

# TVORBA KOLAJE PRI VIACNÁSOBNOM PREJAZDE VYVÁŽACIEHO TRAKTORA LVS 511

## RUT FORMATION BY FORWARDER LVS 511 MULTIPASS

MILAN MARUŠIAK<sup>1)</sup> ✉ - JINDŘICH NERUDA<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>*Mechanical Design, s. r. o., Na Šefranici 1, 010 01 Žilina, Slovak Republic*

<sup>2)</sup>*Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 3, 613 00 Brno, Czech Republic*

✉ *e-mail: milan.marusiak@gmail.com*

### ABSTRACT

In forestry, the problem of soil compaction and rut formation by the forestry machinery multipass has come to the forefront in the past few years, which is becoming an important input information in the decision to deploy suitable harvesting and transport machines for the particular field conditions. Estimation of soil damage, rut formation and soil compaction when passing forestry machinery is very important in terms of root system destruction and soil erosion. Therefore, the possibility of forecasting track formation dependent on the parameters of the forestry technique and its number of passes has become topical. One of the most widespread empirical methods to predict the vehicle's driving performance in off-road conditions is the WES method. The paper deals with the description of some WES calculation models for determining rut depth when passing a forwarder with a load capacity of 5 t and comparing the rut depth values calculated using this method with the measured values. At the same time, the paper compares results of the rut depth calculations with the forwarder multipass and, on the basis of the measured values, compares the multipass coefficients.

For more information see Summary at the end of the article.

**Klíčové slová:** zhutnenie pôdy; tvorba kolaje; metóda WES

**Key words:** soil compaction; rut formation; WES-method; multipass

### ÚVOD

Pri plánovaní nasadenia ťažobných a dopravných strojov v lesnom hospodárstve by sa mala zvyšovať aj snaha o minimalizáciu škôd, ktoré vznikajú používaním lesníckej techniky. Škody na pôdach sú výsledkom niekoľkých spolupôsobiacich faktorov, a to hlavne okamžitých fyzikálnych parametrov pôdy, hmotnosti stroja, typu pojazďového ústrojenstva a počtu prejazdov stroja po rovnakej dráhe.

Pri prejazde ťažobného stroja dochádza k zhutneniu pôdy, ktoré je jednou z hlavných príčin jej znehodnotenia. Zhutnenie znižuje veľkosť pórov a obsah vody v pôde, čím sa následne znižuje obsah kyslíka a spomaľuje rast stromov. Veľkosť zhutnenia závisí na tlaku na pôdu, okamžitej vlhkosti pôdy, zrnitosti pôdy, stupni plasticity pôdy, podielu východzej pórovitosti pôdy, veľkosti kontaktnej plochy pneumatiky s podložíom a hrúbke humusovej vrstvy (NERUDA et al. 2013a).

Zhutnením pôdy sa v stope vytvára kolaj, ktorá odvádza povrchovú vodu, a tým vytvára začiatok eróznej ryhy. Negatívny účinok kolaje je tým väčší, čím je vytlačená stopa hlbšia, užšia a hladšia. Hĺbka kolaje je úmerná zhutneniu pôdy a svojim spôsobom aj mierou rizika

erózie, preto je v niektorých krajinách ukazovateľom šetrnosti transportu dreva (NERUDA et al. 2013a). K vytváraniu kolaje dochádza aj tzv. „frézovaním“ pôdy pri preklze kolies podvozku v pôde s nižšou únosnosťou. Z hľadiska erózie je obzvlášť rizikové vytváranie kolaje v strmom teréne. Kolaj v pôde môže pretrvávajúť viacero rokov a spôsobuje degradáciu pôdy, ktorá spočíva v odstránení vrchnej humusovej vrstvy a zmiešaní pôdných vrstiev.

Tvorbou kolaje pri prejazde lesnej techniky sa zaoberali viacerí autori. Z posledných rokov je možné uviesť napr. NERI et al. (2007) – vplyv tlaku hustenia v pneumatikách na tvorbu kolaje pri prejazde forwardera po rašelinovej pôde s nízkou únosnosťou pri rôznych kombináciách tlaku a zaťaženia, alebo BATTIATO, DISERENS (2013) – vplyv zaťaženia a hustenia pneumatík na prenos trakčnej sily a hĺbku kolaje.

Komplexné matematické modelovanie vzájomného pôsobenia terénnych vozidiel a pôdneho prostredia je veľmi obtiažnou úlohou (WONG 2008). Na prekonanie týchto ťažkostí boli vyvinuté empirické metódy, ktoré sú založené na testovaní jazdných vlastností vozidiel v rôznych terénnych podmienkach. Na základe výsledkov meraní jazdných vlastností vozidla a vlastností terénu sú potom empiricky vytvorené

závislosti jednotlivých parametrov, ktoré simulujú pracovné podmienky predpokladaného budúceho nasadenia vozidla.

V článku je analyzované použitie empirickej metódy WES pre predpovedanie hĺbky kolaje pri prejazde lesnej techniky. Cieľom analýzy je pomocou nameraných údajov penetračného odporu pôdy a hĺbky kolaje overiť platnosť výpočtových vzťahov metódy WES na určenie hĺbky kolaje v pôde typu kambizem pri prvom a viacnásobnom prejazde malého vyvážacieho traktora s nosnosťou do 5 t.

## Rozbor problematiky

### Metóda WES

Jedna z najrozšírenejších empirických metód na modelovanie interakcie vozidla a pôdneho prostredia je metóda WES vyvinutá spoločnosťou Waterway Experiment Station v USA (WONG 2008). Princípom tejto metódy je stanovenie podmienok pre mobilitu vozidiel v teréne pomocou dvoch základných parametrov:

**Faktor kolesa** (Wheel Numeric) je bezrozmerné číslo, v ktorom sú zahrnuté rozmery a vlastnosti pneumatiky (napr. priemer, šírka, výška profilu, tuhosť, tlak hustenia), zaťaženie pôsobiacie na koleso a aj vlastnosti pôdy. Faktor kolesa vyjadruje jedným číslom vzájomný pomer parametrov kolesa a pôdy. Jeho hodnota udáva prvú informáciu o podmienkach prejazdnosti vozidla, napr. dobré podmienky sú vyjadrené faktorom kolesa  $N_{CI} > 3$  a pre nedostatočné podmienky platí  $N_{CI} < 1,5$  (SAARILAHTI 2002). V rámci metódy WES bolo vyvinutých niekoľko faktorov kolesa, založených na empirickom pozorovaní pohybu kolesa v pôdnom prostredí. V článku sú použité dva najrozšírenejšie faktory kolesa:

TURNAGE (1972)

$$N_{CI} = \frac{CI \cdot b \cdot d}{F_k} \cdot \sqrt{\frac{\delta}{h}} \cdot \frac{1}{(1 + \frac{b}{2} \cdot d)} \quad [-] \quad (1)$$

MACLAURIN (1990)

$$N_M = \frac{CI \cdot b^{0,85} \cdot d^{0,8} \cdot \delta^{0,4}}{F_k} \quad [-] \quad (2)$$

**Penetračný odpor pôdy**, reprezentovaný kuželovým indexom (Cone Index, CI). CI sa meria kuželovým penetromerom, vybaveným 30stupňovým kuželom s plochou 3,23 cm<sup>2</sup>. CI predstavuje penetračný odpor pôdy na jednotku plochy kužela a reprezentuje kombináciu šmykových a kompresívnych vlastností pôdy. V rámci metódy WES je to jediný údaj o pôde. Kuželový penetromer sa používa aj na získanie ďalších informácií o vlastnostiach pôdy, napr. index stlačenia pôdy (remolding index, RI), ktorý informuje o zmenách v pevnosti pôdy počas opakovaného prejazdu vozidla. Je to pomer kuželového indexu CI po stlačení pôdy k CI pred stlačením. Pevnosť pôdy počas opakovaného prejazdu charakterizuje pomerný kuželový index (Rating cone index, RCI), ktorý je vyjadrený podľa vzťahu:

$$RCI = RI \cdot CI$$

Na metóde WES je založený aj model WES VCI, vyvinutý v US Army Research and Development Center (PRIDY, WILLOUGHBY 2004). Tento model bol navrhnutý na predpovedanie prejazdnosti vozidla v termínoch go/no go pre predpísaný počet prejazdov na jemnej a hrubozrnnej anorganickú pôde, pričom dráha prejazdu je rovná. V modeli WES VCI bol vytvorený empirický vzťah pre výpočet indexu mobility vozidla (MI), ktorý je závislý na niektorých parametroch vozidla, ako napr. hmotnosť vozidla, kontaktný tlak na pôdu, rozmery pneumatiky. Na základe indexu mobility je vypočítaný kuželový index vozidla (VCI). Tento reprezentuje minimálnu pevnosť danej pôdy v jej kritickej vrstve, ktorá je dostačujúca na dosiahnutie určitého počtu prejazdov, zvyčajne jeden alebo 50 prejazdov.

Metóda WES je používaná vo vojenskom výskume, napr. referenčný model mobility vozidiel NATO (NRMM) (WONG 2008) je vyvinutý pomocou tejto metódy. Je vhodná hlavne pre homogénne frikčné alebo súdržné minerálne a organické pôdy. Keďže táto metóda vyžaduje málo vstupných parametrov, je viac-menej použiteľná aj pre lesné stroje.

### Zaborenie kolesa a hĺbka kolaje

Po prejazde lesných strojov v teréne vznikajú v pôde kolaje s rôznou hĺbkou. Hĺbka kolaje je preto jedným z najlepších indikátorov posúdenia vplyvu lesného stroja na pôdu.

Tvorba kolaje pri prejazde a v určitom rozsahu aj valivý odpor a ťažná sila závisia od konfigurácie vozidla a vlastností pôdneho prostredia. V minulosti boli uskutočnené viaceré terénne experimenty s testovaním prejazdnosti vozidiel v rôznych terénnych podmienkach a podľa ich výsledkov boli vyvinuté empirické výpočtové modely stanovenia zaborenia kolesa a hĺbky kolaje, založené na metóde WES.

Zaborenie kolesa a hĺbka kolaje sú odlišné z pohľadu pôsobenia kolesa na pôdu. K zaboreniu dochádza pri statickom zaťažení kolesa na pôdu, hĺbka kolaje sa meria až po prejazde kolesa/vozidla cez merač bod. Vzťahom medzi týmito parametrami sa zaoberá viacero autorov. MACLAURIN (1990) definuje zaborenie ako hĺbku kolaje k povrchu pred jej vytvorením, čo je prakticky rovnaká hodnota ako hĺbka kolaje, meraná k okolitému povrchu. SAARILAHTI, ANTTILA (1999) predpokladajú, že medzi zaborením kolesa a hĺbkou kolaje je určitý vzťah.

Na základe teórie tuhého kolesa je koeficient valivého odporu ( $\mu_R$ ) definovaný hĺbkou zaborenia ( $z$ ), ktorú musí koleso pri svojom pohybe prekonať, a priemerom kolesa ( $d$ ):

$$\mu_R = \sqrt{\frac{z}{d}} \quad [-] \quad (3)$$

Ak je hĺbka kolaje rovnaká, prípadne lineárne závislá od zaborenia kolesa, potom je možné hĺbku definovať podľa vzťahu:

$$z_R = d \cdot \mu_R \cdot x \quad [m] \quad (4)$$

Vo viacerých štúdiách (GEE-CLOUGH et al. 1978; MACLAURIN 1990), založených na metóde WES, sa koeficient valivého odporu určuje podľa faktora kolesa ( $N_{CI}$ ,  $C_N$ ) a empirických konštánt „a“ a „b“:

$$\mu_R = a_1 + \frac{b_1}{C_N; N_{CI}} \quad [-] \quad (5)$$

Konštanta  $a_1$  reprezentuje závislosť valivého odporu na deformácii kolesa a pomer  $b_1/C_N; N_{CI}$  závisí na odpore, spôsobenom deformáciou pôdy. Vzťah pre stanovenie hĺbky stopy potom bude nasledovný:

$$z_R = d \cdot \left( a_1 + \frac{b_1}{C_N; N_{CI}} \right) \quad [m] \quad (6)$$

Pri analýze hĺbky kolaje sa porovnávajú namerané údaje s výsledkami empirických výpočtových vzťahov. Každý výpočtový vzťah a v ňom obsiahnuté koeficienty platia len pre konfiguráciu stroja a pôdnych podmienok, pri ktorých boli merania uskutočnené, a preto nie je možné očakávať presnú zhodu s nameranými údajmi u iného stroja.

Niektoré z týchto experimentov boli vypracované v podmienkach práce poľnohospodárskych traktorov, stavebných strojov, prípadne vojenských vozidiel, kde napr. spôsob jazdy, zaťaženie náprav a vlastnosti pôdy sú odlišné od podmienok, za akých pracuje lesný stroj. Zároveň je potrebné rozlišovať aj spôsob merania hĺbky kolaje, kde môžu nastať dva prípady:

- Hĺbka kolaje je meraná pri prejazde jedného kolesa (napr. testovacie koleso na vozidle)
- Hĺbka kolaje je meraná po prejazde vozidla

Pri prejazde prvého kolesa cez určitý bod dochádza k stlačeniu pôdy a vytvára sa prvá kolaj. Nasledujúce koleso prechádza v rovnakej dráhe po pôde, už stlačenej prvým kolesom, kde pri vyššej únosnosti pôdy je vytváraná kolaj s menšou hĺbkou. Tento proces sa opakuje, až kým cez merací bod neprejde celé vozidlo (SAARILAHTI 2002). Viacerí autori považujú prejazd vozidla ako viacnásobný prejazd jeho kolies. Napr. WIJEKON (2012) uvádza, že hĺbka kolaje po prejazde celého vozidla môže byť stanovená ako hĺbka pri štvornásobnom prejazde kolesa, pričom počíta s jeho priemerným zaťažením. Niektoré výpočtové vzťahy sú založené na meraní hĺbky kolaje po prejazde celého vozidla a zaťažení zadnej nápravy, ktoré poskytuje realistickejší obraz o pôsobení vozidla na pôdu. Špeciálny prípad stanovenia hĺbky kolaje nastáva, keď sa vozidlo pohybuje jedným smerom prázdne a opačným smerom naložené. Tento spôsob merania sa najviac približuje skutočným podmienkam transportu dreva a venuje sa mu napr. ANTTILA (1998).

Aby bolo možné vyhodnotiť namerané údaje, v článku sú použité výpočtové vzťahy pre stanovenie hĺbky kolaje len pre prejazd jedného kolesa a prejazd celého vozidla od nasledovných autorov:

- 1 GEE-CLOUGH et al. (1978) – hĺbka kolaje je definovaná pri prejazde jedného kolesa

$$z_R = \frac{\mu_R \cdot d}{(0,63 + 0,34 \frac{b}{d})^2} \quad [\text{m}] \quad (7)$$

Pre výpočet koeficientu valivého odporu  $\mu_R$  sa v tomto prípade odporúča použiť vzťah:

$$\mu_R = \frac{0,287}{N_{Cl}} \quad [-] \quad (8)$$

- 2 MACLAURIN (1990) – hĺbka kolaje je definovaná pre prejazd jedného kolesa:

$$z_R = d \cdot \left( \frac{0,224}{N_{Cl}^{1,25}} \right) \quad [\text{m}] \quad (9)$$

- 3 MACLAURIN (1997) – do vzťahu vstupuje ako premenná valivý odpor:

$$z_R = 0,6 \cdot d \cdot \mu_R^{1,25} \quad [\text{m}] \quad (10)$$

Maclaurin v tomto výpočte využíva pre valivý odpor vzťah:

$$\mu_R = 0,017 + \frac{0,453}{N_{Cl}} \quad [-] \quad (11)$$

- 4 SAARILAHTI (2002) – hĺbka kolaje pri prejazde celého vozidla. Výpočtový vzťah vznikol analýzou závislosti medzi hĺbkou kolaje a valivým odporom:

$$z_R = d^{0,66} \cdot \mu_R^{1,33} \quad [\text{m}] \quad (12)$$

- 5 SAARILAHTI (2002) – hĺbka kolaje pri prejazde celého vozidla s využitím faktora kolesa  $N_M$ :

$$z_R = d \cdot \left( \frac{0,13}{N_M^{0,88}} \right) \quad [\text{m}] \quad (13)$$

- 6 SAARILAHTI, ANTTILA (1999) – hĺbka kolaje pri prejazde celého vozidla. Do výpočtového vzťahu bola ako premenná doplnená aj max. hĺbka, dosiahnutá pri meraní penetračného odporu pôdy:

$$z_R = 0,005 + 0,086 \cdot z_{MAX} + \frac{0,185}{N_{Cl}} \quad [\text{m}] \quad (14)$$

### Viacnásobný prejazd lesných strojov

Pre plánovanie systému dopravy v lesnom hospodárstve je z hľadiska únosnosti pôdy potrebné poznať aj počet prejazdov stroja a s tým súvisiacich zaťažení. Problematike viacnásobného prejazdu sa venovali viacerí autori. Napr. ELIASSON (2005) sa zaoberal vplyvom tlaku hustenia v pneumatikách na zhutnenie pôdy pri viacnásobnom prejazde forwardéra. Výsledky meraní ukazujú že na linkách s vyššou frekvenciou prejazdov nemá zníženie tlaku v pneumatikách veľký vplyv na zhutnenie pôdy. Na linkách len s jedným prejazdom je možné znížením tlaku v pneumatikách dosiahnuť pokles zhutnenia pôdy. KORMANEK, GOŁĄB (2012) sa zaoberali meraním hĺbky kolaje počas viacnásobného prejazdu lesného traktora v teréne s priečnym sklonom. Na meranie hĺbky kolaje použili laserové zariadenie. Z najnovších výskumov je možné spomenúť vplyv šírky dopravnej trasy na hĺbku stopy pri viacnásobnom prejazde harvestora po rašelinovej pôde s nízkou únosnosťou, ktorému sa venovali USITALO et al. (2015).

V rámci vyhodnotenia nameraných údajov hĺbky kolaje boli vyvinuté výpočtové vzťahy, pomocou ktorých je možné určiť hĺbku kolaje pri viacnásobnom prejazde.

Reakciu pôdy pri opakovanom zaťažení lesného traktora sa zaoberal SCHOLANDER (1973). Na základe testov v rôznych typoch lesnej pôdy navrhol všeobecne platný vzťah pre deformáciu pôdy pri opakovanom zaťažení:

$$S_n = S_1 \cdot n^{\frac{1}{a}} \quad [\text{m}] \quad (15)$$

Koeficient  $a$  sa nazýva koeficient opakovaného zaťaženia. Viacerí autori (napr. ABEBE et al. 1989) používajú pre tento parameter názov koeficient viacnásobného prejazdu (multipass coefficient), pričom vzťah na jeho výpočet je rovnaký:

$$z_n = z_1 \cdot n^{\frac{1}{a}} \quad [\text{m}] \quad (16)$$

Hodnota koeficientu závisí od typu pôdy a jej vlhkosti, napr. pre vlhké a jemnozrnné pôdy sa pohybuje v intervale 2–5, pre suché a hrubozrnné pôdy môže dosiahnuť interval 17–26. V porovnaní výpočtových vzťahov bude použitý koeficient  $a = 3$  (pôdy so strednou únosnosťou, stredné zaťaženie).

Niektoré výskumy hĺbky kolaje pri viacnásobnom prejazde boli zamerané na zistenie závislosti koeficienta ( $a$ ) od faktora kolesa ( $N_{Cl}$ ), ktorý reprezentuje údaje o zaťažení vozidla a vlastnostiach pôdy. V ďalšej analýze budú použité vzťahy od nasledovných autorov:

DWYER (1984)

$$a = \frac{\ln(2)}{\ln\left(z_1 \left( \frac{N_{Cl}}{N_{Cl} - 0,896} \right)^{\alpha} - \ln(z_1)\right)} \quad [-] \quad (17)$$

kde pre koeficient odporu pôdy pri tvorbe kolaje  $a$  je zvolená hodnota 1,25 (SAARILAHTI 2002)

ANTTILA (1998)

$$a = 1,5 \cdot N_{Cl}^{0,7} \quad [-] \quad (18)$$

RUMMUKAINEN, ALA-ILOMÄKI (1986)

$$a = 2,0 \cdot N_{Cl}^{0,33} \quad [-] \quad (19)$$

## MATERIÁL A METODIKA

### Namerané údaje

V rokoch 2015 a 2016 bola na skúšobnom pracovisku Mendelovej univerzity Křtiny uskutočnená séria skúšok vyvážacieho traktora LVS 511, v rámci ktorých boli namerané nasledovné parametre:

- statické zaťaženie prázdneho a naloženého stroja
- deformácia pneumatiky pri rôznych úrovniach zaťaženia a tlaku hustenia
- dynamické tlaky na pôdu pri prejazde vyvážacieho traktora
- hĺbka stopy po prejazde
- penetrometrické merania v mieste stopy pred a po každom prejazde.

V analýze sú využité výsledky z merania vyvážacieho traktora s plným nákladovým priestorom. Vyvážací traktor sa počas merania pohyboval stálou rýchlosťou. V rámci každého merania sa uskutočnilo 10 prejazdov stroja (5 prejazdov smerom dopredu a 5 prejazdov smerom

dozadu), pričom bola zistená celková hĺbka kolaje po každom prejazde a prípadné zatlačenie senzorov tlaku v pôdnej sonde. Miera zhutnenia pôdy bola pred, v priebehu a po prejazde určená pôdnym penetrometrom. V každej meracej sonde bola zistená vlhkosť pôdneho profilu. Základné parametre stroja a pôdy sú uvedené v tab. 1 a 2.

Pre meranie dynamických tlakov v pôde bola použitá meracia súprava, ktorá sa skladala zo snímača tlaku tvoreného tenzometrickým senzorom spojeným s tlakovou sondou, prevodníka analógovo-digitálneho signálu a notebooku s meracím programom. Počas merania bola tlaková sonda umiestnená do pôdy v hĺbke 20 cm. Táto hĺbka bola zvolená preto, lebo v tejto zóne sa vyskytuje u plytko koreniacich drevín značné množstvo koreňov, vystavených poškodeniu pri prejazde lesnej techniky (NERUDA et al. 2013b).

Keďže pri prvom prejazde stroja bývajú namerané tlaky väčšinou nižšie z dôvodu vôle medzi vyvrtaným otvorom v pôdnom profile a priemerom tlakovej sondy (ZEMÁNEK et al. 2015), pre stanovenie dynamického zaťaženia, potrebného na výpočet hĺbky kolaje sú použité namerané hodnoty kontaktného tlaku počas druhého prejazdu. Na obr. 1 je znázornená ukážka priebehu kontaktného tlaku, zaznamenaného tlakovou sondou počas druhého prejazdu vyvážacieho traktora.

**Tab. 1.**

Vyvážací traktor LVS 511 naložený – základné parametre  
Forwarder LVS 511 loaded – basic parameters

Stroj/Machine	Vyvážací traktor LVS 511/Forwarder LVS 511			
Počet náprav/Number of axles	4			
Rýchlosť/Speed [km/h]	2,5			
Náprava/Axle	PN1/FA1	PN2/FA2	ZN1/RA1	ZN2/RA2
Statické zaťaženie kolesa/Static wheel load [N]	7 900	7 824	15 843	15 892
Dynamický tlak na pôdu/Dynamic soil pressure [kPa]	125	142	215	219
Dynamické zaťaženie kolesa/Dynamic wheel load [N]	15 600	18 640	29 000	33 210
Pneumatiky/Tires	Mitas D-Forest		Mitas D-Forest	
Typ/Type	Mitas D-Forest		Mitas D-Forest	
Rozmer/Size	400/60/15,5		400/60/15,5	
Priemer /Diameter [m]	0,875		1,17	
Šírka/Width [m]	0,405		0,5	
Výška profilu/Profile height [m]	0,241		0,241	
Polomer pri dyn. zaťažení/Dynamic load radius [m]	0,420	0,419	0,416	0,417
Dynamická deformácia/Dynamic deformation [m]	0,0185	0,0195	0,0222	0,0231
Výška profilu pri dyn. zaťažení/ Profile height by dynamic load [m]	0,223	0,222	0,219	0,218
Tlak hustenia/Inflation pressure [kPa]	350		350	

PN1,2/FA1,2 – predná náprava/front axle; ZN1,2/RA1,2 – zadná náprava/rear axle

**Tab. 2.**

Vlastnosti pôdy  
Soil properties

Druh pôdy/Soil type	Kambizem/Cambisoil										
Vlhkosť/Humidity [%]	26,2										
Prejazd/Pass	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Penetračný odpor v hĺbke 15 cm/ Penetration resistance at 15 cm depth [kPa]	1150	1420	1390	1330	1600	1680	1660	1490	2010	1860	2060

**Metodický postup stanovenia hĺbky koľaje**

Pre stanovenie hĺbky koľaje je ďalej použitý nasledovný metodický postup:

- 1 stanovenie dynamického zaťaženia z nameraných údajov kontaktného tlaku na pôdu, statického zaťaženia kolies, deformácie pneumatiky a rýchlosti stroja. Postup stanovenia zaťaženia je znázornený na obr. 2.
- 2 výpočet faktorov kolesa  $N_{CI}$  (TURNAGE 1972), a  $N_M$  (MACLAURIN 1997)
- 3 výpočet valivého odporu  $\mu_r$
- 4 výpočet hĺbky koľaje podľa metodiky viacerých autorov v kombináciách uvedených v tab. 4.

V zátvorkách sú uvedené čísla použitých výpočtových vzťahov. Výpočtové vzťahy (7), (9), (10) a (12) boli vytvorené na základe meraní hĺbky koľaje pri prejazde jedného kolesa. Aby sa dosiahla hĺbka koľaje pre prejazd celého vozidla, ktoré má 4 nápravy, v tomto prípade bol doplnený do výpočtu aj variant štvornásobného prejazdu kolesa (multipass) pri použití koeficientu viacnásobného prejazdu ( $a$ ). Keďže má vyvážací traktor zaťaženie prednej a zadnej nápravy rozdielne, vo výpočtových vzťahoch bolo použité priemerné zaťaženie prednej a zadnej nápravy  $(PN+ZN/2)$  a aj variant so zaťažením zadnej nápravy (ZN).

- 5 Stanovenie koeficientu viacnásobného prejazdu ( $a$ )

Namerané údaje hĺbky koľaje sú uvedené v tab. 3. Koeficient ( $a$ ) bol vypočítaný podľa vzťahov (18) (Anttila), (17) (Dwyer), (19) (Rummu-

**Tab. 3.**

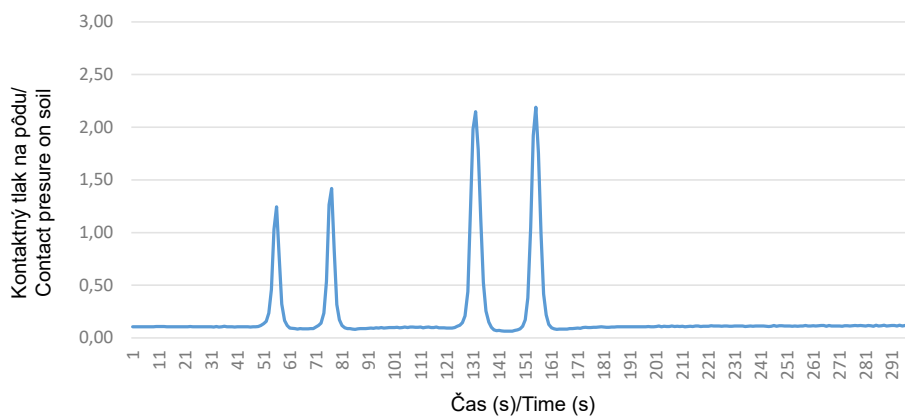
Namerané údaje hĺbky koľaje pri prejazde stroja  
Measured rut depth values during machine pass

Prejazd/Pass	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hĺbka koľaje/Rut depth [m]	0,06	0,09	0,10	0,11	0,15	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12

**Tab. 4.**

Kombinácie výpočtu hĺbky koľaje a zaťaženia  
Combination of rut depth and load calculations

Hĺbka koľaje/ Rut depth	Faktor kolesa/ Wheel numeric	Valivý odpor/ Rolling resistance	Zaťaženie/Load
1. Gee-Glough (7)	$N_{CI}$ (1)	$\mu_r$ (8) Gee-Glough	priemer PN+ZN; ZN/average FA+RA; RA multipass – priemer PN+ZN; ZN/multipass – average FA+RA; RA
2. Maclaurin – 1 (9)	$N_{CI}$ (1)		priemer PN+ZN; ZN/average FA+RA; RA multipass – priemer PN+ZN; ZN/multipass – average FA+RA; RA
3. Maclaurin – 2 (10)	$N_{CI}$ (1)	$\mu_r$ (11) Maclaurin	priemer PN+ZN; ZN/average FA+RA; RA multipass – priemer PN+ZN; ZN/multipass – average FA+RA; RA
4. Saarihahti – 1 (12)	$N_{CI}$ (1)	$\mu_r$ (11) Maclaurin	priemer PN+ZN; ZN/average FA+RA; RA
5. Saarihahti – 2 (13)	$N_M$ (2)		priemer PN+ZN; ZN/average FA+RA; RA
6. Saarihahti, Anttila (14)	$N_{CI}$ (1)		priemer PN+ZN; ZN/average FA+RA; RA



**Obr. 1.**

Priebeh kontaktného tlaku pri prejazde vyvážacieho traktora

**Fig. 1.**

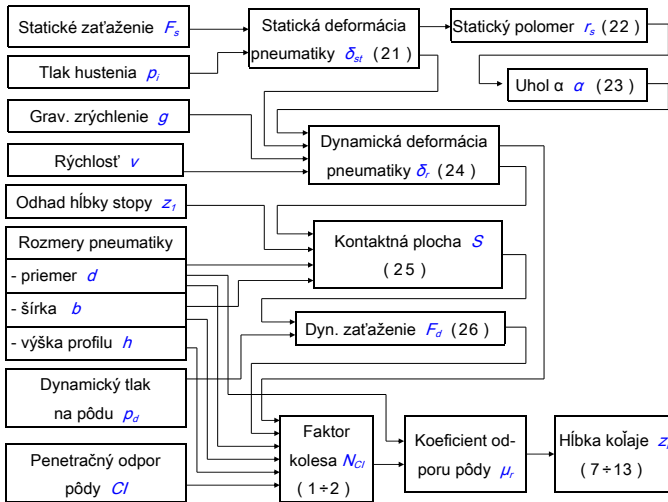
Course of the contact pressure at the forwarder's pass

kainen) a pomocou regresnej analýzy, kde ako premenná bol zvolený počet prejazdov.

Vzťah, vytvorený z nameraných údajov v tab. 3 pomocou regresnej analýzy:

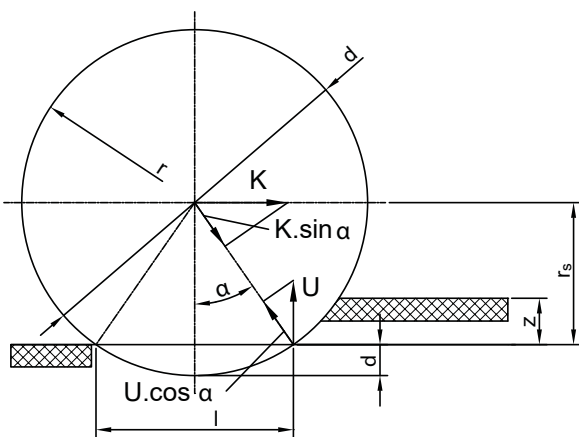
$$a = 0,16 \cdot n + 1,76 \quad [-] \quad (20)$$

Postup stanovenia hĺbky koľaje, popísaný v bodoch 1 ÷ 4 je znázornený na obr. 2. Čísla v zátvorkách označujú výpočtové vzťahy, potrebné na určenie jednotlivých parametrov.



**Obr. 2.** Schéma výpočtu hĺbky koľaje z nameraných parametrov  
**Fig. 2.** Calculation of rut depth from the recorded parameters – a scheme

V nasledujúcej časti sú podrobnejšie objasnené niektoré parametre, vyskytujúce sa v schéme výpočtu:



**Obr. 3.** Energetické a silové pomery pri odvalujúcej sa pneumatike  
**Fig. 3.** Energy and power ratios by rolling tire

**- deformácia pneumatiky**

V rámci skúšok vyvážacieho traktora bolo vykonané aj meranie statického polomeru kolesa pri rozličných hodnotách tlaku

v pneumatikách a zaťaženia. Rozdiel nameraného statického polomeru a polomeru nezaťaženej pneumatiky potom predstavuje jej deformáciu. Pre deformáciu pneumatiky Mitas D FOREST 400/60 – 15,5 najlepšie vyhovuje vzťah, vytvorený pomocou regresnej analýzy podľa nameraných hodnôt statického polomeru kolesa:

$$\delta = 0,001 \cdot F_d^{(-0,0008 \cdot \pi + 0,577)} \quad [m] \quad (21)$$

- **statický polomer** – je polomer zaťaženej pneumatiky (obr. 3)

$$r_s = r - \delta_{st} \quad [m] \quad (22)$$

- **uhol  $\alpha$**  – je uhol, pri ktorom dochádza ku kontaktu zaťaženej pneumatiky s pôdou (obr. 3)

$$\alpha = \arccos \frac{r_s}{r} \quad [^\circ] \quad (23)$$

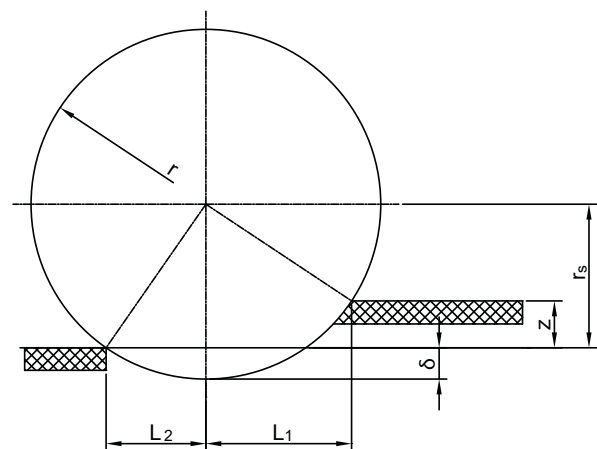
**- dynamická deformácia pneumatiky**

Deformáciu pneumatiky pri dynamickom zaťažení môžeme zjednodušene vypočítať pomocou zákona zachovania a premeny energie pri náraze (ZAHRADNÍČEK, SEMRÁD 2007). Kinetická energia pohybujúceho sa kolesa (K), reprezentovaná zaťažením a rýchlosťou jeho pohybu sa tu mení na potenciálnu energiu napätosti pružnej sústavy (U), reprezentovanú tuhosťou a deformáciou pneumatiky. Úpravou rovníc pre výpočet kinetickej a potenciálnej energie a aj zohľadnením uhla  $\alpha$  (obr. 3) dostaneme vzťah pre výpočet dynamickej deformácie pneumatiky:

$$\delta_d = \delta_{st} \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{v^2 \cdot \sin \alpha}{2g \cdot \cos \alpha \cdot \delta_{st}}} \right) \quad [m] \quad (24)$$

**- kontaktná plocha pneumatiky s pôdou pri dynamickom zaťažení**

Kontaktná plocha je počítaná pre prejazd elastickej pneumatiky na mäkkom podklade, ktorý najlepšie simuluje jazdu lesnej techniky v teréne (obr. 4). Dochádza tu k deformácii pneumatiky ( $\delta_d$ ) a aj podložia (z). Keďže deformáciu podložia nepoznáme (je reprezentovaná hĺbkou koľaje, ktorú potrebujeme vypočítať), zvolíme si v tomto prípade hodnotu 0,05 m. Nedochádza tu k veľkej odchýlke, rozdiel kontaktnej plochy pri  $z = 0,05$  m a  $z = 0,1$  m je približne 14%. Kontaktná plocha sa vypočíta podľa vzťahu (SCHWANGHART 1990):



**Obr. 4.** Kontaktná plocha elastickej pneumatiky na mäkkom podklade (SAARILAHTI 2002)  
**Fig. 4.** Contact area of elastic tire on the soft substrate (SAARILAHTI 2002)

$$s = c \cdot b \cdot \sqrt{d \cdot (z + \delta_d) - (z + \delta_d)^2} + \sqrt{d \cdot \delta_d - \delta_d^2} \quad [\text{m}^2] \quad (25)$$

#### - dynamické zaťaženie

PACAS et al. (1983) definuje zaťaženie pneumatiky ako podiel kontaktného tlaku a kontaktnej plochy. Podobným spôsobom sa dynamické zaťaženie vypočíta ako podiel nameraného dynamického tlaku a kontaktnej plochy:

$$F_d = \frac{p_d}{S} \quad [\text{N}] \quad (26)$$

## VÝSLEDKY A DISKUSIA

### Vyhodnotenie nameraných hodnôt penetračného odporu

Obr. 5 znázorňuje krivky závislosti penetračných odporov od hĺbky, v ktorej boli namerané. Po prvom prejazde dochádza k zvýšeniu penetračného odporu (zhutneniu pôdy) v hĺbke 10–12 cm. Do piateho prejazdu je v hĺbke 20–30 cm pozorovateľné zníženie penetračného odporu a v hlbších vrstvách 35–45 cm potom jeho následné zvýšenie. Po piatom prejazde nastáva zhutnenie pôdy aj v hĺbkach 35–45 cm, čo sa prejavuje plynulým nárastom penetračného odporu počas celej nameranej hĺbky.

Za podmienku únosnosti pôdy pre technickú mobilitu prázdneho vyvážacieho traktora sa považuje pôda s penetračným odporom min. 250 kPa. Pre kritérium ekonomickej mobility platí, že penetračný odpor pôdy musí byť vyšší ako 400 kPa. U naloženého vyvážacieho traktora je technický limit približne 600 kPa a ekonomický limit 750 kPa (SAARILAHTI 2002). Údaje z obr. 5 ukazujú, že pôda, na ktorej sa uskutočnili merania, má dostatočnú únosnosť a umožňuje viacnásobný prejazd vyvážacieho traktora.

### Vyhodnotenie spôsobu výpočtu hĺbky koľaje

Obr. 6 znázorňuje hĺbku koľaje pri prvom prejazde, vypočítanú podľa kombinácií zaťaženia, popísaných v tab. 4. V hodnotách hĺbky koľaje, vypočítaných podľa metodiky jednotlivých autorov sú značné rozdiely. Výsledky výpočtov podľa GEE-CLOUGH et al. (1978) sa približujú nameraným údajom pri kombinovanom zaťažení prednej a zadnej nápravy a prejazde jedného kolesa (3). Pri prejazde celého vozidla ako štvornásobku prejazdu kolesa (4 a 5) sú tieto hodnoty výrazne vyššie.

Výsledky výpočtov podľa MACLAURINA (1997) vychádzajú celkom priaznivo, ak sa hĺbka koľaje počíta ako štvornásobok prejazdu kolesa (8 a 9, 12 a 13). Maclaurin pracoval na výskume mobility vojenských vozidiel, ktorých pneumatiky boli nahustené na nižší tlak ako u lesnej techniky, a preto sú aj vypočítané hodnoty merného tlaku a hĺbky koľaje pri prejazde jedného kolesa nižšie, ako u iných autorov.

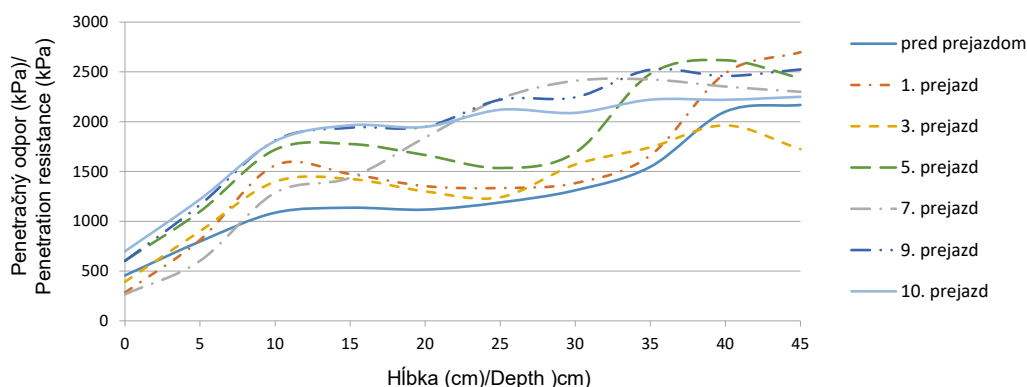
Pomerne dobrú zhodu s nameranými údajmi ukazuje aj vzťah (14) pri zaťažení zadnej nápravy a prejazde celého vozidla. Tento vzťah vypracoval SAARILAHTI (2002) kombináciou viacerých vzťahov pre výpočet hĺbky koľaje (WISMER, LUTH 1973; GEE-CLOUGH et al. 1978; MACLAURIN 1997). Predstavuje najlepšie zohľadnenie podmienok merania hĺbky koľaje (prejazd celého stroja + dynamické zaťaženie).

Hodnoty hĺbky koľaje podľa posledného výpočtového vzťahu (18,19) sú v porovnaní s nameranými údajmi príliš nízke. SAARILAHTI (2002) vypracoval tento vzťah v podmienkach rašelinovej pôdy a vyvážací traktor bol počas merania vybavený kolesopásmi, ktoré znižovali tlak na pôdu pri prejazde.

### Vyhodnotenie spôsobu stanovenia koeficienta viacnásobného prejazdu (a)

Na obr. 7 sú znázornené krivky závislosti hĺbky koľaje od počtu prejazdov, vypočítané podľa vzťahov (20), (16), (17), (18) a (19) a krivka, reprezentujúca namerané hodnoty hĺbky koľaje. Z porovnania jednotlivých kriviek vyplýva, že pre typ pôdy kambizem, na ktorej boli uskutočnené merania nie je vhodné použiť koeficient (a) s konštantnou hodnotou pre všetky prejazdy. Hĺbky koľaje pri viacerých prejazdoch stroja, vypočítané podľa vzťahov ANTILA (1998), DWYER (1984) a RUMMUKAINEN et al. (1986) tiež celkom nezodpovedajú nameraným hodnotám, hlavne pri prvých piatich prejazdoch. Závislosť koeficienta (a) od faktora kolesa ( $N_{Cl}$ ) poskytuje síce presnejší obraz o hodnote (a), zhutnením pôdy sa však pri druhom a ďalších prejazdoch mení jej penetračný odpor ( $CI$ ), a tým aj samotný faktor kolesa ( $N_{Cl}$ ).

Podľa nameraných údajov narastá hĺbka koľaje len pri prvých piatich prejazdoch, pri ďalšej jazde stroja sa po dosiahnutí hodnoty 12 cm už nemení. Najlepšiu zhodu s nameranými údajmi predstavuje vzťah (20), kde koeficient (a) mení svoju hodnotu v závislosti od počtu prejazdov. Tento vzťah bol použitý aj pre stanovenie výslednej hĺbky koľaje pre prejazd celého vozidla ako štvornásobku prejazdu jedného kolesa (metodika GEE-CLOUGH et al. 1978 a MACLAURIN 1997).



**Obr. 5.**  
Penetračný odpor pôdy  
**Fig. 5.**  
Penetration resistance of the ground

## ZÁVER

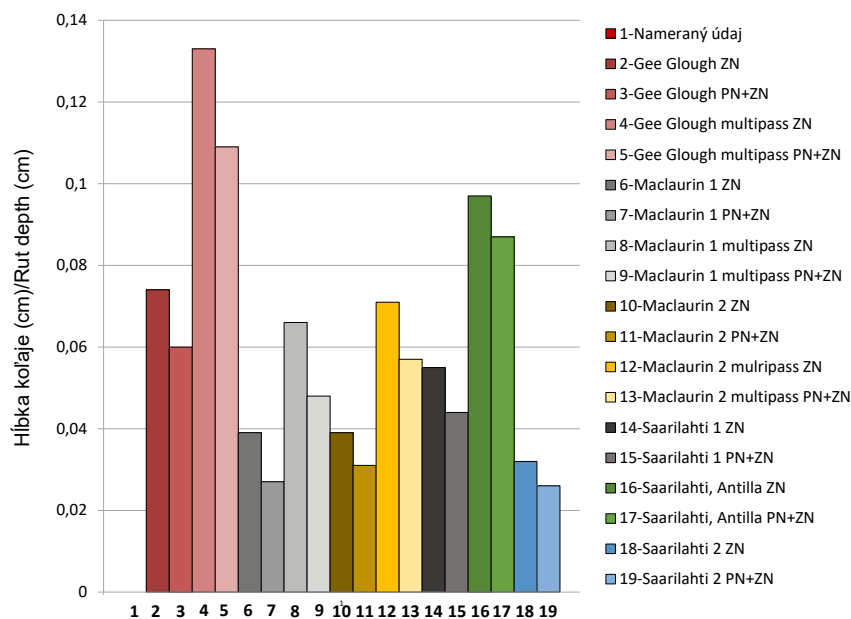
Metóda WES poskytuje široký výber viacerých výpočtových modelov, použiteľných pre rozličné pôdne podmienky a typy pneumatík. Vďaka empirickej povahe sa môžu vzťahy prispôsobiť lokálnym podmienkam, aby sa zlepšila ich vypovedacia schopnosť.

Výpočtové modely, založené na metóde WES je možné použiť aj na simulácie, v ktorých sa porovnávajú parametre viacerých strojov. Aj keď sa výsledky výpočtov môžu v určitých prípadoch líšiť od reálneho stavu, modely poskytujú dostatočné informácie o vhodnosti nasadenia určitého stroja v konkrétnych podmienkach. Modely môžu zároveň slúžiť na vývoj a vytvorenie dopravných systémov, optimálnych z technického, ekonomického a enviromentálneho hľadiska, ako aj na doplnenie parametrov prejazdnosti pôdy v databáze lesného dopravného systému.

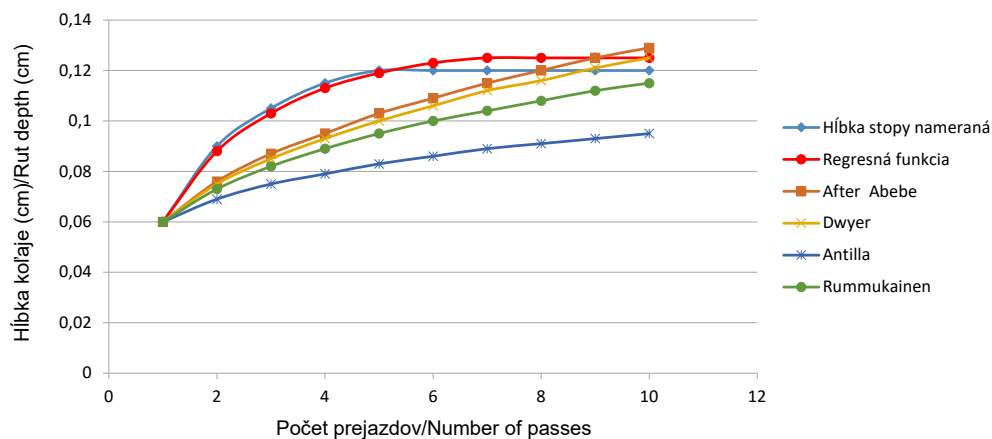
Analýza nameraných údajov hĺbky kolaje ukazuje, že použitie empirických vzťahov založených na metóde WES poskytuje realistickú predpoveď pre stanovenie hĺbky kolaje pri prvom a ďalších prejazdoch malého vyvážacieho traktora na pôde typu kambizem. V budúcnosti bude potrebné vykonať ďalší výskum na rozšírenie platnosti týchto vzťahov pre ďalšie typy pôdy a vyvážacie traktory s väčšou nosnosťou.

### PodĎakovanie:

Tento článok vznikol v súvislosti s riešením projektu TAČR Alfa TA04020087 „Vývoj a výroba variabilného vyvážacieho traktora se zaměřením na ekologickou čistotu prací a efektivní zpracování biomasy v lesním hospodářství“.



**Obr. 6.**  
Hĺbka kolaje pri prvom prejazde  
**Fig. 6.**  
Rut depth by the first pass



**Obr. 7.**  
Hĺbka kolaje pri viacnásobnom prejazde  
**Fig. 7.**  
Rut depth by multipass



**Použité symboly:**

$a$ ... koeficient viacnásobného prejazdu	[-]
$b$ ... šírka pneumatiky	[m]
$c$ ... konštanta, vyjadrujúca tvar odtlačku pneumatiky $c = \pi/4 = 0,785$	[-]
$C_N$ ... faktor kolesa (Wisner a Luth)	[-]
$d$ ... priemer pneumatiky	[m]
$\delta$ ... deformácia pneumatiky	[m]
$\delta_{st}$ ... statická deformácia pneumatiky	[m]
$\delta_d$ ... deformácia pneumatiky pri dynamickom zaťažení	[m]
$F_d$ ... dynamické zaťaženie kolesa	[N]
$F_k$ ... zaťaženie kolesa	[N]
$g$ ... gravitačné zrýchlenie	[m.s <sup>-2</sup> ]
$h$ ... výška profilu pneumatiky	[m]
$\mu_R$ ... koeficient valivého odporu	[-]
$n$ ... počet prejazdov	[-]
$N_{CI}$ ... faktor kolesa (Turnage)	[-]
$N_M$ ... faktor kolesa (Maclaurin)	[-]
$p$ ... kontaktný tlak na pôdu	[kPa]
$p_d$ ... kontaktný tlak na pôdu pri dynamickom zaťažení	[kPa]
$p_s$ ... tlak hustenia pneumatiky	[kPa]
$r$ ... polomer nezaťaženej pneumatiky	[m]
$r_s$ ... statický polomer pneumatiky	[m]
$S$ ... kontaktná plocha (odtlačok) pneumatiky	[m <sup>2</sup> ]
$S_n$ ... deformácia pôdy pri $n$ -tom zaťažení	[m]
$S_1$ ... deformácia pôdy pri prvom zaťažení	[m]
$v$ ... rýchlosť vozidla	[m.s <sup>-1</sup> ]
$z_R$ ... zaborenie kolesa (hlbka kolaje)	[m]
$z_n$ ... hĺbka kolaje pri $n$ -tom prejazde	[m]
$z_1$ ... hĺbka kolaje pri prvom prejazde	[m]
$z_{MAX}$ ... max. dosiahnutá hĺbka pri meraní CI	[m]

**LITERATÚRA**

- ABEBE, A.T, TANAKA T., YAMAZAKI M. 1989. Soil compaction by multiple passes of a rigid wheel relevant for optimization of traffic. *Journal of Terramechanics*, 26 (2): 139–148. DOI: 10.1016/0022-4898(89)90003-7
- ANTTILA T. 1998. Metsämaan raiteistumisen ennustaminen WES-menetelmää käyttäen. [Prediction of forest land tracks using the WES method]. Helsinki, University of Helsinki, Department of forest resource management. Publications 17. 53 s. ISBN 951-45-8025-7
- BATTIATO A., DISERENS E. 2013. Influence of tyre inflation pressure and wheel load on the traction performance of a 65 kW MFWD tractor on a cohesive soil *Journal of Agricultural Science*; 5 (8): 197–215.
- DWYER M.J. 1984. The tractive performance of wheeled vehicles. *Journal of Terramechanics*, 21 (1):19–34. DOI: 10.1016/0022-4898(84)90005-3
- ELIASSON L. 2005. Effect of forwarder tyre pressure on rut formation and soil compaction, *Silva Fennica*, 39 (4): 549–557.
- GEE-CLOUGH D., MCALLISTER M., PEARSON G., EVERNDEN G.W. 1978. The empirical prediction of tractor-implement field performance. *Journal of Terramechanics*, 15 (2): 81–94. DOI: 10.1016/0022-4898(78)90026-5
- KORMANEK M., GOŁĄB J. 2012. Określenie deformacji szlaku zrywkowego przy pomocy laserowego urządzenia do pomiaru przekroju lub ukształtowania powierzchni terenu. [Determination of a skid trail deformation with the use a laser device for measuring cross section or lie of land]. *Inżynieria rolnicza – Agricultural Engineering*, 4 (139): 157–169.
- MACLAURIN E.B. 1990. The use of mobility numbers to describe the in-field tractive performance of pneumatic tyres. In: *Proceedings of 10th international conference of the ISTVS*. Vol. 1. International Conference Center, Kobe, Japan, August 20–24, 1990. Kyoto, Organizing Comitee of 10th International Conference, School of Civil Engineering: 177–186.
- MACLAURIN E.B. 1997. The use of mobility numbers to predict the tractive performance of wheeled and tracked vehicles in soft cohesive soils. In: *Proceedings of the 7th European ISTVS Conference*. Ferrara, Italy, October 8–10, 1997. [Italy], International Society for Terrain-Vehicle Systems: 391–398.
- NERI F., SPINELLI R., LYONS J. 2007. Ground pressure forwarder trials: assess benefits in reducing wheel rutting, In: *Austro 2007/FORMEC 07. Meeting the needs of tomorrow's forests*. New developments in forest engineering. October 7–11, 2007. Vienna and Heiligenkreuz: 10 s. Dostupné na/Available on: [https://www.formec.org/images/proceedings/2007/session\\_5\\_pdf/5\\_2\\_paper\\_neri\\_spinelli\\_lyons\\_austro\\_formec\\_2007.pdf](https://www.formec.org/images/proceedings/2007/session_5_pdf/5_2_paper_neri_spinelli_lyons_austro_formec_2007.pdf)
- NERUDA J. et al. 2013a. Technika a technologie v lesnictví. Brno, Mendelova univerzita v Brně: 364 s.
- NERUDA J., ULRICH R., KUPČÁK V., SLODIČÁK M., ZEMÁNEK T. 2013b. Harvesterové technologie lesní těžby. Brno, Mendelova univerzita v Brně: 165 s.
- PACAS B. et al. 1983. *Teorie stavebních strojů*. Praha, SNTL: 244 s.
- PRIDY J.D, WILLOUGHBY W.E 2004. Clarification of vehicle cone index with reference to mean maximum pressure. *Journal of Terramechanics*, 43 (2): 85–96. DOI: 10.1016/j.jterra.2004.10.001
- RUMMUKAINEN A., ALA-ILOMÄKI J. 1986. Manoeuvrability of forwarders and its prediction on peatlands. In: *Proceedings of 3rd International conference of the ISTVS*. Off the road vehicles and machinery in agriculture, earthwork and forestry. 15–17 September 1986, Warsaw, Poland. II: 75–81.
- SAARILAHTI M. 2002. Soil interaction model. [online] University of Helsinki, Department of Forest Resource Management: 87 s. Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (ecowood). [cit. 2017-05-19] . Dostupné na/Available on: <http://ethesis.helsinki.fi/julkaisut/maa/mvaro/publications/31/soilinte.pdf>
- SAARILAHTI M., ANTTILA T. 1999. Rut depth model for timber transport on moraine soils. In: *Proceedings of 13th International conference of the ISTVS*. Munich, Germany, September 14–17, 1999. Hanover, The International Society for Terrain-Vehicle Systems: 29–37.
- SCHWANGHART H. 1990. Measurement of contact area, contact pressure and compaction under tires in soft soil In: *Proceedings of 10th international conference of the ISTVS*. International Conference Center, Kobe, Japan, August 20–24, 1990. Kyoto, Organizing Comitee of 10th International Conference, School of Civil Engineering: 193–204.
- SCHOLANDER J. 1973. Bearing capacity of some forest soils for wheeled vehicles. Some technical aspects and consequences. Stockholm, Royal College of Forestry, Department of Operational Efficiency: 120 s. Research notes Nr 64.

- TURNAGE G.W 1972. Tire selection and performance prediction for off-road wheeled-vehicle operations. In: Proceedings of the 4th International ISTVS Conference. Stockholm-Kiruna, Sweden, April 24–28, 1972. Vol. I: 62–82.
- UUSITALO J., SALOMÄKI M., ALA-ILOMÄKI J. 2015. The effect of logging trails on rut formations in the harvesting of peatland forests. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 36 (1): 125–130.
- WIJEKOON M. 2012. Forest machine tire-soil interaction [online]. Stockholm, KTH Industrial Engineering and Management: 81 s. [cit. 2017-04-30]. Dostupné na/Available on: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:541740/FULLTEXT01.pdf>
- WISMER R.D., LUTH H.J. 1973. Off-road traction prediction for wheeled vehicles. *Journal of Terramechanics*, 10 (2): 49–61. DOI: 10.1016/0022-4898(73)90014-1
- WONG J.Y. 2008. *Theory of ground vehicles*. Hoboken, Wiley: 560 s.
- ZAHRADNÍČEK R., SEMRÁD K. 2007. *Pružnosť a pevnosť II*. Košice, Technická univerzita: 144 s. [CD-ROM]
- ZEMÁNEK T., NERUDA J., ULRICH R. 2015. Okamžité tlaky v pôde vyvozované prejazdy lesní techniky. lesnictví. In: Krilek, J. (ed.): *Mobilné energetické prostriedky – hydraulika – životné prostredie – ergonómia mobilných strojov*. Vedecký recenzovaný zborník. Zvolen, Technická univerzita vo Zvolene: 171–178.

## RUT FORMATION BY FORWARDER LVS 511 MULTIPASS

### SUMMARY

Machines moving in forest stands cause soil compaction, which is one of the main reasons of the soil degradation. By the soil compaction, a rut is formed, which drains the surface water and thus creates the erosion edge. Estimation of soil damage, track formation and soil compaction when passing forestry machinery is very important in terms of root system destruction and soil erosion. Therefore, the possibility of forecasting track formation dependent on the parameters of the forestry technique and its number of passes has become topical.

To overcome difficulties in the complex mathematical modeling of the vehicle-soil interaction, empirical methods that are based on testing the mobility performance of vehicles in different terrain conditions have been developed. The paper deals with the description of the WES empirical method for predicting the rut depth by passing of forestry technique after the cambisol. The principle of this method is to determine the conditions for the mobility of vehicles in off-road conditions using two basic parameters: (1) wheel numeric – dimensionless number that includes dimensions and characteristics of the tire, wheel load and soil characteristics, and (2) penetration resistance of the soil, represented by the cone index CI, which expresses the soil compressive and shear properties.

There are many empirical models for prediction wheel sinkage and rut formation, based on the WES method. The article uses calculation models to determine the rut depth for (1) passing one wheel only, and (2) passing the entire vehicle.

For the planning of the transport system in forestry, it is also necessary to know the number of machine passes and related loads in terms of the soil bearing capacity. Therefore, calculations have been developed to determine the rut depth at multiple passes.

The article uses the results from testing of the full loaded forwarder LVS 511. Within each measurement, 10 machine passes (5 forward and 5 backward) were performed, the total rut depth being determined after each pass. The soil compaction rate was determined before, during and after each pass with the soil penetrometer. Basic parameters of the forwarder are described in Tab. 1., and soil parameters in Tab. 2.

The method of determining the rut depth consisted of the following steps:

- 1 – determination of the dynamic load from the measured contact pressure data to the ground, static wheel load, static tire deformation and machine speed. Using the law of energy conservation and conversion by impact, the tire dynamic deformation and the contact surface are calculated. Energy and power conditions used in the calculation are shown in Fig. 3, contact surface in Fig. 4. Dynamic load is calculated by dividing of measured dynamic pressure and contact area. The load determination procedure is given in Fig. 2;
- 2 – calculation of wheel numerics;
- 3 – rolling resistance calculation;
- 4 – calculation of rut depth according to the methodology of multiple authors in multiple wheel load combinations (Tab. 3);
- 5 – determination of multipass coefficient.

Measured penetration resistance data (Fig. 5) show that its increase in a depth of 10–12 cm occurs by first machine pass. After the fifth pass, soil compaction also occurs in depths of 35–45 cm and the penetration resistance continuously increases throughout the measured depth. Depending on the measured penetration resistance values, the land at which the measurements were made, has sufficient bearing capacity and allows for multiple crossing of the forwarder.

The evaluation of the rut depth calculating method by the first machine pass shows that the results of the calculations approximate to the measured data using the methodology from the following authors:

GEE-CLOUGH et al. (1978) – at the combined front and rear axle load and by passing one wheel,

MACLAURIN (1990, 1997) – the depth of the track at four-wheel passing and combined load of front and rear axle,

SAARILAHTI (2002) – rut depth by rear axle load and by passing the entire vehicle.

Results of the calculations are described in Fig. 6.

Evaluation of the multipass coefficient calculation (Fig. 7.) shows that there it is not appropriate to use this coefficient with a constant value for all passes for the cambisol on which the measurements were made. Best match with measured data is a relationship created by regression analysis by number of passes.

Analysis of measured track depth data shows that the use of empirical numeric models based on the WES method provides a realistic prediction to determine the rut depth for the first and further passes of a small forwarder on cambisol.

*Zasláno/Received: 27. 06. 2017*

*Přijato do tisku/Accepted: 14. 11. 2017*