

Pregled talnih lastnosti, ki vplivajo na poškodbe tal pri strojni sečnji

Forest Soil Properties, Relevant for Soil Damage During Forest Operation

Primož BRATUN¹, Milan KOBAL²

Izvilleček:

Bratun, P., Kopal, M.: Pregled talnih lastnosti, ki vplivajo na poškodbe tal pri strojni sečnji; Gozdarski vestnik, 76/2018, št. 5–6. V slovenščini s izvillečkom in povzetkom v angleščini, cit. lit. 41. Prevod Breda Misja, jezikovni pregled slovenskega besedila Marjetka Šivic.

V prvem delu prispevka so predstavljene glavne vrste poškodb gozdnih tal: zbijanje tal, premeščanje tal ter nastanek kolesnic. V drugem delu prispevka so opisani dejavniki občutljivosti gozdnih tal za poškodbe, ki smo jih razdelili na primarne talne dejavnike (tekstura tal, organska snov tal, zrak v tleh, voda v tleh) ter sekundarne talne dejavnike (struktura tal, poroznost tal, gostota tal, prepustnost tal za vodo in zrak). Navedene so nekatere možnosti povečanja odpornosti gozdnih tal proti poškodbam. Pomembna faza strojne sečnje je načrtovanje dela. Zaradi heterogenosti gozdnih tal je nemogoče vnaprej natančno prostorsko opredeliti bolj in manj primerna delovišča za strojno sečnjo. Kot smiseln kriterij primernosti strojne sečnje na določenem rastišču predlagamo še sprejemljivo poškodovanost tal in sestoja – primeren kazalnik se zdi dovoljena globina kolesnic.

Ključne besede: poškodbe gozdnih tal, strojna sečnja, organska snov, tekstura tal, voda v tleh

Abstract:

Bratun, P., Kopal, M.: Forest Soil Properties, Relevant for Soil Damage During Forest Operation; Gozdarski vestnik (Professional Journal of Forestry), 76/2018, vol 5-6. In Slovenian, abstract and summary in English, lit. quot. 41. Translated by Breda Misja, proofreading of the Slovenian text Marjetka Šivic.

The first part of this article presents the main kinds of forest soil damage: soil compaction, soil displacement, and emergence of rut. In the second part of the article, we describe the factors of forest soil sensitivity to damage, which we split into basic soil factors (soil texture, soil organic matter, air in the soil, soil water) and secondary soil factors and variables (soil structure, soil porosity, soil density, air and water permeability of soil). Some factors of increasing the forest soil resistance to damage are listed. Planning of work is an important phase of machine felling. Due to the heterogeneity of forest soil it is impossible to accurately spatially determine more or less appropriate working sites. We propose still acceptable stand damage as an additional criterion – allowed rut depth seems to be an appropriate index.

Key words: forest soil damage, machine felling, organic matter, soil texture, soil water

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Z vse pogostejšo rabo strojne sečnje za delo v gozdu se tudi v Sloveniji srečujemo z nekaterimi negativnimi vplivi, ki jih ima strojna sečnja na gozdni ekosistem. Poškodbe tal, ki jih izpostavljamo v prispevku, so že več desetletij pogosta tema raziskav vpliva strojne sečnje na tla v tujini, ki so procese zbijanja, premeščanja ipd. obrav-

navale z različno mero uspešnosti (npr. Lull, 1959; Dickerson, 1976; Howard in sod., 1981; Wästerlund, 1985; Forelich, 1987). Pri tem so v gozdarstvu lahko uporabni tudi nekateri izsledki raziskav v kmetijstvu, vendar jih je treba pri prenosu v gozdarstvo obravnavati kritično, predvsem z vidika celostne obravnave gozdnega rastišča in gozdnega sestoja na eni strani ter organizacije gozdarskih del na drugi.

¹ P. B., mag. inž. gozd., Šmarje - Sap, SI-1000 Ljubljana, Slovenija. primoz.bratun@hotmail.com

² Doc. dr. M. K., univ. dipl. inž. gozd., Biotehniška

fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire. Večna pot 83, SI-1000 Ljubljana, Slovenija. milan.kobal@bf.uni-lj.si

Specifičnost talnih razmer v gozdovih je posledica velike heterogenosti (naklon, relief, skalovitost) in relativne ohranjenosti gozdnih tal (fizične in kemijske lastnosti, vegetacija, vertikalna zgradba tal, organska snov, mikrobiološka aktivnost) ter specifičnega načina poseganja v gozdni ekosistem, kamor sodi tudi uporaba strojne sečnje.

2 VRSTE POŠKODB GOZDNIH TAL 2 SORTS OF FOREST SOIL DAMAGE

Poškodbe gozdnih tal (Slika 1) nastanejo zaradi dinamičnih pritiskov kolesa ali gosenice na podlago, kar povzroča vertikalne in strižne sile (Horn in sod., 2007). Ob prehodu stroja se z delovanjem sil na podlago le-ta začne deformirati, kar povzroči glavne poškodbe tal: zbijanje, premeščanje in nastanek kolesnic (Naghdi in sod., 2009; Ampoorter in sod., 2012). Omenjene poškodbe lahko povzročijo tudi druge negativne posledice: površinsko zastajanje vode, povečan površinski odtok, nevarnost površinske in globinske erozije

ter poškodbe koreninskih sistemov (Matthies in sod., 2003; Hillel, 2004; Wilpert in Schäffer, 2006). Negativni vplivi na kakovost tal za rast in produktivnost ob večjih razsežnostih veljajo za degradacijo rastišča (Froelich, 1979; Brais in Camiré, 1998; Hillel, 2004). Natančna ponazoritev vpliva stroja na podlago je v praksi zelo težavna zaradi heterogenosti matične podlage, plastičnosti tal, spremenljivih položajev stroja med vožnjo in različnih hitrosti prehoda stroja. Kljub temu lahko za lažje razumevanje opredelimo dejavnike, ki so pomembni za nastanek poškodb tal. Pri tem Košir (2010) opredeljuje dejavnike podlage, kolesa, način prenosa sile na podlago, velikosti stroja in bremena, naklon ter relief.

2.1 Zbijanje tal 2.1 Soil compaction

Zbijanje tal je glavna poškodba tal in je proces zgoščevanja talnih delcev ob pritisku koles oz. gosenic stroja, ki na podlago delujejo s silo teže.



Slika 1: Gozdna vlaka (foto: M. Kobal)
Figure 1: Forest skid trail (Photo: M. Kobal)

Pri tem se poveča gostota tal in iztisne zrak oz. voda iz večjih por, ki se zapolnijo s talnimi delci (Smith, 1995; Aragon in sod., 2000; Hillel, 2004). Povečanje števila prehodov vodi v logaritemsko večanje gostote tal (McNabb in sod., 2001; Godeša, 2010). Učinek zbijanja slabi z globino tal, pri večjem številu prehodov pa se najprej poškodujejo vrhnje plasti tal. Horn in sod. (2007) so ob proučevanju vplivov stroja za sečnjo na gozdna tla ugotovili največjo stopnjo zbijanja v fazi spe-ljevanja, dodatne obremenitve tal je povzročala obdelava dreves na mestu.

Zbijanje tal negativno vpliva na kakovost rastišča, saj zmanjšuje delež vode v večjih talnih porah in povečuje delež vode v manjših, kjer je rastlinam težje dostopna (Richard in sod., 2001). Sočasno je v zbitih tleh zaradi povečanja gostote otežena razrast korenin (Wästerlund, 1985).

2.2 Premeščanje tal

2.2 Soil displacement

Premeščanje tal je mešanje, premikanje in zama-zanje (vrhnjih) slojev tal, ki nastaja kot posledica strižnih sil zaradi vrtenja in zdrsa kolesa (Slika 2). Dodatno premeščanje tal povzroča vertikalni pritisk, ki se v tleh prenaša tridimenzionalno in povzroča izpodrivanje tal izpod koles (Horn in sod., 2007). Premeščanje tal in zdrs delujeta na izpostavljene zgornje plasti tal in povzročata poškodbe drevesnih korenin (Matthies in sod., 2003). Premeščanje tal je lahko problematično predvsem na erozijsko ogroženih območjih, kjer vrhnje organske plasti varujejo tla pred čezmernim izpiranjem (Elliot in sod., 1996; Cambi in sod., 2016). Na plitvih tleh lahko izpostavljanje eroziji povzroči uničenje rodovitnega dela tal.



Slika 2: Premeščanje tal (foto: M. Kobal)

Figure 2: Soil displacement (Photo: M. Kobal)

2.3 Kolesnice

2.3 Ruts

Kolesnice so poškodbe tal, ki nastanejo z udiranjem tal pod težo stroja (Slika 3). So posledica zbijanja, premeščanja tal ter specifičnih talnih razmer, ko je zaradi velike vsebnosti vlage v tleh s fino teksturo pospešeno (vertikalno) premeščanje tal (Ampoorter in sod., 2012). Značilne točke v prečnem prerezu kolesnice (začetek grebena kolesnice, vrh grebena kolesnice, dno kolesnice) so uporabni praktični pokazatelji poškodb na gozdnih tleh (Mali in Košir, 2007). Med nastankom globokih kolesnic lahko nastanejo večje mehanske poškodbe koreninskih sistemov dreves (Matthies in sod., 2003). Lahko povečajo tveganje za delovanje erozije, intenzivnost površinskega odtoka ali pa so (skupaj z zbijanjem) vzrok za zastajanje vode na površini (Sheridan, 2003).

3 DEJAVNIKI OBČUTLJIVOSTI GOZDNIH TAL ZA POŠKODBE

3 FACTORS OF SOIL SENSITIVITY TO DAMAGE

3.1 Primarni talni dejavniki nastanka poškodb: tekstura tal, organska snov v tleh, zrak v tleh, voda v tleh

3.1 Basic soil damage properties: soil texture, soil organic matter, air in soil, soil water

Tekstura tal je porazdelitev delcev mineralnega dela tal po velikostnih razredih. Glavni razredi so: pesek (< 2mm), melj (< 0.05) in glina (< 0,002 mm). Našteti razredi z različnimi deleži tvorijo kombinacije peščenih, ilovnatih, meljastih in glinastih tal (Kimmins, 2004). Poškodbe tal nimajo večjega vpliva na teksturo, medtem ko tekstura lahko pomembno vpliva na nastanek poškodb (Richard in sod., 2001).



Slika 3: Kolesnice na Pohorju (foto: M. Kobal)

Figure 3: Ruts on Pohorje (Photo: M. Kobal)

V gozdnih tleh najdemo organsko snov predvsem na površju v plasteh različno razgrajenega rastlinskega opada (Kimmins, 2004). Delež organske snovi v gozdnih tleh je zelo spremenljiv in v mineralnem delu tal znaša do 35 %. Urbančič in sod. (2007) so v raziskavi tal na ploskvah intenzivnega monitoringa gozdnih ekosistemov v Sloveniji ter na raziskovalnih ploskvah v Rajhenavskem rogu in Snežni jami zabeležili deleže organske snovi v mineralnem delu tal od 10,4 % do 1,7 %, pri čemer se je delež organske snovi zmanjševal z globino tal. Večji delež organske snovi v tleh zmanjšuje gostoto in povečuje poroznost tal, prepustnost tal za vodo in zrak (Arthur in sod., 2013).

Zrak v tleh prihaja iz atmosfere v tla preko omrežja talnih por in mora za uspevanje rastlin vsebovati dovolj kisika. Talne zračne razmere so odvisne predvsem od stopnje prehodnosti zraka v tleh (vpliv teksture tal, strukture tal, poroznosti tal, organske snovi v tleh, gostote tal, idr.). Zračne razmere v tleh so zelo okrnjene ob nasičenju tal z vodo ter v zbitih tleh (Hillel, 2004; Arthur in sod., 2013).

Voda v gozdnih tleh ima od vseh spremenljivk verjetno najpomembnejšo in hkrati najbolj kompleksno vlogo. Njeno dinamiko večinoma določajo sile med vodnimi molekulami in talnimi delci ter sile gravitacije. V tleh se trajno obdrži le voda, ki je na talne delce vezana bolj od sile teže (točka poljske kapacitete). Taka voda je rastlinam na voljo dlje, vendar rastline določenega deleža (zaradi prevelike vezave na talne delce) ne morejo izkoristiti (Kimmins, 2004). Zbijanje lahko povečuje delež rastlinam nedostopne vode (Richard in sod., 2001). Na rastiščne razmere in občutljivost tal na zbijanje pomembno vplivajo količina in porazdelitev vode v tleh ter agregatno stanje vode v tleh (Hillel, 2004). Prisotnost vode v tleh ne vpliva enoznačno na odpornost tal na poškodbe in je odvisna predvsem od sovplivanja z drugimi dejavniki (tekstura tal, struktura tal, gostota tal, poroznost tal, idr.). Lahko predpostavimo, da pri tleh, ki so že sicer občutljiva za zbijanje, ima voda pomembnejšo vlogo kot pri tleh, ki niso tako občutljiva za zbijanje (Smith, 1995).

3.2 Sekundarni talni dejavniki in spremenljivke: struktura tal, poroznost tal, prepustnost tal za vodo in zrak, gostota tal

3.2 Composite soil factors and variables: soil structure, soil porosity, soil density, air and water permeability of soil

Struktura tal je povezanost talnih delcev v različno obstojne skupke – agregate, ki jih povezujejo glineni delci (vpliv teksture tal), organska snov, druge kemične spojine ter cikli vlaženja in izsuševanja (voda v tleh). Nastajanje strukturnih agregatov dodatno pospešujeta talna favna in koreninska aktivnost rastlin. Struktura tal zelo vpliva na prehodnost zraka in vode v tleh (poroznost, prepustnost) ter s tem na rastiščne razmere (Kimmins, 2004). Na strukturne značilnosti tal negativno vplivata visoka vlažnost in zbijanje tal (Hillel, 2004).

Poroznost tal je delež in porazdelitev por v tleh – prostora, ki ni zapoljen s talnimi delci. Med talnimi delci in njihovimi agregati so različno velike pore, zato poroznost lahko delimo na strukturno poroznost (oz. makroporoznost) in teksturno (oz. mikroporoznost). Poroznost je kakovosten indikator rastiščnih razmer, saj neposredno pogojuje prehodnost vode in zraka v tleh. V tleh z idealno poroznostjo so vse velikosti por in tako omogočajo prehod zraka in tudi zadrževanje rastlinam dostopne vode. Ob zbijanju tal se strukturna poroznost tal zmanjša, delež majhnih talnih por in delež rastlinam nedostopne vode pa se lahko povečata (Dickerson, 1976; Richard in sod., 2001; Naghdi in sod., 2009). Od dejavnikov strukture in poroznosti tal je zelo odvisna prepustnost tal za vodo in zrak (Hillel, 2004; Schack-Kirchner in sod., 2007). Ob nasičenju tal z vodo (Horn in sod., 2007) in s prehodi mehanizacije se poroznost po navadi zmanjša (Matthies in sod., 2003; Wilpert in Schäffer, 2006; Arthur in sod., 2013). Kombinacija pritiska in zdrsa koles ter visoke vlažnosti lahko povzročita popoln razpad strukturnih agregatov na površini tal in tako nastane gost površinski sloj brez strukture, ki onemogoča prehajanje vode in zraka v tla (Hillel, 2004; Kimmins, 2004).

V literaturi je gostota tal pogosto merjen dejavnik zbijanja (Smith, 1995). Vrednosti gostote tal so zelo odvisne od teksture, vlage in organske

snovi v tleh (Šušnjar in sod., 2006; Kobal in sod., 2011) ter navadno nihajo od 1,00 Mg/m³ do 2,00 Mg/m³. Prehodi mehanizacije povečujejo gostoto tal (Preglednica 1).

3.3 Tlotvorni dejavniki

3.3 Soli-formating factors

Na opisane parametre tal neodvisno vpliva zadnja skupina dejavnikov – tlotvorni dejavniki, ki s svojim delovanjem vplivajo na občutljivost gozdnih tal za poškodbe. Tlotvorni dejavniki, kot jih navaja Stritar (1990), so: matična podlaga, relief, klima, organizmi, čas in človek. Pri tem relief s strmino pogosto pogojuje globino tal. Plitka tla na strmih pobočjih so lahko občutljiva za premeščanje tal in erozijo (Matthies in sod., 2003; Naghdi in sod., 2009), globlja tla pa imajo

potencial za večjo razsežnost poškodb. Podnebje s spreminjajočim pogojevanjem vodnih razmer in temperatur intenzivno spreminja občutljivost tal za nastanek poškodb (Šušnjar in sod., 2006). Na drugi strani matična podlaga, organizmi in čas dolgoročno vplivajo na temeljne lastnosti teksture, skeleta in organske snovi (Hillel, 2004).

4 DEJAVNIKI POVEČANJA ODPORNOSTI GOZDNIH TAL ZA POŠKODBE

4 FACTORS OF INCREASING THE FOREST SOIL RESISTANCE TO DAMAGE

Na odpornost vplivajo tako posamezni dejavniki kot njihove interakcije, pri čemer poudarjamo teksturo tal in vlago v njih. Peščena in peščeno ilovnata tla

Preglednica 1: Ugotovljene vrednosti nekaterih sestavljenih talnih parametrov in njihovih sprememb v literaturi
Table 1: Established values and changes of some composite soil parameters in the literature

Poroznost	Vrednost	Vir
Volumski delež por v gozdnih tleh	35 % – 65 %	Kimmins, 2004
Kritična meja zmanjšanja deleža por za rastiščne razmere	10 % 15 %	Froelich, 1989 Quesnel in Curran, 2000
Zmanjšanje deleža por v kolesnicah po večkratnih prehodih strojev	28 % 25 % 68 % ¹	Matthies in sod., 2003 Godeša, 2010 Dickerson, 1976
Prepustnost		
Zmanjšanje prepustnosti zraka po prehodu stroja za sečnjo	30 % - 40 %	Horn in sod., 2007
Gostota tal		
Kritično povečanje gostote za rastiščne razmere	15 %	Ampoorter in sod., 2012
Povečanje gostote tal s prehodi mehanizacije	< 35 % 8 % – 10 % ² 13 % – 23 % ³ 21 %, 14 % ² 8 % – 15 % ⁴ 18 % – 35 % ⁵ 25 % ⁶ 20 % 9 % – 18 %	Matthies in sod., 2003 Brais in Camire, 1998 Eliasson, 2005 Vidrine in Lanford, 1999 Block in sod, 2002 Agherkakli in sod., 2010 Page-Dumroese, 1993 Dickerson, 1976; Godeša, 2010; Froelich, 1979
¹ Delež makropor	⁴ Na globinah 10 in 20 cm, pozimi in poleti	
² Na različnih globlinah	⁵ Na naklonih pod in nad 20 %	
³ Ob prisotnosti sečnih ostankov	⁶ Lahka pepelnata tla	

so odpornejša od ilovnatih, meljastih in glinastih tal (Smith, 1995, idr.). Ampoorter in sod. (2012) navajajo nekoliko manjšo odpornost peščenih in peščeno ilovnatih tal ob zelo nizkih in visokih deležih vode. Odpornost finih ilovnatih, meljastih in glinastih tal v suhem stanju je zelo velika (Hillel, 2004; Košir, 2010), vendar se s povečevanjem vlage zelo zmanjša in pri okoli 80 % poljske kapacitete (Aragón in sod., 2000; Hillel, 2004) doseže največjo občutljivost za zbijanje. Nadaljnje povečanje vsebnosti vode v tleh finih tekstur poveča občutljivost tal za poškodbe premeščanja tal in nastanek kolesnic (Ampoorter in sod., 2012).

Od opisanih primarnih talnih dejavnikov lahko odpornost tal proti poškodbam (predvsem proti zbijanju) izboljša tudi vsebnost organske snovi. Le-ta ima v zgornjem delu tal, vključno s koreninsko mrežo vegetacije, lahko ob prehodu stroja vlogo zaščitne oz. blažilne plasti, ki jo lahko okrepimo s polaganjem sečnih ostankov (Soane, 1990; Košir, 2010; Ampoorter in sod., 2012; Cambi in sod., 2016). Tla z večjo gostoto so bolj odporna proti zbijanju, čeprav lahko večja gostota tal pomeni slabše rastiščne razmere. Tako Ampoorter in sod. (2012) predposta-

vljajo, da zbijanje pri določenih vrednostih gostote ($1,4 \text{ Mg/m}^3$) postane manj problematično zaradi zmanjšanja deleža še stisljivih por v tleh (Powers in sod., 2005).

Med tlotvornimi dejavniki na odpornost tal na poškodbe poglavito vpliva temperatura. Globoka zamrznjenost tal zagotavlja odpornost pred vsemi vrstami poškodb, ne glede na vsebnost vode in teksturo tal. Na drugi strani so tla finih tekstur med taljenjem izdatno občutljiva za poškodbe (Šušnjar in sod., 2006). Matična podlaga vpliva na delež skeleta v tleh, ki povečuje odpornost tal proti poškodbam (Košir, 2010). Matična podlaga obenem določa kemične lastnosti tal; tako npr. prisotnost karbonatnih ionov pospešuje nastanek strukturnih agregatov, ki povečujejo nosilnost tal (Cambi in sod., 2016).

5 RAZPRAVA IN ZAKLJUČKI

5 DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Ob napredujoči uporabi strojne sečnje ostaja človeški vpliv na dejavnike odpornosti tal proti poškodbam relativno majhen. Kot pozitiven primer reševanja te problematike omenjamo



Slika 4: Gozdna tla v suhem obdobju (foto: M. Kopal)
Figure 4: Forest soil in the dry season (photo: M. Kopal)

uporabo sečnih ostankov, ki so v več raziskavah zmanjšali poškodbe ob prevozih mehanizacije (Page-Dumroese, 1993; Vidrine in Lanford., 1999; Mali in Košir, 2007). Nekatere možnosti zmanjšanja poškodb se odpirajo na tehnološkem področju, kjer izpostavljamu pozitiven vpliv uporabe kolesnih gosenic (Sakai in sod., 2008).

Izpostaviti velja področje načrtovanja dela, kjer lahko z upoštevanjem obravnavanih dejavnikov odločilno vplivamo na poškodovanost tal po strojni sečnji. Ker izvedba strojne sečnje izpostavlja poškodbam velik del sestojne površine, je v sestojih smiselno določiti sistem stalnih sečnih poti (Wilpert in Schäffer, 2006). Odločitev za izvedbo del mora zaradi heterogenosti gozdnih tal upoštevati konkretne lokalne razmere z obravnavanimi dejavniki občutljivosti tal za poškodbe. Pri tem so lahko koristne metode za hitro ocenjevanje občutljivosti tal, upoštevanje izkušenj iz predhodnih posegov ter beleženje poškodb in razmer, v katerih so nastale kot pomoč ob prihodnjih posegih.

Pri natančnem prostorskem opredeljevanju primernosti gozdnih rastišč za strojno sečnjo na ravni celotne Slovenije je na podlagi trenutno zbranih in dostopnih podatkov potrebno zlasti upoštevati nekatere omejitve le teh. Pedološka karta Slovenije v merilu 1:25000 za gozdni prostor zelo slabo drži (npr. celoten Nanos je ena pedokartografska enota!), hkrati pa je merilo 1 : 25000 za operativno klasifikacijo tal pregrubo. Za operativno rabo (sečno-spravilno oz. tehnološko načrtovanje) bi bilo pa potrebno poznati na mikro nivoju karakteristike tal za načrtovanje in rabo sečnih poti v detajlu. Dejstvo je tudi, da se v gozdovih nahaja le 32,7 % ($n = 539$) vseh izkopanih talnih profilov. Prav tako bi bilo v takšno kartiranje primernosti rastišč vključiti tudi vpliv skeleta, žal pa ti podatki na ravni Slovenije ne obstajajo.

Zelo zagovarjamo, da se kot kriterij vpliva strojne sečnje na gozd in kot merila za njeno uporabo določi maksimalno dovoljeno poškodovanost rastišča in sestoja po zaključenem delu – to se nam zdi edino smiselno. Mnogo pomembnejše od samih lastnosti tal se nam za poškodovanost tal zdijo človekovi vplivi, npr. število prehodov stroja, način dela strojnika, teža stroja, pnevmatike / gosenice, itd.

6 POVZETEK

Z vse pogostejšo rabo strojne sečnje za delo v gozdu se tudi v Sloveniji srečujemo z nekaterimi negativnimi vplivi, ki jih strojna sečnja povzroči v gozdnem ekosistemu. Specifičnost talnih razmer v gozdovih je posledica velike heterogenosti in relativne ohranjenosti gozdnih tal ter specifičen način poseganja v gozdni ekosistem, kamor sodi tudi uporaba strojne sečnje. Poškodbe gozdnih tal se pojavljajo zaradi dinamičnih pritiskov kolesa ali gosenice na podlago, kar povzroča vertikalne in strižne sile. Ob prehodu stroja se z delovanjem sil na podlago le-ta prične deformirati, kar povzroči glavne poškodbe tal: zbijanje, premeščanje in nastanek kolesnic.

Zbijanje tal velja za osnovno poškodbo tal in je proces zgoščevanja talnih delcev ob pritisku koles ali gosenic stroja, ki na podlago delujejo s silo teže. Pri tem se povečuje gostota tal in iztiska zrak oz. voda iz večjih por, ki se zapolnijo s talnimi delci. Premeščanje tal zajema mešanje, premikanje in zamazanje (vrhnjih) slojev tal in nastaja kot posledica strižnih sil zaradi vrtenja in zdrsa kolesa. Dodatno premeščanje tal povzroča vertikalni pritisk, ki se v tleh prenaša tridimenzionalno in povzroča izpodrivanje tal izpod koles. Kolesnice so ugreznine v tleh, ki jih povzroča udiranje tal zaradi teže stroja. Njihov nastanek je posledica zbijanja, premeščanja tal ter specifičnih razmer, ko je zaradi velike vsebnosti vlage v tleh s fino teksturo pospešeno (vertikalno) premeščanje tal. Značilne točke kolesnice (začetek grebena, vrh grebena kolesnice, dno ugreznine) so uporabni praktični pokazatelji poškodb na gozdnih tleh.

Med primarne talne dejavnike občutljivosti gozdnih tal za poškodbe štejemo teksturo tal, organsko snov tal, zrak v tleh in vodo v tleh. Tekstura tal je porazdelitev delcev mineralnega dela tal po velikostnih razredih. Poškodbe tal nimajo večjega vpliva na teksturo, medtem ko tekstura lahko vpliva na možnost nastanka poškodb. Organsko snov v gozdnih tleh najdemo predvsem na površju v plasteh različno razgrajenega rastlinskega opada. Delež organske snovi v mineralnem delu gozdnih tal je zelo variabilen. Večji delež organske snovi v tleh zmanjšuje gostoto in povečuje poroznost, prepustnost tal za vodo in zrak. Zračne razmere v tleh so zelo okrnjene ob viških vode v tleh in

pogosto ob zbijanju. Voda v gozdnih tleh ima od vseh spremenljivk verjetno najpomembnejšo in hkrati najbolj kompleksno vlogo. Njeno dinamiko večinoma določajo sile med vodnimi molekulami in talnimi delci ter sile gravitacije. Na rastiščne razmere in občutljivost tal za zbijanje pomembno vplivajo spremembe agregatnega stanja, količine in porazdelitve vode. Prisotnost vode v tleh ne vpliva enoznačno na odpornost tal in je odvisna predvsem od sovplivanja vode z drugimi spremenljivkami. Predpostavimo lahko kvečjemu, da pri tleh, ki so že sicer občutljiva za zbijanje, voda igra pomembnejšo vlogo, kot pri tleh, ki niso tako občutljiva za zbijanje.

Med sekundarne talne dejavnike občutljivosti gozdnih tal za poškodbe štejemo strukturo tal, poroznost tal, gostoto tal, prepustnost tal za vodo in zrak. Struktura tal je povezanost talnih delcev v različno obstojne skupke – agregate, ki jih povezujejo glineni delci (tekstura), organska snov, druge kemične spojine ter cikli vlaženja in izsuševanja. Struktura tal zelo vpliva na prehodnost zraka in vode v tleh (poroznost, prepustnost) ter s tem na rastiščne razmere. Negativen vpliv na strukturne značilnosti tal povzročata visoka vlažnost in zbijanje tal. Poroznost tal je delež in porazdelitev por v tleh – prostora, ki ni zapolnjen s talnimi delci. Poroznost je kakovosten pokazatelj rastiščnih razmer, saj neposredno pogojuje dostopnost vode in zraka v tleh. Ob zbijanju se zmanjšuje strukturna poroznost (oz. makroporoznost), povečujeta se lahko delež rastlinam nedostopne vode in delež mikropor. Kombinacija pritiska in zdrsa koles ter visoke vlažnosti lahko povzroči popoln razpad površinskih strukturnih agregatov in tako nastane gost površinski sloj brez strukture, ki onemogoča prehajanje vode in plinov v tla.

Na odpornost vplivajo tako posamezni dejavniki kot njihove interakcije, pri čemer poudarjamo teksturo in vlago v tleh. Peščena in peščeno ilovnata tla so odpornejša od ilovnatih, meljastih in glinastih tal. Odpornost finih ilovnatih, meljastih in glinastih tal v suhem stanju je zelo velika, vendar se s povečevanjem vlage hitro manjša in pri okoli 80 % poljske kapacitete doseže največjo občutljivost za zbijanje. Od opisanih temeljnih dejavnikov lahko odpornost tal proti poškodbam zaradi zbijanja izboljša tudi vsebnost organske snovi, ki deluje kot zaščitna oz.

blažilna plast (koncept sečnih ostankov). Dodatna zaščita je lahko tudi koreninska mreža vegetacije. Na splošno so tla z večjo gostoto odpornejša proti zbijanju. Med tlotvornimi dejavniki na odpornost poglavito vpliva temperatura. Zamrznjenost tal zagotavlja odpornost pred vsemi vrstami poškodb, ne glede na vsebnost vode in teksturo tal, čeprav so tla finih tekstur med taljenjem zelo občutljiva. Kompleksnejši je vpliv matične podlage, ki vpliva na povečanje odpornosti z večjim deležem skeleta in kemičnimi lastnostmi (prisotnost karbonskih ionov), ki pospešujejo nastanek strukturnih agregatov.

6 SUMMARY

Increasing employment of machine felling in forest operations brings along some negative impacts, caused to the forest ecosystem by machine felling, also in Slovenia. Specifics of soil conditions in the forests are a consequence of a high heterogeneity and relative preservation of forest soil and specific way of intervention in the forest ecosystem, which comprises also the employment of machine felling. Forest soil damage occurs due to the dynamic pressure of wheel or caterpillar tracks on the grounding, what causes vertical and shear forces. On passage of a machine, the impact of forces on the grounding begins to deform it and this causes the main damage to the soil: compaction, displacement and establishing of ruts.

Soil compaction is considered to be the basic soil damage. It is a process of compacting soil particles at the pressure of wheels or caterpillar tracks of a machine, applying weight to the grounding. Thereby, the soil density increases and air or water is squeezed out of major pores that fill with soil particles. Soil displacement comprises mixing, moving and putting of the (upper) soil layers and occurs as a consequence of shear forces due to the rotation and slide of a wheel. Additional soil displacement is caused by the vertical pressure, which is transferred three-dimensionally in the soil and causes ousting the soil from under the wheels. Ruts are groves in the soil, caused by sinking of the soil due to the weight of the machine. Their occurrence is a consequence of soil compaction and displacement and of specific conditions, when high moisture

content in the soil with fine structure (vertical) displacement of soil is accelerated. Characteristic rut points (beginning of the ridge, top of the rut ridge, bottom of the groove) are useful practical indicators of forest soil damage.

Among the basic factors of soil sensitivity to damage are soil texture, soil organic matter, air in the soil, and soil water. Soil texture is distribution of particles of mineral soil part by size classes. Soil damages have no major impact on the texture, while the texture can affect the possibility of damage occurrence. Organic matter in forest soil is found above all on the surface in the layers of diversely decomposed plant material. The share of organic matter in the mineral part of forest soil is very variable. A larger share of organic matter in the soil decreases the density and increases porosity, air and water permeability of the soil. Air conditions in the soil are much deteriorated at surplus of water in the soil and often at compaction. Water in the forest floor probably plays the most important and, at the same time, the most complex role of all variables. Its dynamic is mostly determined by the forces between water molecules and soil particles and gravitational forces. Site conditions and soil sensitivity to compaction are significantly affected by the changes of the state of matter, quantity, and distribution of water. Presence of water in the soil does not affect the soil sensitivity unambiguously and it depends above all on the interaction of water with other variables. At best, we can presume that with the soil, which is already sensitive to compaction, water plays a more important role than with the soil, which is not so sensitive to compaction.

Among the secondary soil factors of the sensitivity of forest soil to damage are soil structure, soil porosity, soil density and air and water permeability of soil. Soil structure is connection of soil particles into diversely durable clusters – aggregates, which are connected by loam particles (texture), organic matter, other chemical compounds, and moisturizing and drainage cycles. Soil structure much affects transition of air and water in the soil (porosity, permeability) and thereby the site conditions. A negative impact on the structural characteristics of the soil is

caused by high humidity and soil compaction. Soil porosity is the share and distribution of pores in the soil – the space which is not filled with the soil particles. Porosity is a good indicator of site conditions, since it directly conditions accessibility of water and air in the soil. On compaction, the structural porosity (or macroporosity) decreases and the share of water, inaccessible to plants, and of micropores can increase. The combination of wheel pressure and slide and high humidity can cause a total disintegration of the surface structural aggregates and thus a dense surface layer without structure, preventing water and gas transition into the soil, is formed.

Resistance is affected both by individual factors as by their interactions, whereby we emphasize texture and moisture in the soil. Sand and sand-loam soils are more resistant than the loam, silt and clay soil. The resistance of fine loam, silt and clay soil in dry state is very high, but it decreases rapidly with the increasing humidity and achieves its highest sensitivity to compaction at around 80 % of field capacity. Among the described basic factors, soil resistance against compaction damage can be improved also by organic matter content, which acts as a protection or soothing layer (felling debris concept). An additional protection can also be formed by the vegetation root network. Soil with higher density is generally more resistant against compaction. Among the soil-forming factors, the temperature predominantly affects the resistance. Soil freezing ensures resistance against all kinds of damage regardless of water content and soil texture, although fine texture soils are very sensitive while thawing. More complex is the impact of parent materials which affect the increase of resistance through a higher share of the skeleton and chemical features (presence of calcareous ions) accelerating the emergence of structural aggregates.

7 ZAHVALA

7 ACKNOWLEDGEMENT

Zahvaljujemo se dr. Tomažu Kralju za končni pregled prispevka. Delo je nastalo v okviru raziskovalnega projekta CRP V4-1624: Vpliv strojne sečnje na gozd in določitev meril za njeno uporabo.

8 VIRI**8 REFERENCES**

- Agherkakli B., Najafi A., Sadeghi, S.H. 2010. Ground based operation effects on soil disturbance by steel tracked skidder in a steep slope of forest. *Journal of Forest Science*, 56 (6): 278–284.
- Ampoorter E., Schrijver A., Nevel L., Hermy M., Verheyen K. 2012. Impact of mechanized harvesting on compaction of sandy and clayey forest soils: results of a meta-analysis. *Annals of Forest Science*, 69, 5: 533–542.
- Aragon A., M.G. Garcia R.R. Filgueira, Ya.A. Pachepsky. 2000. Maximum compactibility of Argentina soils from the Proctor test: The relationship with organic matter and water content. *Soil Tillage Research*, 56:197–204.
- Arthur E., Schjønning P., Moldrup P., Tuller M., de Jonge L.W. 2013. Density and permeability of a loess soil: long-term organic matter effect and the response to compressive stress. *Geoderma* 193–194: 236–245.
- Block R., Van Rees K.C.J., Pennock D.J. 2002. Quantifying harvesting impacts using soil compaction and disturbance. *Soil Science Society of America Journal*, 66: 1669–1676.
- Brais S., Camiré, C. 1998. Soil compaction induced by careful logging in the claybelt region of northwestern Quebec (Canada). *Canadian Journal of Soil Science*, 78: 197–206.
- Cambi M., Certini G., Fabiano F., Foderi C., Laschi A., Picchio R. 2016. Impact of wheeled and tracked tractors on soil physical properties in a mixed conifer stand. *iForest – Biogeosciences and Forestry* 9(1): 89–94.
- Dickerson B.P. 1976. Soil compaction after tree-length skidding in northern Mississippi. *Canadian Journal of Soil Science*, 40: 965–966.
- Eliasson L. 2005. Effects of forwarder tyre pressure on rut formation and soil compaction. *Silva Fennica*, 39: 549–557.
- Elliot W. J., Page-Dumroese D., Robichaud P. R. 1996. 12 The Effects of Forest Management on Erosion and Soil Productivity. *Symposium on Soil Quality and Erosion Interaction*: 16 str.
- Froehlich H.A. 1979. Soil compaction from logging equipment: effects on growth of young ponderosa pine. *Journal of Soil and Water Conservation*, 34: 276–278.
- Froehlich H. 1989. Soil damage, tree growth and mechanization of forest operations (USA). In *Proceedings of the seminar on «Impact of mechanisation of forest operations to the soil*: 77–82.
- Godeša T. 2010. Zbijanje njivskih tal kot posledica večkratnih prehodov vozil. V: *Novi izzivi v poljedelstvu 2010: zbornik simpozija*. Kocjan Ačko D., Čeh B. (ur.). Rogaška Slatina, 2. in 3. december 2010: 89–95.
- Hillel D. 2004. *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier, Amsterdam: 494 str.
- Horn R., Vossbrink J., Peth S., Becker S. 2007. Impact of modern forest vehicles on soil physical properties. *Forest Ecology and Management*, 248: 56–63.
- Howard R. F., Singer M. J., Frantz G. A. 1981. Effects of soil properties, water content and compactive effort on the compaction of selected California forest and range soils. *Soil Science Society of America Journal*, 45: 231–236.
- Intihar M. 2014. Poškodbe tal po sečnji in spraviu s kombiniranim strojem HSM 805F. Magistrsko delo. Univerza v Ljubljani, Biotehnična fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 139 str.
- Kimmins J. P. 2004. *Forest ecology: a foundation for sustainable forest management and environmental ethics in forestry*. Upper Saddle River, N. J., Prentice Hall, 3rd ed.: 596 str.
- Kobal M., Urbančič M., Potočič N., de Vos B., Simončič P. 2011. Pedotransfer functions for bulk density estimation of forest soils = Pedotransfer funkcije za projenu gustoče šumskih tala. *Šumarski list*, ISSN 0373-1332, 2011, god. 135, br. 1/2: 19–27.
- Košir B. 2010. Gozdna tla kot usmerjevalec tehnologij pridobivanja lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 80 str.
- Lull H. W. 1959. Soil compaction on forest and range lands. *For. Serv., U.S. Dep. Agric.: Washington, D.C., Misc. Publ. No. 768*: 1–33.
- Mali B., Košir, B. 2007. Poškodbe tal po strojni sečnji in spraviu lesa z zgibnim polprikoličarjem. *Gozdarski vestnik*, 65, 3: 131–142.
- Matthies D., Wolf B., Kremer J., Ohrner G. 2003. Comparative study of the impact of wheeled and tracked forest machines on soil and roots. *Austro2003: High Tech Forest Operations for Mountainous Terrain*, October 5-9, 2003, Schlägl - Austria: 1–8.
- McNabb D.H., Startsev A.D., Nguyen, H. 2001. Soil wetness and traffic level effects on bulk density and air-filled porosity of compacted boreal forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, 65:1238–1247.
- Naghdi R., Bagheri I., Lotfalian M., Setodeh B. 2009. Rutting and soil displacement caused by 450C Timber Jack wheeled skidder (Asalem forest northern Iran). *Journal of Forest Science*, 55: 177–183.
- Page-Dumroese D.S. 1993. Susceptibility of volcanic ash-influenced soil in northern Idaho to mechanical

- compaction. Research Note INT-409, Intermountain Research Station, Forest Service, USDA: 1–5.
- Powers R.F., Scott D.A., Sanchez F.G., Voldseth R.A., Page-Dumroese, D., Elioff J.D., Stone D.M. 2005. The North American long-term soil productivity experiment: findings from the first decade of research. *Forest Ecology and Management*. 220: 31–50.
- Quesnel H. J., Curran M. P. 2000. Shelterwood harvesting in root-disease infected stands—post-harvest soil disturbance and compaction. *Forest Ecology and Management*, 133(1-2): 89–113.
- Richard G., Cousin I., Sillon J. F., Bruand A., Guérif, J. 2001. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, 52(1): 49–58.
- Sakai H., Nordfjell T., Suadiciani K., Talbot B., Bollehuus E. 2008. Soil compaction on forest soils from different kinds of tires and tracks and possibility of accurate estimate. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 29(1): 15–27.
- Schack-Kirchner H., Fenner P.T., Hildebrand E.E. 2007. Different responses in bulk density and saturated hydraulic conductivity to soil deformation by logging machinery on a Ferralsol under native forest. *Soil Use and Management*, 23: 286–293.
- Sheridan G. J. 2003. A comparison of rubber-tyred and steel-tracked skidders on forest soil physical properties. *Soil Research*, 41: 1063–1075.
- Smith C. W. 1995. Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. *Soil and Tillage Research*, 41, 1-2: 53-73.
- Soane B.D. 1990. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. *Soil and Tillage Research*, 16: 179–201.
- Stritar A., Stritar I., Oset, F. 1990. Krajina, krajinski sistemi: Raba in varstvo tal v Sloveniji. Ljubljana, Partizanska knjiga: 173 str.
- Šušnjar M., Horvat D., Šešelj J. 2006. Soil compaction in timber skidding in winter conditions. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 27(1): 3–15.
- Urbančič M., Kobal M., Zupan M., Šporar M., Eler K., Simončič P. 2007. Organska snov v gozdnih tleh. Prispevek na konferenci Strategija varovanja tal v Sloveniji: zbornik referatov Konferenca ob svetovnem dnevu tal 5.decembra 2007: 217–230.
- Vidrine C. G., Dehoop C., Lanford B. L. 1999. Assessment of site and stand disturbance from cut-to-length harvesting. Paper presented at the Tenth Biennial Southern Silvicultural Research Conference, Shreveport. LA, February 16-18, 1999: 288–292.
- von Wilpert K., Schäffer J. 2006. Ecological effects of soil compaction and initial recovery dynamics: a preliminary study. *European Journal of Forest Research*, 125: 129–138
- Wästerlund I. 1985. Compaction of till soils and growth tests with Norway spruce and Scots pine. *Forest Ecology and Management*, 11: 171–189.
- Zhao Y., Krzic M., Bulmer C.E., Schmidt M.G. 2008. Maximum Bulk Density of British Columbia Forest Soils from the Proctor Test: Relationships with Selected Physical and Chemical Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 72: 442–452.