čistega lesa brez napak, s standardiziranim vzorcem po velikosti in orientaciji, test pa je bil destruktiven. S štiri-točkovnim upogibnim testom pa smo testirali žagarske polizdelke, ki se običajno uporabljajo za konstrukcijske namene v gradbeništvu. Na trdnost oz. modul elastičnosti bistveno vplivajo prisotne napake v lesu (grče, razpoke, reakcijski les, zavrtost vlaken), ki se jih po večini upošteva pri vizualnem razvrščanju žaganega lesa. Ravno napake so šibek člen, ki znižujejo raven mehanskih lastnosti lesa.

Test udarne žilavosti je z lesarskega področja dober za testiranje in primerjavo mehanskih lastnosti lesa različnih drevesnih vrst. Tudi testiranje različnih kompozitnih plošč, modificiranega lesa in lepljenih elementov na udarno žilavost je smiselno, saj so pri njih napake lesa enakomerno porazdeljene po celotnem volumnu. Tako iz proizvodnje dobimo polizdelke (plošče, nosilce, ...), pri katerih mehanske lastnosti (trdnost, modul elastičnosti, udarna žilavost) variirajo veliko manj kot pri masivnem lesu. Uporaba lesa v izdelkih, ki so hipno obremenjeni z visoko obremenitvijo je omejena na določene izdelke oz. določene pogoje uporabe. Kot se je izkazalo v praksi je potrebno zaradi variabilnosti trdnostno ovrednotiti vsak element posebej. To je možno samo z uporabo nedestruktivnih metod testiranja ali ob uporabi lesa brez napak.

6 POVZETEK

Pri uporabi lesa v gradbene in konstrukcijske namene so bistvenega pomena njegove mehanske lastnosti. Rezultat testiranja je razvrščanje žaganega lesa v trdnostne razrede, ki določajo vrsto uporabe in dovoljeno obremenitev posameznih konstrukcijskih izdelkov. Za določanje mehanskih lastnosti se uporabljajo nedestruktivne (neporušne) in destruktivne (porušne) metode določanja. Pri testiranju je zelo pomembna medsebojna primerjava rezultatov porušnih in neporušnih metod, ker se moramo z nedestruktivnim testiranjem čim bolj približati dejanski vrednosti oz. rezultatom porušnih testov. Udarne žilavost je mehanska lastnost lesa, ki je pomembna v specifičnih pogojih uporabe in se trenutno ugotavlja samo z uporabo porušnih metod. To sta najverjetneje poglavitna razloga za maloštevilne novejša raziskave.

V diplomski nalogi smo določali udarno žilavost konstrukcijskega lesa smrekovine (*Picea abies* L.). Ugotavljali smo korelacije med udarno žilavostjo, gostoto, hitrostjo priraščanja, modulom elastičnosti in trdnostjo. Iz konstrukcijskega lesa z znanimi moduli elastičnosti in znano trdnostjo smo izdelali vzorce za določanje udarne žilavosti.

Modifikacija testa, ki smo jo izvedli na Charpy-jevem stroju za testiranje udarne žilavosti zavzema togo namestitev pospeškovera na sredino udarnega kladiva. Z dovolj občutljivim pospeškoverom je možno z računalniško podporo in naknadnim izračunom pridobiti natančnejše rezultate udarne žilavosti, kot z mehanskim testiranjem. Veliko število posameznih meritev ob prelomu pa poda natančno sliko obnašanja preizkušanca med lomom. Podvajanje rezultatov pri merjenju s pospeškoverom ni možno, kar se je kot slabost izkazalo pri mehanskem testu.

Testni vzorec je zajemal po 100 desk in 100 plohov, katerim je bil določen modul elastičnosti s štiri-točkovnim upogibnim testom ter trdnost s standardiziranim porušnim testom. Iz osnovnih vzorcev smo izžagali po dva preizkušanca brez napak za testiranje udarne žilavosti po standardu DIN 52189. Pri tem je potrebno poudariti, da so bile meritve za izračun modula in trdnosti izvedene na osnovnem vzorcu dimenzij $20 \times 130 \times 4000$ mm za deske in $38 \times 174 \times 4000$ mm za plohe, medtem ko je bila udarna žilavost določena na preizkušancih dimenzij $10 \times 10 \times 300$ mm.

Rezultati raziskave potrjujejo veliko variabilnost lesa med celimi vzorci in preizkušanci za udarno žilavost. Zaradi nehomogene strukture lesa je potrebno vsak element obravnavati zase, ker manjši preizkušanec ni reprezentativen pokazatelj lastnosti celega vzorca. Primerjava gostote celih vzorcev dimenzije $38 \times 174 \times 4000$ mm za plohe in $20 \times 130 \times 4000$ mm za deske s preizkušanci za udarno žilavost dimenzij $10 \times 10 \times 300$ mm ter malimi vzorci izžaganimi skozi celoten prerez dimenzij $38 \times 174 \times 35$ za plohe in $20 \times 130 \times 35$ mm za deske so pokazali razlike pri merjenju gostote, čeprav so bili izžagani iz istega celega vzorca. Vseeno pa je iz grafov možno razbrati določeno povezavo, trend med celimi vzorci in izžaganimi elementi. Pri pripravi malih vzorcev in preizkušancev za udarno žilavost smo se izogibali vsakršnim napakam v lesu (grče, razpoke, smolni žepi). Pri štiri-točkovnem upogibnem testu celih vzorcev in porušnem testu pa so bile te prisotne in v večji meri vplivale na rezultat modula elastičnosti in trdnosti.

Šibka korelacija se je pokazala med rezultati testa udarne žilavosti in modulom elastičnosti oz. trdnostjo celih vzorcev. Predvidevamo, da je določeno odstopanje posledica prisotnih napak v lesu celih vzorcev, odstopanje pa je tudi zaradi naknadnega pridobivanja vzorcev za testiranje udarne žilavosti iz že porušenega materiala. Les, ki je bil porušen z upogibnim testom je bil poškodovan, ni pa možno ugotoviti tega vpliva na posamezne preizkušance za udarno žilavost, ki so bili pridobljeni v neposredni bližini loma.

Razvrščanju konstrukcijskega lesa v trdnostne razrede je možno le z nedestruktivnim testiranjem vsakega elementa posebej, ker je variabilnost lesa prevelika, da bi lahko z vzorcem potrdili lastnosti celega elementa (deske, hloda, drevesa). V ta namen je bila uvedena oznaka CE za konstrukcijski les, ki ga je potrebno nedestruktivno testirati z upogibnim testom, vibracijskim testom, X-žarki ali kombinacijo teh metod.

7 VIRI

- Beal F. 2007 Industrial applications and opportunities for nondestructive evaluation for structural wood members. *Ciencia tecnologia Maderad*: 127-134
- Bodig J., Collins F. 2001. The process of NDE research for wood nad wood composites. V: 12th international symposium on nondestructive testing of wood, *NDT*. 6, 3: 1-22
<http://www.ndt.net/article/v06n03/bodig/bodig.htm>
- Čepon M. 2006. Nedestruktivne metode določanja relativnih gradacijskih lastnosti žaganega lesa. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani Biotehniška fakulteta oddelek za lesarstvo: 43 str.
- DIN 52189: 1981-12. Prüfung von holz, Schlagbiegeversuch, Bestimmung der Bruchschlagarbeit: 3 str.
- Gorišek Ž. 2009. Les-zgradba in lastnosti njegova variabilnost in heterogenost. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 178 str.
- Gornik Bučar D., Šega B., Merhar M., Čepon M., Bučar, B. 2007. Strength Grading of Structural Timber using the Transversal Frequency Response Method. V: 15th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Duluth, Minnesota, September 10 -12, 2007
- Gornik Bučar D., Bučar B. 2009. Uporaba metode frekvenčnega odziva za določanje modula elastičnosti žaganega lesa. *Les*, 61, 05-P-2009: 240-245
- Gornik Bučar D. 2008: Razvrščanje konstrukcijskega lesa V: Kitek Kuzman, Manja (ur.). *Gradnja z lesom - izziv in priložnost za Slovenijo*. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 114-118
- James W. L. 1962. Dynamic Strength and Elastic Properties of Wood. *Forest Products Journal*, 12, 6: 253-260
- Jansson B. 1992. Impact loading of timber beams. Faculty of Civil Engineering, University of British Columbia: 119 str.
- Kollmann F.P.K. 1963: Phenomena of fracture in wood. *Holzforschung*: 65-71
- Kollmann F.P.K., Cote W.A. 1984. Principles of Wood Science and Technology. Volume, I. Solid Wood. Berlin Heidelberg, New York: 359-394
- Leijten A.J.M. 2004. Heat treated wood and the influence on the impact bending strength. *Heron*, 49, 4: 349-359
- Luong M.P. 2002. Mechanical performance of wood construction materials. Palaiseau, CNRS-LMS, Ecole Polytechnique: 8 str.

Madsen B., Mindess S. 1986. The fracture of wood under impact loading. Material and structures, 19: 109

Niemz P. Wood physics. Zürich, Swiss federal institute of technology: 26 str.

Pellerin R.F., Ross R.J. 2002. Nondestructive evaluation of Wood. Madison, Forest products society: 379-394

Seong L., Chang S.L. 2003. Failure modes of foam core sandwich beams under static and impact loads. Korea. Mechanical design laboratory with advanced materials: 24 str.

SIST EN 14081-1: 2006. 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 preizkus proizvodnje

SIST EN 14081-3: 2010. 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

Šega B. 2005. Razvrščanje konstrukcijskega žaganega lesa po trdnosti. Študijsko gradivo, Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. Dominiki Gornik Bučar ter somentorju izr. prof. dr. Bojanu Bučarju za pomoč pri usmerjanju in pisanju diplomske naloge.

Zahvaljujem se izr. prof. dr. Željku Gorišku za strokovno recenzijo.

Hvala tudi viš. pred. mag. Bogdanu Šegi in asist. dr. Miranu Merharju za pomoč in nasvete pri nalogi.

Posebna zahvala gre tehniškemu sodelavcu Janiju Renku za pomoč pri izdelavi vzorcev za testiranje.

Zahvaljujem pa se tudi staršem, ki so mi omogočili študij in me pri tem podpirali.

PRILOGE

Priloga: A1

Meritve preizkušancev za udarno žilavost za deske

Oznaka deske		Udarna žilavost - meritve								
		l	b	d	m	ρ	klasični test	s pospešom.	dolž. loma	šir. branik
		(mm)				(kg/m ³)	(J)	(J)	(mm)	(mm)
1	1	301,0	9,98	9,94	12,13	406	2,1582	2,285	8	3,33
	2	301,0	9,71	9,46	10,92	395	1,962	1,961	7	3,33
2	1	301,0	9,91	9,80	15,57	533	1,962	1,261	10	1,43
	2	301,0	10,01	9,95	15,34	512	1,962	1,931	12	1,67
3	1	301,0	10,02	10,04	14,75	487	3,7278	4,338	6	1,11
	2	301,0	10,04	10,04	13,35	440	3,4335	3,453	6	1,43
4	1	301,0	9,85	10,00	13,52	456	2,4525	2,555	8	0,50
	2	301,0	9,99	10,03	13,58	450	2,4525	2,563	5	0,83
5	1	301,0	9,20	9,85	10,80	396	1,7658	1,909	60	5,00
	2	301,0	10,02	10,05	11,98	395	1,7658	2,076	30	5,00
6	1	301,0	9,89	9,97	12,26	413	1,962	2,411	8	5,00
	2	301,0	10,06	10,01	12,15	401	2,7468	2,404	6	3,33
7	1	301,0	10,04	9,96	14,98	498	3,924	4,065	6	1,11
	2	301,0	10,05	9,97	16,93	561	4,905	4,908	5	0,40
8	1	300,5	10,06	10,08	15,58	511	3,7278	4,373	6	0,83
	2	300,5	10,04	10,07	16,11	530	3,924	3,82	5	0,83
9	1	301,0	9,99	9,95	11,11	371	2,7468	2,868	80	3,33
	2	301,0	10,00	9,98	11,97	398	2,4525	2,883	5	3,33
10	1	301,0	9,85	10,02	13,94	469	2,4525	2,866	5	1,67
	2	301,0	9,94	10,04	14,84	494	1,962	2,266	8	2,00
11	1	301,0	10,05	10,06	14,39	473	4,7088	4,504	85	1,67
	2	301,0	9,77	10,02	13,41	455	2,943	4,186	44	2,00
12	1	300,5	10,10	10,06	14,42	472	1,962	2,56	10	0,67
	2	300,5	10,17	10,12	17,44	564	3,7278	3,702	15	0,67
13	1	301,0	10,00	10,00	12,32	409	2,1582	2,491	3	2,00
	2	301,0	9,77	9,99	12,37	421	2,4525	2,939	6	2,00
14	1	301,0	9,78	10,00	11,73	398	2,4525	2,616	5	2,00
	2	301,0	10,04	10,06	12,43	409	2,7468	2,732	5	2,00
15	1	301,0	9,64	10,03	12,22	420	1,962	2,359	3	3,33
	2	301,0	10,00	10,02	12,10	401	1,962	2,5	4	3,33
16	1	301,0	10,04	9,97	13,38	444	3,1392	3,36	5	2,50
	2	301,0	10,09	10,01	14,47	476	4,4145	4,755	5	1,67
17	1	301,0	9,57	9,76	13,42	477	2,943	3,022	5	1,25
	2	301,0	10,02	9,97	14,65	487	3,7278	3,892	6	1,00
18	1	300,5	10,16	10,05	15,65	510	3,4335	3,503	5	1,11
	2	300,5	10,15	10,05	15,63	510	3,924	3,829	8	1,25
19	1	301,0	10,07	10,05	12,51	411	5,3955	5,014	35	3,33
	2	301,0	9,83	9,99	12,37	418	3,924	3,866	15	3,33
20	1	301,0	10,01	10,00	15,43	512	3,7278	3,948	5	0,83
	2	301,0	10,04	9,93	15,20	507	4,7088	5,15	6	1,00

...se nadaljuje

...nadaljevanje

Oznaka deske		Udarna žilavost - meritve								
		l	b	d	m	ρ	klasični test	s pospešom.	dolž. loma	šir. branik
		(mm)				(kg/m ³)	(J)	(J)	(mm)	(mm)
41	1	301,0	9,94	10,05	14,15	471	3,7278	3,628	5	1,67
	2	301,0	9,97	9,99	14,40	480	3,924	4,061	4	1,67
42	1	301,0	9,77	10,05	11,83	400	2,1582	2,414	55	3,33
	2	301,0	10,06	10,10	12,28	402	2,943	3,192	70	3,33
43	1	301,0	10,11	10,12	11,78	383	4,905	4,951	90	2,00
	2	301,0	10,17	9,98	11,03	361	1,962	2,281	5	3,33
44	1	301,0	10,14	10,10	15,10	490	3,7278	3,853	6	0,67
	2	301,0	10,11	10,10	14,68	478	3,1392	3,202	6	1,00
45	1	300,5	10,05	9,99	13,68	453	5,3955	5,508	85	3,33
	2	300,5	9,99	9,86	13,53	457	4,4145	4,719	15	2,50
46	1	301,0	10,07	10,02	12,94	426	2,943	3,056	5	1,67
	2	301,0	10,08	10,03	13,09	430	2,1582	2,417	3	1,67
47	1	301,0	10,04	9,86	13,96	468	3,7278	3,201	10	1,67
	2	301,0	10,04	10,02	14,08	465	3,7278	3,671	10	2,00
48	1	301,0	10,08	10,05	14,51	476	2,943	3,129	3	1,25
	2	301,0	10,20	10,11	15,34	494	2,943	3,099	5	1,00
49	1	301,0	10,10	10,04	13,09	429	2,7468	2,545	6	1,11
	2	301,0	10,08	10,03	13,20	434	2,4525	2,584	5	1,43
50	1	301,0	10,10	10,08	13,66	446	2,943	2,937	4	1,67
	2	301,0	10,08	10,03	14,42	474	3,2373	3,294	6	1,43
51	1	300,5	10,19	10,25	12,95	413	3,924	4,04	8	3,33
	2	300,5	10,13	10,18	12,97	419	1,962	1,367	80	3,33
52	1	300,5	10,03	10,02	13,06	432	4,905	5,087	15	1,43
	2	300,5	10,05	10,09	12,87	422	2,943	3,381	12	1,43
53	1	301,0	10,03	9,93	13,43	448	1,7658	1,728	5	1,67
	2	301,0	9,96	9,97	12,77	427	1,962	2,373	4	1,67
54	1	301,0	9,99	10,05	13,26	439	2,943	2,663	80	2,50
	2	301,0	10,04	10,02	13,18	435	3,1392	4,301	80	2,50
55	1	301,0	9,85	10,12	16,31	544	4,7088	4,411	8	0,83
	2	301,0	9,96	10,10	15,95	527	4,7088	4,61	8	0,83
56	1	301,0	10,03	9,91	12,12	405	2,7468	2,665	4	5,00
	2	301,0	10,08	10,06	12,55	411	3,1392	3,172	5	3,33
57	1	301,0	10,12	10,00	12,81	421	2,943	2,998	6	1,67
	2	301,0	10,11	10,03	12,73	417	2,943	2,688	6	1,67
58	1	301,0	10,13	10,10	17,13	556	4,7088	5,26	6	0,91
	2	301,0	10,12	10,10	17,21	559	4,905	5,215	6	0,91
59	1	301,0	10,07	9,98	14,79	489	2,1582	2,85	4	1,43
	2	301,0	10,10	10,01	15,43	507	3,4335	3,684	3	1,43
60	1	300,5	10,17	10,04	14,50	473	5,6898	6,616	45	1,67
	2	300,5	10,22	10,09	14,37	464	3,924	4,116	10	2,50

...se nadaljuje

...nadaljevanje

Oznaka deske		Udarna žilavost - meritve								
		l	b	d	m	ρ	klasični test	s pospešom.	dolž. loma	šir. branik
		(mm)				(kg/m ³)	(J)	(J)	(mm)	(mm)
61	1	300,5	10,08	10,14	11,26	367	3,924	4,016	90	2,50
	2	300,5	10,12	10,14	11,21	364	2,4525	2,251	15	2,50
62	1	300,5	10,15	10,14	15,05	487	4,7088	4,127	6	1,25
	2	300,5	10,21	10,17	14,69	471	2,943	2,941	5	1,25
63	1	301,0	10,04	10,11	13,40	439	2,4525	2,669	4	2,50
	2	301,0	10,07	10,05	13,44	441	2,7468	2,755	4	2,00
64	1	301,0	10,00	10,03	13,18	437	2,7468	2,913	6	1,00
	2	301,0	10,05	10,04	13,04	429	2,4525	2,769	6	1,43
65	1	301,0	10,02	9,99	15,59	517	3,924	4,564	8	0,91
	2	301,0	10,03	9,98	15,67	520	3,7278	3,772	12	1,00
66	1	301,0	10,03	10,06	13,13	432	1,962	2,803	3	2,50
	2	301,0	10,12	10,05	11,90	389	2,4525	2,284	6	2,50
67	1	301,0	10,07	10,07	12,71	416	2,7468	3,356	90	3,33
	2	301,0	10,01	10,05	11,56	382	2,943	2,641	80	3,33
68	1	301,0	9,79	10,06	11,70	395	2,4525	2,803	5	2,00
	2	301,0	9,81	10,02	12,08	408	2,943	2,932	4	2,00
69	1	301,0	9,81	9,99	16,30	553	4,2183	4,502	3	0,48
	2	301,0	9,99	10,01	16,25	540	4,905	4,638	4	0,50
70	1	301,0	10,02	10,06	11,44	377	3,2373	2,933	8	2,50
	2	301,0	9,98	10,06	11,52	381	1,962	2,111	6	2,50
71	1	301,0	9,87	10,05	13,80	462	2,943	3,188	6	1,43
	2	301,0	9,79	10,04	13,08	442	1,962	2,381	7	1,43
72	1	301,0	9,75	10,12	12,24	412	2,943	2,933	4	3,33
	2	301,0	9,68	10,04	12,21	417	2,2563	2,483	10	3,33
73	1	301,0	10,03	9,87	14,56	489	3,7278	3,894	3	1,43
	2	301,0	9,96	9,92	14,02	471	3,7278	4,892	6	1,67
74	1	301,0	10,11	10,09	15,73	512	4,4145	5,163	12	1,25
	2	301,0	10,03	10,04	15,59	514	3,924	3,919	10	1,43
75	1	301,0	10,10	10,00	14,97	492	4,4145	4,85	5	1,43
	2	301,0	10,11	10,05	15,01	491	7,3575	6,577	40	1,43
76	1	301,0	10,14	10,04	11,86	387	1,962	2,238	20	5,00
	2	301,0	10,12	10,09	12,75	415	2,943	2,808	68	3,33
77	1	301,0	9,99	10,01	12,85	427	1,7658	2,099	4	2,00
	2	301,0	10,01	9,94	13,01	434	1,4715	1,637	4	1,67
78	1	301,0	9,97	10,07	14,34	475	2,943	3,287	5	1,25
	2	301,0	10,05	10,04	16,29	536	4,4145	4,452	4	0,50
79	1	301,0	10,05	10,03	14,42	475	2,943	2,962	5	1,43
	2	301,0	10,03	10,04	14,66	484	3,2373	3,461	5	1,25
80	1	300,5	10,23	10,21	13,22	421	4,905	5,094	90	3,33
	2	300,5	10,27	10,19	11,81	376	2,943	3,314	80	5,00

...se nadaljuje

...nadaljevanje

Oznaka deske		Udarna žilavost - meritve								
		l	b	d	m	ρ	klasični test	s pospešom.	dolž. loma	šir. branik
		(mm)				(kg/m ³)	(J)	(J)	(mm)	(mm)
81	1	301,0	9,82	9,99	12,45	422	1,962	2,671	3	3,33
	2	301,0	9,89	10,05	12,18	407	2,7468	2,691	4	3,33
82	1	301,0	9,81	10,12	12,61	422	1,962	2,625	2	5,00
	2	301,0	9,83	10,07	11,46	385	2,4525	2,147	3	2,50
83	1	301,0	10,00	10,03	14,28	473	3,924	4,16	4	1,11
	2	301,0	10,05	10,09	14,06	461	4,7088	3,987	2	1,25
84	1	301,0	10,15	10,12	14,15	458	2,943	2,866	6	2,00
	2	301,0	10,13	10,17	14,87	480	3,924	4,364	5	1,25
85	1	301,0	10,11	10,04	14,67	480	5,3955	5,04	90	1,67
	2	301,0	10,09	10,06	16,71	547	5,886	6,825	75	0,77
86	1	301,0	10,09	10,11	11,06	360	2,4525	2,725	4	3,33
	2	301,0	10,11	10,11	10,12	329	1,962	1,714	4	3,33
87	1	301,0	10,06	9,95	13,69	454	2,943	3,289	5	1,43
	2	301,0	10,04	10,03	13,68	451	2,4525	2,789	3	1,43
88	1	301,0	10,10	10,06	14,27	467	3,2373	3,753	4	2,00
	2	301,0	10,13	10,06	14,02	457	2,7468	2,393	10	2,00
89	1	301,0	10,10	10,10	13,46	438	4,905	5,177	60	1,67
	2	301,0	10,01	10,04	13,96	461	3,4335	3,166	10	1,11
90	1	301,0	9,87	9,93	10,09	342	1,4715	1,976	3	5,00
	2	301,0	9,74	10,06	9,77	331	1,1772	1,578	3	5,00
91	1	301,0	10,08	10,02	12,74	419	2,7468	2,657	6	3,33
	2	301,0	10,04	10,05	12,90	425	2,943	2,666	8	3,33
92	1	301,0	9,98	9,98	12,65	422	1,962	2,405	2	3,33
	2	301,0	10,05	9,96	13,03	432	2,943	3,523	3	2,00
93	1	301,0	10,07	10,07	13,33	437	2,4525	2,5	4	1,00
	2	301,0	10,02	10,03	11,85	392	1,962	2,09	6	2,00
94	1	301,0	10,08	10,07	13,06	427	2,943	3,831	4	1,67
	2	301,0	10,08	10,04	12,55	412	2,943	3,018	5	1,67
95	1	301,0	10,11	10,00	14,86	488	5,1993	5,417	55	1,67
	2	301,0	10,12	10,01	15,74	516	3,924	4,342	8	0,91
96	1	301,0	10,13	10,03	15,77	516	3,924	3,849	3	1,11
	2	301,0	10,05	10,08	15,83	519	2,943	3,855	4	1,00
97	1	301,0	10,12	10,07	13,11	427	3,2373	3,64	75	2,50
	2	301,0	10,14	9,94	12,69	418	2,943	3,182	80	2,50
98	1	301,0	9,87	9,90	12,87	438	3,924	4,226	85	2,50
	2	301,0	10,03	9,98	13,18	437	3,2373	3,33	85	2,50
99	1	301,0	10,07	10,00	16,03	529	4,1202	4,385	8	0,50
	2	301,0	10,05	10,04	15,69	517	3,924	4,144	8	0,59
100	1	301,0	10,07	9,98	12,21	404	2,7468	3,22	80	2,50
	2	301,0	9,92	10,02	12,96	433	3,2373	3,274	85	1,67

Priloga: A2
Meritve preizkušancev za udarno žilavost za plohe

Oznaka ploha		Udarna žilavost - meritve								
		l	b	d	m	ρ	klasični test	s pospešom.	dolž. loma	šir. branik
		(mm)				(kg/m ³)	(J)	(J)	(mm)	(mm)
1	1	300,5	9,84	9,81	13,84	477	3,4335	3,721	8	1,67
	2	300,5	10,05	9,88	14,40	483	3,6297	3,578	6	2,50
2	1	300,0	10,10	9,78	13,08	441	3,924	4,071	88	2,50
	2	300,5	10,07	9,91	13,04	435	4,2183	5,863	65	2,50
3	1	300,5	9,77	9,93	13,57	465	2,943	3,079	55	5,00
	2	300,5	10,09	9,62	14,04	481	2,5506	2,819	18	5,00
4	1	300,5	10,04	9,80	12,69	429	2,1582	2,825	7	3,33
	2	300,5	10,10	9,98	13,46	444	2,1582	3,129	8	2,50
5	1	300,5	10,14	10,03	11,21	367	1,4715	1,924	5	3,33
	2	300,5	10,12	9,59	10,67	366	1,5696	2,108	7	3,33
6	1	300,5	10,19	10,13	14,84	478	2,4525	2,755	22	2,00
	2	300,5	9,71	9,97	13,76	473	2,943	3,198	28	1,67
7	1	300,5	10,20	10,18	12,31	395	1,962	2,28	15	5,00
	2	300,5	10,19	10,17	12,68	407	2,943	2,814	13	5,00
8	1	300,5	9,91	10,20	12,47	411	2,0601	2,441	4	2,50
	2	300,5	9,99	10,03	12,61	419	2,5506	2,608	8	2,50
9	1	300,5	9,97	10,11	14,49	478	2,943		10	2,50
	2	300,5	10,06	10,14	15,00	489	2,943	3,051	7	2,50
10	1	300,5	10,17	10,04	12,49	407	1,962	1,942	5	2,00
	2	300,5	10,11	10,09	12,89	421	1,962		6	2,00
11	1	300,5	10,16	10,20	12,60	405	1,962	2,685	5	3,33
	2	300,5	9,69	10,18	11,59	391	1,962	2,197	8	3,33
12	1	300,5	10,13	10,06	15,32	500	1,962	3,034	8	2,00
	2	300,5	10,07	9,76	15,34	519	2,5506	3,038	5	1,67
13	1	300,5	9,64	10,06	14,52	498	2,1582	2,378	7	3,33
	2	300,5	10,10	10,03	14,97	492	2,2563	2,395	8	3,33
14	1	300,5	10,03	10,04	14,43	477	3,5316	3,688	7	2,50
	2	300,5	10,17	10,00	14,59	477	2,943	3,324	5	2,00
15	1	300,5	10,01	9,93	12,68	425	1,962	1,931	4	3,33
	2	300,0	9,99	10,16	12,74	418	2,7468	2,712	12	3,13
16	1	300,5	9,94	9,91	11,59	392	1,7658	1,935	12	5,00
	2	300,5	10,11	10,03	11,75	386	1,4715		12	3,33
17	1	300,5	9,95	9,83	12,46	424	1,962	1,943	6	3,33
	2	300,5	9,98	10,13	12,66	417	2,4525		10	3,33
18	1	300,5	10,13	10,02	12,81	420	4,0221	4,784	25	1,67
	2	300,5	10,12	10,15	12,95	420	3,4335	4,399	18	1,67
19	1	300,5	10,22	10,13	14,82	476	7,848	7,29	50	5,00
	2	300,5	10,15	10,08	13,74	447	6,0822	5,811	50	5,00
20	1	300,5	10,07	10,01	15,06	497	3,2373	3,042	15	3,33
	2	300,5	10,08	10,02	14,98	494	4,905	5,889	20	2,50

...se nadaljuje

...nadaljevanje

Oznaka ploha		Udarna žilavost - meritve								
		l	b	d	m	ρ	klasični test	s pospešom.	dolž. loma	šir. branik
		(mm)				(kg/m ³)	(J)	(J)	(mm)	(mm)
21	1	300,5	10,15	10,09	14,25	463	3,2373	3,113	5	3,33
	2	300,5	9,92	10,08	13,37	445	2,4525	2,327	6	5,00
22	1	300,5	10,17	10,07	12,69	412	1,962	2,626	6	5,00
	2	300,5	10,17	10,11	12,80	414	1,962	1,734	8	5,00
23	1	300,5	9,98	10,11	13,36	441	2,943	3,244	5	2,50
	2	300,5	9,66	10,06	12,74	436	2,7468	2,78	7	2,00
24	1	300,5	9,78	10,14	13,70	460	3,924	4,004	6	3,33
	2	300,5	9,77	10,08	13,63	461	3,924	4,504	7	3,33
25	1	300,5	10,16	10,15	16,62	536	8,3385	8,35	25	1,67
	2	300,5	10,14	10,13	15,82	513	6,6708	7,557	40	1,67
26	1	300,0	10,20	9,98	14,84	486	3,2373	3,427	4	2,00
	2	300,5	9,95	10,13	15,06	497	2,943	3,009	6	2,00
27	1	300,5	10,10	10,16	15,29	496	3,4335	3,228	10	3,33
	2	300,5	9,98	10,00	15,53	518	3,4335	4,224	12	2,50
28	1	300,5	9,68	9,86	14,14	493	2,7468	3,319	6	2,50
	2	300,5	10,08	10,12	15,16	495	3,7278	3,306	8	2,50
29	1	300,5	10,19	10,18	16,29	523	3,2373	4,135	9	2,50
	2	300,5	10,20	10,11	16,11	520	3,2373	3,266	7	2,50
30	1	300,5	10,15	10,09	13,97	454	2,943	3,934	10	10,00
	2	300,5	9,88	10,08	13,75	459	3,4335	3,724	4	5,00
31	1	300,5	10,12	10,13	13,21	429	2,943	3,269	8	5,00
	2	300,5	10,19	9,97	13,45	441	3,4335	3,235	10	3,33
32	1	300,5	10,11	10,02	15,76	518	3,7278	3,894	6	1,67
	2	300,5	10,08	10,03	16,02	527	3,7278	3,592	7	2,00
33	1	300,5	9,91	10,11	15,65	520	2,943	3,3	10	2,00
	2	300,5	9,85	9,90	14,87	507	2,943	3,079	10	2,00
34	1	300,5	10,12	10,18	15,64	505	5,886	5,806	7	2,50
	2	300,5	9,89	9,93	15,55	527	4,905	4,564	6	2,50
35	1	300,5	10,01	9,74	13,79	471	6,3765	6,008	85	3,33
	2	300,5	10,11	10,07	13,21	432	7,6518	7,49	95	3,33
36	1	300,5	10,04	9,93	13,43	448	3,5316	3,925	82	5,00
	2	300,5	10,21	9,93	13,40	440	5,886	6,07	95	3,33
37	1	300,5	10,42	10,01	13,30	424	4,905	4,831	53	5,00
	2	300,5	10,13	10,04	13,21	432	5,3955	6,116	90	3,33
38	1	300,5	10,09	10,08	15,93	521	3,7278	3,523	6	2,00
	2	300,5	10,25	10,12	15,01	482	3,2373	3,382	7	2,50
39	1	300,5	9,86	9,89	12,19	416	2,0601	2,206	7	5,00
	2	300,5	10,12	10,05	13,81	452	1,962	2,806	4	5,00
40	1	300,5	10,12	9,76	17,60	593	6,1803	6,626	10	2,00
	2	300,5	10,13	9,74	17,75	599	6,3765	8,34	8	1,67

...se nadaljuje

...nadaljevanje

Oznaka ploha		Udarna žilavost - meritve								
		l	b	d	m	ρ	klasični test	s pospešom.	dolž. loma	šir. branik
		(mm)				(kg/m ³)	(J)	(J)	(mm)	(mm)
41	1	300,5	10,08	10,08	12,84	421	3,924	4,289	95	2,50
	2	300,5	10,13	10,12	13,16	427	4,905	5,582	85	3,33
42	1	300,5	9,61	10,11	13,48	462	3,7278	3,75	8	2,50
	2	300,5	10,17	10,18	14,24	458	3,924	5,054	10	2,50
43	1	300,5	10,17	10,17	13,38	430	4,905	4,942	32	2,50
	2	300,5	10,17	10,11	13,16	426	3,924	3,578	8	2,50
44	1	300,5	10,19	10,18	13,30	427	6,3765	6,006	65	3,33
	2	300,5	9,77	10,19	12,86	430	4,4145	5,429	40	2,50
45	1	300,5	10,03	10,02	13,49	447	4,0221	3,523	88	3,33
	2	300,5	10,08	10,12	13,15	429	4,4145	3,668	75	3,33
46	1	300,5	10,01	10,11	15,27	502	3,924	4,091	8	1,67
	2	300,5	10,12	10,10	15,73	512	4,905	4,749	6	1,67
47	1	300,5	10,24	9,80	12,35	410	3,4335	3,351	10	5,00
	2	300,5	10,07	10,04	12,93	426	4,3164	3,996	10	5,00
48	1	300,5	10,04	10,05	13,07	431	3,4335	4,018	85	3,33
	2	300,5	10,18	9,96	12,57	413	3,4335	3,874	95	3,33
49	1	300,5	10,12	10,00	13,64	449	4,4145	5,273	88	3,33
	2	300,5	10,08	9,91	13,49	449	3,5316	3,361	15	3,33
50	1	300,5	9,89	9,94	15,15	513	4,2183	4,153	10	2,00
	2	300,5	10,15	10,05	15,18	495	5,886	5,575	11	2,50
51	1	300,5	10,29	10,16	13,21	420	3,924	4,341	78	5,00
	2	300,5	10,14	10,19	13,58	437	4,7088	4,963	95	3,33
52	1	300,5	10,05	10,21	14,04	455	3,7278	3,486	88	2,00
	2	300,5	10,02	10,16	13,29	434	3,4335	2,89	90	2,50
53	1	300,5	9,99	10,19	14,71	481	3,924	4,084	6	2,00
	2	300,5	10,06	10,22	15,10	489	3,924	4,17	7	2,00
54	1	300,5	9,89	10,15	14,93	495	2,943	3,109	60	3,33
	2	300,5	10,24	9,77	14,60	486	2,7468	3,353	65	5,00
55	1	300,5	10,13	9,91	14,00	464	3,924	4,167	10	5,00
	2	300,5	9,99	10,08	13,48	445	3,924	4,986	55	5,00
56	1	300,5	10,13	10,11	17,68	574	7,848	8,851	125	1,00
	2	300,5	10,00	10,03	17,56	583	7,848	7,087	92	1,25
57	1	300,5	10,06	9,84	14,69	494	2,943	3,44	4	2,50
	2	300,5	10,21	10,13	15,00	483	5,886	5,575	12	1,67
58	1	300,5	10,03	10,11	12,13	398	1,962	2,36	75	2,50
	2	300,5	9,87	10,13	11,93	397	2,4525	3,361	90	2,50
59	1	300,5	10,18	9,84	12,44	413	2,4525	3,544	90	2,50
	2	300,5	10,12	10,06	12,74	416	3,4335	3,376	8	2,50
60	1	300,5	10,10	10,11	14,29	466	2,7468	3,439	85	3,33
	2	300,5	10,07	10,06	14,38	472	3,4335	3,841	95	5,00

...se nadaljuje

...nadaljevanje

Oznaka ploha		Udarna žilavost - meritve								
		l	b	d	m	ρ	klasični test	s pospešom.	dolž. loma	šir. branik
		(mm)				(kg/m ³)	(J)	(J)	(mm)	(mm)
61	1	300,5	10,24	10,03	12,34	400	2,4525	2,452	8	5,00
	2	300,5	10,25	9,64	11,58	390	3,0411	2,703	80	5,00
62	1	300,5	10,00	9,94	14,63	490	1,962	2,714	4	2,50
	2	300,5	9,84	9,76	11,87	411	1,962	3,026	15	2,50
63	1	300,5	9,85	10,01	12,84	433	1,7658	2,299	4	5,00
	2	300,5	10,18	9,93	14,47	476	1,962	2,722	4	5,00
64	1	300,5	10,14	9,93	14,15	468	3,5316	4,598	15	1,43
	2	300,5	10,13	9,98	15,26	502	3,4335	4,236	15	1,43
65	1	300,5	10,19	10,07	13,02	422	2,1582	2,384	4	5,00
	2	300,5	10,02	10,07	13,02	429	1,962	2,294	4	5,00
66	1	300,5	10,14	10,00	13,61	447	3,7278	3,758	10	3,33
	2	300,5	10,01	9,93	13,67	458	4,1202	3,966	40	5,00
67	1	300,5	10,07	10,14	14,10	460	3,6297	3,797	6	2,00
	2	300,5	9,93	10,08	14,40	479	2,943	3,028	6	2,00
68	1	300,5	10,09	9,75	11,93	404	2,1582	2,415	6	5,00
	2	300,5	10,14	9,94	12,14	401	2,5506	2,998	5	5,00
69	1	300,5	10,16	9,78	11,48	384	2,943	2,58	70	5,00
	2	300,5	10,04	10,11	11,69	383	1,962	2,159	10	3,33
70	1	300,5	10,17	9,77	13,88	465	2,943	3,847	5	3,33
	2	300,5	10,17	10,14	14,51	468	3,6297	3,859	6	3,33
71	1	300,5	9,92	9,99	12,55	421	1,7658	1,878	70	2,50
	2	300,5	10,12	10,06	13,10	428	4,6107	5,702	100	2,00
72	1	300,5	9,94	10,12	13,10	433	3,4335	3,601	8	5,00
	2	300,5	9,85	9,83	12,94	445	2,943	2,717	10	3,33
73	1	300,5	10,02	10,03	13,46	446	3,924	2,776	75	5,00
	2	300,5	9,94	9,89	13,87	470	3,4335	3,662	58	5,00
74	1	300,5	10,16	10,09	14,56	473	3,924	4,715	7	2,00
	2	300,5	10,18	10,06	14,39	468	2,7468	2,967	6	2,00
75	1	300,5	10,20	10,05	14,57	473	4,4145	5,043	6	3,33
	2	300,5	10,19	10,01	14,76	482	4,4145	4,838	7	3,33
76	1	301,0	10,06	9,95	14,44	479	3,4335	2,994	4	3,33
	2	301,0	10,07	9,87	13,80	461	2,943	3,015	5	3,33
77	1	300,5	10,15	10,14	14,54	470	3,6297	3,671	7	5,00
	2	300,5	10,15	10,16	14,73	475	2,943	2,999	6	5,00
78	1	300,5	10,13	10,11	14,33	466	3,924	3,716	6	2,00
	2	300,5	10,16	10,15	15,19	490	3,924	3,827	6	2,00
79	1	300,5	9,86	10,07	13,49	452	2,7468	3,009	4	2,00
	2	300,5	9,33	10,08	12,75	451	2,7468	2,698	5	2,00
80	1	300,5	10,04	10,17	13,34	435	2,943	2,942	20	2,50
	2	300,5	10,13	10,09	13,93	454	2,7468	2,89	10	2,00

...se nadaljuje

...nadaljevanje

Oznaka ploha		Udarna žilavost - meritve								
		l	b	d	m	ρ	klasični test	s pospešom.	dolž. loma	šir. branik
		(mm)				(kg/m ³)	(J)	(J)	(mm)	(mm)
81	1	300,5	10,12	10,08	13,77	449	2,2563	2,28	95	2,00
	2	300,5	9,86	9,88	12,82	438	1,962	2,235	80	2,00
82	1	300,5	10,06	10,08	14,27	468	2,6487	3,227	85	5,00
	2	300,5	10,05	10,09	13,82	454	2,1582	2,727	60	5,00
83	1	300,5	10,24	10,11	13,99	450	3,924	3,931	7	3,33
	2	300,5	10,23	10,10	14,46	466	3,7278	3,586	5	5,00
84	1	300,5	10,12	10,09	14,91	486	3,924	3,809	7	2,50
	2	300,5	10,04	9,98	13,44	446	3,2373	3,42	6	3,33
85	1	300,5	9,81	10,14	13,50	452	0,981		35	5,00
	2	300,5	10,07	10,11	14,01	458	0,7848		35	5,00
86	1	300,5	10,01	10,15	12,23	401	2,943	3,144	7	3,33
	2	300,5	10,00	10,16	12,37	405	2,6487	2,884	15	3,33
87	1	300,5	10,03	10,04	12,18	403	2,2563	2,677	5	3,33
	2	300,5	10,08	9,92	12,38	412	1,962	1,751	8	3,33
88	1	300,5	10,22	10,05	15,15	491	1,4715	1,936	4	3,33
	2	300,5	10,26	10,13	15,88	508	2,1582	2,585	6	3,33
89	1	300,5	10,12	10,11	13,53	440	2,943	2,763	8	2,50
	2	300,5	10,21	10,14	13,18	424	2,7468	3,443	10	3,33
90	1	300,0	10,16	10,17	15,61	504	4,1202	3,775	10	2,50
	2	300,5	10,08	10,06	15,76	517	4,7088	4,759	8	2,00
91	1	300,5	9,77	10,20	14,18	474	3,4335	3,657	7	1,67
	2	300,5	10,11	10,12	15,31	498	4,7088	4,417	6	1,67
92	1	300,5	10,08	9,96	13,52	448	1,962	2,36	80	2,50
	2	300,5	10,15	9,96	14,86	489	2,6487	2,98	84	2,00
93	1	300,5	9,80	10,16	11,99	401	2,7468	2,764	3	2,50
	2	300,5	10,04	10,16	12,37	404	2,4525	2,683	3	2,50
94	1	300,5	10,10	10,15	16,25	527	3,1392	3,255	3	3,33
	2	300,5	10,06	10,12	15,93	521	3,1392	3,1	5	3,33
95	1	300,5	9,96	10,11	12,70	420	2,943	3,121	6	3,33
	2	300,5	10,17	10,10	13,16	426	2,943	3,011	8	3,33
96	1	300,5	10,17	10,10	12,41	402	2,943	2,847	10	5,00
	2	300,5	10,13	9,94	12,52	414	2,943	3,204	10	3,33
97	1	300,5	10,22	10,01	13,08	425	2,7468	2,736	20	3,33
	2	300,5	10,17	10,10	12,39	401	1,962	2,359	4	3,33
98	1	300,5	9,94	9,79	13,30	455	2,943	2,942	78	5,00
	2	300,5	10,15	9,95	13,61	448	3,924	3,67	70	5,00
99	1	300,5	10,18	10,07	13,03	423	2,943	2,888	4	3,33
	2	300,5	10,18	10,08	13,15	426	1,962	2,41	5	3,33
100	1	300,5	9,94	10,02	12,95	433	3,7278	4,064	8	2,50
	2	300,5	9,90	10,00	13,19	443	5,886	7,05	65	3,33

Priloga: B1

Izračuni trdnosti, MOE, gostote celih vzorcev in udarna žilavost za deske

oznaka	Udarna žilavost - izračuni						
	povprečna gostota	povprečna. ud. ž. s pospeškom	gostota BF majhni p. korigirana	trdnost korigirana	MOE pokončno - globalni korigirani	gostota BF korigirana	normalizirane vrednosti ud. žilavosti
	(kg/m ³)	(J)	(kg/m ³)	[N/mm ²]	[N/mm ²]	(kg/m ³)	
1	401	2,123	395	38,33	9371	427	0,00530
2	522	1,596	496	30,15	10344	540	0,00306
3	464	3,896	488	22,00	11180	507	0,00840
4	453	2,559	421	31,43	10736	425	0,00565
5	396	1,993	392	12,83	4260	404	0,00504
6	407	2,408	389	35,42	9301	411	0,00592
7	530	4,487	535	56,90	14429	534	0,00847
8	521	4,097	481	30,39	12572	520	0,00787
9	385	2,876	393	32,97	9115	388	0,00747
10	482	2,566	491	21,38	11110	513	0,00533
11	464	4,345	466	16,85	7997	498	0,00936
12	518	3,131	462	40,64	9657	470	0,00604
13	415	2,715	404	32,11	10394	420	0,00654
14	404	2,674	433	44,51	11348	439	0,00662
15	411	2,430	408	13,04	8471	422	0,00592
16	460	4,058	449	27,23	10199	471	0,00882
17	482	3,457	446	45,05	12314	435	0,00717
18	510	3,666	497	29,00	11216	517	0,00719
19	415	4,440	414	24,66	9784	417	0,01071
20	509	4,549	437	29,84	11742	455	0,00893

...se nadaljuje

...nadaljevanje

oznaka	Udarna žilavost - izračuni						
	povprečna gostota	povprečna. ud. ž. s pospeškom	gostota BF majhni p. korigirana	trdnost korigirana	MOE pokončno - globalni korigirani	gostota BF korigirana	normalizirane vrednosti ud. žilavosti
	(kg/m ³)	(J)	(kg/m ³)	[N/mm ²]	[N/mm ²]	(kg/m ³)	
21	402	2,230	393	32,37	10258	412	0,00554
22	421	3,159	391	26,45	8754	414	0,00751
23	402	3,029	394	16,60	8770	402	0,00754
24	396	2,745	402	9,97	5749	425	0,00693
25	418	3,092					0,00740
26	499	4,815	487	32,33	11022	494	0,00964
27	412	2,450	413	34,59	11387	430	0,00594
28	540	3,224	506	39,03	13642	531	0,00597
29	387	2,396	368	35,42	9653	376	0,00619
30	455	2,838	465	16,60	9811	496	0,00624
31	407	2,671	401	44,03	11745	408	0,00656
32	516	3,621	464	39,46	12061	490	0,00702
33	399	2,343	368	15,12	7947	397	0,00588
34	523	4,434	489	47,71	13837	504	0,00847
35	415	4,281	413	31,80	8884	413	0,01031
36	402	2,717	423	36,76	8124	422	0,00676
37	483	3,826	460	49,48	13177	466	0,00792
38	417	2,194	427	25,70	10431	442	0,00526
39	456	2,123	441	14,07	6443	464	0,00466
40	409	2,891	407	17,55	8555	430	0,00706

...se nadaljuje

...nadaljevanje

oznaka	Udarna žilavost - izračuni						
	povprečna gostota	povprečna. ud. ž. s pospeškom	gostota BF majhni p. korigirana	trdnost korigirana	MOE pokončno - globalni korigirani	gostota BF korigirana	normalizirane vrednosti ud. žilavosti
	(kg/m ³)	(J)	(kg/m ³)	[N/mm ²]	[N/mm ²]	(kg/m ³)	
41	475	3,845	475	34,03	11186	479	0,00809
42	401	2,803	401	24,91	8058	414	0,00699
43	372	3,616	385	21,99	7727	391	0,00973
44	484	3,528	449	44,05	12644	469	0,00729
45	455	5,114	476	36,49	12334	467	0,01123
46	428	2,737	434	32,45	11261	450	0,00639
47	467	3,436	481	46,29	11486	487	0,00736
48	485	3,114	488	32,38	11027	498	0,00642
49	431	2,565	417	23,90	10487	426	0,00595
50	460	3,116	454	33,56	12203	471	0,00678
51	416	2,704	433	24,27	9293	421	0,00651
52	427	4,234	409	33,65	10533	420	0,00991
53	438	2,051	443	28,12	10715	443	0,00469
54	437	3,482	407	26,29	10202	423	0,00797
55	535	4,511	472	35,41	12409	495	0,00843
56	408	2,919	401	16,25	9117	415	0,00715
57	419	2,843	418	21,78	10726	417	0,00679
58	558	5,238	520	40,08	12100	506	0,00939
59	498	3,267	485	26,39	11112	501	0,00656
60	468	5,366	436	27,72	9439	429	0,01146

...se nadaljuje

...nadaljevanje

oznaka	Udarna žilavost - izračuni						
	povprečna gostota	povprečna ud. ž. s pospeškom	gostota BF majhni p. korigirana	trdnost korigirana	MOE pokončno - globalni korigirani	gostota BF korigirana	normalizirane vrednosti ud. žilavosti
	(kg/m ³)	(J)	(kg/m ³)	[N/mm ²]	[N/mm ²]	(kg/m ³)	
61	365	3,134	390	28,20	8977	389	0,00858
62	479	3,534	490	23,95	11307	493	0,00738
63	440	2,712	456	40,86	12030	469	0,00617
64	433	2,841	420	17,34	11056	436	0,00656
65	519	4,168	453	40,06	11929	460	0,00803
66	411	2,544	405	21,71	9615	415	0,00620
67	399	2,999	405	39,21	9774	417	0,00751
68	401	2,868	390	33,05	9440	382	0,00714
69	546	4,570	522	42,61	12938	519	0,00837
70	379	2,522	387	29,28	9562	405	0,00665
71	452	2,785	403	27,17	10108	427	0,00616
72	415	2,708	404	33,49	9106	420	0,00653
73	480	4,393	468	22,40	11455	478	0,00915
74	513	4,541	461	23,32	11645	472	0,00885
75	492	5,714	474	42,72	13076	475	0,01162
76	401	2,523	407	27,40	8291	416	0,00629
77	431	1,868	427	43,12	11781	442	0,00434
78	505	3,870	488	37,30	11603	494	0,00766
79	479	3,212	455	33,80	11292	463	0,00670
80	398	4,204	409	37,25	9203	420	0,01055

...se nadaljuje

...nadaljevanje

oznaka	Udarna žilavost - izračuni						
	povprečna gostota	povprečna. ud. ž. s pospeškom	gostota BF majhni p. korigirana	trdnost korigirana	MOE pokončno - globalni korigirani	gostota BF korigirana	normalizirane vrednosti ud. žilavosti
	(kg/m ³)	(J)	(kg/m ³)	[N/mm ²]	[N/mm ²]	(kg/m ³)	
81	414	2,681	410	38,22	9734	429	0,00647
82	403	2,386	400	24,15	7508	411	0,00592
83	467	4,074	474	31,46	11651	473	0,00873
84	469	3,615	473	30,20	11362	475	0,00771
85	514	5,933	481	21,42	12558	508	0,01155
86	345	2,220	336	20,57	8941	351	0,00644
87	453	3,039	465	48,11	12415	480	0,00671
88	462	3,073	460	37,43	12082	465	0,00665
89	450	4,172	445	26,87	10133	459	0,00927
90	337	1,777	355	30,71	7831	362	0,00528
91	422	2,662	423	32,80	8887	429	0,00631
92	427	2,964	419	25,32	9804	426	0,00694
93	414	2,295	426	40,37	11057	443	0,00554
94	420	3,425	425	48,21	11889	443	0,00816
95	502	4,880	471	34,53	11837	494	0,00972
96	517	3,852	467	36,14	10806	483	0,00744
97	423	3,411	400	23,82	10083	417	0,00807
98	438	3,778	420	27,81	9842	422	0,00864
99	523	4,265	453	46,52	12890	458	0,00816
100	418	3,247	369	38,77	9995	388	0,00776

Priloga: B2

Izračuni trdnosti, MOE, gostote celih vzorcev in udarna žilavost za plohe

oznaka	Udarna žilavost - izračuni						
	povprečna gostota	povprečna. ud. žilavost s pospeškom	gostota BF majhni p. korigirana	trdnost korigirana	MOE pokončno - globalni korigirani	gostota BF korigirana	normalizirane vrednosti ud. žilavosti
	(kg/m ³)	(J)	(kg/m ³)	[N/mm ²]	[N/mm ²]	(kg/m ³)	
1	480	3,650	482	56,78	13571	489	0,00761
2	438	4,967	427	57,40	10610	436	0,01134
3	473	2,949	441	28,93	8987	470	0,00623
4	437	2,977	462	38,12	10834	476	0,00682
5	366	2,016	397	38,41	8911	415	0,00550
6	476	2,977	478	40,62	11138	514	0,00626
7	401	2,547	464	38,33	11259	422	0,00635
8	415	2,525	461	27,45	9314	475	0,00609
9	484	3,051	462	49,21	13072	471	0,00631
10	414	1,942	434	19,03	7194	438	0,00469
11	398	2,441	419	17,36	7592	417	0,00614
12	510	3,036	522	57,81	14542	545	0,00595
13	495	2,387	469	14,01	8657	480	0,00482
14	477	3,506	486	38,80	12963	490	0,00735
15	421	2,322	407	44,94	11524	423	0,00551
16	389	1,935	393	28,27	7851	412	0,00498
17	420	1,943	518	22,79	10518	472	0,00462
18	420	4,592	408	24,82	10814	417	0,01094
19	462	6,551	490	33,14	12270	489	0,01419
20	495	4,466	470	44,91	14276	482	0,00901

...se nadaljuje

...nadaljevanje

oznaka	Udarna žilavost - izračuni						
	povprečna gostota	povprečna. ud. žilavost s pospeškom	gostota BF majhni p. korigirana	trdnost korigirana	MOE pokončno - globalni korigirani	gostota BF korigirana	normalizirane vrednosti ud. žilavosti
	(kg/m ³)	(J)	(kg/m ³)	[N/mm ²]	[N/mm ²]	(kg/m ³)	
21	454	2,720	488	49,22	11347	482	0,00599
22	413	2,180	396	41,49	11263	410	0,00527
23	438	3,012	473	38,47	11615	460	0,00687
24	460	4,254	492	53,90	14297	487	0,00924
25	524	7,954	491	36,05	11203	508	0,01517
26	492	3,218	460	49,16	12453	474	0,00655
27	507	3,726	466	50,30	12946	479	0,00735
28	494	3,313	458	41,82	11773	469	0,00671
29	521	3,701	488	55,79	12123	486	0,00710
30	457	3,829	475	32,86	10859	477	0,00838
31	435	3,252	477	44,90	11401	481	0,00748
32	523	3,743	473	26,80	11035	491	0,00716
33	514	3,190	465	57,62	12586	458	0,00621
34	516	5,185	536	35,04	14076	541	0,01005
35	451	6,749	416	42,63	9734	434	0,01496
36	444	4,998	419	53,81	12027	426	0,01125
37	428	5,474	420	30,81	11219	432	0,01278
38	501	3,453	500	59,95	13176	486	0,00689
39	434	2,506	425	16,57	8753	467	0,00578
40	596	7,483	519	43,67	12288	521	0,01256

...se nadaljuje

...nadaljevanje

oznaka	Udarna žilavost - izračuni						
	povprečna gostota	povprečna. ud. žilavost s pospeškom	gostota BF majhni p. korigirana	trdnost korigirana	MOE pokončno - globalni korigirani	gostota BF korigirana	normalizirane vrednosti ud. žilavosti
	(kg/m ³)	(J)	(kg/m ³)	[N/mm ²]	[N/mm ²]	(kg/m ³)	
41	424	4,936	443	37,07	11043	469	0,01164
42	460	4,402	434	27,45	9948	456	0,00958
43	428	4,260	427	40,58	10846	434	0,00995
44	428	5,718	427	37,14	10071	430	0,01335
45	438	3,596	404	23,34	8823	416	0,00821
46	507	4,420	480	38,85	12230	502	0,00872
47	418	3,674	506	49,63	11927	479	0,00880
48	422	3,946	449	31,21	11054	467	0,00936
49	449	4,317	431	38,23	11022	472	0,00962
50	504	4,864	506	53,55	13473	532	0,00965
51	429	4,652	386	30,87	9382	408	0,01085
52	445	3,188	399	23,45	8801	402	0,00717
53	485	4,127	459	11,22	9623	473	0,00851
54	490	3,231	439	18,57	6613	457	0,00659
55	455	4,577	430	10,63	6876	459	0,01006
56	579	7,969	503	26,65	9438	512	0,01377
57	488	4,508	465	30,76	11836	478	0,00923
58	398	2,861	406	22,78	7880	404	0,00719
59	415	3,460	390	26,68	8496	400	0,00834
60	469	3,640	454	37,23	7797	483	0,00776

...se nadaljuje

...nadaljevanje

oznaka	Udarna žilavost - izračuni						
	povprečna gostota	povprečna. ud. žilavost s pospeškom	gostota BF majhni p. korigirana	trdnost korigirana	MOE pokončno - globalni korigirani	gostota BF korigirana	normalizirane vrednosti ud. žilavosti
	(kg/m ³)	(J)	(kg/m ³)	[N/mm ²]	[N/mm ²]	(kg/m ³)	
61	395	2,578	409	7,07	4772	452	0,00653
62	451	2,870	500	29,59	10576	524	0,00637
63	455	2,511	445	10,41	6372	465	0,00552
64	485	4,417	496	63,10	13630	487	0,00911
65	426	2,339	435	13,42	7855	458	0,00549
66	452	3,862	441	19,29	7681	471	0,00854
67	469	3,413	468	28,71	11581	478	0,00727
68	402	2,707	436	21,56	8554	452	0,00673
69	384	2,370	403	14,76	4946	423	0,00617
70	467	3,853	464	10,38	6366	463	0,00826
71	425	3,790	393	38,04	10106	409	0,00892
72	439	3,159	413	34,32	10652	436	0,00720
73	458	3,219	438	8,05	6053	460	0,00703
74	470	3,841	459	47,75	12081	471	0,00817
75	477	4,941	465	33,27	8369	490	0,01035
76	470	3,005	499	55,63	14472	515	0,00639
77	473	3,335	521	54,09	13524	509	0,00705
78	478	3,772	471	45,89	13265	490	0,00789
79	452	2,854	461	47,83	12395	479	0,00632
80	444	2,916	461	36,10	11617	483	0,00657

...se nadaljuje

...nadaljevanje

oznaka	Udarna žilavost - izračuni						
	povprečna gostota	povprečna ud. žilavost s pospeškom	gostota BF majhni p. korigirana	trdnost korigirana	MOE pokončno - globalni korigirani	gostota BF korigirana	normalizirane vrednosti ud. žilavosti
	(kg/m ³)	(J)	(kg/m ³)	[N/mm ²]	[N/mm ²]	(kg/m ³)	
81	444	2,258	409	33,24	9187	403	0,00509
82	461	2,977	461	25,52	8093	463	0,00646
83	458	3,759	484	62,60	13206	486	0,00821
84	466	3,615	424	46,87	11508	446	0,00775
85	455		459	23,44	6499	481	
86	403	3,014	386	31,78	7954	398	0,00748
87	407	2,214	384	40,45	12555	401	0,00544
88	500	2,261	457	40,40	12639	495	0,00452
89	432	3,103	459	41,28	12684	471	0,00719
90	510	4,267	503	55,12	13390	496	0,00836
91	486	4,037	460	15,50	11853	468	0,00831
92	469	2,670	445	28,49	11236	459	0,00570
93	402	2,724	369	27,52	7431	395	0,00677
94	524	3,178	492	60,16	13486	511	0,00606
95	423	3,066	406	29,87	8833	425	0,00725
96	408	3,026	403	36,15	10425	426	0,00742
97	413	2,548	418	31,82	10670	439	0,00616
98	452	3,306	437	13,33	6130	464	0,00732
99	425	2,649					0,00624
100	438	5,557	434	24,20	9903	434	0,01269