

Naklon terena in poškodbe tal pri pridobivanju lesa

Slope and Soil Damages During Forest Operations

Anton POJE¹, Martin ZIESAK², Matevž MIHELICH¹, Boštjan HRIBERNIK¹, Vasja LEBAN¹

Izvleček:

Poje, A., Ziesak, M., Mihelič, M., Hribernik, B., Leban, V.: Naklon terena in poškodbe tal pri pridobivanju lesa; Gozdarski vestnik, 78/2020, št. 7-8. V slovenščini z izvlečkom in povzetkom v angleščini, cit. lit. 26. Prevod Breda Misja, jezikovni pregled slovenskega besedila Marjetka Šivic.

Naklon terena v kombinaciji s fizikalnimi lastnostmi strojev potencialno vpliva na poškodbe tal pri gozdni proizvodnji. V raziskavi smo z analizo globine kolesnic na dveh objektih ter analizo podatkov programa iFOS ugotavljali vpliv naklona vlak in sečnih poti na globino kolesnic. Poleg tega smo proučili medsebojni vpliv naklona in dejavnikov tal, kot so vlažnost tal ter delež humusa in skeleta, na dopustnost sečnje in spravila s sodobnimi tehnologijami z okoljskega vidika. Rezultati kažejo, da globina kolesnic v realnih razmerah narašča z naklonom prometnic, vendar pa ta vpliv ni statistično značilen. Na podlagi rezultatov ocenjujemo, da je z vidika poškodb tal gozdna proizvodnja brez večjih prilagoditev dopustna pri naklonih terena do 15 %. Po drugi strani pa lahko s prilagoditvami stroja, načina ter organizacije dela (npr. dela v ugodnih talnih razmerah, pri nizki vlažnosti tal, večjem deležu skeleta in humusa) gozdna proizvodnja poteka tudi na večjih naklonih terena.

Ključne besede: gozdarstvo, pridobivanje lesa, gozdna tla, poškodbe tal, kolesnice

Abstract:

Poje, A., Ziesak, M., Mihelič, M., Hribernik, B., Leban, V.: Slope and Soil Damages During Forest Operations; Gozdarski vestnik (Professional Journal of Forestry), 78/2020, vol 7-8. In Slovenian, abstract and summary in English, lit. quot. 26. Translated by Breda Misja, proofreading of the Slovenian text Marjetka Šivic.

Slope of the terrain, combined with the physical characteristics of the machines, has a potential impact on the damage to forest soil during forest operations. In our research, we have determined the impact of the slope of the skid and harvester trail on the depth of the ruts based on measurements on two objects and the data analysis of the iFOS program. In addition, we investigated the mutual impact of slope and soil factors, e.g. soil moisture and humus and skeleton content, on the acceptability of forest operations with modern technologies from an environmental point of view. The results show that under real conditions the depth of the ruts increases with the slope of the trails, but its effect is not statistically significant. Based on the results, we evaluate that from the point of view of soil damage, forest operations are allowed without major adjustments on slopes up to 15%. On the other hand, with adjustments to the machine and to the working method and organization (e.g. work in favorable soil conditions, low humidity, greater skeletal and humus content) forest operations can be carried out even on steeper slopes.

Key words: forestry, forest operations, forest soil, soil damage, ruts

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Kolesnice na gozdnih tleh so vidne posledice vožnje gozdarskih strojev in nastanejo kot posledica uravnoteženja med tlakom koles in nosilnostjo tal. Spremembe tal so odvisne od lastnosti strojev, in sicer predvsem od njihove mase ter

naležne površine koles ali gosenic, pa tudi od lastnosti tal, kot so vlažnost, tip, tekstura, delež skeleta in humusa (Horn R. in sod., 2004; Košir B., 2010; Lüscher P. in sod., 2016).

Na ravnini je tlak koles na tla, poleg števila in lastnosti koles, odvisen tudi od razporeditve mase stroja oziroma njegovega težišča. Tako je pri strojih

¹ Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire. Večna pot 83, 1000 Ljubljana

² School of Agricultural, Forest and Food Sciences, Länggasse 85, 3052 Zollikofen, Švica

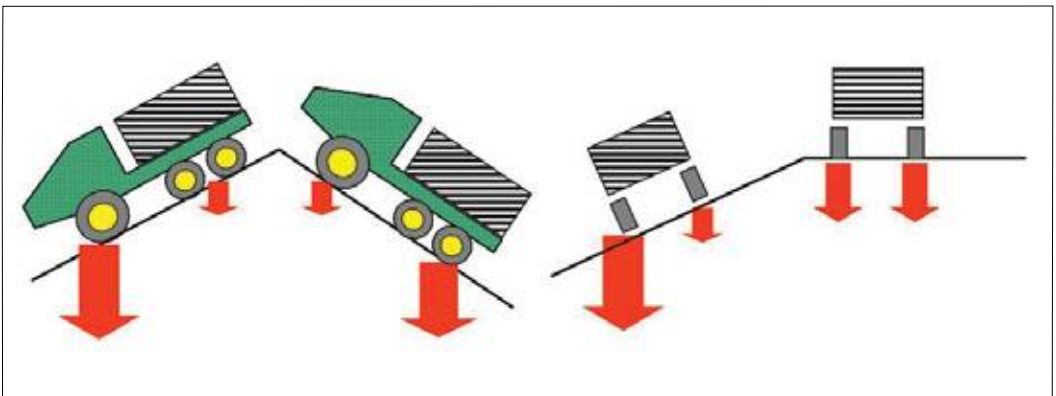
* dopisni avtor: anton.poje@bf.uni-lj.si

za sečnjo in praznih polprikoličarjih približno 40 % mase na zadnjem delu stroja ter 60 % na sprednjem. Pri gozdnem delu se razporeditev mase stroja spreminja. Pri zgibnem polprikoličarju sta zaradi bremena kar dve tretjini mase na zadnjem delu stroja (Akay A. E. in sod., 2007; Košir B., 2010). Na pobočju se zaradi spremembe položaja oziroma naklona stroja razporeditev mase stroja dodatno spremeni: pri spravilu navzdol se poveča obremenitev na sprednji del stroja, pri spravilu navzgor pa na zadnji (Marenče J. in Košir B., 2006). Podobno se pri vožnji vzporedno po plastnici težišče stroja pomakne na spodnjo stran (slika 1).

Z naklonom terena se povečuje verjetnost za zdrs koles, ki nastane v trenutku, ko nosilnost tal glede na strižne sile popusti pod obodno silo koles. Na zdrs kolesa poleg lastnosti pnevmatik, opreme in stroja vplivajo tudi lastnosti tal, kot so na primer vlažnost in delež skeleta ter orografija (Hittenbeck J., 2013; Marenče J., 2005; Owende P. M. O. in sod., 2002). Zdrs koles¹, večji od 25 %, povzroči popolno odstranitev zgornjih plasti tal, večja verjetnost nastanka globokih kolesnic ter posledično pojav erozije. Z okoljskega vidika so zato največji nakloni terena pri delu z zgibnim polprikoličarjem v najugodnejših razmerah (npr. vlažnost tal) omejeni na 60 % (Hittenbeck J., 2013).

Sprememba težišča stroja pomembno vpliva na obremenitev tal in povečuje dovzetnost za nastanek poškodb tal. Z večanjem naklona vlake pri uporabi zgibnega traktorja se večata zbitost tal (t.i. suha navidezna gostota tal) in globina kolesnic, zmanjšuje pa se poroznost tal. Spremembe fizikalnih in kemičnih lastnosti tal se pojavljajo tudi v polmetrskem pasu ob vlaki. Pri naklonu nad 20 % so globine kolesnic značilno večje kot pri manjših naklonih, ne glede na število prehodov stroja (Naghdi R. in Solgi A., 2014; Naghdi R. in sod., 2020; Solgi A. in sod., 2019; Solgi A. in sod., 2015). Vpliv naklona na globino kolesnic se občutno poveča pri sedmih ali več prehodih zgibnega polprikoličarja. Razlike v globinah kolesnic so večje pri naklonih terena nad 10 % (Pasemann S. in Erler J., 2016).

V Sloveniji je opazen trend večanja števila in obsega sanitarnih sečenj, ki so posledica obsežnih vetrolomov in namnožitve podlubnikov. Sečnja in spravilo lesa se v takih nevarnih razmerah neredko opravljata s pomočjo strojev, vse pogosteje tudi na bolj strmih naklonih terena, ki pa lahko krepko presegajo ugodne terenske razmere, ki so v Normativih gozdnih del (Uredba o koncesiji za izkoriščanje gozdov v lasti Republike Slovenije, 2010) opredeljene s povprečnim naklonom do



Slika 1: Shematski prikaz povečanja obremenitve stroja na strmem terenu (vir: Košir B., 2010: 26)

Figure 1: Schematic display of increased machine load on steep terrain (source: Košir B., 2010: 26)

¹ Zdrs merimo v odstotkih – to je razmerje med razdaljo, ki jo kolo dejansko opravi, in obsegom kolesa. Pri obsegu kolesa en meter pomeni 25 % zdrs dejansko razdaljo, ki jo je kolo prevozilo, 1,25 m.

10 %. V Sloveniji še ni bilo opravljene raziskave, ki bi se poglobila v povezavo med naklonom terena in poškodbami tal, tuje raziskave pa so bile pretežno opravljene na nekarbonatnih kamninah, katerih delež je v slovenskih gozdovih manjši (Urbančič M. in sod., 2005). Zato smo med raziskavo v okviru projekta z naslovom *Vpliv strojne sečnje na gozd in določanje meril za njeno uporabo* (številka V4-1624) želeli ugotoviti: a) ali se globina kolesnic na vlakah in sečnih poteh spreminja z njihovim naklonom, in b) kolikšen je medsebojni vpliv naklona in drugih dejavnikov tal, kot so vlažnost tal, delež humusa in delež skeleta, na dopustnost sečnje in spravila s sodobnimi tehnologijami. Ker smo v raziskavi želeli ugotoviti skupni dolgoročni vpliv gozdne proizvodnje v preteklosti na tla, smo objekte izbrali naključno vendar brez natančnega poznavanja prejšnjega časovnega poteka gozdne proizvodnje ter uporabljene tehnologije.

2 METODA DELA

2 METHODS

Za uresničitev prvega dela raziskave smo izbrali dva objekta, in sicer na območju Pokljuke ter na območju Gozdnogospodarske enote (GGE) Zaplana v Gozdnogospodarskem območju (GGO) Ljubljana.

Na objektu na Pokljuki, kjer je potekala delavnica v sklopu projekta V4-1624 (Poje A. in sod., 2019), smo naključno izbrali tri sečne poti v odseku 53D, ki je v celoti v lasti Republike Slovenije. V preteklosti so služile predvsem za spravilo lesa z zgibnimi polprikoličarji ali gozdarskimi polprikolicami. Na izbranih sečnih poteh smo na vsakem metru izmerili globino kolesnic in ocenili kamnitost podlage. Globino kolesnice smo izmerili z orodjem, ki smo ga uporabljali že v prejšnjih raziskavah v okviru projekta V4-1624 (GTE, 2018). Meritev je bila izvedena na centimeter natančno na globlji od obeh kolesnic. Za vizualno oceno kamnitosti podlage smo uporabili tri kategorije: a) zemljata podlaga, b)

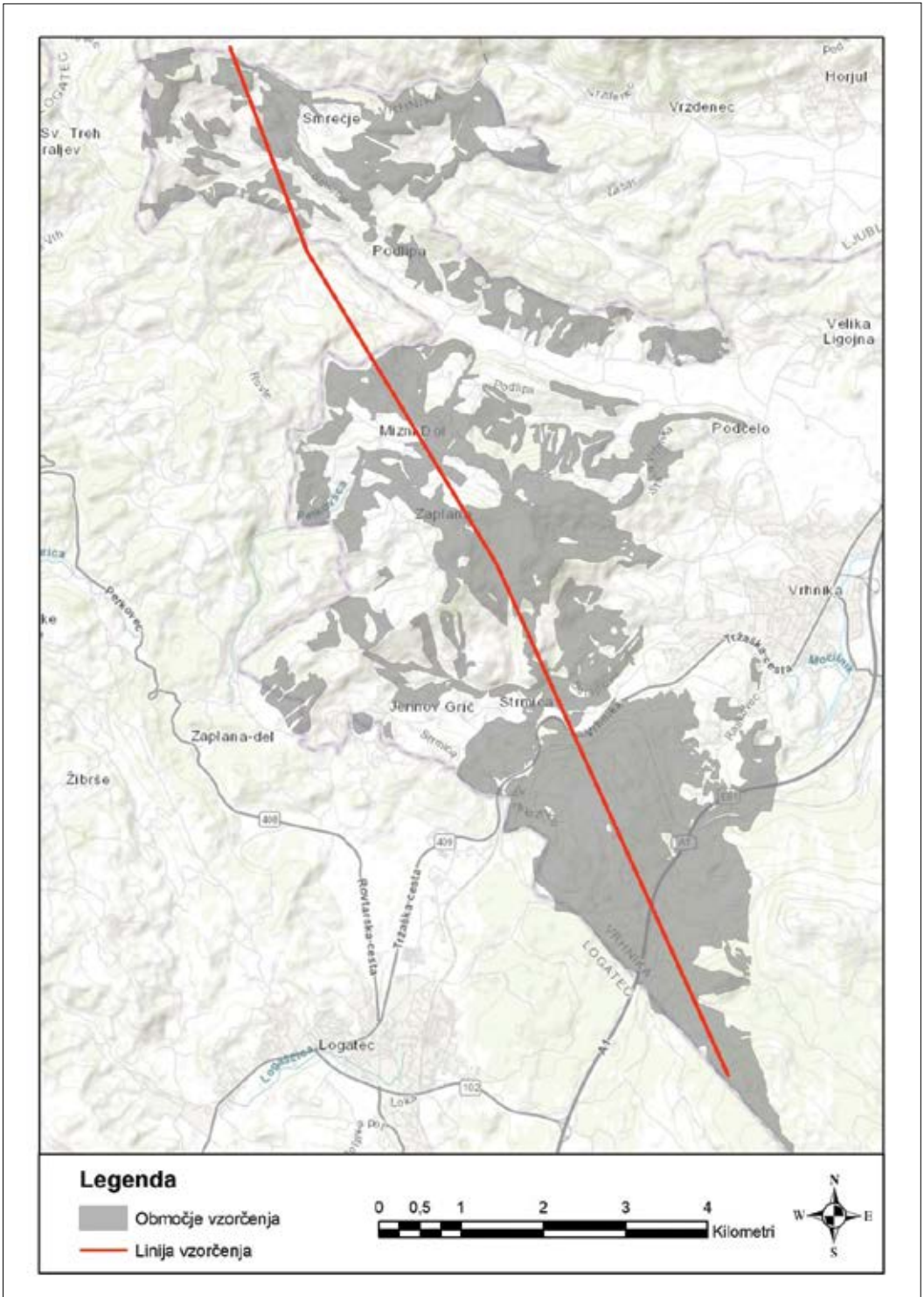
podlaga s posameznimi kamni in c) zelo kamnita podlaga. Zadnja kategorija je v večini primerov pomenila, da je kolesnica segala do matične podlage. Poglavitni razlog za to so bila plitka tla. Naklon izbranih sečnih poti smo pridobili iz digitalnega modela višin (LiDAR snemanje natančnosti 1 m) s programskim orodjem ArcGIS Desktop 10.5^{*} (Esri Inc.). Dobljene podatke smo skupaj s podatki meritev s terena obdelali v programu MS Excel 2010^{*}, kjer smo na podlagi razlik v nadmorski višini med točkami izračunali naklone. Skupna dolžina analiziranih sečnih poti znaša 355 metrov.

Na objektu v GGE Zaplana je bila metodologija zbiranja podatkov drugačna, podatki so bili zbrani v okviru izdelave diplomske naloge (Ogrin G., 2019). Vzorčenje globin kolesnic je potekalo vzdolž poljubno določene navidezne linije, dolge 14 kilometrov (slika 2). Na terenu smo pri vsakem prehodu čez vlako ali sečno pot popisali globino najgloblje kolesnice, naklon prometnice ter ocenili kamnitost podlage. Globino smo izmerili z metrom in palico kot razdaljo med višino raščenih tal in dnom kolesnice, naklon pa z naklonomerom. Skupno je navidezna linija 90-krat prečila prometnice na terenu in za vsako prečenje smo zbrali zahtevane podatke – skupaj torej 90 popisov. Točke, kjer je navidezna linija prečila vlako ali sečno pot, so bile v 97,7 % na zasebnih zemljiščih².

Drugi del raziskave, ko smo ugotavljali vpliv različnih dejavnikov na možnost izvajanja gozdne proizvodnje pri različnih naklonih terena, temelji na analizi podatkov programa *iFOS* (*»integrated Forest Operations Software«*), ki je nadgradnja programa *ProFor*, nastalega v sklopu nemškega projekta *Physikalischer Bodenschutz im Wald* (Lüscher P. in sod., 2016). Program *iFOS* med drugim omogoča ugotavljanje vpliva naklona terena na mejno vsebnost vode v tleh, pri kateri je vožnja izbranega tipa stroja na posameznih tleh še okoljsko sprejemljiva³ (slika 3).

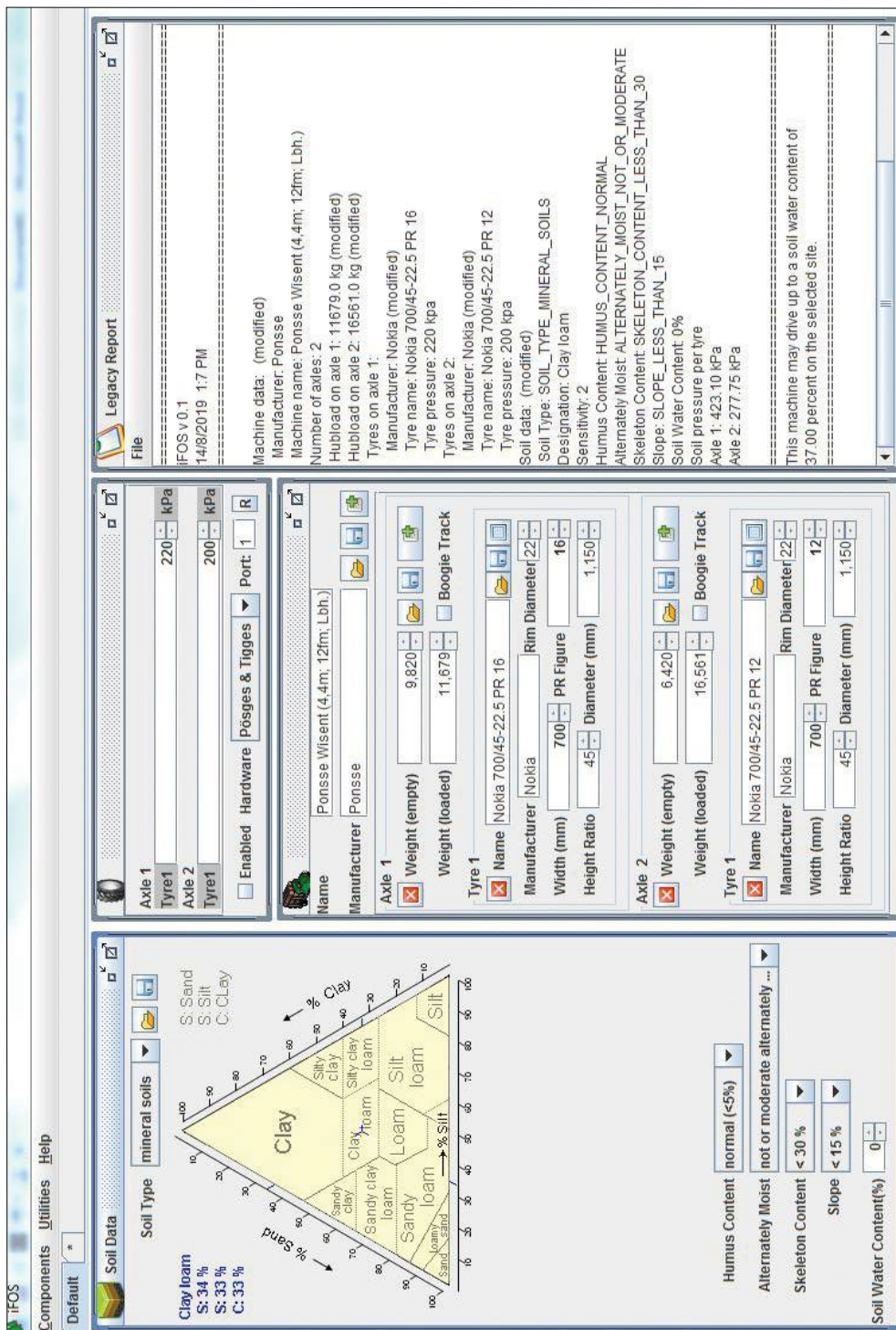
² Izračun iz baze sestojev v letu 2018 Zavoda za gozdove Slovenije.

³ Okoljsko sprejemljiva vožnja je v tem kontekstu opredeljena kot vožnja, pri kateri se ne pojavi mešanje tal v kolesnicah.

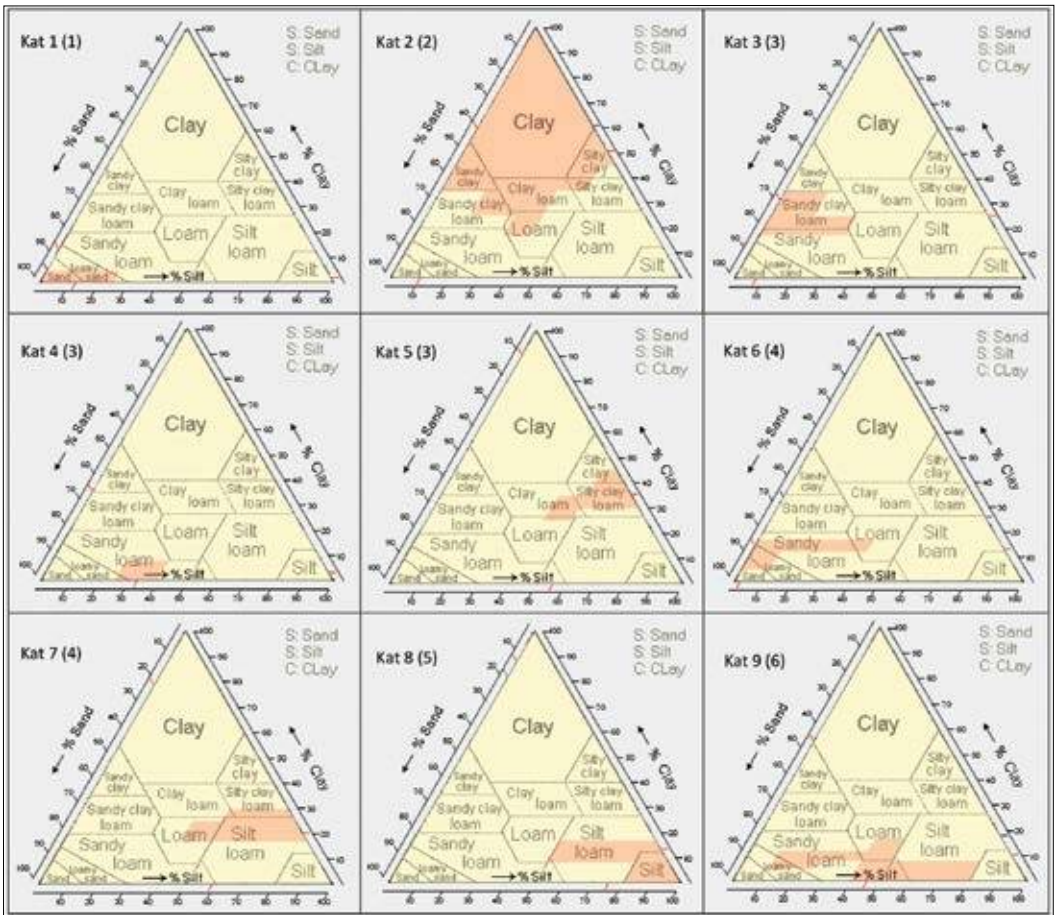


Slika 2: Potek navidezne linije vzorčenja v GGE Zaplana (avtor: M. Mihelič)

Figure 2: The extend of the imaginary sample line in Zaplana unit (author: M. Mihelič).



Slika 3: Primer nastavitve parametrov za tla (levo) in stroj (sredina) ter poročila (desno) iz programskega orodja iFOS (prikaz: A. Poje)
 Figure 3: An example of set parameters for soils (left) and the machine (middle), and the corresponding legacy report (right) of iFOS software (display: A. Poje)



Slika 4: Kategorije tal glede na teksturo tal ter občutljivost za poškodbe (obarvani del trikotnika označuje kategorijo tal, številka v oklepaju poleg oznake kategorije pa občutljivost za poškodbe) v programskem orodju iFOS (prikaz: A. Poje)

Figure 4: Soil categories based on soil texture and sensitivity to soil damages (coloured part of the triangle indicates soil category, the number in parentheses next to category mark indicates sensitivity to soil damages) from iFOS software (display: A. Poje)

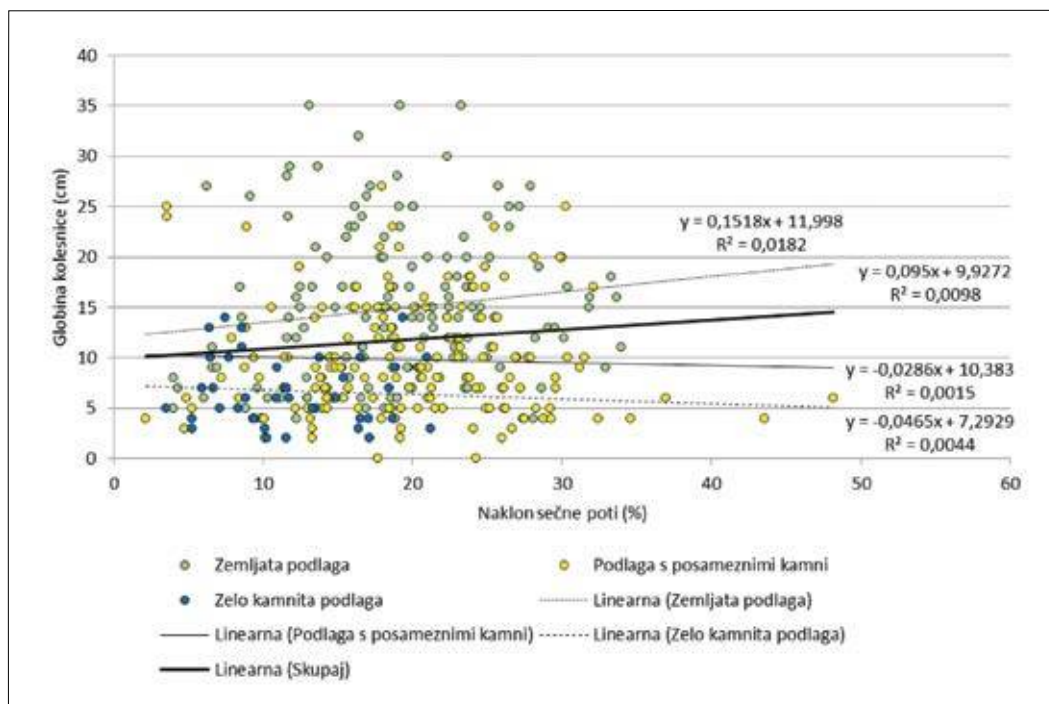
Mineralna tla so v teksturnem trikotniku (slika 4) glede vsebnost glin, mulja in peska ter občutljivosti tal za poškodbe razdeljena v devet skupin, medtem ko za mokra, peščena in skeletna tla ni podskupin. Preostali dejavniki, ki vplivajo na nosilnost tal, so razdeljeni v dve ali tri kategorije, in sicer:

- delež humusa: a) več kot 5 % in b) manj kot 5 %,
- delež skeleta: a) do 30 %, b) od 30 do 50 % in c) več kot 50 %,
- naklon terena: a) do 15 % in b) 15 do 30 %.

Izračunana mejna vsebnost vode v tleh, ki se izpiše na koncu poročila (slika 3, skrajno desno),

se linearno spreminja pri tlaku posameznega kolesa na tla od 150 do 250 kPa, nad in pod temi vrednostmi pa je vsebnost vode konstantna in enaka najvišji oz. najnižji izračunani vrednosti. Model spreminjanja vsebnosti vode v tleh temelji na Atterbergovih mejah plastičnosti tal (Poršinsky T. in sod., 2006). Pri izračunu vsebnosti vode program iFOS vedno upošteva kolo z najvišjo vrednostjo tlaka na tla med vsemi kolesi stroja.

Za pripravo in statistično analizo podatkov smo uporabili programsko orodje MS Excel 2010[®]. Poleg opisne statistike smo pri analizi odvisnosti naklona in drugih dejavnikov tal uporabili linearno regresijsko analizo.



Slika 5: Vpliv naklona sečne poti na globino kolesnice glede na talno podlago na objektih na Pokljuki (avtor: A. Poje)

Figure 5: Influence of machine trail slope on rut depth according to soil type on Pokljuka objects (author: A. Poje)

3 REZULTATI

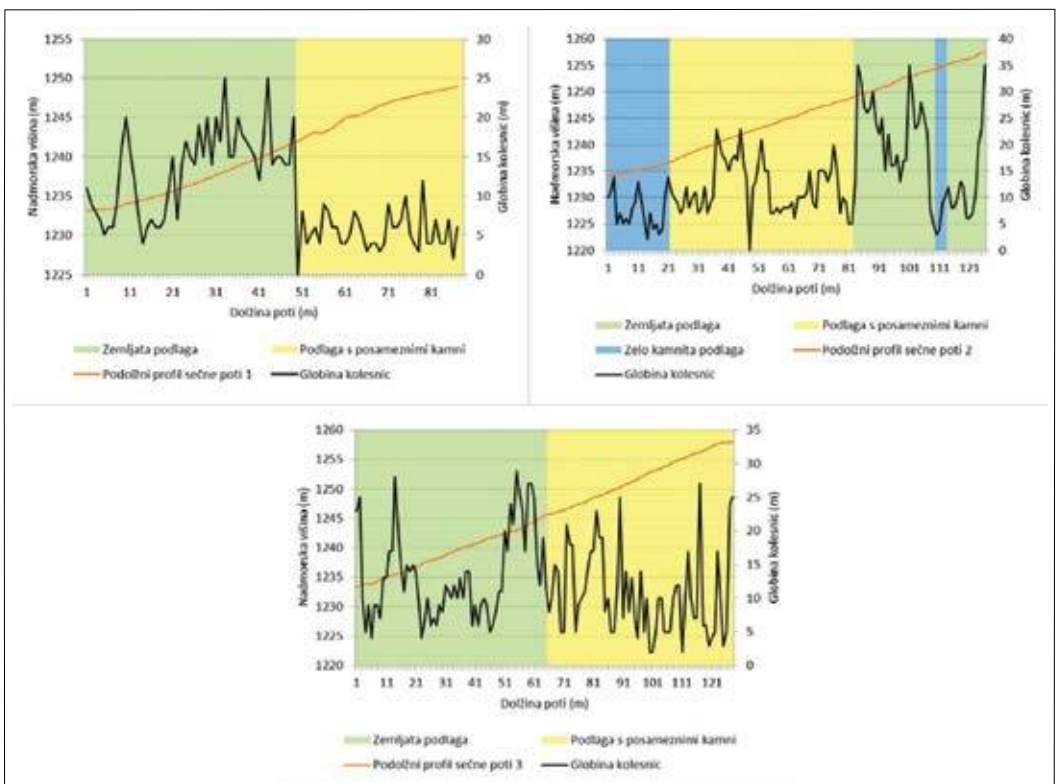
3 RESULTS

Iz opisne statistike z objekta na Pokljuki je razvidno, da je variabilnost globin kolesnic relativno velika in da se večje globine pojavljajo predvsem na sečnih poteh z zemljato podlago (sliki 5 in 6). Izračunan naklon sečnih poti znaša od 2,1 do 48,5 %, v povprečju 18,5 %. Povprečna globina kolesnic znaša 11,7 cm. Statistična analiza je pokazala, da se globina kolesnic na splošno (tj. neodvisno od kategorije kamnitosti podlage) večja z naklonom sečne poti, vendar pa je povečevanje zelo majhno (0,95 cm/10 % naklona) ter statistično neznačilno (slika 5). Na zelo kamniti podlagi, kjer globina kolesnic pogosto doseže matično podlago, so bile kolesnice v povprečju globoke 6,8 cm, na sečnih poteh s posameznimi kamni 3,0 cm globlje, na sečnih poteh z zemljato podlago pa 8,1 cm globlje. Globina kolesnic se večja z naklonom sečne poti le na poteh z zemljato podlago, medtem ko se na poteh s posameznimi kamni in zelo kamnito

podlago zmanjšuje (slika 5). V vseh treh primerih se je vpliv naklona na globino kolesnic izkazal za statistično neznačilnega.

Vpliv naklona sečne poti na globino kolesnic se je izkazal visoko statistično značilen le na odseku sečne poti 1 z zemljato podlago ($R^2 = 0,665$; $p < 0,000$), kjer se je globina kolesnic večala s stopnjo 5,7 cm na 10 % naklona sečne poti (slika 6).

Enako kot na objektu na Pokljuki je bila tudi na objektu na GGO Zaplana variabilnost globin kolesnic relativno velika, ne glede na naklon prometnic ter vrsto podlage (slika 7). Povprečen naklon prometnic na objektu je znašal 14,0 %, povprečna globina kolesnic pa 5,7 cm. Globina kolesnic z naklonom prometnic se večja (0,61 cm/10 % naklona), vendar pa je vpliv statistično neznačilen. Razlike v povprečnih globinah kolesnic so bile manjše kot na objektu na Pokljuki. Kolesnice so bile najplitvejše na prometnicah, kjer so se pojavljali posamezni kamni (5,4 cm), ter najgloblje na prometnicah s kamnito podlago (6,2 cm). V nasprotju z ugotovitvami na objektu



Slika 6: Prikaz globine kolesnic, vrste podlage in podolžnih profilov proučevanih sečnih poti na Pokljuki (avtor: A. Poje)

Figure 6: Display of rut depth, soil type and longitudinal profile of studies machine trails on Pokljuka (author: A. Poje)

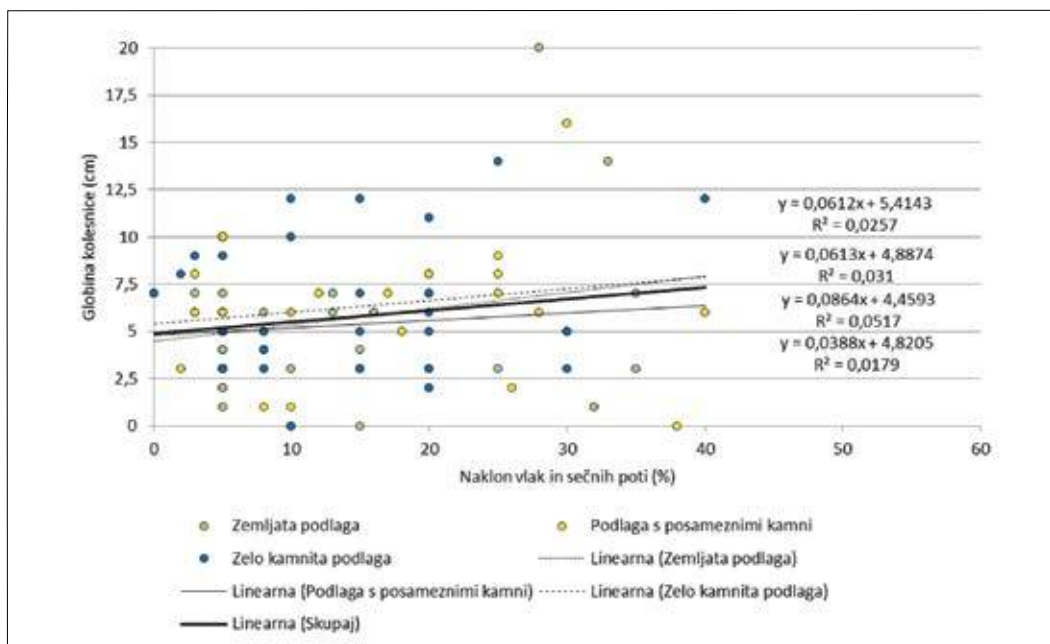
Pokljuka so se globine kolesnic z naklonom večale pri vseh treh kategorijah podlag, vendar pa je bil vpliv naklona tudi v tem primeru statistično neznačilen.

Pri analizi podatkov iz programa *iFOS* smo ugotovili, da je dopustna vsebnost vode v mineralnih tleh za delo na manjših naklonih terena večja kot na bolj strmih naklonih terena. Tako na naklonih terena, manjših od 15 %, ter s stroji z visokim specifičnim tlakom na tla (250 kPa in več) lahko delo poteka v povprečju pri 5,3 % višji vsebnosti vode kot na naklonih terena od 15 do 30 %. S stroji, ki imajo tlak na tla manjši od 150 kPa, pa lahko delo poteka pri 11,4 % višji vsebnosti vode na naklonih, manjših od 15 %, v primerjavi z delom na bolj strmih terenih (tj. od 15 do 30 %).

Navedene povprečne vsebnosti vode v tleh so lahko višje ali nižje, če poleg naklona terena

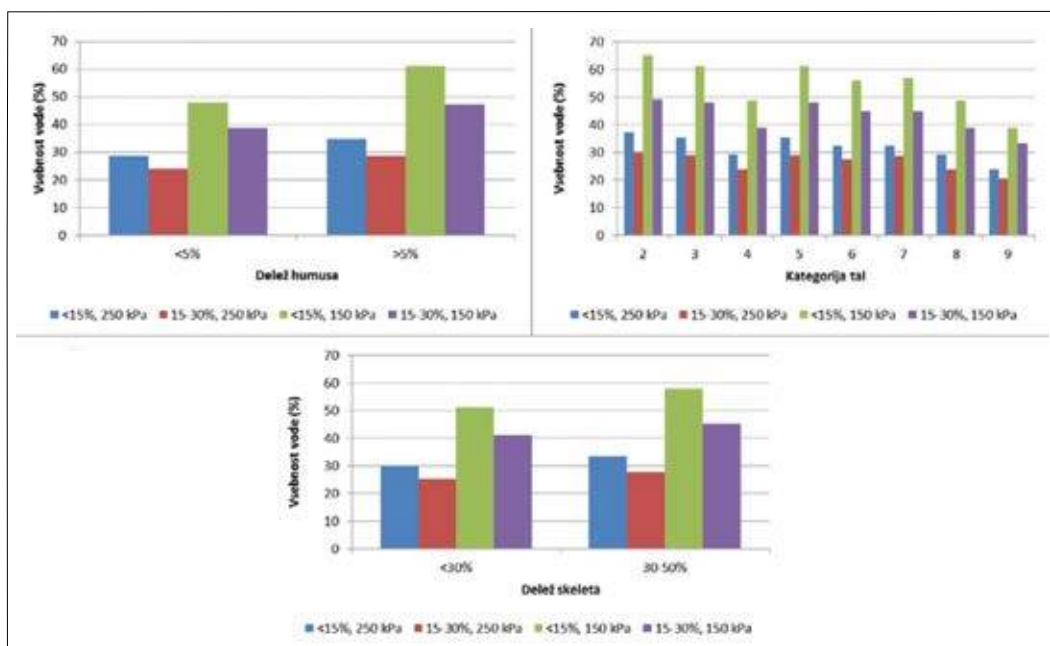
upoštevamo tudi druge lastnosti tal, ki so v interakciji z naklonom terena (slika 8). Tako je dopustna vsebnost vode pri vsebnosti humusa več kot 5 % v povprečju za 0,9 % višja v primeru uporabe strojev z visokimi tlaki na tla in za 2,3 % višja pri uporabi strojev z nižjimi tlaki na tla. Pri vsebnostih humusa manj kot 5 % so dopustne vsebnosti vode za enak odstotek (0,9 % in 2,3 %) vode manjše od navedenih povprečnih vrednosti vsebnosti vode na posameznih naklonih terena.

Vpliv kategorije mineralnih tal na dopustno vsebnost vode je višji kot vpliv vsebnosti humusa, in sicer se lahko dopustna vsebnost vode v tleh na najbolj za poškodbe občutljivih tleh (slika 4, kategorija 9) v povprečju zmanjša za 1,9 % pri strojih s tlakom na tla 250 kPa in več ter 5,7 % pri strojih s tlakom na tla, nižjim od 150 kPa. Na manj občutljivih tleh (tj. tla kategorije 2) pa se dopustna vsebnost vode lahko poveča za 1,7 %



Slika 7: Vpliv naklona vlake in sečne poti na globino kolesnice glede na talno podlago na GGE Zaplana (avtor: A. Poje)

Figure 7: Vpliv naklona vlake in sečne poti na globino kolesnice glede na talno podlago na GGE Zaplana (avtor: A. Poje)



Slika 8: Dopustna vsebnost vode v tleh glede na naklon terena (<15 %, 15-30 %) in pritisk kolesa stroja na tla (150 kPa, 250 kPa) ter delež humusa, kategorijo tal in delež skeleta (avtor: A. Poje)

Figure 8: Acceptable soil water content according to terrain slope (<15 % or 15-30 %) and soil pressure per tyre (150 kPa or 250 kPa), and share of humus, soil category and share of skeleton (author: A. Poje)

pri strojih s tlakom na tla 250 kPa ter 4,6 % pri strojih s tlakom na tla, nižjim od 150 kPa.

Vsebnost skeleta tal v povprečju najmanj vpliva na spremembo povprečne dopustne vsebnosti vode, in sicer se pri skeletu do 30 % v povprečju zmanjša za 0,3 % ter poveča za 1,4 % pri skeletu od 30 do 50 %. Na tleh, kjer vsebnost skeleta preseže 50 %, je izvedba dela vedno mogoča ne glede druge dejavnike.

Tla kategorije 1 (slika 4), kjer v teksturi tal prevladuje pesek, so za poškodbe najmanj občutljiva in je zato delo na takih tleh vedno mogoče ne glede na naklon terena, vsebnost vode, delež humusa in delež skeleta. Enako velja za delo na gramoznih in skeletnih tleh. Nasprotno pa delo na mokrih tleh z okoljskega vidika ni mogoče ne glede na naklon terena. Na naklonih terena, večjih od 15 %, pri vseh tipih tal in talnih razmerah obstaja nevarnost pojava erozije na sečni poti.

4 RAZPRAVA IN ZAKLJUČKI 4 DISCUSSION AND CONCLUSIONS

V raziskavi ugotavljamo, da naklon prometnic na terenu, kjer so bile globine kolesnic popisane brez natančnega poznavanja prejšnjega časovnega poteka gozdne proizvodnje ter uporabljene tehnologije, na splošno ne vpliva na poškodovanost tal. Eden od morebitnih razlogov je, da se skozi daljše obdobje rabe prometnice vpliv naklona na globino kolesnic prepleta z drugimi dejavniki, s čimer se povečuje globina kolesnic po celotni dolžini prometnice ter posledično njihova variabilnost. Drugi morebitni razlog je, da se zaradi zmanjševanja globine tal z naklonom (Bergant J., 2011) povečuje skelet tal na pobočjih kot posledica razpadanja matične podlage in spiranja talnih delcev v nižje ležeče predele pobočja. Ker skelet tal dokazano zmanjšuje zdrs koles (Hittenbeck J., 2013) ter povečuje dopustno vsebnost vode v tleh pri gozdni proizvodnji (Lüscher P. in sod., 2016), so lahko globine kolesnic na pobočjih celo manjše kot ob vznožjih pobočij in na položnejših terenih. Poleg manjše globine tal so zaradi odtekanja vode pobočja bolj sušna kot vznožja (Repe B., 2007). Če so tla dovolj globoka, se poškodovanost tal večja z naklonom terena. To smo sicer statistično dokazali samo na enem kratkem odseku sečne

poti, dokazujejo pa jo nekatere druge raziskave (Hittenbeck J., 2013).

Razlike v povprečnih globinah kolesnic iz dveh različnih objektov, Pokljuke in GGE Zaplana, nakazujejo, da bi lahko na globino kolesnic, poleg že znanih dejavnikov (tj. tip tal, vsebnost vode, skeleta, humusa), posredno ali neposredno vplivala še dva manj znana, in sicer čas popisa poškodb tal ter lastništvo gozda. Predvidevamo, da se globina kolesnic s časom na splošno zmanjšuje, saj vremenski dejavniki, kot so padavine in veter, povzročajo premeščanje talnih delcev v kolesnico in v globine tal. Vendar pa so spremembe tal v smeri prvotnega stanja dolgotrajne. Tako je bilo ugotovljeno, da se globine kolesnic niso značilno spremenile po petih letih po izvedbi gozdne proizvodnje (Jankovský M. in sod., 2019), za popolno povrnitev tal v prvotno stanje pa je na biološko zelo aktivnih tleh z visoko vsebnostjo glin treba čakati vsaj 10 do 20 let (Ebeling C. in sod., 2016). Ker je izvedbo gozdne proizvodnje veliko lažje prilagajati vremenskim razmeram – še posebno v primeru lastništva strojev – domnevamo, da so poškodbe tal na zasebni gozdni posesti manjše kot v gozdovih v državni lasti. Razlog za to lahko iščemo pri večinoma prevladujočem ekonomskem interesu izvajalcev, ki stremijo k čimprejšnji izvedbi sečnje ne glede na okoljske posledice. Poleg tega je pogostost uporabe tehnologije strojne sečnje s težjimi stroji na zasebni gozdni posesti manjša.

Gozdna proizvodnja lahko na posameznem delovišču poteka, dokler je omogočena tehnična prevoznost poti in dokler niso presežena dopustna okoljska in dogovorjena merila poškodovanosti tal. Tehnično prevoznost poti lahko onemogoči prevelika globina kolesnic ali prevelik zdrs koles. Ker pa je zgolj prevoznost poti najpogosteje uporabno merilo predvsem za vojaške namene (Meyer M. P. in Knight S. J., 1961), okoljska merila pa so zaradi varovanja rodovitnosti tal v gozdarstvu nujnost (Pezdevšek Malovrh Š. in sod., 2018), si dopusten naklon prizadevamo opredeliti predvsem z okoljskega vidika. Če upoštevamo merila dopustne poškodovanosti tal (Košir B., 2010; Krč J. in sod., 2014; Poje A. in sod., 2019), ki večinoma dovoljujejo do 10 cm globoke kolesnice na sečnih poteh, lahko na podlagi raziskave ocenimo, da bi bila na globljih tleh in več prehodih strojev

dopustna globina kolesnic presežena pri naklonih sečnih poti in vlak nad 15 %. Ugotovljena ocena se v grobem sklada z nekaterimi dosedanjimi raziskavami, ki so bile opravljene pri spraviu z zgibnimi traktorji (Naghdi R. in Solgi A., 2014), ter ustreza najnižjim ugotovljenim naklonom terena za spravo lesa z zgibnim polprikoličarjem na podlagi zdrsov koles na puhlici (Hittenbeck J., 2013). Po drugi strani pa lahko v ugodnih talnih razmerah, kjer so tla bolj nosilna zaradi ustrežnejšega tipa tal, majhne vlažnosti, večjega deleža skeleta in humusa (Cambi M. in sod., 2015; Lüscher P. in sod., 2016; Mohtashami S. in sod., 2017) gozdna proizvodnja poteka tudi na veliko večjih naklonih terena, tudi do 60 % (Hittenbeck J., 2013).

Omenjene naklone prometnic je treba upoštevati z veliko previdnostjo, saj lahko velik razpon naklona terena, ki še omogoča gozdno proizvodnjo s hkratnim minimalnim vplivom na tla, v praksi povzroči veliko zmede. Za delo na naklonih prometnic, večjih od 15 %, je treba pri pripravi dela in med samim delom predvideti dovolj sečnih poti, saj število prehodov stroja v interakciji z naklonom terena neposredno vpliva na globino kolesnic (Pasemann S. in Erler J., 2016). Za delo na večjih naklonih je treba uporabljati stroje, katerih tlak na kolo ne presega 150 kPa. Vsebnost vode v tleh je lahko pri delu s stroji z nižjim specifičnim tlakom na tla v povprečju 17 % višja kot pri delu s stroji s tlakom na kolo, večjim od 250 kPa. Uporaba verig in gosenic omogoča delo na do 14 % večjih naklonih kot v primeru njihove neuporabe (Hittenbeck J., 2013).

Ker je naštetih ukrepe med izvajanjem dela pogosto težko nadzorovati, je za učinkovito varovanje tal pred poškodbami nujno izobraževanje strojnikov. Le-ti morajo biti sposobni zaznati trenutno občutljivost delovišča za pojav poškodb in morebitne spremembe stanja ter izbrati pravilne ukrepe za njihovo preprečitev ali zmanjšanje na najmanjšo mogočo stopnjo. Kljub izobraževanju je nujno sodelovanje med načrtovalci proizvodnje, delovodji in strojniki (Archibald D. J. in sod., 1997).

Ugotovljeni vplivi naklona na globino kolesnic so rezultat dveh krajših raziskav, v katerih je kot glavna ugotovitev izpostavljeno dejstvo, da

globine kolesnic v realnih razmerah niso nujno odvisne od naklona sečnih poti in vlak. To nakazuje, da je interakcija med vplivom tal in strojem kompleksna in težko dokazljiva s popisi poškodb brez poznavanja prejšnje uporabe gozdarskih tehnologij. Spoznanje je na splošno v nasprotju z dosedanjimi raziskavami, ki so pogosto potekale v kontroliranih razmerah. Ker je očitno, da na globino kolesnic zelo vplivajo tudi drugi dejavniki, bi bilo nadaljnje raziskave smotrno usmeriti na gozdna območja z različnimi terenskimi in podnebnimi razmerami (npr. tipi in lastnosti tal, fitocenološke združbe, odprtost s prometnicami, lastnosti padavin) in posestniškimi razmerami (npr. lastništvo, velikost in razdrobljenost posesti). S širšo inventuro lastnosti vlak in sečnih poti na nivoju Slovenije bi zagotovili osnovo za nadaljnje raziskave s tega področja.

Raziskava je tudi pokazala, da globina tal potencialno vpliva na globino kolesnic, kar pomeni, da jo je treba upoštevati v prihodnjih raziskavah. Poleg tega se v povezavi s stopnjo poškodovanosti tal pojavlja vprašanje, ali bi morala biti merila poškodovanosti tal različna glede na globino tal. Podoben sistem imajo npr. na Finskem, kjer so na mineralnih tleh dopustne globine kolesnic do 10 cm, na šotnih barjih pa do 20 cm (Salmivaara A. in sod., 2018). Z okoljskega vidika je namreč stopnja poškodovanosti tal na kraških terenih, kjer kolesnice na plitvih tleh (npr. rendzina) pogosto dosežejo matično kamnino, veliko resnejša, kot na globljih tleh.

Program *iFOS* nudi izvajalcem gozdnih del informacijsko podporo za zmanjšanje tveganja za poškodbe tal v procesu načrtovanja in izvedbe del. Lastnik stroja lahko na podlagi izpisa iz programa dokaže primernost svojih strojev za uporabo na konkretnem delovišču, se odloči za njihovo zamenjavo, prilagoditev ali celo nabavo novih strojev. Z razvojem programa je mogoče vzpostaviti neposredno povezavo s sistemom za nadzor tlaka v pnevmatikah ali z elektronsko tehtnico na dvigalih. Kljub naštetim prednostim pa avtorji programa ugotavljajo, da je treba izračune modelov dopolniti, saj so raziskave pokazale na nekatera večja odstopanja, predvsem glede razvrstitev vrst tal in izračune kontaktnega površinskega tlaka (Lüscher P. in sod., 2016).

Eden od ključnih spremenljivih dejavnikov v interakciji med strojem in tlemi ostaja vlažnost tal, ki se prostorsko in časovno lahko zelo spreminja in otežuje ali celo preprečuje izvedbo gozdne proizvodnje. Nosilnost tal se s povečevanjem vlažnosti zmanjšuje, poškodbe tal pa postanejo nedopustne pri preseganju zgornje meje plastičnosti tal (Zore P., 2019). Čeprav je vpliv vlažnosti na globino kolesnic relativno dobro znan, je manj znano, kakšne bodo razmere v tleh v bližnji ali daljni prihodnosti (Košir B., 2010). V dosedanjih tujih raziskavah najdemo nekaj napovednih modelov (npr. Reintam in sod., 2016; Vega-Nieva in sod., 2009), katerih skupna lastnost je, da vsebujejo podatke, ki jih ni mogoče pridobiti iz običajnih meteoroloških meritev. Podobno velja tudi za podatke o lastnostih tal, zato so slednje le delno uporabne. Ne glede na to pa je smiselno nadaljevati prizadevanja za vzpostavitev napovednega modela, ki bi vsaj za dan ali dva vnaprej z višjo stopnjo verjetnosti predvidel stanje tal. Tako bi olajšali odločitve v praksi, optimizirali proizvodnjo in – kar je najpomembnejše – zmanjšali morebiten negativen vpliv proizvodnje na tla. Pri tem se zdi, da bi najprimernejše modele zgradili z uporabo strojnega učenja (Adeyemi in sod., 2018; Jevšenak in sod., 2017).

5 ZAHVALA

5 ACKNOWLEDGEMENT

Zahvaljujemo se Ministrstvu za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano ter Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije za financiranje Ciljnega raziskovalnega projekta št. V4-1624 z naslovom Vpliv strojne sečnje na gozd in določitev meril za njeno uporabo. Anonimnemu recenzentu smo hvaležni za korekten pregled in konstruktivne pripombe na prvo različico besedila.

6 POVZETEK

Globina kolesnic je pogost kazalnik poškodovanosti tal po gozdarskih delih in je odvisna od lastnosti strojev, lastnosti tal in drugih okoljskih dejavnikov. Med slednje uvrščamo tudi naklon terena, ki poveča obremenitve na nižje ležečih kolesih. Večja obremenitev manj koles stroja pogloblja kolesnice, povečuje zbitost tal in zmanjšuje

poroznost tal. Ker v Sloveniji še ni bilo opravljene študije vpliva naklona terena in vrste podlage na globino kolesnic, smo to proučili v projektu *Vpliv stroje sečnje na gozd in določanje meril za njeno uporabo*. Poleg vpliva naklona nas je zanimalo tudi, koliko sta sečnja in spravilo s sodobnimi tehnologijami odvisna od medsebojnega vpliva naklona in drugih dejavnikov tal, kot so vlažnost tal, delež humusa in delež skeleta. V prvem delu raziskave smo analizirali dva objekta: na Pokljuki smo na izbranih sečnih poteh na vsakem metru izmerili globino kolesnic in ocenili kamnitost podlage, v okolici Zaplane pa smo vzdolž poljubno določene navidezne linije popisali globine kolesnic, naklon prometnic ter ocenili kamnitost podlage. Za pridobivanje in obdelavo grafičnih podatkov smo uporabili program ArcGIS Desktop 10.5^{*} (Esri Inc.), za dodatne obdelave in analize združenih podatkov pa program MS Excel 2010^{*}. Za drugi del raziskave smo podatke pridobili iz programa *integrated Forest Operations Software (iFOS)*; zanimalo nas je, pri katerih vsebnostih vode v tleh in pri katerih naklonih je vožnja izbranega tipa stroja še okoljsko sprejemljiva. Podatki z objekta na Pokljuki kažejo, da se globlje kolesnice pojavljajo predvsem na sečnih poteh z zemljato podlago. V povprečju so kolesnice globoke 11,7 cm, povprečni naklon pa znaša 18,5 %. Globine kolesnic se rahlo povečujejo z naklonom sečne poti (0,95 cm / 10 %), vendar je večanje statistično neznačilno. Povprečna globina kolesnic na objektu na Zaplani je znašala 5,7 cm, povprečen naklon prometnic pa 14,0 %. Tudi v tem primeru se globine kolesnic rahlo povečujejo z naklonom prometnic (0,61 cm / 10 %) in njihov vpliv je statistično neznačilen. V nasprotju z rezultati na objektu Pokljuka se globine kolesnic večajo z naklonom ne glede na podlago, čeprav je njihov vpliv statistično neznačilen. Na osnovi izmerjenih podatkov lahko zaključimo, da naklon prometnic na splošno ne vpliva na poškodovanost tal. Razloge za tak rezultat lahko iščemo v dejstvu, da se skozi daljše obdobje rabe vpliv naklona na globino kolesnic prepleta z drugimi dejavniki, v večjem deležu skeleta tal na pobočjih, v času popisa poškodb ali v lastništvu gozda. Analiza podatkov programa *iFOS* je pokazala, da je na mineralnih tleh in manjših naklonih terena dopustna večja

vsebnost vode kot na večjih naklonih. Vpliv kategorije mineralnih tal na dopustno vsebnost vode je pomembnejši od vpliva vsebnosti humusa in vsebnosti skeleta. Na podlagi raziskave in dose-
danjih raziskav ocenjujemo, da bi bila na globljih tleh in več prehodih strojev dopustna globina kolesnic presežena pri naklonih sečnih poti in vlak nad 15 %. Za delo na večjih naklonih terena predlagamo boljše načrtovanje in predvidevanje dovolj sečnih poti, saj število prehodov stroja v interakciji z naklonom terena neposredno vpliva na globino kolesnic. Prav tako priporočamo uporabo strojev, katerih tlak na kolo ne presega 150 kPa, ter uporabo verig in gosenic. Ključne osebe za učinkovito varovanje tal pred poškodbami so strojniki, zato naj bo njihovo izobraževanje temeljito in predvsem kontinuirano. Poleg tega je nujno sodelovanje med načrtovalci proizvodnje, delovodji in strojniki. Zaradi nezanesljivega, a neznanega vpliva drugih dejavnikov bi bilo nadaljnje raziskave smotrno usmeriti na gozdna območja z različnimi razmerami, kot so tip in globina tal, fitocenološke združbe, odprtost s prometnicami, lastnosti padavin, lastništvo, velikost in razdrobljenost posesti. Dobra podlaga za nadaljnje raziskave bi bila tudi inventura vlak in sečnih poti, ki bi vsebovala podatke o njihovem stanju.

6 SUMMARY

The depth of the ruts is a frequently used indicator of soil damage after forest operations. It depends on the characteristics of the machines, soil characteristics, and other environmental factors. The latter also include the slope of the terrain, which increases the load on the lower set wheels. A greater load with fewer machine wheels deepens the ruts, increases soil compaction and decreases soil porosity. Since there has been no study of terrain slope and surface rockiness influence on the rut depth in Slovenia, we studied this in the project »Impact of the Machine Felling on the Forest and Determining the Scale for its Use«. In addition to the impact of the slope, we were also interested in the extent to which the forest operations with modern technologies depend on the mutual impact of the slope and other soil factors,

e.g. soil moisture, humus and skeleton content. In the first part of our research we analyzed two objects: on Pokljuka we measured the rut depth on every meter and assessed surface rockiness on the selected harvester trails and in the surrounding of Zaplana we recorded the rut depth and trails slope and assessed the surface rockiness along the optionally determined imaginary line. We used ArcGIS Desktop 10.5[®] (Esri Inc.) program for the acquisition and processing of the graphical data and MS Excel 2010[®] for additional processing and combined data analysis. For the second part of our research, we obtained the data from the integrated Forest Operations Software (iFOS) program; we wanted to know, at what soil water contents and what slope the drive of the selected machine is still ecologically acceptable. The data from Pokljuka show that deeper ruts occur mainly on the harvester trails with lower surface rockiness. On average, the ruts were 11.7 cm deep and the average slope was 18.5 %. The depth of the ruts increased slightly with the slope of the harvester trail (0.95 cm / 10 %), but the increase was not statistically significant. The average rut depth on Zaplana was 5.7 cm and the average skid and harvester trail slope to 14.0 %. Also in this case the rut depth increased slightly with the trail slope (0.61 cm / 10 %) and their impact was not statistically significant. Contrary to the results on the Pokljuka object, the rut depth increased with the slope regardless of the soil type, also their impact is not statistically significant. We can conclude on the basis of the measured data, that the slope of the trails in general has no influence on the soil damage. The reasons for this result can be found in the fact, that over a longer period the impact of the slope on the rut depth intertwines with other factors, in the higher skeleton content on slopes, in the time of the damage recording or forest ownership. The iFOS program data analysis showed that on the mineral soil a larger water content is acceptable on lower terrain slopes than on steeper slopes. The impact of the mineral soil type on the admissible water content is more important than the impact of the humus content and skeleton content. On the basis of this research and former ones, we assess that on the deeper soil and more machine

passages the admissible rut depth would be exceeded at harvester and skidding trails slopes over 15 %. For work on higher slopes we suggest better planning and anticipation of sufficient harvester trails, since the number of machine passages in interaction with the slope of the terrain directly affects the rut depth. We also recommend the use of machines whose pressure per wheel does not exceed 150 kPa, as well as the use of chains and tracks. The key people for effective protection of soil from damage are the machine operators, so their education should be thorough and continuous. Additionally, cooperation is required between the production planners, foremen and machine operators. Due to the significant but unknown impact of other factors, it would be useful to focus further research on forest areas with different conditions, e.g. soil type and depth, phytocoenological associations, skid and harvester trail network, precipitation characteristics, forest ownership, size and fragmentation of forest property. A good basis for further research would also be an inventory of skid and harvester trails, which would contain data on their condition.

7 VIRI

7 REFERENCES

- Adeyemi, O., Grove, I., Peets, S., Domun, Y., Norton, T. 2018. Dynamic Neural Network Modelling of Soil Moisture Content for Predictive Irrigation Scheduling. *Sensors*, 18, 10: 3408.
- Akay, A. E., Sessions, J., Aruga, K., 2007. Designing a forwarder operation considering tolerable soil disturbance and minimum total cost. *Journal of Terramechanics*, 44, 2: 187–195.
- Archibald, D. J., Wiltshire, W. B., Morris, D. M., Batchelor, B. D., 1997. Forest management guidelines for the protection of the physical environment. (ur.) Ontario, Ministry of Natural Resources: 42 str.
- Bergant, J., 2011. Relief kot pedogenetski dejavnik na krasu : diplomsko delo: (Univerza v Ljubljani). Ljubljana: 87 str.
- Cambi, M., Certini, G., Neri, F., Marchi, E., 2015. The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management*, 338, 124–138.
- Ebeling, C., Lang, F., Gaertig, T., 2016. Structural recovery in three selected forest soils after compaction by forest machines in Lower Saxony, Germany. *Forest Ecology and Management*, 359, 74–82.
- GTE., 2018. Priprave na seminar. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire <http://www.bf.uni-lj.si/oddelek-za-gozdarstvo/o-oddelku/katedre-in-druge-org-enote/katedra-za-gozdno-tehniko-in-ekonomiko/vpliv-strojne-secnje-na-gozd-in-dolocitev-meril-za-njeno-uporabo/> (13. 7. 2020).
- Hittenbeck, J., 2013. Estimation of trafficable grades from traction performance of a forwarder. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 34, 1: 71–81.
- Horn, R., Vossbrink, J., Becker, S., 2004. Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. *Soil and Tillage Research*, 79, 2: 207–219.
- Jankovský, M., Allman, M., Allmanová, Z., Ferencík, M., Vlčková, M., 2019. Changes of key soil parameters five years after forest harvesting suggest slow regeneration of disturbed soil. *Journal of Sustainable Forestry*, 38, 4: 369–380.
- Jevšenak, J., Džeroski, S., Levanič, T. 2017. Uporaba metod strojnega učenja za preučevanje odnosov med značilnostmi branik in okoljem. *Acta silvae et ligni*, 114: 21–29.
- Košir, B., 2010. Gozdna tla kot usmerjevale tehnologij pridobivanja lesa. (ur.) Ljubljana, Biotehniška fakulteta pri Univerzi v Ljubljani, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 80 str.
- Krč, J., Beguš, J., Primožič, J., Levstek, J., Papler-Lampe, V. in sod., 2014. Vodila dobrega ravnanja pri strojni sečnji. (ur.) Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 38 str.
- Marenče, J., 2005. Spreminjanje tehničnih parametrov traktorja pri vlačanju lesa - kriterij pri izbiri delovnega sredstva: Doktorska disertacija. (Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta). Ljubljana: 271 str.
- Marenče, J., Košir, B., 2006. Vpliv tehničnih parametrov gozdarskega traktorja ob njegovi izbiri. *Gozdarski vestnik*, 64, 4: 213–226.
- Meyer, M. P., Knight, S. J., 1961. Soil classification: trafficability of soils. 1961. (Technical memorandum, no. 3-240, suppl 16). Wicksburg, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station: 185 str. <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/265743.pdf> (9. 9. 2020).
- Mohtashami, S., Eliasson, L., Jansson, G., Sonesson, J., 2017. Influence of soil type, cartographic depth-to-water, road reinforcement and traffic intensity on rut formation in logging operations: a survey study in Sweden. *Silva Fennica*, 51, 5: 1–14
- Naghdi, R., Solgi, A., 2014. Effects of skidder passes and slope on soil disturbance in two soil water contents. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 35, 1: 73–80.
- Naghdi, R., Solgi, A., Labelle, E. R., Nikooy, M., 2020. Combined effects of soil texture and machine operating trail gradient on changes in soil physical

- properties during ground-based skidding. *Pedosphere*, 30, 4: 508–516.
- Ogrin, G., 2019. Ugotavljanje občutljivosti gozdnih tal na poškodbe zaradi pridobivanja lesa v GEE Zaplana: Diplomsko naloga. (Univerza v Ljubljani). Ljubljana: 32 str.
- Owende, P. M. O., Lyons, J., Haarlaa, R., Peltola, A., Spinelli, R. in sod., 2002. Operations protocol for eco-efficient wood harvesting on sensitive sites. Dublin, University College Dublin <http://www.ucd.ie/foresteng/html/ecowood/op.pdf> (7. 3. 2020).
- Pezdevšek Malovrh, Š., Mihelič, M., Krč, J., 2018. Varstvo gozdnih tal z vidika zakonodaje. *Acta silvae et ligni*, 115, 43–56.
- Poje, A., Mihelič, M., Leban, V., 2019. Analiza strokovnega ocenjevanja poškodovanosti gozdnih tal. *Gozdarski vestnik*, 77, 1: 3–20.
- Poršinsky, T., Sraka, M., Stankić, I., 2006. Comparison of two approaches to soil strength classifications. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 27, 1: 17–26.
- Reintam, E., Vennik, K., Kukkk, L., Kade, S., Krebstein, K. in sod., 2016. Measuring and predicting soil moisture conditions for trafficability. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 66, 8: 698–705.
- Repe, B., 2007. Voda v prsti in ugotavljanje njenega razporejanja v odvisnosti od reliefa. *Dela*, 28, 91–106.
- Salmivaara, A., Miettinen, M., Finér, L., Launiainen, S., Korpunen, H. in sod., 2018. Wheel rut measurements by forest machine-mounted LiDAR sensors – accuracy and potential for operational applications? *International Journal of Forest Engineering*, 29, 1: 41–52.
- Solgi, A., Naghdi, R., Marchi, E., Laschi, A., Keivan Behjou F. in sod., 2019. Impact assessment of skidding extraction: effects on physical and chemical properties of forest soils and on maple seedling growing along the skid trail. *Forests*, 10, 2: 134.
- Solgi, A., Naghdi, R., Nikooy, M., 2015. Effects of skidder on soil compaction, forest floor removal and rut formation. *Madera y Bosques*, 21, 2: 147–155.
- Urbančič, M., Simončič, P., Prus, T., Kutnar, L., 2005. Atlas gozdnih tal Slovenije. (ur.) Ljubljana, Zveza gozdarskih društev Slovenije: 100 str.
- Reintam, E., Vennik, K., Kukkk, L., Kade, S., Krebstein, K. in sod., 2016. Measuring and predicting soil moisture conditions for trafficability. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 66, 8: 698–705.
- Vega-Nieva, D., Murphy, P., Castonguay, M., Ogilvie, J., Arp, P., 2009. A modular terrain model for daily variations in machine-specific forest soil trafficability. *Canadian Journal of Soil Science*, 89: 93–109.
- Zore, P., 2019. Presoja hitrih metod za določanje mehanskih lastnosti tal. Diplomsko delo. Biotehniška fakulteta. Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire. Ljubljana: 46 str.