

PREDIKCIA MODULU PRUŽNOSTI V OHYBE AKUSTICKÝMI CHARAKTERISTIKAMI

PREDICTION OF MODULUS OF ELASTICITY USING ACOUSTIC CHARACTERISTICS

Rastislav Lagaňa – Alena Rohanová

ABSTRACT

Nondestructive methods based on different principles are used for prediction of quality parameters of structural timber. Bending modulus of elasticity is mostly evaluated by dynamic acoustic methods (ultrasound, vibrational) that define dynamic moduli $E_{dyn,ult}$ and $E_{dyn,res}$. This study deals with structural timber of spruce (*Picea abies*, Karst.) from locality Slovakia. Both, entire set of data (n=101) and individual regions (mid SK and north SK) were analyzed.

The entire set of data confirmed high correlation between bending modulus of elasticity and dynamic modulus ($E_{dyn,ult}$ and $E_{dyn,res}$). The bending modulus of elasticity can be predicted using regression parameters of both dynamic methods. Based on statistical characteristics, a vibrational method seems to be more suitable. An effect of region on correlation between bending modulus of elasticity and dynamic modulus was not confirmed. Experimental results showed that vibrational dynamic method performed closer prediction of bending modulus of elasticity than ultrasound method, even though the differences were not significant.

Keywords: structure timber, modulus of elasticity, destructive testing, ultrasound method, vibration method.

ÚVOD

Smrekové drevo je jednou zo strategických surovín na stavebné účely v Európskom priestore. Keďže je to obnoviteľná a kapacitne obmedzená surovina, jej racionálne využitie je závislé od kvalitného triedenia. Triedenie konštrukčného dreva sa stáva neodmysliteľnou súčasťou technológie spracovania dreva. Vo všeobecnosti sa na triedenie používajú dve základné metódy: vizuálna a strojová. Strojová, ktorá je zároveň objektívnejšia, aplikuje princípy ohybového zaťaženia, rýchlosti a spôsobu šírenia zvukovej vlny, hustotu hodnotenú radiačnou metódou alebo iné princípy. Využívajú sa na predikciu modulu pružnosti a pevnosti konštrukčného dreva do tried pevností v strojových zaradeniach (WEIDENHILLER a DENZLER 2009, ROHANOVÁ *et al.* 2011, BACHER a KRZOSEK 2013). Rezonančné dynamické metódy sa ukázali byť úspešné pri hodnotení fyzikálnych a mechanických vlastností dreva aj drevných kompozitov (WANGA a GONG 2012).

Predikovať moduly pružnosti v ohybe akustickými metódami si vyžaduje najprv zistiť ohybové charakteristiky deštruktívnou skúškou. Okrem pevnosti v ohybe je významný aj globálny modul pružnosti v ohybe. Predikcia je založená na zistených koreláciách medzi ohybovými a dynamickými modulmi.

ALVES *et al.* 2013 poukázali na veľmi významnú koreláciu priečného modulu pružnosti hodnoteného dynamickou a ohybovou metódou. Štatisticky významná korelácia v pozdĺžnom smere existuje medzi dynamickým modulom pružnosti dreva zisťovaným na kmeni a ohybovým modulom pružnosti ideálnych telies (MORA *et al.* 2009, HORÁČEK *et al.* 2012). Podobný výsledok bol zaznamenaný pre drevo konštrukčných rozmerov (ROHANOVÁ *et al.* 2010) ako aj pri lepenom lamelovom dreve (ZHANG a HU 2010).

Pri hodnotení vlastností konštrukčného dreva podľa metód sa odporúča zohľadňovať nielen krajinu pôvodu ale aj jej regióny. STAPEL a DENZLER (2011) uvádzajú, že rozdielne vlastnosti konštrukčného dreva môžu byť rovnako veľké v rámci jednej krajiny (v regiónoch) ako aj medzi krajinami.

Cieľom tejto práce bolo overiť vhodnosť využitia akustických metód na predikciu modulu pružnosti v ohybe konštrukčného dreva zo Slovenska, pričom pri metódach diferencovane hodnotiť aj vplyv regiónu.

EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Testovalo sa smrekové drevo (*Picea abies*, Karst.). Z náhodne vybranej piliarskej guľatiny triedy III.A a III.B (STN 48 0055) sa vyrobilo rezivo o rozmeroch $40 \times 185 \times 2350 \text{ mm}^3$. Počet skúšobných telies bol 101 ks.

Pri testovaní sa zohľadňoval aj výber reziva podľa regiónu Slovenska: Orava (Sever SK) a Horehronie (Stred SK). Počet skúšobných telies podľa regiónov bol: 51 ks - Sever SK, 50 ks - Stred SK. Na zisťovanie modulov pružnosti boli použité:

- dve akustické dynamické metódy a to ultrazvuková a rezonančná metóda (dynamický modul pružnosti – $E_{dyn,ultr.}$ a $E_{dyn,vibr.}$),
- deštruktívna ohybová skúška podľa STN EN 408 (modul pružnosti v ohybe – $E_{m,408}$).

Ultrazvuková metóda pomocou prístroja Sylvatest Duo® meria rýchlosť šírenia zvuk. Výstup zo softwaru uvádza hodnotu $E_{dyn,ultr.}$, ktorý je možné približne vypočítať z rýchlosti šírenia zvukovej vlny c podľa nasledovného vzťahu (SANDOZ 1989):

$$E_u = \rho c^2 \quad (1)$$

kde ρ je hustota dreva. Uvedený vzťah je platný za predpokladu zanedbania súčinnov Poissonových čísel (BUCUR 2005). Pri triedení reziva sa merania modulov pružnosti obmedzujú na pozdĺžny smer. Poissonové čísla v priečnom smere sú výrazne nízke (ν_{LR} a ν_{LT} sú zanedbateľné), a preto je tento predpoklad splnený.

Druhá dynamická metóda (rezonančná) pomocou zariadenia Timber Grader MTG meria prirodzenú frekvenciu skúšobného telesa a určuje $E_{dyn,vibr.}$. Pri meraní sa zvuková vlna generuje na čele dosky, prechádza doskou a rozkmitá ju. Na základe charakteristík krivky tlmiaceho signálu (dekrement útlmu a koeficient útlmu) sa určí prirodzená frekvencia dosky f_n , ktorá je vo vzťahu s dynamickým modulom pružnosti $E_{dyn,vibr.}$ podľa nasledovnej rovnice:

$$E_v = \rho(2lf_n)^2 \quad (2)$$

kde l je dĺžka dosky a ρ je hustota dreva. Počas testovania sa zisťovala vlhkosť skúšobných telies odporovým vlhkomerom Hydromette HT 85T. Hustota dreva (pri oboch metódach) sa zisťovala váhovou metódou.

Modul pružnosti v ohybe ($E_{m,408}$) bol meraný deštruktívnou ohybovou skúškou. Skúšobné teleso o priereze 40×120 mm bolo zaťažené 4 bodovým ohybom (vzdialenosť podpier $l = 2160$ mm). Modul pružnosti v ohybe bol vypočítaný podľa STN EN 408. Zohľadňuje vplyv šmykových napätí na priehyb pomocou šmykového modulu ($G = 650$ MPa).

Hodnoty modulov pružnosti v ohybe boli prepočítané na referenčnú vlhkosť dreva ($w = 12$ %), čo objektivizuje ich porovnanie s dynamickými modulmi pružnosti.

VÝSLEDKY A DISKUSIA

Sumár výsledkov vo forme základnej popisnej štatistiky je v tab. 1. Vyhodnocovanie pozostávalo zo štatistickej analýzy modulov pružnosti ($E_{m,408}$, $E_{dyn,ult}$ a $E_{dyn,rez}$) v dvoch úrovniach:

- súbor skúšobných telies z regiónov SK ($n = 101$),
- podľa regiónov SK (stred SK, sever SK).

Tab. 1 Popisná štatistika meraných modulov pružnosti.

Tab. 1 Basic statistics of measured modulus of elasticity.

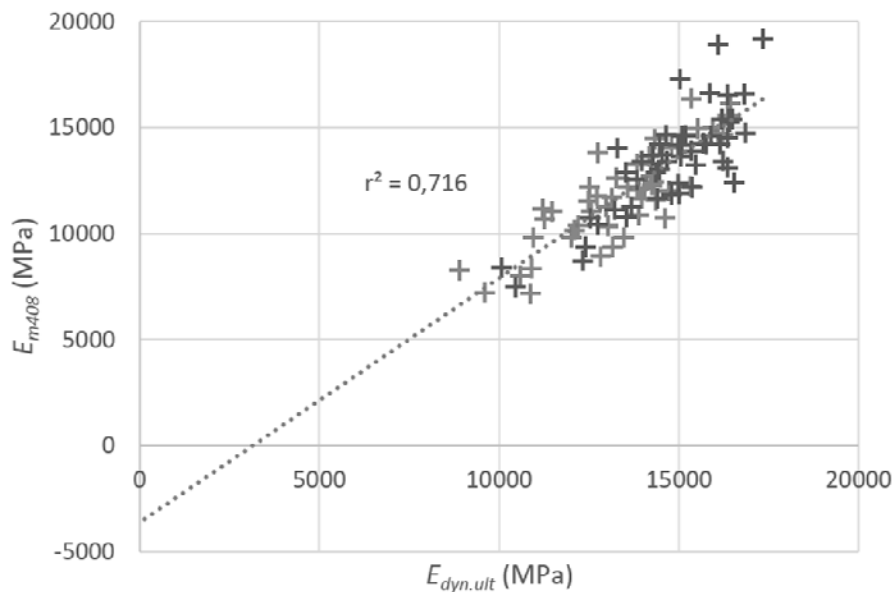
Štatistické charakteristiky	Spolu SK			Stred SK			Sever SK		
	$E_{m,408}$	$E_{dyn,ult}$	$E_{dyn,rez}$	$E_{m,408}$	$E_{dyn,ult}$	$E_{dyn,rez}$	$E_{m,408}$	$E_{dyn,ult}$	$E_{dyn,rez}$
Počet telies	101			50			51		
Priemer [MPa]	12637	14114	11870	13507	14840	12247	11783	13402	11500
Maximum [MPa]	19183	17334	16932	19183	17334	16932	16353	16443	15876
Minimum [MPa]	7150	8904	7534	7478	10063	7534	7150	8904	7950
Var. koef. [%]	19	13	17	18	11	17	19	13	16

Predikcia charakteristík – súbor skúšobných telies z regiónov SK ($n = 101$)

Hodnoty modulov pružnosti v ohybe sa porovnávali s dynamickými modulmi $E_{dyn,ult}$ a $E_{dyn,rez}$. Vo všeobecnosti sú hodnoty dynamických modulov vyššie oproti modulom pružnosti v ohybe ako uvádzajú DIVOS a TANAKA 2005, RAYMOND *et al.* 2007. Pri našich meraniach sa toto zvýšenie potvrdilo len pri $E_{dyn,ult}$ (vyššie o 12 %), naopak pri $E_{dyn,rez}$ je pokles o 6 % oproti $E_{m,408}$. Výsledky variačných koeficientov sú pri $E_{m,408}$ v zhode s poznatkami v zahraničí (19–20%) (FRIEDRICH a DENZLER 2010, BACHER a KROSZEK 2013). Nižší variačný koeficient bol zistený pri $E_{dyn,rez}$ (17%) avšak výrazne nižší pri $E_{dyn,ult}$ (13%). Rezonančná metóda, pri ktorej sa meria prirodzená frekvencia, je na predikovanie modulov pružnosti v ohybe vhodnejšia.

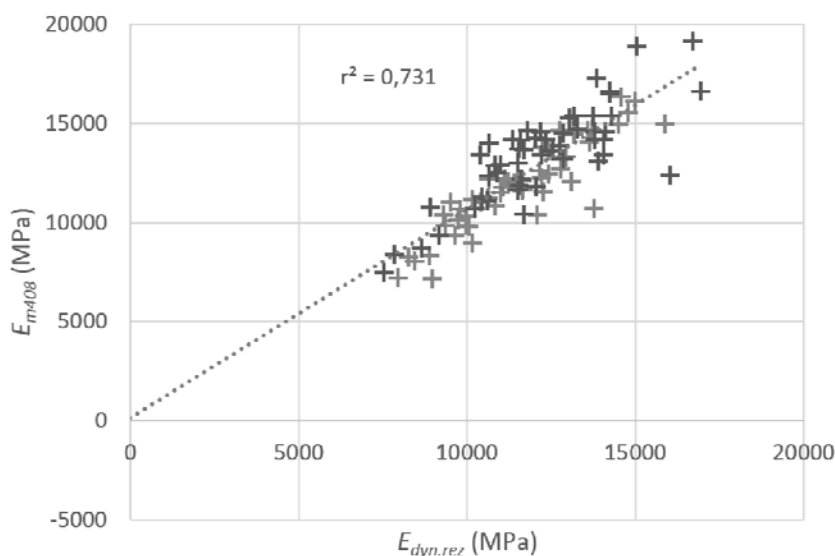
Medzi modulom pružnosti v ohybe a dynamickými modulmi $E_{dyn,ult}$ a $E_{dyn,rez}$ sa potvrdila vysoká korelačná závislosť (obr. 1 a obr. 2).

Štatisticky významné sú koeficienty determinácie pri rezonančnej metóde ($r^2 = 0,73$) aj pri ultrazvukovej metóde ($r^2 = 0,72$). Pri oboch metódach je možné pomocou korelačných vzťahov vhodne predikovať modul pružnosti v ohybe.



Obr. 1 Závislosť medzi modulom pružnosti v ohybe a dynamickým modulom (ultrazvuková metóda) (*Picea abies*, Karst.).

Fig. 1 Dependency between static bending modulus and dynamic modulus given by ultrasound method (*Picea abies*, Karst.).



Obr. 2 Závislosť medzi modulom pružnosti v ohybe a dynamickým modulom (rezonančná metóda) (*Picea abies*, Karst.).

Fig. 2 Dependency between static bending modulus and dynamic modulus given by vibrational method (*Picea abies*, Karst.).

Predikcia charakteristík – podľa regiónov SK

Ďalším skúmaním sa sledoval vplyv regiónu na ohybové a dynamické moduly pružnosti (tab.1). Pri porovnaní skúmaných regiónov sa zistilo, že rezivo pochádzajúce zo stred SK má v priemere vyššie dynamické aj ohybové moduly pružnosti ako rezivo zo sever SK. Za najvýznamnejšie faktory, ktoré ovplyvňujú rozdielne hodnoty modulov pružnosti je možné považovať rôzna kvalita výrezov a spôsob porezu (účelový, na prizmu).

Párový t-test preukázal podobnosť iba medzi modulom pružnosti v ohybe a dynamickým modulom (rezonančným) pre región stred SK (tab. 2). Ostatné výsledky párového testu potvrdzujú, že rozdiely vo veľkosti modulov pružnosti sú štatisticky významné. V prípade všeobecnej predikcie modulu pružnosti v ohybe rezonančnou alebo ultrazvukovou metódou je potrebné poznať ich korelačné vzťahy.

Tab. 2 Výsledky párových t-testov medzi jednotlivými metódami.

Tab. 2 Results of paired t-tests between used methods.

Pravdepodobnosť rovnosti	$E_{dyn,ultr}$	$E_{dyn,rez}$	$E_{m,408}$
$E_{dyn,ultr}$	–	0,0000**	0,0000**
$E_{dyn,rez}$	0,0000*	–	0,2437**
$E_{m,408}$	0,0007*	0,0028*	–

* stred SK, ** sever SK

Vplyv regiónu na modul pružnosti v ohybe (STN EN 408) bol testovaný pomocou jednofaktorovej analýzy na hladine významnosti $\alpha = 0,05$. Analýza ukázala štatisticky významný rozdiel modulov pružnosti medzi regiónmi ($p = 2,8 \cdot 10^{-4}$).

Ďalej sa hodnotili korelácie medzi dynamickým a ohybovým modulom pružnosti podľa regiónov (tab. 3). Koeficienty determinácie boli štatisticky významné pre všetky štyri kombinácie závislosti. Najvyšší koeficient determinácie bol zaznamenaný pri rezonančnej metóde, a to na rezive pochádzajúceho zo sever SK ($r^2 = 0,81$). Parametre korelačných závislostí **a** a **b** boli vzájomne porovnávané medzi regiónmi pomocou t-testu, s cieľom zistiť vplyv kvalitatívne rozdielnych súborov na koreláciu. Pri obidvoch dynamických metódach sa ukázal štatisticky *nevýznamný* vplyv regiónu na parametre lineárnej regresie (t-hodnota bola vždy nižšia ako t-kritické). Keďže vplyv regiónu je nevýznamný, modul pružnosti v ohybe je možné predikovať na základe špecifickej jedinečnej korelačnej rovnice a meraného dynamického modulu. Parametre korelačných rovníc z našich meraní pre ultrazvukovú a rezonančnú metódu sú uvedené v tab. 3.

Tab. 3 Výsledky štatistickej analýzy korelácie medzi dynamickými a ohybovými modulmi a vplyvu regiónu na túto koreláciu.

Tab. 3 Results of correlation analysis between dynamic a static bending modulus and an effect of regions on that correlation.

$E_{m,408} = a + b \cdot E_{v(u)}$	Sever SK	Stred SK	t – hodnota	t – kritické	SPOLU
Rezanančná metóda					
a [MPa]	–408	1726	1,460	2,009	165
b	1,060	0,960	1,832		1,051
r²	0,81	0,67			0,73
Ultrazvuková metóda					
a [MPa]	–2610	–4921	0,989	2,009	–3611
b	1,076	1,240	1,012		1,152
r²	0,71	0,65			0,72

Na druhej strane sme tesnejšiu koreláciu dynamických a ohybových modulov pozorovali u rezonančnej dynamickej metódy. Dôvod vidíme vo vyššej frekvencii ultrazvukového signálu, ktorý citlivejšie reaguje na zmenu hustoty dreva (DANIHELOVÁ *et al.* 2012). Navyše, prirodzená frekvencia po dĺžke reziva významnejšie reaguje na štruktúru dreva a najmä na chyby dreva nachádzajúce sa v zóne porušenia pri ohybe. Napriek tomu tieto rozdiely nie sú významné a obidve dynamické metódy môžeme považovať za rovnocenné hodnotenie predikcie modulu pružnosti v ohybe nedeštruktívnymi akustickými metódami.

Problematike vplyvu regiónov v krajine sa venovali rôzni autori v zahraničí. FRIEDRICH a DENZLER (2010) vyhodnocovali dva regióny SR a ich výsledky boli použité v projekte GRADEWOOD. Preukázal sa vplyv regiónov nielen na pevnosť v ohybe, ale aj na modul pružnosti v ohybe. Obdobný výskum bol realizovaný v Slovinsku, kde testovali konštrukčné drevo zo štyroch regiónov Slovinska (PAZLAR *et al.* 2011). Použili sedem nedeštruktívnych metód a posledná fáza testovania definovala ohybové charakteristiky. Boli zistené vysoké korelácie: $r = 0,904$ ($E_{m,408} \sim E_{dyn,vibr}$) a $r = 0,868$ ($E_{m,408} \sim E_{dyn,ultr}$). Predpokladá sa, že na vysoké korelácie má značný vplyv kvalita výrezov, počet meraní ($n = 1074$) ako aj počet regiónov. Výber konštrukčného dreva v Poľsku pozostával z piatich regiónov. Aplikovali sa tri nedeštruktívne metódy a na záver ohybová skúška podľa EN 408 ($n = 764$). Boli zistené rozdielne hodnoty ohybových, akustických a optických charakteristík podľa regiónov (KRZOSEK *et al.* 2008). Cieľom tohto výskumu bolo poukázať na diferenciáciu hodnotených vlastností podľa regiónov v príslušnej krajine. Tieto poznatky sa ďalej aplikujú pri návrhoch predikčných modelov hodnotených parametrov v krajine ako celok (napr. Slovensko) a nie samostatne podľa regiónov, tak ako to uvádzajú STN EN 1912+A4 a STN EN 14081-4.

ZÁVER

Na testovanom súbore SK ($n = 101$, *Picea abies*, Karst.) sa overovala predikcia modulu pružnosti v ohybe (STN EN 408) pomocou akustických dynamických metód (ultrazvuková a rezonančná). Medzi modulom pružnosti v ohybe a dynamickými modulmi ($E_{dyn,ult}$ a $E_{dyn,rez}$) sa potvrdila vysoká korelačná závislosť. Štatisticky významné sú koeficienty determinácie pri rezonančnej metóde ($r^2 = 0,73$) ako aj pri ultrazvukovej metóde ($r^2 = 0,72$). Pri oboch metódach je možné pomocou korelačných vzťahov vhodne predikovať modul pružnosti v ohybe, pričom rezonančná metóda je z hľadiska vyhodnotenia štatistických charakteristík vhodnejšia.

Ďalej sa zisťoval vplyv regiónu (sever SK a stred SK) na ohybové a dynamické moduly pružnosti. Vplyv regiónu na koreláciu medzi modulom pružnosti v ohybe a dynamickými metódami sa nepotvrdil. Koeficienty determinácie boli štatisticky významné pre všetky štyri kombinácie závislosti. Najvyšší koeficient determinácie bol zaznamenaný pri rezonančnej metóde, a to na rezive pochádzajúceho zo sever SK ($r^2 = 0,81$). Vplyv regiónu na parametre lineárnej regresie sa pri oboch dynamických metódach ukázal štatisticky nevýznamný.

Výsledky z experimentov preukázali, že rezonančná dynamická metóda v porovnaní s ultrazvukovou dynamickou metódou vykazuje tesnejšiu predikciu modulu pružnosti v ohybe, hoci rozdiely neboli významné.

LITERATÚRA

- ALVES, R. J., MAGALHAES, M. D. C., Carrasco, E.V.M. 2013. Determination of the transverse Young's modulus (TYM) of wood by means of an input power technique. *Construction and Building Materials*. 42: 11–21.
- BACHER, M. KRZOSEK, S. 2013. Modulus of elasticity tension/bending ratio of polish grown pine (*Pinus sylvestris* L.) and spruce (*Picea abies* Karst.) timber. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Forestry and Wood Technology* No 82, 2013. *Ann. WULS-SGGW, For and Wood Technol.* 2013. 82: 31–38. ISSN 1898- 5912.

- BUCUR, V. 2005. Acoustics of wood. 2nd edition, Springer : Berlin, Heidelberg, New York. p. 394.
- DANIHELOVÁ, A., ČULÍK, M., DANIHELOVÁ, Z. 2012. The Timbre of an Experimental Edge-Blown Pipe – Slovak “Koncovka” (Typical Simple Slovak Folk Flute Without Finger Holes) when Changing the Geometry of the Tone Forming Part and TubeWood. In Euronoise Prague 2012: proceedings [CD ROOM]. Prague: Czech Technical University in Prague, 2012, pp. 771–776.
- FRIEDRICH, G. - DENZLER, J. K. 2010: Comparison of Slovakian spruce from different regions. Holz Foschung, Austria, Vienna, Timber Construction and Materials. Project GRADEWOOD, 2010, 6 p.
- HORÁČEK, P., TIPPNER, J., & HASSAN, K. T. 2012. Nondestructive evaluation of static bending properties of scots pine wood using stress wave technique. Wood Research, 57(3): 359–366.
- SANDOZ, J. L. 1989. Grading of construction timber by ultrasound. Wood Science and Technology. 23:95–108.
- DIVOS, F., TANAKA, T. 2005. Relation between static and dynamic modulus of elasticity of wood. Acta Silvatica and Lignaria Hungarica, 1: 105–110.
- Krzosek, S., Grzeskiewicz, M., Bacher, M. 2008: Mechanical properties of Polish-grow *Pinus silvestris* L. Structural sawn timber. END USER’S NEEDS FOR WOOD MATERIAL AND PRODUCTS. COST E53 Conference proceedings, 2008, TU Delft, The Netherlands, 2008, pp. 253 – 260, ISBN/EAN: 978-90-5638-202-5.
- MORA, C. R., SCHIMLECK, L. R., MAHON, J. M., ISIK, F., MAHON, J. M., CLARK, A., & DANIELS, R. F. 2009. Relationships between acoustic variables and different measures of stiffness in standing pinus taeda trees. Canadian Journal of Forest Research, 39(8): 1421–1429.
- PAZLAR, T., SRPČIČ, J., PLOS, M., TURK, G. 2011: Non-destructive tests for strength grading of Slovenian structural sawn timber. In. 17th International nondestructive testing and evaluation of wood symposium. (ed. Ferenc Divos). Sopron : University of West Hungary. ISBN 978-963-9883-82-6. pp. 231-238.
- RAYMOND, C. A., JOE, B., EVANS, R., & DICKSON, R. L. 2007. Relationship between timber grade, static and dynamic modulus of elasticity, and SilviScan properties for pinus radiata in new south wales. New Zealand Journal of Forestry Science, 37(2): 186–196.
- ROHANOVÁ, A., LAGAÑA, R., VACEK, V. 2010. Static and dynamic modulus of spruce structural timber. In Annals of Warsaw University of Life Sciences. Forestry and Wood Technology. - Warszawa : Warsaw University of Life Sciences Press, 2010. No. 72, p. 229–232. ISSN 1898-5912.
- ROHANOVÁ, A., LAGAÑA, R., BABIAK, M. 2011. Comparison of non-destructive methods of quality estimation of the construction spruce wood grown in Slovakia. In Proceedings 17th International nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. University of West Hungary, faculty of Wood Sciences, Sopron, 2011, ISBN 978-963-9883-82-6, pp. 247-254.
- STAPEL, P., DENZLER, J. K. 2011: Influence of the origin on specific properties of European spruce and pine. <http://www.cte.napier.ac.uk/e53/47>. In The future of quality control for wood & wood products : the final conference of COST Action E53 : 4-7th May 2010, Edinburgh, UK. - Edinburgh : Edinburgh Napier University, 2010.
- WANGA Z, LI L, GONG M. 2012. Measurement of dynamic modulus of elasticity and damping ratio of wood-based composites using the cantilever beam vibration technique. Construction and Build Materials, 28:831–4.
- WEIDENHILLER A., DENZLER, J. K. 2009. Optimising machine strength grading with three indicating properties. In: Proceedings of the Economic and technical aspects of quality

control for wood and wood products. Cost Action E53 Conference 22nd – 23rd October 2009, Lisbon, Portugal. Paper No.7.

ZHANG, L., & HU, Y. 2010. Relationships between dynamic young's modulus and static MOE of the reinforced poplar LVL. *Advanced Materials Research*. 129–131:588–591.

STN EN 408. 2011. Drevené konštrukcie. Konštrukčné drevo a lepené lamelové drevo. Stanovenie niektorých fyzikálnych a mechanických vlastností.

STN EN 1912+A4, 2010: Konštrukčné drevo. Pevnostné triedy. Zaradenie vizuálnych tried a druhov dreva (Konsolidovaný text).

STN EN 14081-4, 2009: Drevené konštrukcie. Pevnostné triedené konštrukčné rezivo s pravouhlým prierezom. Časť 4: Strojové triedenie. Nastavenia triediacich strojov pre strojovo riadené systémy.

STN 48 0055.2007. Kvalitatívne triedenie ihličnatej guľatiny.

PodĎakovanie

Tento príspevok vznikol v rámci riešenia projektov VEGA 1/0109/12 a VEGA 1/0893/13.

Adresa autora

Rastislav Lagaňa
Alena Rohanová
Technická univerzita vo Zvolene
Drevárska fakulta
T. G. Masaryka 24
96053 Zvolen
Slovensko
lagana@tuzvo.sk
rohanova@tuzvo.sk