

# Djelotvorno i okolišno prihvatljivo izvoženje drva forvarderom temeljem analize nominalnoga tlaka na podlogu

Tomislav Poršinsky, Igor Stankić, Andreja Bosner

## Nacrtač – Abstract

U radu se prikazuje istraživanje mogućnosti izvoženja drva forvarderima na djelotvoran i okolišno prihvatljiv način u uvjetima ograničene nosivosti glejnih tala hrvatskih nizinskih šuma zbog njihove povećane vlažnosti tijekom cijele godine.

Analiza je provedena na primjeru srednje teškoga šestokotačnoga forvardera Valmet 840.2, a obuhvatila je: 1) utjecaj smanjenja tereta na djelotvornost forvardera, 2) okolišnu pogodnost forvardera u uvjetima ograničene nosivosti tla temeljem nominalnoga tlaka na podlogu (Mellgren 1980) prednjih i stražnjih kotača vozila ovisno o masi utovarenoga drva, opremljenosti vozila užim (600 mm) i širim (710 mm) gumama, odnosno opremljenosti kotača stražnje (bogi) osovine gusjenicama. Granica je okolišne pogodnosti bilo dopušteno opterećenje tla ograničene nosivosti < 60 kPa (Owende i dr. 2002).

Rezultati analize djelotvornosti izvoženja drva forvarderom pokazali su da je smanjenje tereta u uvjetima ograničene nosivosti glejnih tala, kao mjera koja osigurava kretnost vozila, ali i smanjenje razine oštećivanja šumskoga tla, izrazito neprihvatljiva zbog pada proizvodnosti i rasta jediničnih troškova.

Iz analize je nominalnoga tlaka na podlogu ispod kotača prednje i kotača (gusjenica) stražnje osovine vidljivo da se u uvjetima ograničene nosivosti tla: 1) može iskoristiti nominalna nosivost forvardera te djelotvorno izvoziti drvo, 2) pri čemu će okolišnu pogodnost osigurati primjena četveroosovinskih (osmokotačnih) forvardera opremljenih širim gumama te polugusjenicama na kotačima prednje i stražnje bogi osovine vozila.

Ključne riječi: nizinske šume, forvarder, nominalni tlak na podlogu, djelotvornost, okolišna pogodnost

## 1. Uvod – Introduction

Jedan od kriterija za ocjenu uspješnosti izvođenja radova pri potrajnom gospodarenju šumama jest i okolišna prihvatljivost. Pridobivanje drva na okolišno prihvatljiv način određeno je postupcima u kojim sudjeluju različiti strojevi i alati te okolnostima primjereni načini izradbe drva, nakon kojih su štete na staništu (tlo, voda) i sastojini (dubeća stabla, pomladak) najmanje moguće. Zbog sve jačega utjecaja glasa javnosti na okruženje u kojem se danas nalazi šumarstvo, navedenom svakako treba pridodati i estetski izgled šumskoga radilišta u tijeku te po završetku radova.

Pridobivanje drva glavnoga prihoda nizinskih jednodobnih šuma u Hrvatskoj zasniva se na sječi i

izradbi drva motornim pilama lančanicama te izvoženju drva forvarderima koje je izrađeno sortimentnom metodom. Pritom se rabe srednje teški (12 – 16 t) i teški (> 16 t) forvarderi, čija se masa s teretom kreće u rasponu od 25 do 40 t, a raspodijeljena je na tri ili četiri osovine. Troosovinski (šestokotačni) forvarder opremljen je s dva veća kotača na prednjoj osovini te četiri manja kotača na stražnjoj, koja je izvedena kao udvojena, njihajuća (bogi) osovina. Četveroosovinski (osmokotačni) forvarder opremljen je kotačima istih dimenzija na prednjoj i stražnjoj bogi osovini vozila. Bogi osovina, s kotačima u tzv. tandemskom rasporedu, povećava kretnost i stabilnost forvardera pri radu po šumskom bespuću.

Tla nizinskih šuma Hrvatske težega su mehaničkoga sastava, a u uvjetima čestoga prekomjernoga



**Slika 1.** Kretnost i djelotvornost forvardera?

**Fig. 1** Forwarder mobility and efficiency?

vlaženja (podzemnom, oborinskom, poplavnom ili slivenom vodom) tijekom cijele godine smanjuje se njihova nosivost te se ona kao takva svrstavaju u osjetljiva šumska staništa. Za Warda i Lyonsa (2000) šumska staništa u kojima je potrebno preinačiti uobičajene postupke pridobivanja drva da bi se izbjegli štetni utjecaji na ekološke, ekonomske i društvene funkcije šume jesu osjetljiva.

Smanjenje nosivosti podloge ograničava kretnost i smanjuje proizvodnost forvardera (Poršinsky i Stankić 2006a), ali i povećava razinu oštećivanja šumskog tla (Poršinsky i Stankić 2006b), što se očituje u njegovu zbijanju i nastanku kolotruga (slika 1). Iz navedenoga izlazi da će pri transportu drva po šumskom bespuću nizinskih šuma u Hrvatskoj biti pogodna vozila što manjega dodirnoga tlaka. S gledišta ekonomične uporabe zahtjev je hrvatskoga šumarstva forvarder nosivosti od 14 t i podiznim momentom hidraulične dizalice od 100 kNm, kojim se osigurava utovar i izvoženje trupaca velikih dimenzija iz sječina glavnoga prihoda (Horvat i dr. 2004).

Paradoks između primjene strojnoga rada i posljedičnosti izvođenja radova određuje mehanizirano pridobivanje drva na djelotvoran i okolišno prihvatljiv način, što obuhvaća: 1) djelotvornost (proizvodnost i troškove) strojnoga rada i 2) smanjenje utjecaja na stanište strojeva obuhvaćenih sustavom pridobivanja drva (Owende i dr. 2002, Akay i dr. 2007).

Cilj je ovoga rada na primjeru srednje teškoga forvardera iskazati: 1) utjecaj smanjenja tereta na proizvodnost i jedinične troškove izvoženja drva, 2) utjecaj mase utovarenoga drva na opterećenje kotača forvardera, 3) utjecaj širine guma te korištenja gusjenica u ovisnosti o masi utovarenoga drva na nominalni tlak na podlogu. Dobiveni rezultati dali bi smjer-

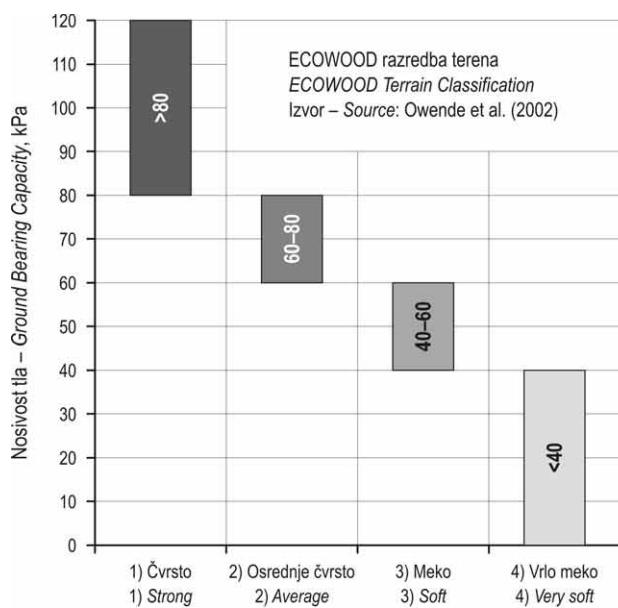
nice za donošenje odluka pri nabavama forvardera, čime bi se u budućnosti osiguralo djelotvorno i okolišno prihvatljivo izvoženje drva u uvjetima ograničene nosivosti glejnih tala iz sječina glavnoga prihoda nizinskih šuma.

## 2. Problem

Pri ocjenjivanju okolišne pogodnosti šumskih vozila, kod kojih zbog stalnoga dodira s tlom raste mogućnost njegova oštećivanja, kriteriji su gaženje i zbijanje tla (Poršinsky i Horvat 2005).

Gaženje je radnja kojom se zbija površina tla zbog kretanja šumskih strojeva (MacDonald i dr. 2002), a ovisi o sekundarnoj otvorenosti sječne jedinice te najvećoj udaljenosti dohvata drva (Pentek i dr. 2010) prihvatnom napravom (hidraulična dizalica, vučno uže vitla) i određenoga sredstva za rad (forvarder, skider).

Zbijanje tla, odnosno nastanak kolotruga kotača, posljedica je kretanja vozila po šumskom bespuću zbog kratkotrajnoga djelovanja dodirnih tlakova te (pro)klizavanja pogonskih kotača (i) vučenoga tereta (Horn i dr. 2004). Zbijanjem se tla razbijaju strukturni agregati, smanjuje se međuagregatni prostor te količina pora i volumen tla (Poršinsky 2005). Zbog toga se pogoršava toplotni režim u tlu, mijenjaju se vodno-zračni odnosi u tlu i donekle se smanjuju uvjeti za ishranu koji su potrebni za razvitak biljaka (Arnup 1999), odnosno smanjuje se mikrobiološka aktivnost zbog dovođenja tla u anaerobne uvjete (Frey i dr. 2009). Zbijanjem se u prvom redu smanjuje količina nekapilarnih pora i propusnost tla za vodu (Halvorson i dr. 2003), što na nagnutim izbrazdanim površinama mrežom kolotruga vozila ubrzava



Razredi čvrstoće (nosivosti) tla – Soil Strength Classes

Razred 1 – Class 1

Razred 2 – Class 2

Razred 3 – Class 3

Opći opis tipova tala – General description of the soil types

- Razred 1, Čvrsto tlo – Class 1, Strong soil
  - Suha pijeskovita i šljunkovita tla, čvrsta mineralna tla
  - Dry sands and gravels, Firm mineral soils
- Razred 2, Osrednje čvrsto tlo – Class 2, Average soil
  - Meka mineralna ili posmeđena tla
  - Soft mineral or iron-pan soils
- Razred 3, Meko tlo – Class 3, Soft soil
  - Mokra glejna i tresetna tla
  - Wet gleys and peaty soils
- Razred 4, Vrlo meko tlo – Class 4, Very soft soil
  - Mokri treset
  - Wet peats



Slika 2. Razredi nosivosti tla

Fig. 2 Soil strength classes

površinsko otjecanje vode te u konačnici izaziva eroziju (Owende i dr. 2002).

Osjetljivost šumskoga tla na zbijanje određuju ovi čimbenici: veličina dodirnih tlakova vozila, tekstura tla, vlaga tla tijekom privlačenja drva, udjel skeletnih i pjeskovitih čestica u tlu, struktura tla, prirodna gustoća i poroznost tla te debljina humusno akumulativnog sloja (Arnup 1999).

U ograničenim uvjetima nosivosti podloge kotači udvojene (bogi) osovine forvardera opremaju se polugusjenicama, čime se ostvaruju višestruke koristi: 1) zaštita tla od oštećivanja, ponajprije od zbijanja i

premještanja slojeva tla zbog povećanja površine dodira, odnosno smanjenja dodirnoga tlaka (Bygdén i dr. 2004, Gerasimov i Katarov 2010), 2) osiguranje kretnosti vozila smanjenjem klizanja kotača, ali i dubine kolotraga odnosno otpora kotrljanja vozila (Bygdén i dr. 2004, Bygdén i Wästerlund 2007, Suvinen 2006), 3) osiguranje djelotvornosti izvoženja drva zbog mogućnosti korištenja nominalne nosivosti vozila, ali i povećanja brzine kretanja vozila (Poršinsky i Stankić 2006a), 4) smanjenje potrošnje goriva zbog smanjenja klizanja kotača (Suvinen 2006), 5) povećanje bočne stabilnosti forvardera pri utovaru i istova-

ru drva, ali i pri kretanju vozila pogotovo pri radu na nagnutim terenima (Sutherland 2003).

Da bi se smanjilo oštećivanje tala ograničene nosivosti, osim korištenja polugusjenica, poduzimaju se dodatne mjere smanjivanja dodirnih tlakova forvardera, koje se očituju u uporabi višekotačnih vozila (Nugent i dr. 2003, Partington i Ryans 2010), udvajanju kotača (Ireland 2006, Owende i dr. 2002), uporabi širih guma (Saarilahti 2002b), ali i regulaciji tlaka zraka u njima (Eliasson 2005, Sakai i dr. 2008), zatim u uporabi lanaca na prednjim kotačima vozila (Suvinen 2006), smanjenju količine utovarenoga drva (Poršinsky 2005), planiranju trenutka izvođenja radova (Saarilahti 2002a).

Osim tih mjera istraživači su se bavili i idejom poboljšanja uvjeta nosivosti tla pokrivanjem vlaka pilanskim okorcima ili paletama (Owende i dr. 2002), odnosno sve prisutnijim zastorom vlaka šumskim ostatkom (Poršinsky i Stankić 2006b, Eliasson i Wästerlund 2007, Ampoorter i dr. 2007, Gerasimov i Katarov 2010) koji još i danas predstavlja otpad pri sječi i izradbi drva.

### 2.1 Nosivost tla – *Ground Bearing Capacity*

Nosivost (čvrstoća, prohodnost) tla jest sposobnost tla odupiranju vanjskim silama (djelovanju kotača ili gusjenica vozila), a određena je slijeganjem tla (dubina kolotruga) pod vanjskim opterećenjem. U šumarstvu je nosivost tla određena kao najveći dopušteni dodirni tlak kotača vozila (Saarilahti 2002b) bez oštećivanja tla, što ovisi o vrsti i teksturnom sastavu tla, udjelu humusa i skeletnih čestica (stalni parametri tla) te jedinom promjenjivom parametru – trenutačnoj vlazi (Poršinsky 2005).

Zadnja razredba terena za izvođenje šumskih radova, napravljena u sklopu projekta EcoWood, a koja posebnu pažnju poklanja okolišno djelotvornom pridobivanju drva na osjetljivim tlama, raščlanjuje nosivost u četiri razreda te za svaki propisuje dopušteni dodirni tlak (slika 2). Ova opisna razredba nosivosti šumskoga tla također preporučuje uporabu izraza nominalnoga tlaka vozila na podlogu (Mellgren 1980) radi određivanja pogodnosti primjene pojedinih vrsta i tipova vozila za privlačenje drva ovisno o graničnom dopuštenom dodirnom tlaku na tlo pojedinoga razreda čvrstoće (Ward i dr. 2003).

### 2.2 Nominalni tlak na podlogu – *Nominal Ground Pressure*

Dodirni je tlak vozila omjer težine i površine oslonca vozila s podlogom (tlom), a iskazuje okolišnu pogodnost određenoga šumskoga vozila. Problem je pri izračunu dodirnih tlakova vozila za kreta-

nje po šumskom bespuću ovisnost dodirne površine gume kotača i tla o: 1) elastičnim deformacijama opterećenoga kotača (značajke gume, tlak punjenja zrakom) i 2) plastično-elastičnim deformacijama tla (granulometrijski sastav, vlaga).

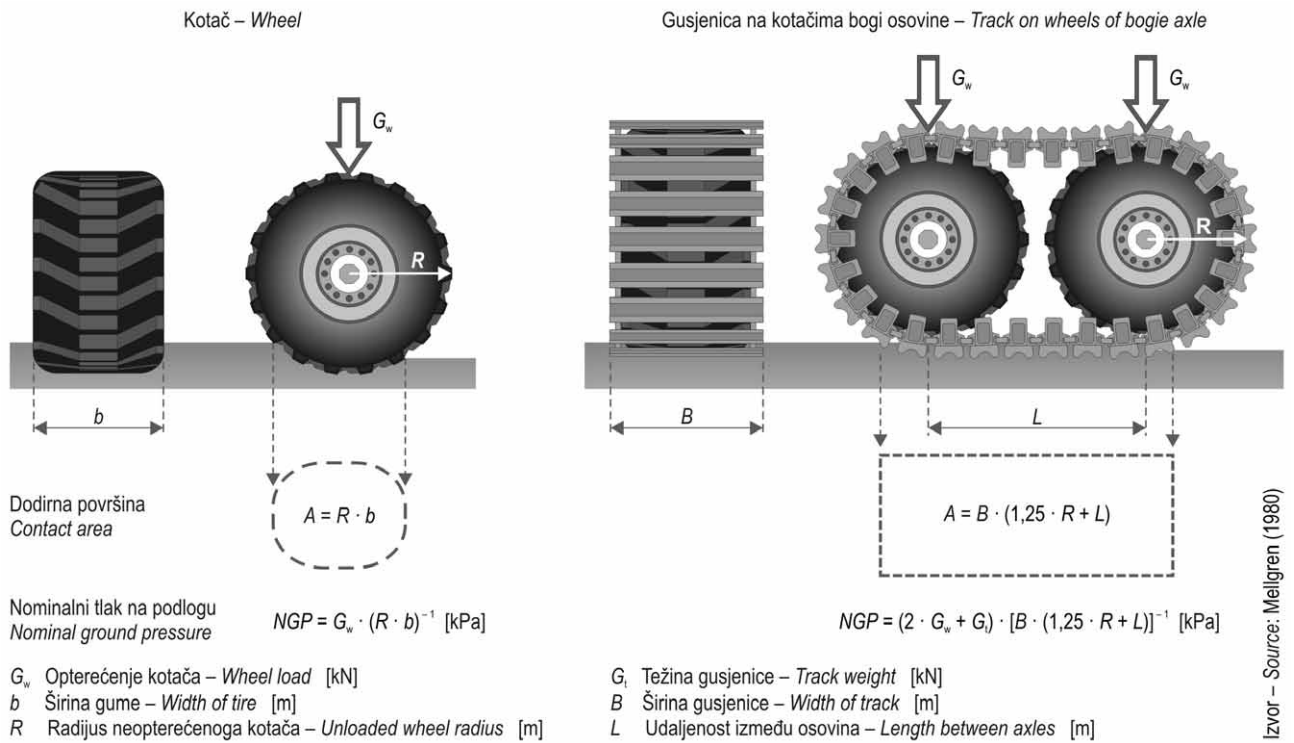
U želji za standardiziranjem načina izračuna dodirnih tlakova šumskih vozila, radi međusobne usporedivosti u prvom redu vozila (ili različite opremljenosti pojedinoga vozila) koja se rabe za privlačenje drva po šumskom bespuću, Mellgren (1980) uvodi nominalni tlak na podlogu (slika 3). Nominalni je tlak na podlogu statički tlak (vozilo u mirovanju), a teoretski se zasniva na slučaju krutoga kotača na plastično-elastičnoj podlozi koja dodirnu površinu kotača s tlom izračunava kao umnožak polumjera kotača i širine gume. Važna je pretpostavka pri poistovjećivanju duljine dodira kotača i plastične podloge s polumjerom kotača propadanje 15 % promjera kotača u tlo (kolotrag), čime je osiguran potpuni dodir gume kotača i tla (Partington i Ryans 2010). U slučaju manjega propadanja kotača u tlo (ovisno o uvjetima nosivosti) površina se dodira smanjuje te raste dodirni tlak vozila koji je veći u odnosu na nominalni tlak na podlogu. U stvarnosti je nominalni tlak na podlogu najmanji tlak koje vozilo može ostvariti u uvjetima smanjene nosivosti tla te se ne može rabiti za usporedbu pogodnosti dvaju različitih kotača u različitim uvjetima stanja tla.

Pojednostavljenje računanja dodirne površine, tj. aproksimacija duljine dodira opterećenoga kotača uz dubinu kolotruga od 15 % promjera kotača, teorijski ograničava široku uporabu ovoga modela. Osnovna je zamjerka aproksimaciji duljine dodira kotača s tlom, s polumjerom kotača održivost samo u slučaju kada je kut između početka i kraja dodira kotača s podlogom 1 rad ( $\approx 57,3^\circ$ ), što znači da je model geometrijski održiv samo u određenim slučajevima (Poršinsky i Horvat 2005).

Prednost je nominalnoga tlaka na podlogu njegova jednostavnost izračuna, a nedostaci su zanemari-vanje utjecaja progiba gume opterećenoga kotača pri kretanju, tlaka punjenja guma, neovisnost o značajkama tla te precjenjivanje utjecaja uporabe širih guma (Saarilahti 2002b).

## 3. Materijal i metode – *Material and Methods*

Analiza djelotvornosti i okolišne pogodnosti izvoženja drva provedena je na primjeru srednje teškoga šestokotačnoga forvardera Valmet 840.2, nominalne nosivosti 12 t, čije su gabaritne dimenzije i raspored opterećenja nenatovarenoga vozila prikazane na slici 4. Ploština je poprečnoga presjeka utovarnoga prostora 4,1 m<sup>2</sup>, a duljina 4 m. Vozilo pokreće



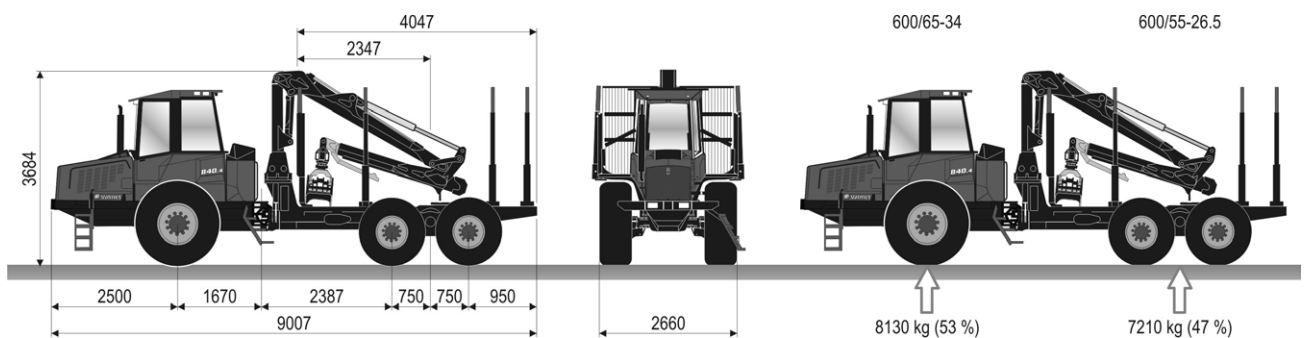
Slika 3. Izračun nominalnoga tlaka na podlogu  
 Fig. 3 Calculation of Nominal Ground Pressure

šesticilindarski dizelski motor s prednabijanjem, nazivne snage 125 kW pri 2200 min<sup>-1</sup> i 670 Nm najvećega momenta pri 1400 min<sup>-1</sup>. Forvarder je opremljen hidrauličnom dizalicom Cranab CFR7C, podizne sile 7,1 kN pri najvećem dosegu od 9,1 m.

Utjecaj smanjenja tereta (4 t, 8 t u odnosu na 12 t nominalne nosivosti vozila) na djelotvornost forvardera u odnosu na udaljenost izvoženja drva, iskazan je prema višekriterijskom modelu izračuna proizvodnosti ovih vozila (Stankić 2010), koji uzima u obzir: 1) klasu forvardera, 2) nosivost tla, 3) opremljenost forvardera gusjenicama, 4) sječnu gustoću, 5)

obujam srednjega sječivoga stabla te 6) udaljenost izvoženja drva. Jedinični trošak izvoženja drva izračunat je s obzirom na kalkulaciju troška strojnoga trgovačkoga društva »Hrvatske šume« d.o.o Zagreb za forvarder Valmet 840.2 u iznosu od 433,19 kn/h.

Za izračunavanje nominalnoga tlaka na podlogu primijenjen je teorijski model raspodjele osovinskih opterećenja, slučaj vozila u mirovanju na ravnoj podlozi, u ovisnosti o masi i duljini natovarene oblovine u tovarni prostor forvardera (Poršinsky i Horvat 2005). Analiza raspodjele osovinskih opterećenja zasnovana je na prosječnoj duljini sortimentnom meto-



Slika 4. Forvarder Valmet 840.2  
 Fig. 4 Valmet 840.2 Forwarder

dom izrađene oblovine (4 m) u području hrvatskih nizinskih šuma (Stankić 2010) te 1800 kg mase para polugusjenica u slučaju kada su njima opremljeni kotači stražnje (bogi) osovine. Opterećenje kotača pretpostavilo je ravnomjernu raspodjelu osovinskoga opterećenja po pripadajućim kotačima. Dodirna površina kotača (polugusjenice) i tla izračunata je prema Mellgrenu (1980) za uže (600/65–34 – prednje, 600/55–26.5 – stražnje) te šire (710/55–34 – prednje, 710/45–26.5 – stražnje) gume koje preporučuje proizvođač ovoga forvardera.

Analiza okolišne pogodnosti primjernoga forvardera temeljila se na: 1) vrijednostima nominalnoga tlaka na podlogu prednjih i stražnjih kotača vozila ovisno o masi utovarenoga drva te opremljenosti vozila užim i širim gumama, odnosno opremljenosti kotača stražnje osovine gusjenicama i 2) gornjom granicom dopuštenoga opterećenja tla (60 kPa) ograničene nosivosti (slika 2 – razred 3, meko tlo) koje prevladava u vrijeme sječe glavnoga prihoda drva hrvatskih nizinskih šuma.

#### 4. Rezultati s diskusijom – Results with Discussion

U skladu sa zacrtanim ciljevima rezultati istraživanja pogodnosti izvoženja drva, u uvjetima ograničene nosivosti tla hrvatskih nizinskih šuma srednje teškim forvarderom, prikazani su s obzirom na: 1) utjecaj smanjenja tereta na djelotvornost forvardera te 2) nominalni tlak na podlogu kao mjeru okolišne pogodnosti s obzirom na opremljenost vozila i masu utovarenoga drva.

##### 4.1 Djelotvornost forvardera – Forwarder efficiency

U hrvatskom šumarstvu prevladavaju šestokotačni forvarderi, najčešće opremljeni gumama tzv. visoke prohodnosti, tj. samočišćećim oblikom orebrenja gaznoga sloja gume. Takav oblik orebrenja gume smanjuje (pro)klizavanje kotača, ali i povećava rizik oštećivanja tla, odnosno korijenja stabala (Sutherland 2003). Primjena nesamočišćećih guma (oblik orebrenja koji smanjuje oštećenje tla, ali povećava rizik od klizanja kotača te je prikladniji za prihvat gusjenice) na kotačima stražnje (bogi) osovine forvardera na koje su montirane gusjenice, odnosno poboljšanje uvjeta nosivosti tla na vlakama uhrpanim zastorom granjevine ili slaganjem višemetarskoga ogrjevnoga drva, više je izuzetak nego pravilo (Poršinsky 2005).

Najčešći oblik osiguranja kretnosti forvardera u uvjetima ograničene nosivosti tala hrvatskih nizinskih šuma jest smanjenje količine utovarenoga drva

(mase, obujma tereta), što nepovoljno djeluje na djelotvornost izvoženja drva forvarderima. Utjecaj smanjenja obujma tereta na djelotvornost izvoženja drva forvarderom Valmet 840.2 prikazan je na slici 5 s obzirom na utovar drva do: 1) pune visine utovarnoga prostora (teret – 12,2 t, 12,2 m<sup>3</sup>), 2) 2/3 visine utovarnoga prostora (teret – 8,1 t, 8,2 m<sup>3</sup>) te 3) 1/3 visine utovarnoga prostora (teret – 4,1 t, 4,3 m<sup>3</sup>). Valja naglasiti da je obujam tereta iskazan na osnovi mjerenja duljine te promjera s korom na debljem kraju, sredini duljine i debljem kraju svakoga pojedinoga trupca u tovaru forvardera, a obujam je procijenjen Riecke-Newtonovim izrazom.

Smanjenje tereta, do 2/3 visine utovarnoga prostora (68 % nosivosti vozila), utjecalo je na pad proizvodnosti u rasponu od 16 % (udaljenost 100 m) do 28 % (udaljenost 800 m) te rast jediničnih troškova od 19 % (100 m) do 38 % (800 m) u odnosu na nominalno natovareni forvarder (12 t tereta).

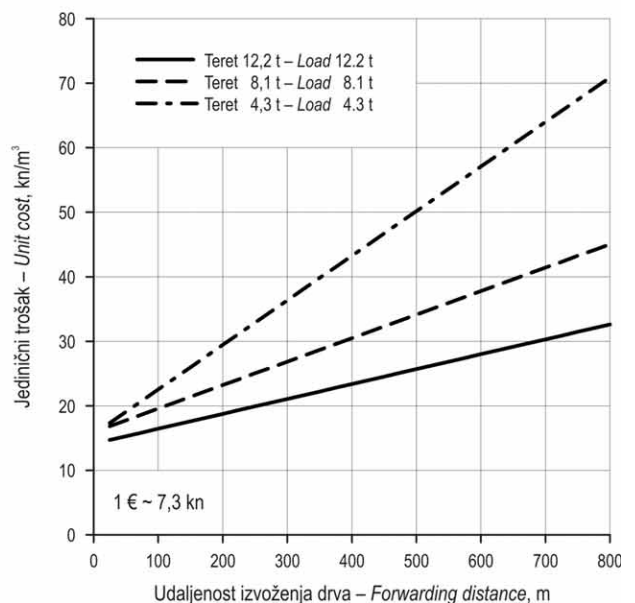
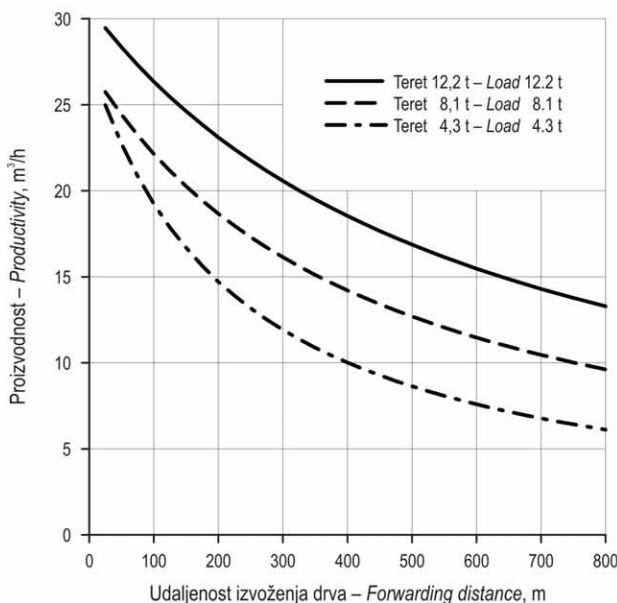
Dodatno smanjenje tereta do 1/3 visine utovarnoga prostora (34 % nosivosti vozila) utjecalo je na pad proizvodnosti u rasponu od 27 % (udaljenost 100 m) do 54 % (udaljenost 800 m) te rast jediničnih troškova od 37 % (100 m) do 117 % (800 m) u odnosu na nominalno natovareno vozilo (12 t).

Tako široki rasponi pada proizvodnosti i rasta jediničnih troškova forvardera zbog porasta udaljenosti izvoženja drva posljedica su međudjelovanja utrošaka vremena kretanja (ne)opterećenoga vozila te utovara i istovara drva, odnosno obujma tovara (Poršinsky i Stankić 2006a, Stankić 2010). Očito da smanjenje obujma utovarenoga drva snažno utječe na djelotvornost forvardera (pogotovo povećanjem udaljenosti izvoženja drva) te s ekonomskoga gledišta svakako nije prihvatljiva metoda osiguranja kretnosti, ali i okolišne pogodnosti izvoženja drva u uvjetima ograničene nosivosti podloge hrvatskih nizinskih šuma.

##### 4.2 Okolišna pogodnost – Environmentally soundness

Nominalni tlak vozila na podlogu zasniva se na međudjelovanju opterećenja kotača vozila i njegove dodirne površine, čime je metodološki primjenjivost ograničena samo na slučaj jednakih dimenzija guma kotača i jednake raspodjele opterećenja po kotačima vozila. Za slučaj različitih dimenzija prednjih i stražnjih kotača, odnosno nejednake raspodjele opterećenja između prednje i stražnje osovine vozila, (prijelaz iz raščlambe sustava kotač – tlo u sustav vozilo – teren), Saarilahti (2002a) rabi tzv. »referentni kotač« (kotač s najvećim dodirnim tlakom) ili se iskazuje posebno dodirni tlak na podlogu ovisno o kotačima prednje, odnosno stražnje osovine vozila (Poršinsky i Horvat 2005).

		Puna visina tovarnoga prostora Full height of loading area	Do 2/3 visine tovarnoga prostora Up to 2/3 height of loading area	Do 1/3 visine tovarnoga prostora Up to 1/3 height of loading area
Teret – Load	Masa – Mass, kg	12160	8130	4130
	Obujam – Volume, m <sup>3</sup>	12,21	8,19	4,32
	Nosivost – Payload, %	101	68	34

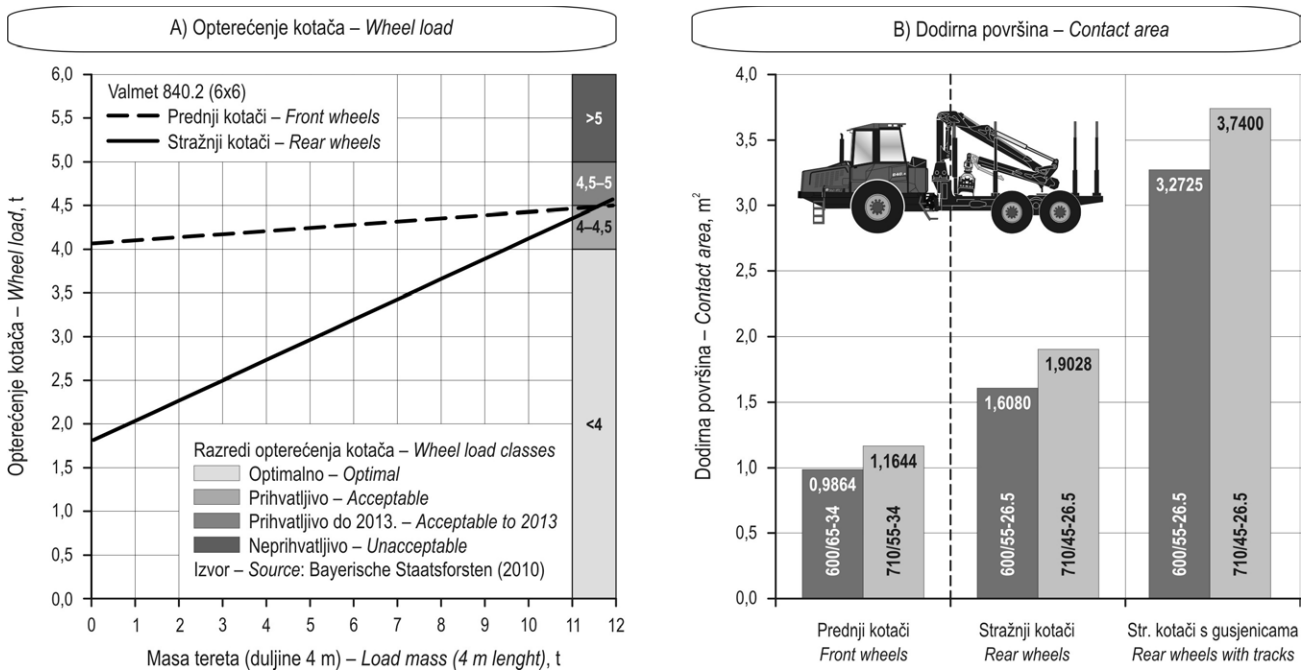


Slika 5. Utjecaj smanjenja tereta na djelotvornost forvardera Valmet 840.2  
 Fig. 5 Impact of load reduction on efficiency of Valmet 840.2 Forwarder

Ovisno o masi (0 – 12 t) natovarene oblovine u tovarni prostor forvardera (slika 6a), raste ukupna masa vozila, pri čemu je znakovit porast opterećenja na stražnjim kotačima (1,8 – 4,6 t), odnosno relativno beznačajan porast opterećenja na prednjim kotačima (4,1 – 4,5 t). Povećanjem mase utovarenoga drva < 11,5 t referentni su kotači prednje osovine, nakon čega (pred samu nominalnu nosivost) postaju to stražnji kotači. Bavarske su savezne šume razvile poseban pristup ocjeni okolišne pogodnosti vozila koja se rabe pri pridobivanju drva radi zaštite tla od zbijanja,

koji se zasniva na 4 razreda opterećenja kotača (slika 6a) odnosno korištenju širih (≥ 700 mm) guma (Wolf 2010). Prema bavorskim smjernicama za cijeli raspon nosivosti (< 12 t) kotači prednje osovine primjernoga forvardera su u području »prihvatljivoga« opterećenja kotača, dok su stražnji kotači u području »optimalnoga« opterećenja < 9,5 t mase utovarenoga drva.

Analiza dodirnih površina vozila i tla (slika 6b) pokazala je porast dodirne površine za 18 % (ispod prednjih, ali i stražnjih kotača) pri korištenju širih

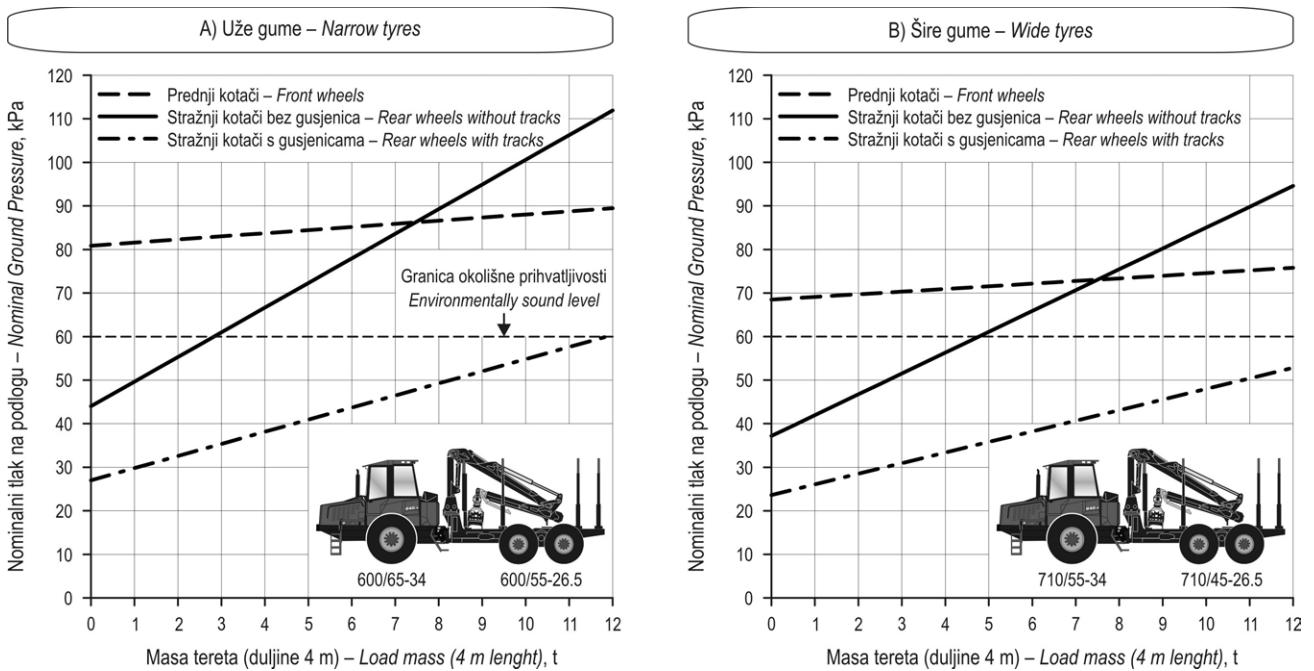


Slika 6. Opterećenje kotača i dodirna površina forvardera Valmet 840.2 (6 × 6)

Fig. 6 Wheel load and contact area - Valmet 840.2 (6 × 6) Forwader

guma (710 mm) u odnosu na uže gume (600 mm). Korištenje polugusjenica na stražnjim kotačima bogi osovine utjecalo je na gotovo dvostruki porast dodirne površine.

Analizu utjecaja mase utovarene oblovine u tovarni prostor forvardera na vrijednosti nominalnoga tlaka na podlogu ispod prednjih i stražnjih kotača vozila, odnosno ispod polugusjenice kotača stražnje



Slika 7. Ovisnost nominalnoga tlaka prednjih i stražnjih kotača (gusjenice) ovisno o masi utovarenoga drva

Fig. 7 Nominal Ground Pressure of front and rear wheels (track) vs. mass of load



udvojene osovine prikazana je na slici 7a za uže gume (600 mm) te na slici 7b za šire gume (710 mm).

Neovisno o korištenju užih ili širih guma, ali i mase utovarenoga drva, nominalni tlak na podlogu ispod prednjih kotača forvardera nadilazi dopušteno opterećenje tla ograničene nosivosti (< 60 kPa). Kod užih guma (600/65–34), za raspon nosivosti vozila (< 12 t), nominalni je tlak veći 35 – 49 % u odnosu na dopušteni. Pogodnost primjene širih guma (710/55–34) na prednjim kotačima vozila očituje se padom vrijednosti prekoračenja nominalnoga tlaka, koje se kreće od 14 do 26 % u odnosu na dopušteno. Rješenje preopterećenja prednje osovine šestokotačnoga forvardera sa stajališta okolišne pogodnosti svakako je osmokotačni forvarder.

Nominalni tlak na podlogu ispod stražnjih kotača forvardera opremljenoga užim gumama (600/55–26.5) prelazi dopušteno opterećenje tla ograničene nosivosti pri utovaru drva mase > 3 t, a pri korištenju širih guma (710/45–26.5) pri utovaru drva mase > 5 t, što je izrazito nepovoljno sa stajališta djelotvornosti izvoženja drva (slika 5).

Korištenjem polugusjenica na stražnjim kotačima udvojene njihajuće osovine s užim gumama, nominalni je tlak na podlogu manji za 55 – 2 % (ovisno o masi utovarenoga drva) u odnosu na dopušteni. Opremanje forvardera polugusjenicama na širim gumama dodatno pogoduje okolišnoj pogodnosti izvoženja drva forvarderom zbog dodatnoga pada nominalnoga tlaka na podlogu, koji je niži u rasponu od 61 % (nenatovareno vozilo) do 12 % (natovareno vozilo) u odnosu na dopušteni dodirni tlak tla ograničene nosivosti.

## 5. Zaključak – Conclusion

U uvjetima ograničene nosivosti glejnih tala zbog njihove povećane vlažnosti, smanjenje tereta forvardera kao mjera koja osigurava kretnost vozila, ali i smanjenje razine oštećivanja šumskoga tla izrazito je neprihvatljiva sa stajališta djelotvornosti izvoženja drva.

Analiza nominalnoga tlaka na podlogu ispod kotača prednje i kotača (gusjenica) stražnje osovine dala je sljedeće smjernice za izvoženje drva forvarderima, u uvjetima ograničene nosivosti tla, na djelotvoran i okolišno prihvatljiv način:

- ⇒ zbog većega nominalnoga tlaka ispod prednjih kotača troosovinskoga forvardera u odnosu na dopušteno opterećenje tla ograničene nosivosti (<60 kPa) preporučuje se korištenje četveroosovinskih (osmokotačnih) forvardera,
- ⇒ primjena širih guma (710 mm) osigurava još uvijek nezadovoljavajuće povećanje mase utovarenoga

drva u odnosu na vozilo opremljeno užim gumama (600 mm), a da se pri tome ne premaši dopušteno opterećenje tla,

- ⇒ zbog osiguranja kretnosti, potpunoga korištenja nominalne nosivosti vozila koje osigurava djelotvornost izvoženja drva forvarderima, ali i okolišnu pogodnost preporučuje se korištenje polugusjenica na kotačima udvojene prednje i stražnje osovine osmokotačnoga forvardera.

Ovi bi rezultati trebali poslužiti kao smjernice pri budućim nabavama forvardera, čime bi se u budućnosti osiguralo djelotvorno i okolišno prihvatljivo izvoženje drva u uvjetima ograničene nosivosti glejnih tala iz sječina glavnoga prihoda nizinskih šuma.

## Zahvala – Acknowledgements

Istraživanje je provedeno u sklopu znanstvenoistraživačkoga zadatka »Okolišno prihvatljive tehnologije u gospodarenju šumama prema vrijedećim međunarodnim normama« koji financira trgovačko društvo »Hrvatske šume« d.o.o Zagreb i znanstvenoistraživačkoga projekta Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske »Pridobivanje drva na okolišno prihvatljiv način (068-0682111-0390)«.

## 6. Literatura – References

- Akay, A. E., Sessions, J., Aruga, K., 2007: Designing a forwader operation considering tolerable soil disturbance and minimum total cost. *J. Terramech.*, 44 (2): 187–195.
- Ampoorter, E., R. Goris, W. M. Cornelis, K. Verheyen, 2007: Impact of mechanized logging on compaction status of sandy forest soils. *For. Ecol. Manage.*, 241 (1–3): 162–174.
- Arnup, R. W., 1999: The extent, effect and management of forestry-related soil disturbance, with reference to implications for the Clay Belt: a literature review. Ontario Ministry of Natural Resources, Northeast Science & Technology, TR-37, 1–30.
- Bosner, A., S. Nikolić, Pandur, Z., Benić, D., 2008: Razvoj i umjeravanje prijenosnoga sustava za mjerenje osovinskih opterećenja vozila – mjerenja na forvarderu (*Development and Calibration of Mobile Measuring System of Vehicle Axle Mass – Measurements on Forwarder*). *Nova meh. šumar.*, 29: 1–15.
- Bygdén, G., Eliasson, L., Wästerlund, I., 2004: Rut depth, soil compaction and rolling resistance when using bogie tracks. *J. Terramech.*, 40 (3): 179–190.
- Bygdén, G., I., Wästerlund, 2007: Rutting and soil disturbance minimized by planning and using bogie tracks. *Forestry Studies*, 46: 5–12.

- Eliasson, L., 2005: Effects of forwarder tyre pressure on rut formation and soil compaction. *Silva Fennica*, 39 (4): 549–557.
- Eliasson, L., I. Wästerlund, 2007: Effects of slash reinforcement on rutting and soil compaction on a moist fine-grained soil. *For. Ecol. Manage.*, 252 (1–3): 118–123.
- Frey, B., J. Kremer, A. Rüdft, S. Sciacca, D. Matthies, P. Lüscher, 2009: Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. *European journal of soil biology*, 45 (4): 312–320.
- Gerasimov, J., V. Katarov, 2010: Effect of Bogie Track and Slash Reinforcement on Sinkage and Soil Compaction in Soft Terrains. *Croat. j. for. eng.*, 31 (1): 35–45.
- Halvorson, J. J., L. W. Gatto, D. K. McCool, 2003: Owerwinter changes to near-surface bulk density, penetration resistance and infiltration rates in compacted soil. *J. Terra-mech.*, 40 (1): 1–24.
- Horn, R., J. Vossbrink, S. Becker, 2004: Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. *Soil Till. Res.*, 79 (2): 207–219.
- Horvat, D., T. Poršinsky, A. Krpan, T. Pentek, M. Šušnjar, 2004: Ocjena pogodnosti forvardera morfološkom raščlambom (*Suitability Evaluation of Forwarders Based on Morphological Analysis*). *Strojarstvo*, 46 (4–6): 149–160.
- Ireland, D., 2006: Traction Aids in Forestry. Forestry Commission, Technical Note, 13: 1–8.
- Mellgren, P. G., 1980: Terrain Classification for Canadian Forestry. Canadian Pulp and Paper Association, 1–13.
- McDonald, T. P., E. A. Carter, S. E. Taylor, 2002: Using the global positioning system to map disturbance patterns of forest harvesting machinery. *Canadian Journal of Forest Research*, 32 (2): 310–319.
- Nugent, C., C. Canali, P. M. O. Owende, M. Nieuwenhuis, S. Ward, 2003: Characteristic site disturbance due to harvesting and extraction machinery traffic on sensitive forest sites with peat soils. *Forest Ecology and Management*, 180 (1–3): 85–98.
- Owende, P. M. O., J. Lyons, R. Haarlaa, A. Peltola, R. Spinelli, J. Molano, S. M. Ward, 2002: Operations protocol for Eco-efficient Wood Harvesting on Sensitive Sites. Project ECOWOOD, Funded under the EU 5<sup>th</sup> Framework Project (*Quality of Life and Management of Living Resources*). Contract No. QLK5-1999-00991 (1999–2002), 1–74.
- Partington, M., M. Ryans, 2010: Understanding the nominal ground pressure of forestry equipment. *FPIInnovations*, 12 (5): 1–8.
- Pentek, T., H. Nevečerel, K. Dasović, T. Poršinsky, M. Šušnjar, I. Potočnik, 2010: Analiza sekundarne otvorenosti šuma gorskog područja kao podloga za odabir duljine uža vitla (*Analysis of Secondary Relative Openness in Hilly Areas as a Basis for Selection of Winch Rope Length*). *Šum. list*, 134 (5–6): 241–248.
- Poršinsky, T., 2005: Djelotvornost i ekološka pogodnost forvardera Timberjack 1710B pri izvoženju oblovine iz nizinskih šuma Hrvatske (*Efficiency and Environmental Evaluation of Timberjack 1710B Forwarder on Roundwood Extraction from Croatian Lowland Forests*). Disertacija, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 170 str.
- Poršinsky, T., D. Horvat, 2005: Indeks kotača kao parametar procjene okolišne prihvatljivosti vozila za privlačenje drva (*Wheel Numeric as Parameter for Assessing Environmental Acceptability of Vehicles for Timber Extraction*). *Nova meh. šumar.*, 26: 25–38.
- Poršinsky, T., I. Stankić, 2006a: Djelotvornost forvardera Timberjack 1710B pri izvoženju oblovine iz nizinskih šuma Hrvatske (*Efficiency of Timberjack 1710B Forwarder on Roundwood Extraction from Croatian Lowland Forests*). *Glas. šum. pokuse, pos. izd.*, 5: 573–587.
- Poršinsky, T., I. Stankić, 2006b: Okolišna pogodnost forvardera Timberjack 1710B pri izvoženju oblovine iz nizinskih šuma Hrvatske (*Environmental Evaluation of Timberjack 1710B Forwarder on Roundwood Extraction from Croatian Lowland Forests*). *Glas. šum. pokuse, pos. izd.*, 5: 589–600.
- Saarilahti, M., 2002a: Soil interaction model. Project deliverable D2 (Work package No. 1) of the Development of a Protocol for Ecoefficient Wood Harvesting on Sensitive Sites (ECOWOOD). EU 5<sup>th</sup> Framework Project (Quality of Life and Management of Living Resources) Contract No. QLK5-1999-00991 (1999–2002), 1–87.
- Saarilahti, M., 2002b: Modelling of the wheel and tyre, 1. Tyre and soil contact – Survey on tyre contact area and ground pressure models for studying the mobility of forest tractors. Soil interaction model, Appendix Report No 5, 1–43.
- Sakai, H., T. Nordfjell, K. Suadicani, B. Talbot, E. Bøllehuus, 2008: Soil Compaction on Forest Soils from Different Kinds of Tires and tracks and Possibility of Accurate Estimate. *Croat. j. for. eng.*, 29 (1): 15–27.
- Stankić, I., 2010: Višekriterijsko planiranje izvoženja drva forvarderima iz nizinskih šuma Hrvatske (*Multicriterial planning of timber forwarding in Croatian lowland forests*). Disertacija, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 123 str.
- Sutherland, B. J., 2003: Preventing Soil Compaction and Rutting in the Boreal Forest of Western Canada: A Practical Guide to Operating Timber-Harvesting Equipment. *FERIC Advantage*, 4 (7): 1–52.
- Suvinen, A., 2006: Economic Comparison of the Use of Tyres, Wheel Chains and Bogie Tracks for Timber Extraction. *Croat. j. for. eng.*, 27 (2): 81–102.
- Ward, S. M., J. Lyons, 2000: The development of an operations protocol for wood harvesting on sensitive sites. Proceedings of International conference »Thinnings: A valuable forest management tool», September 9-14, 2001, IUFRO Unit 3.09.00 & FERIC & Natural Resources Canada & Canadian Forest Service, CD, 1–12.
- Ward, S. M., P. M. O. Owende, 2003: Development of a protocol for eco-efficient wood harvesting on sensitive sites.

Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Scientific Conference »Forest and Wood-Processing Technology vs. Environment – Fortechenvi Brno 2003«, May 26–30, 2003, Brno, Czech Republic, Mendel University of Agriculture and Forestry Brno & IUFRO WG 3.11.00, str. 473–482.

Wolf, M., 2010: Bodenschutz bei den Bayerischen Staatsforsten. Bayerische Staatsforsten AöR, str. 1–8.

---

## Abstract

---

### Ecoefficient Timber Forwarding Based on Nominal Ground Pressure Analysis

*This paper presents the research of possibilities of forwarding timber in an efficient and environmentally friendly way, under conditions of limited bearing capacity of gley soils of Croatian lowland forests due to their increased moisture all the year round. Reduced soil bearing capacity causes restricted mobility and decreases the forwarder productivity, and also increases the level of damage caused to forest soil, reflected in its compaction and rutting (Fig. 1).*

*In lowland even-aged forests of Croatia, main felling is mostly carried out based on wood cutting and processing by chain saws and forwarding of timber, processed by cut-to-length method, by six-wheel forwarders, usually not equipped with semitracks on rear wheels of bogie axle (Fig. 1).*

*The analysis was carried out on the example of a medium-weight six-wheel forwarder Valmet 840.2 (nominal load capacity of 12 t, whose dimensions and load distribution of empty vehicle are shown in Fig. 4), and this analysis involved as follows: 1) the effect of load reduction on forwarder efficiency, 2) forwarder environmental soundness under conditions of limited soil strength based on nominal ground pressure (Mellgren 1980) of front and rear wheels of the vehicle depending on the mass of loaded timber, vehicle with narrower (600 mm) and wider (710 mm) tires, or with tracks on wheels of the rear (bogie) axle. The limit value of environmental soundness would be the allowed ground pressure of limited bearing capacity <60 kPa (Owende et al. 2002).*

*The effect of load reduction (4 t, 8 t with respect to 12 t of the vehicle nominal load capacity) on forwarder efficiency with respect to the distance of timber forwarding, is expressed according to the multicriteria calculation model of productivity of these vehicles (Stankić 2010), which takes into account: 1) forwarder class 2) soil strength, 3) use of tracks, 4) felling density, 5) volume of the average felling tree and 6) distance of timber forwarding. The unit cost of timber forwarding was calculated according to machine rate made by the company »Hrvatske šume« d.o.o Zagreb for the forwarder Valmet 840.2 (433.19 kn/h).*

*For calculating the nominal ground pressure (Fig. 3), a theoretical model of axle load distribution was used, the case of vehicle at standstill on level ground, depending on mass and length of loaded logs in the bunk area of the forwarder (Poršinsky and Horvat 2005). The analysis of axle load distribution was based on an average length of logs (4 m) made by cut-to-length method in the area of the Croatian lowland forests, and the mass of 1800 kg of a pair of semitracks. The wheel load assumed even load distribution of axle load by pertaining wheels. The contact area between wheels (tracks) and soil was calculated according to Mellgren (1980), for narrower (front – 600/65-34, rear – 600/55-26.5) and wider (front – 710/55-34, rear – 710/45-26.5) tires recommended by the manufacturer of forwarder.*

*The analysis of the forwarder environmental soundness was based on: 1) values of nominal ground pressure of front and rear wheels of the vehicle depending on the mass of loaded timber, and use of narrower and wider tires, i.e. or use of tracks, and 2) the upper limit value of the allowed ground pressure (<60 kPa) of limited bearing capacity (class 3 – Fig. 2), which prevails at the time of main felling in the Croatian lowland forests.*

*The results of efficiency analysis of timber forwarding (Fig. 5) showed that the reduction of load under conditions of limited bearing capacity of gley soils, as a measure for providing vehicle mobility as well as for diminishing the level of damage caused to forest soil, is highly unacceptable due to the decrease of productivity and increase of unit costs.*

*The analysis of nominal ground pressure (Fig. 7) under wheels of the front axle and wheels (tracks) of the rear axle, showed that under conditions of limited soil bearing capacity: 1) the forwarder nominal load capacity may be used and that efficient timber forwarding may be performed, 2) the environmental soundness can be provided by*

*the application of four-axle (eight-wheel) forwarders equipped with wider tires and half-tracks on wheels of front and rear bogie axle of the vehicle.*

*These results should be used as guidelines for purchasing forwarders, and such approach would provide in future ecoefficient timber forwarding under conditions of limited bearing capacity of gley soils in main felling sites of lowland forests.*

*Keywords: lowland forests, forwarder, nominal ground pressure, efficiency, environmental soundness*

---

**Adresa autorâ – Authors' address:**

Izv. prof. dr. sc. Tomislav Poršinsky

e-pošta: porsinsky@sumfak.hr

Dr. sc. Igor Stankić

e-pošta: stankic@sumfak.hr

Andreja Bosner, dipl. inž. šum.

e-pošta: bosner@sumfak.hr

Zavod za šumarske tehnike i tehnologije  
Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Svetošimunska 25

HR–10 000 Zagreb

Primljeno (*Received*): 03. 12. 2010.

Prihvaćeno (*Accepted*): 22. 12. 2010.