

Pregled uporabe zračnega laserskega skeniranja površja v gozdarstvu

Airborne Laser Scanning in Forestry – A Review

Milan KOBAL¹, Matevž TRIPLAT², Nike KRAJNC³

Izvleček:

Kobal, M., Triplat, M., Krajnc, N.: Pregled uporabe zračnega laserskega skeniranja površja v gozdarstvu. Gozdarski vestnik, 72/2014, št. 5–6. V slovenščini z izvlečkom in povzetkom v angleščini, cit. lit. 73. Prevod avtorji, jezikovni pregled angleškega besedila Breda Misja, slovenskega Marjetka Šivic.

Zračno lasersko skeniranje površja ALS (ang. *Airborne Laser Scanning*) je metoda daljinskega zaznavanja podatkov, ki se uporablja v različnih prostorskih vedah, veča se tudi njena uporaba v gozdarstvu. Podatki zračnega laserskega skeniranja površja se v gozdarstvu uporabljajo za vrednotenje neposredno merljivih sestojnih parametrov (npr. višina drevja) ter posredno izpeljanih kazalcev (npr. lesna zaloga). Veča se uporaba podatkov zračnega laserskega skeniranja površja pri analizi sprememb v času. Časovne študije v gozdarstvu pomenijo več: npr. časovna študija dela z motorno žago. Navajamo osnove laserskega skeniranja površja. V prispevku so navedene nekatere možnosti uporabe zračnega laserskega skeniranja površja glede na prostorsko raven (npr. krajina, gozdni sestoj, posamezno drevo). Vsi navedeni primeri se nanašajo na območje dinarskih jelovo-bukovih gozdov *Omphalodo-Fagetum* s. lat., GGE Leskova dolina.

Ključne besede: zračno lasersko skeniranje, LiDAR, digitalni model relief, zgradba sestojev, dinarski jelovo-bukovi gozdovi

Abstract:

Kobal, M., Triplat, M., Krajnc, N.: Airborne Laser Scanning in Forestry – A Review. Gozdarski vestnik (Professional Journal of Forestry), 72/2014, vol. 5–6. In Slovenian, abstract and summary in English, lit. quot. 73. Translated by the authors, proofreading of the English text Breda Misja, proofreading of the Slovenian text Marjetka Šivic.

Airborne Laser Scanning is a remote sensing method that is being used in different spatial sciences. It is becoming more and more interesting also in Forestry. In forestry ALS can be used for valuation of directly measurable stand parameters (e.g. tree height) and for indirectly executed stand characteristics (e.g. growing stock). Increasing trend can be noticed in applications of ALS data in time series studies. This article describes basics of ALS data processing. Different spatial scales of ALS data processing are presented (e.g. landscape, forest stand, and single tree). All the presented examples refer to the area of dinaric silver fir – European beech forests *Omphalodo-Fagetum* s.lat., FMU Leskova dolina.

Keywords: airborne laser scanning, LiDAR, digital elevation model, forest stand structure, dinaric silver fir – European Beech forests

1 UVOD

1 INTRODUCTION

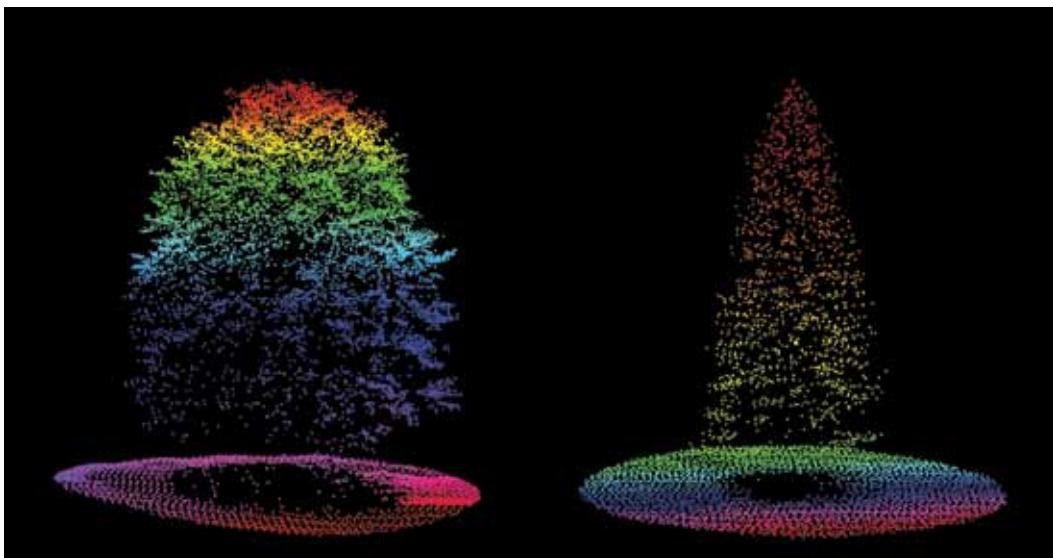
Zračno lasersko skeniranje površja ALS (ang. *Airborne Laser Scanning*) je novejša metoda daljinskega zaznavanja podatkov, ki se je zaradi mnogih pozitivnih lastnosti hitro uveljavila v različnih prostorskih vedah. Poleg zračnega laserskega skeniranja poznamo tudi terestrično lasersko skeniranje. S skupnim izrazom obe tehnologiji označujemo z izrazom LiDAR (ang. *Light Detection And Ranging*), ki nakazuje metodo zajemanja podatkov – za določanje oddaljenosti od objekta laserski instrument beleži čas vračanja odbojev pulzov od površine (Measures, 1992).

Prispevek obravnava zgolj uporabo zračnega laserskega skeniranja površja, ki je v gozdarstvu prisotna za vrednotenje neposredno merljivih sestojnih parametrov, npr. višine drevja, ter posredno izpeljanih kazalcev, kot so npr. temeljnica sestoja ali lesna zaloga (Jakubowski in sod., 2013). Podatki zračnega laserskega skeniranja površja so zlasti primerni za raziskave na različ-

¹Dr. M. Kobal, univ. dipl. inž. gozd., Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, 1000 Ljubljana

²M. Triplat, univ. dipl. inž. gozd., Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, 1000 Ljubljana

³Dr. N. Krajnc, univ. dipl. inž. gozd., Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, 1000 Ljubljana



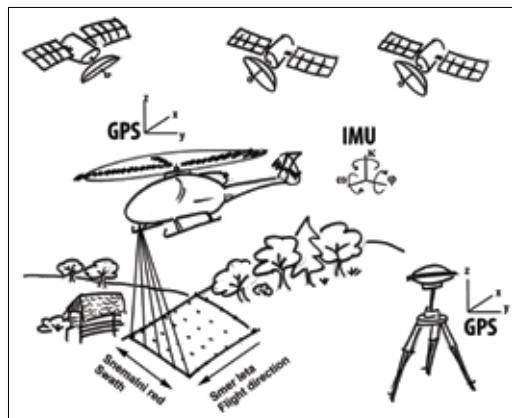
Slika 1: 3D-izsek iz oblaka točk odbojev dveh prostorastočih dreves (levo bukev, desno smreka) na območju GGE Leskova dolina. Povprečna vrednost (mediana) gostote laserskih točk znaša 27.5 ± 0.1 točk/ m^2 . Vizualizacija: Milan Kobal.
Figure 1: 3D-section from lidar point clouds of two single trees (left European beech, right Norway spruce) in the FMU Leskova Dolina. Mean value (median) of laser point density is 27.5 ± 0.1 points/ m^2 . Visualization: Milan Kobal.

nih prostorskih ravneh (npr. za analize krajine, sestojev ali posameznega drevesa), v zadnjem času pa se podatki zračnega laserskega skeniranja površja vse pogosteje (poleg prostorske dimenzije) uporabljajo tudi za analizo sprememb v časovnih serijah. Tako lahko z uporabo podatkov zračnega laserskega skeniranja površja analiziramo spremembe v prostoru in tudi v času.

V tem prispevku a) navajamo osnove laserskega skeniranja površja ter b) na podlagi primerov iz območja dinarskih jelovo-bukovih gozdov nakazujemo možno uporabo podatkov zračnega laserskega skeniranja površja za različne potrebe v gozdarstvu. Vsi navedeni primeri se nanašajo na območje dinarskih jelovo-bukovih gozdov *Omphalodo-Fagetum* s.lat., GGE Leskova dolina, kjer smo leta 2009 opravili zračno lasersko skeniranje površja (glej Kobal, 2011).

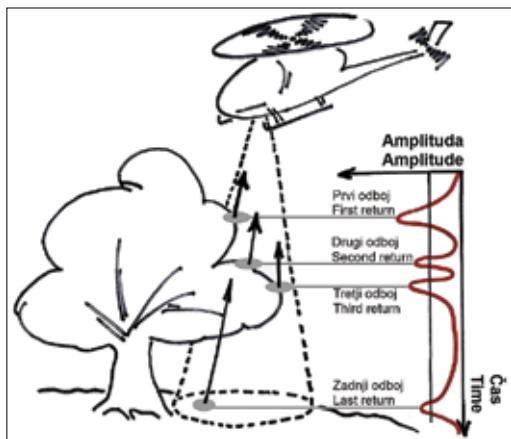
2 OSNOVE LASERSKEGA SKENIRANJA POVRŠJA 2 BASICS OF AIRBORNE LASER SCANNING

Zračno lasersko skeniranje površja je aktivna metoda (sistem je sam sebi vir energije in ni odvisen od zunanjih virov, kot npr. optični sistem)



Slika 2: Shematski prikaz laserskega skeniranja površja (GPS – globalni pozicijski sistem, IMU – inercijska merilna enota, x-y-z – smeri v trirazsežnem prostoru, ω - φ - κ – parametri orientacije). Skica: Robert Krajnc.
Figure 2: Schematic presentation of airborne laser scanning (GPS – global positioning system, IMU – inertial measurement unit, x-y-z – directions in 3D space, ω - φ - κ – orientation parameters). Illustration: Robert Krajnc.

daljinskega zaznavanja, pri kateri pridobivamo prostorske podatke s pomočjo zaznavanja odbojev predhodno oddanih laserskih pulzov (Measures, 1992). Laserski skener določa razdaljo med površjem in laserskim skenerjem na podlagi meritve časa Δt , ki ga potrebuje oddani laserski pulz, da



Slika 3: Shematski prikaz laserskega skeniranja površja in odbojev laserskega žarka vzdolž vegetacije. Amplituda predstavlja intenzitet odbitega valovanja, ki prepotuje razdaljo mesto odbaja-senzor in pada na sprejemni element senzorja. Skica: Robert Krajnc.

Figure 3: Schematic presentations of airborne laser scanning and penetration and reflection of laser beam through dense forest vegetation. Amplitude means intensity of laser beam reflectance from target back to laser scanner. Illustration: Robert Krajnc.

se odbije in vrne do merilnega inštrumenta. Na podlagi Δt in znane hitrosti svetlobe skozi zrak c in obrazca $d = (c \times \Delta t)/2$ lahko določimo razdaljo d od senzorja do odbojne površine.

Poleg časovne razlike je za določitev točke odboja v tridimenzionalnem (3D) prostoru treba v vsakem trenutku poznati še natančno lokacijo in smer merilnega inštrumenta ter odklon oddanega laserskega pulza od srednje osi inštrumenta. Te podatke določimo z globalnim pozicijskim sistemom (Global Positioning System – GPS) in enoto za inercialno merjenje (Inertial Measurement Unit – IMU) ter parametri orientacije (Slika 2).

Vzorčenje oblaka točk odbojev na zemeljskem površju in/ali v notranjosti gozda poteka pravokotno na smer leta, in sicer tako, da laserski skener s pomočjo nihajočega se ogledala periodično odklanja smeri oddajanja laserskega pulza. Končni rezultat laserskega skeniranja površja je 3D-oblak točk, ki jih določajo x , y in z koordinate odbojev v poljubnem trirazsežnem koordinatnem sistemu (Slika 1). Značilnost laserskega skeniranja površja v gozdarstvu je, da laserski pulz lahko prodre tudi skozi drevesne krošnje, zato je mogoče zaznavati teren pod krošnjami (Slika 3). Pri tem je treba pou-

dati, da se laserski pulz odbije tudi od različnih delov dreves (vej, listja, debla), kar pri laserskem skeniranju površja v gozdarstvu lahko (spretno) izkorisčamo za vrednotenje zgradbe gozda.

3 PREGLED UPORABE PODATKOV ZRAČNEGA LASERSKEGA SKENIRANJA POVRSJA V GOZDARSTVU

3 REVIEW OF AIRBORNE LASER SCANNING DATA USE IN FORESTRY

Medtem ko se v Sloveniji (na področju gozdarstva) zračno lasersko skeniranje površja še razvija in uveljavlja, izjema so nekatera dela Koblerja s sodelavci (npr. Kobler in Zafran, 2006; Kobler s sod., 2007; Kobler, 2011) ter Kobala s sodelavci (Kobal, 2011; Kobal in Hladnik, 2013), pa se je uporaba podatkov zračnega laserskega skeniranja površja v gozdarstvu v tujini že dodata uveljavila (glej npr. Hyypä s sod., 2008; Bergen s sod., 2009; Pirotti, 2011; van Leeuwen s sod., 2011 ter Wulder s sod., 2012). Opaziti je več raziskav uporabe podatkov zračnega laserskega skeniranja površja na področju velikoprostorskega vrednotenja gozdnih fondov in sestojnih kazalcev (Hollaus s sod., 2009; Hyppä s sod., 2012; Nord-Larsen in Schumacher, 2012), vse več pa je raziskav, kjer se ti podatki uporabljajo npr. za različne ekološke študije, hidrološka modeliranja in modeliranja pobočnih procesov.

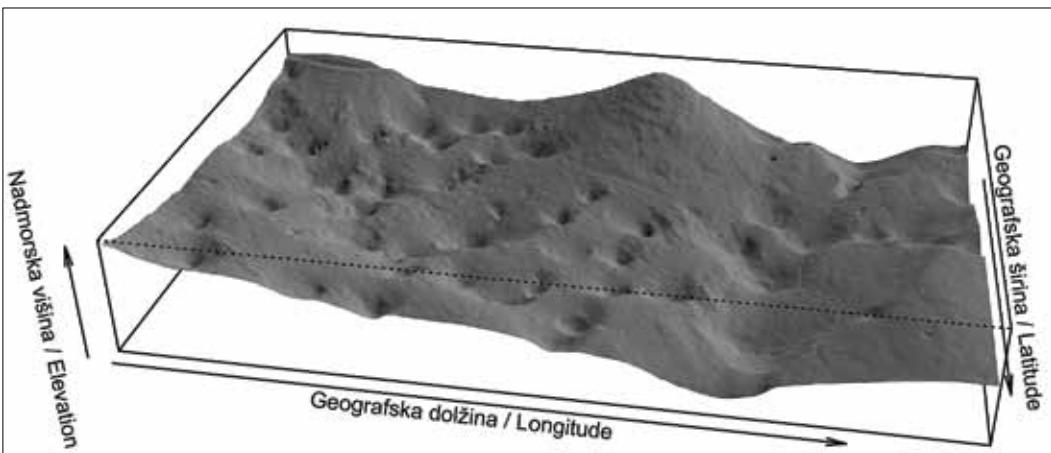
V grobem lahko uporabo podatkov zračnega laserskega skeniranja površja delimo v tri skupine, in sicer glede na prostorsko raven:

- uporaba podatkov zračnega laserskega skeniranja površja na ravni krajine;
- uporaba podatkov zračnega laserskega skeniranja površja na ravni gozdnih sestoj;
- uporaba podatkov zračnega laserskega skeniranja površja na ravni posameznega drevesa.

3.1 Uporaba podatkov zračnega laserskega skeniranja površja na ravni krajine

3.1 Use of airborne laser scanning data on the landscape level

Eno najpomembnejših področij uporabe podatkov zračnega laserskega skeniranja površja, ne samo v



Slika 4: 3D-izsek iz digitalnega modela reliefsa 1×1 m, narejen iz podatkov laserskega skeniranja površja. Prikazano je območje v GGE Leskova dolina (oddelek 34). Povprečna vrednost (mediana) gostote laserskih točk znaša 27.5 ± 0.1 točk/ m^2 . Vizualizacija: Milan Kobal.

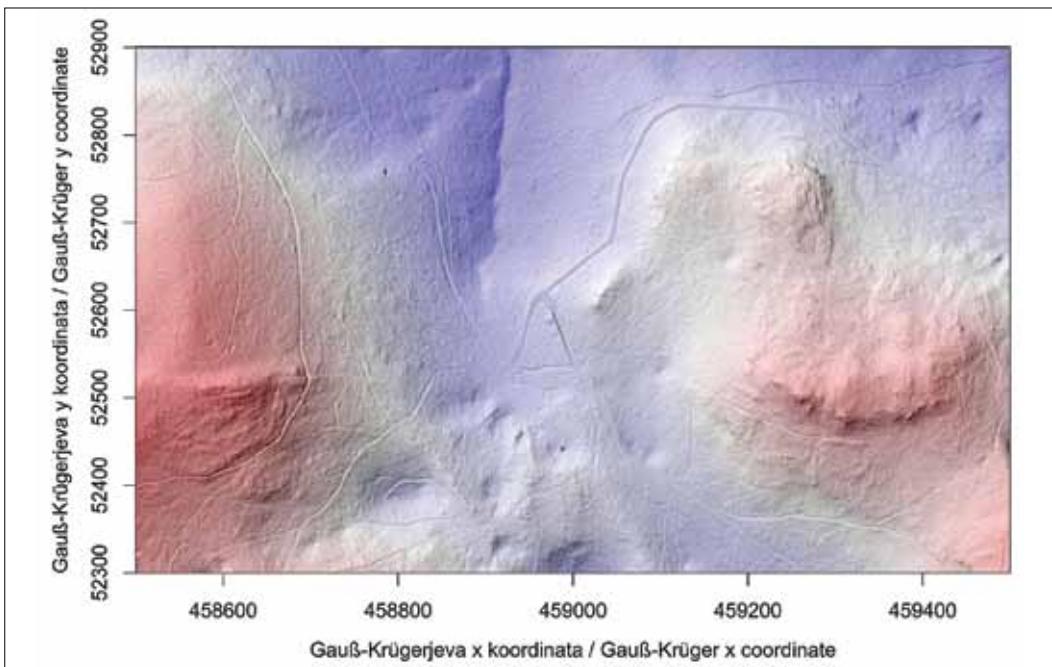
Figure 4: 3D-section from the digital elevation model of the 1×1 m, derived from airborne laser scanning. An area in FMU Leskova Dolina (forest compartment 34) is presented. Mean value (median) of laser point density is 27.5 ± 0.1 points/ m^2 . Visualization: Milan Kobal.

gozdarstvu, ampak tudi širše, je izdelava digitalnih modelov reliefsa (DMR, Slika 4 in 5). Razvili so se številni različni algoritmi (npr. Kraus in Pfeiffer, 1998; Axelsson, 1999; Lohmann s sod., 2000; Elmqvist, 2001; Kobler s sod., 2007) za izdelavo DMR, ki bolj ali manj uspešno razvrstijo 3D-oblak točk na tiste, ki predstavljajo odboje od golih tal in na odboje, ki so nastali zaradi drugih vzrokov (npr. vegetacija, grajeni objekti). Podrobni pregled omenjenih algoritmov in primerjave kakovosti njihove izdelave DMR so prikazane v Meng s sodelavci (2010).

Kakovosten DMR je ključna osnova za različne prostorske študije, ki temeljijo na podatkih DMR. Kot primer analize podatkov zračnega laserskega skeniranja površja na ravni krajine navajamo raziskavi avtomatskega izločanja vrtač kot pomembnega habitatnega tipa (Bátori s sod., 2012). V Sloveniji sta algoritem opisala Obu in Podobnikar (2013), v tujini pa Doctor in Young (2013). Glavni vhodni parameter je DMR, sam algoritem pa temelji na simulaciji vodnega toka po površju in na metodologiji lokalnih oken velikosti 3×3 celice. Postopek avtomatskega prepoznavanja kraških kotanj na podlagi DMR poteka v štirih fazah: 1) računanje porečij kotanj, 2) omejevanje kotanj, 3) omejevanje kotanj višjega reda, 4) izločanje nekraških kotanj.

Drugi primer uporabe podatkov zračnega laserskega skeniranja površja na nivoju krajine oz. natančnega DMR predstavljajo razlike raziskave vrednotenja pobočnih procesov oz. erozije na eni strani in odlaganja materiala na drugi. Bremer in Sass (2012) sta objavila rezultate raziskave iz doline Halltal (Tirolska, Avstrija), v kateri sta primerjala podatke zračnega laserskega skeniranja površja s podatki terestričnega laserskega skeniranja površja. Njune ugotovitve potrjujejo, da na obseg in razpon plavin vplivajo zlasti velikost povodja, topografske značilnosti in vegetacijski pokrov.

Eysn s sodelavci (2012) je za območje Tirolske (Zillertal) razvil algoritem za razmejevanje gozdnih površin od preostale rabe tal. Algoritmom deluje na podlagi dveh prostorskih slojev, pridobljenih iz surovega 3D-oblaka točk. Prvi sloj zajema digitalni model krošenj (DMK) in predstavlja višino vegetacije, drugi pa je sloj hrapavosti površine, ki predstavlja lokalno prepustnost in hrapavost površine. Sloj DMK razlikuje neporaščene rabe, stavbe pa je mogoče razločiti iz sloja prepustnosti oz. hrapavosti površine, ki se v gozdovih razlikuje od preostale rabe tal. Natančnost opisanega modela za razmejevanje gozdnih površin od preostale rabe tal je 96 %.



Slika 5: Izsek iz senčenega digitalnega modela reljefa 1×1 m, narejena iz podatkov laserskega skeniranja površja. Prikazano je območje v GGE Leskova dolina (oddelka 2 in 3). Razvidne so vlake in ceste. Povprečna vrednost (mediana) gostote laserskih točk znaša 27.5 ± 0.1 točk/m². Kartografija: Milan Kobal.

Figure 5: Section from the shaded digital elevation model of 1×1 m, derived from the airborne laser scanning. An area in FMU Leskova Dolina (forest compartments 2 and 3) is presented. Skidding trails and roads are visible. Mean value (median) of laser point density is 27.5 ± 0.1 points/m². Cartography: Milan Kobal.

3.2 Uporaba podatkov zračnega laserskega skeniranja površja na ravni sestoja

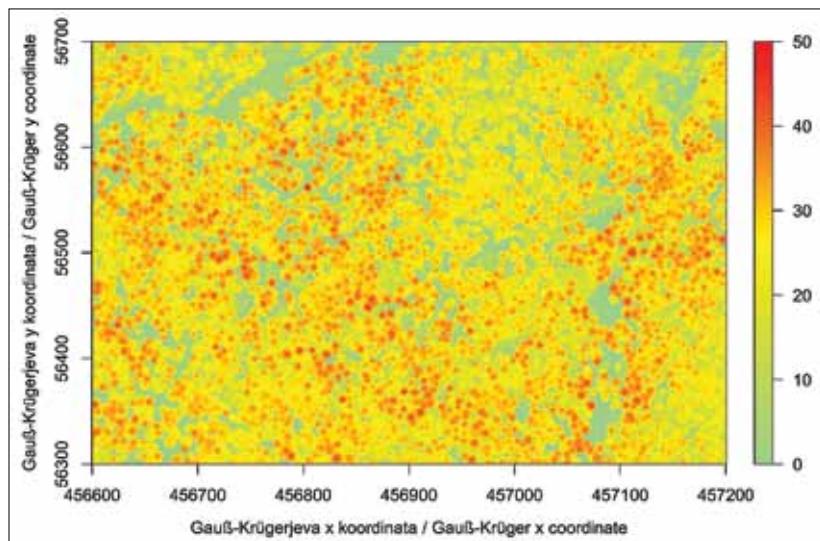
3.2 Use of airborne laser scanning data on the forest stand level

Temeljni podatkovni sloj pri uporabi podatkov zračnega laserskega skeniranja površja na ravni sestoju je digitalni model krošenj (DMK) vse pogosteje pa tudi normaliziran 3D-oblak točk. Kot že rečeno, DMK v gozdnom prostoru predstavlja višino drevja (Slika 6), normaliziran oblak točk pa predstavlja projekcijo točk v ravnino z nadmorsko višino 0 m. Izračunamo jo tako, da za vse točke, ki so na območju ene celice DMR, odštejemo vrednost (nadmorsko višino) te celice.

Najbolj temeljni podatek o sestoju, ki ga izluščimo iz DMK, je podatek o višini drevja, bodisi povprečni, zgornji, minimalni itn. Večina raziskovalcev poroča, da je podatek o višini drevja podcenjen (npr. Nilson, 1996; Næsset, 1997; Alberti s sod., 2013), in sicer bolj za drevesa s

stožčasto obliko krošnje (predvsem iglavci) in manj za drevesa z eliptičnimi krošnjami (predvsem listavci), kar je povsem razumljivo, saj je verjetnost, da laserski žarek zadene točno terminalni poganjek iglavca, majhna (Næsset, 1997).

Podatek DMK oz. iz njega speljani rezultati se pogosto uporabljajo kot vhodni parametri za modeliranje drugih sestojnih kazalcev, kot so srednje temeljnični premer dreves na ploskvi (Nilson, 1996; Anderson s sod., 2006), temeljnica (Lefsky s sod., 1999a; Drake s sod., 2002) ter lesna zaloga (Næsset, 1997; Hollaus s sod., 2009) oz. nadzemna biomasa (Lefsky s sod., 1999a; Drake s sod., 2002; Anderson s sod., 2006; Kankare s sod., 2013). Kot pojasnjevalne spremenljivke se uporabljajo produkti DMK, in sicer, zgornja višina celic DMK na ploskvi, srednja višina celic DMK na ploskvi, mediana celic DMK na ploskvi. Kot pojasnjevalne spremenljivke v raznih modelih pa se uporablja tudi vertikalni profili vegetacije. Pridobimo ga tako, tako da izračunamo npr. percentile ali decile DMK na ploskvi (Lefsky s sod., 1999b).



Slika 6: Izsek iz digitalnega modela krošenj z velikostjo celice 1×1 m, narejena iz podatkov laserskega skeniranja površja. Prikazano je območje v GGE Leskova dolina (oddelek 34). Povprečna vrednost (mediana) gostote laserskih točk znaša 27.5 ± 0.1 točk/m². Kartografija: Milan Kobal.

Figure 6: Section from the digital canopy height model of tree crowns with cell size of 1×1 m, prepared on the basis of airborne laser scanning. An area in FMU Leskova Dolina (forest compartment 34) is presented. Mean value (median) of laser point density is 27.5 ± 0.1 points/m². Cartography: Milan Kobal.

Podatki zračnega laserskega skeniranja površja se v raziskavah na ravni sestojev med drugim uporabljajo tudi za določanje različnih ekoloških značilnosti sestojev, kamor lahko uvrstimo svetlobne razmere, ki jih pri klasičnem opisu gozdnih sestojev ocenjujemo na podlagi sestojnega sklepa. Na sliki 7 je prikazana karta digitalnega modela sestojnega sklepa z območja te raziskave, in sicer je sestojni sklep prikazan kot razmerje med številom točk, ki v normaliziranem oblaku točk ležijo pod določeno višino (v tem primeru smo se odločili za 2 m) in številom vseh točk znotraj rastrske celice (McGaughey, 2009). Pogosto je za oceno svetlobnih razmer iz podatkov zračnega laserskega skeniranja površja v uporabi metodologija izračunavanja indeksa listne površine (npr. Hopkinson in Chasmer, 2009; Kobler, 2011). Primer uporabe podatkov zračnega laserskega skeniranja površja v raziskavah vodne bilance gozdnih sestojev je podrobnejše predstavila Roth s sodelavci (2007).

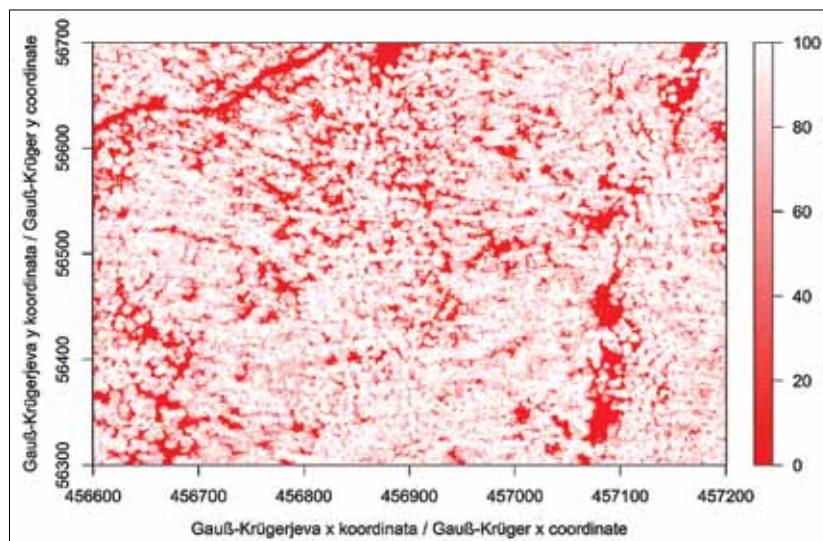
Na podlagi segmentacije kart so se uveljavili različni postopki razmejevanja gozdnih sestojev (Diedershagen s sod., 2004; Leppänen s sod., 2008; Chen s sod., 2011; Kobler, 2011), kjer pa se poleg podatkov zračnega laserskega skeniranja

površja uporabljajo tudi podatki različnih optičnih in satelitskih snemanj. Pri pregledu literature o uporabi zračnega laserskega skeniranja površja na ravni sestojev je mogoče zaslediti še številne primere, ki jih je nemogoče vse navesti. V nadaljevanju navajamo nekatera temeljna pregledna dela, kjer so širše predstavljene možnosti uporabe podatkov zračnega laserskega skeniranja površja na različnih področjih raziskovanju gozdnega ekosistema. Mednje uvrščamo objave avtorjev: Hyypää s sodelavci (2008), Bergen s sodelavci (2009), Pirotti (2011), van Leeuwen s sodelavci (2011) ter Wulder s sodelavci (2012).

3.3 Uporaba podatkov zračnega laserskega skeniranja površja na ravni drevesa

3.3 Use of airborne laser scanning data on the single tree level

Novejši izračuni na področju uporabe podatkov zračnega laserskega skeniranja površja v gozdarstvu potekajo predvsem na ravni posameznega drevesa. Med temeljnimi značilnostmi, ki jih pridobimo iz podatkov zračnega laserskega skeniranja površja na ravni posameznega drevesa,



Slika 7: Izsek iz digitalnega modela sestojnega sklepa 1×1 m, narejen iz podatkov laserskega skeniranja površja. Prikazano je območje v GGE Leskova dolina (oddelek 34). Bela barva predstavlja krošnje, rdeča vrzeli. Povprečna vrednost (mediana) gostote laserskih točk znaša 27.5 ± 0.1 točk/ m^2 . Kartografija: Milan Kobal.

Figure 7: Section from the digital canopy cover model of 1×1 m, prepared on the basis of laser scanning. An area in FMU Leskova Dolina (forest compartment 34) is presented. White colours indicate crowns, red colours indicate gaps. Mean value (median) of laser point density is 27.5 ± 0.1 points/ m^2 . Cartography: Milan Kobal.

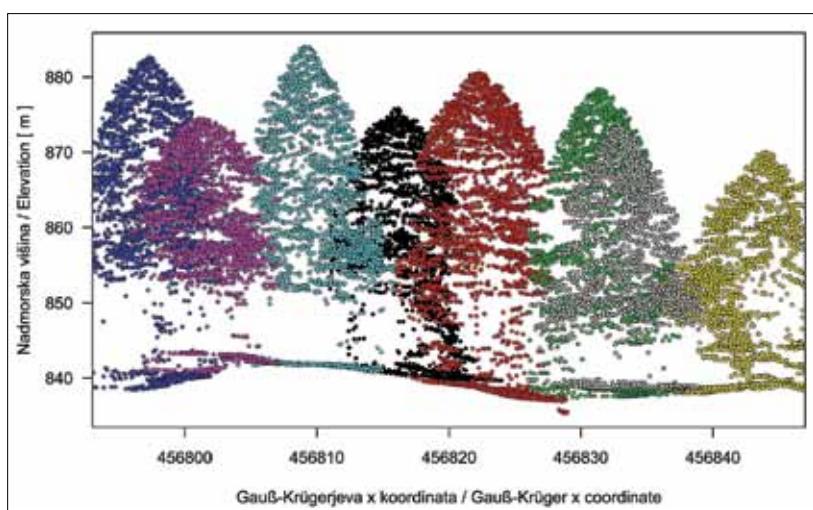
so njegova višina, širina in globina krošnje (npr. Popescu s sod., 2003; Falkowski s sod., 2006), prsní premer, temeljnica in volumen (npr. Chen s sod., 2007; Dalponte s sod., 2011), drevesna vrsta (Reitberger s sod., 2008; Yao s sod., 2012) ter seveda njegova lokacija, ki je pogoj za razpoznavanje omenjenih parametrov.

Primeri obstoječih metod razmejevanja oz. prepoznavanja krošenj posameznih dreves temel-

ijo na sledenju dolin (npr. Gougeon, 1995), prepoznavanju senc med drevesi (npr. Warner s sod., 1998), združevanju regij (npr. Erikson, 2003), odkrivanju robov (npr. Koch s sod., 2006), segmentaciji razvodij (Hyppä in Inkinen, 1999; Chen s sod., 2006) ter tridimenzionalnem modeliranju (Li s sod., 2012). Primer razpoznavanja dreves v oblaku točk z metodo segmentacije razvodij je prikazan na sliki 8. Dolina, regija in

Slika 8: Vzdolžni profil 3D-oblaka točk LiDAR podatkov v GGE Leskova dolina, kjer barve nakazujejo različna samodejno prepoznanata drevesa. Povprečna vrednost (mediana) gostote laserskih točk znaša 27.5 ± 0.1 točk/ m^2 . Vizualizacija: Milan Kobal.

Figure 8: Profile of a 3D-point cloud of LiDAR data in FMU Leskova Dolina, where colors indicate different automatically detected trees. Mean value (median) of laser point density is 27.5 ± 0.1 points/ m^2 . Vizualization: Milan Kobal.



razvodenje imajo pri tem identičen pomen kot pri hidroloških raziskavah.

3.4 Uporaba časovnih podatkov zračnega laserskega skeniranja površja

3.4 Use of temporal airborne laser scanning data

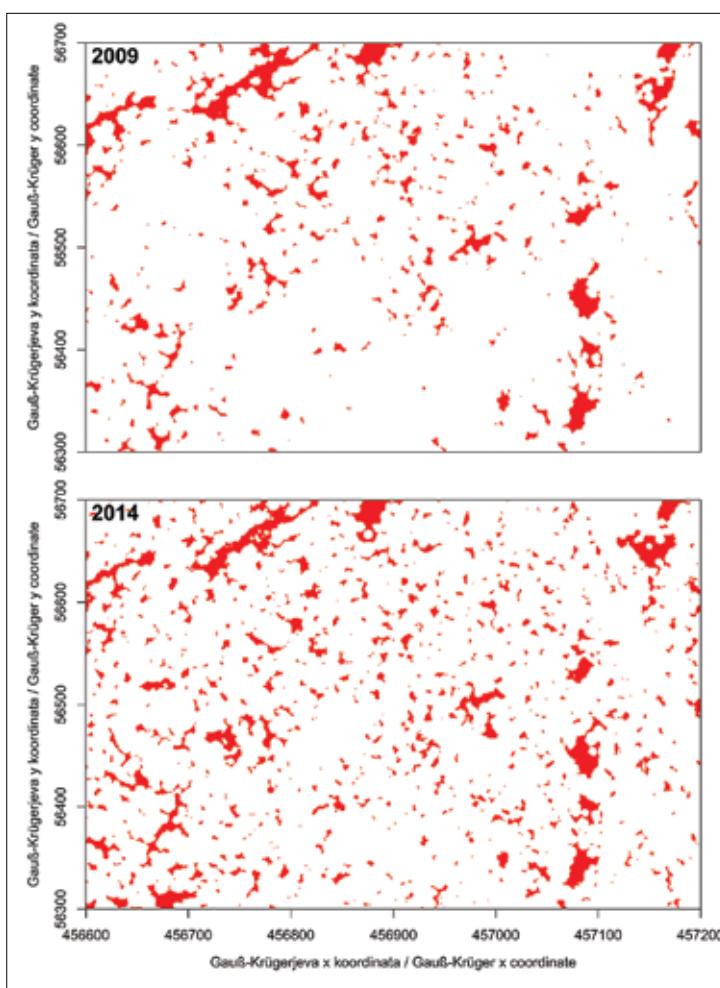
Poleg prostorske dimenzije, ki jo podatki zračnega laserskega skeniranja površja že vključujejo, se v zadnjem času veča število raziskav, v katerih raziskovalci analizirajo časovne serije zaporednih laserskih snemanj in ugotavljajo npr. količino

poseka ter prirastek gozdnih sestojev (Yu in sod., 2004; Engelhart s sod., 2013). Vepakomma s sodelavci (2010) je objavil študijo širjenja vrzeli oz. pomladitvenih jeder. Z zaporednimi snemanji lahko spremljamo dinamičen razvoj sestaja oz. gozdne površine kot celote.

3.4.1 Prepoznavanje žledoloma 2014 s pomočjo podatkov laserskega skeniranja

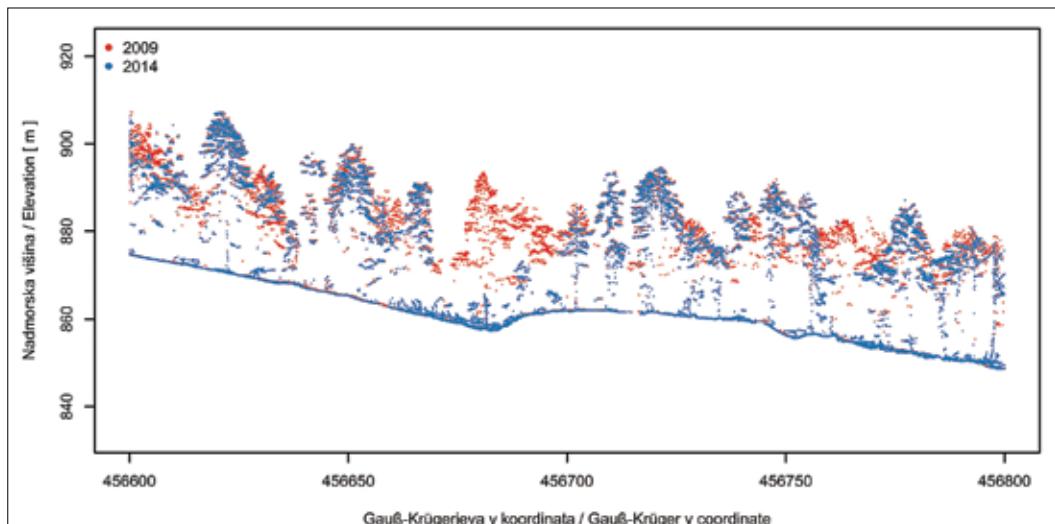
3.4.1 Identification of ice storm 2014 using laser scanning data

Raziskav, s katerimi bi na podlagi podatkov laserskega skeniranja površja vrednotili obsege različnih



Slika 9: Prostorska razporeditev vrzeli leta 2009 in leta 2014. Vrzel je definirana kot območje, kjer je zgornja višina krošenj nižja od 5 m. Prikazan je oddelek 34, GGE Leskova dolina. Kartografija: Milan Kobal.

Figure 9: Spatial distribution of gaps in the year 2009 and in the year 2014. A gap is defined as an area with the upper height of tree crowns below 5 m. Forest compartment 34, FMU Leskova dolina is shown. Cartography: Milan Kobal.



Slika 10: Vzdolžni profil 3D-oblaka točk LiDAR podatkov v GGE Leskova dolina, kjer rdeča barva prikazuje stanje leta 2009, modra pa stanje leta 2014. Širina izseka je 2 m. Povprečna vrednost (mediana) gostote laserskih točk znaša 27.5 ± 0.1 točk/m². Vizualizacija: Milan Kobal.

Figure 10: Lengthways profile of a 3D-point cloud of LiDAR data in FMU Leskova Dolina, where red color indicates condition in 2009 and the blue one condition in 2014. Section's width is 2 m. Mean value (median) of laser point density is 27.5 ± 0.1 points/m². Vizualization: Milan Kobal.

motenj gozdnega ekosistema, ni veliko, opazni pa sta dve različni uporabi, ki sta šele na začetku razvoja. Za prvo je značilno samodejno prepoznavanje na tleh podrtega drevja, in sicer samo na podlagi enkratnega zajema podatkov. Metoda temelji na prepoznavanju vzorcev linijskih objektov, ki ležijo na tleh (npr. Lindberg s sod., 2013; Mücke s sod., 2013) oziroma na ujemaju predhodno definiranih pravokotnih oblik ležečega drevja (npr. Nyström s sod. 2014). Za to metodo je značilno, da za obdelavo podatkov nista potrebeni dve zaporedni laserski skenirani, izkazala pa se je predvsem pri vetrolomih.

Druga metoda temelji na razlikah v zgradbi sestojata pred in po dogodku oziroma motnji in po njem oziroma motnji (npr. vetrolom, žledołom, snegolom). Mogoča je analiza spremembe horizontalne zgradbe (Sliki 9) oziroma vertikalne zgradbe gozda (Zhang s sod., 2008; Vastaranta s sod., 2012; Honkavaara s sod., 2013). Primer iz GGE Leskova dolina je prikazan na sliki 10.

4 RAZPRAVA IN ZAKLJUČKI

4 DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Pomemben parameter laserskega skeniranja površja je gostota snemanja odbojev laserskih pulzov

(Jakubowski s sod., 2013; Watt s sod., 2013). Večjo gostoto točk pri zračnem laserskem skenirjanju površja dosežemo s povečanjem števila oddanih pulzov, hitrostjo skeniranja, prekrivanja leta (ali večkratnimi preleti) ter nižanjem višine in hitrosti letenja (Jakubowski in sod. 2013). V našem primeru je bila gostota snemanja 27.5 ± 0.1 točk/m².

Poleg same gostote laserskih točk je pomembna tudi zgradba gozda (Wulder s sod., 2008; Kobler, 2011). Kot navaja Kobler (2011), se veliko objavljenih metod v glavnem osredotoča na borealni gozd, ki je s stališča daljinskega zaznavanja, še posebno pa s stališča zračnega laserskega skeniranja površja bistveno enostavnejši problem kot pa strma pobočja, pokrita z raznolikim listnatim in mešanim gozdom, kakršen prevladuje v Sloveniji. Tudi v tem prispevku veliko navedenih raziskav izhaja iz enomernih borealnih gozdov, večinoma ene drevesne vrste.

Razvidno je, da iz podatkov zračnega laserskega skeniranja površja lahko precej hitro in na velikih površinah pridobivamo relativno zanesljive podatke ob zelo majhnem časovnem vložku. Metode daljinskega zajema podatkov so izjemno zanimive že od samega pojava, saj zmanj-

šujejo porabo časa in stroškov pri pridobivanju podatkov, hkrati pa izboljšujejo vrednost ciljnega podatka (Kušar in Hočevar, 2000). Dandanes je zračno lasersko skeniranje površja glede na celotne stroške (zajem podatkov, analiza, osebje, programska oprema itn.) že konkurenčno primerljivo daljinskim metodam, še posebno za velike površine (Johansen in sod., 2010; Jakubowski in sod., 2013). Razumljivo je, da se z večanjem velikosti območja snemanja in gostote laserskih točk (tj. več oddanih laserskih pulzov na enoto površine) večajo tudi stroški snemanja. Zato morajo uporabniki podatkov vedno sprejemati kompromise ob predpostavki, da se ohrani zadostna kakovost podatkov oz. takšna, ki še zagotavlja zadostno natančnost pričakovanega rezultata.

Jakubowski sodelavci (2013) ugotavljajo, da nekatere sestojne kazalnike (npr. srednji premer, srednja sestojna višina) lahko kakovostno določimo že pri relativno nizki natančnosti zračnih laserskih snemanj. Pri tem je nujno treba upoštevati stopnjo penetracije laserskih žarkov skozi profil vegetacije na tla, da potem lahko izdelamo kakovosten digitalni model reliefa in pozneje digitalni model krošenj. Tako govorimo o stopnji prodiranja laserskega žarka skozi vegetacijo. Za bukove sestoste velja, da bukev tvori tesen sestojni sklep in je zato penetracija laserskih žarkov majhna (Heurich in Thoma, 2008); Barilotti sodelavci (2006) za gozdove v Furlaniji-Julijski krajini poroča o povprečni penetraciji (izračunano kot razmerje med številom točk, ki so do višine 1 m nad tlemi in številom vseh točk znotraj ploskev, premora 5 m) 9 %; tako za gozdove jelke kot za gozdove bukve znaša penetracija 2 %, za smrekove in jelove sestoste 9 % ter za smrekove 15,1 %. Upoštevajoč stopnjo penetracije skozi krošnje dreves to pomeni, da imamo v bukovih sestojih pri gostoti snemanja 50 točk / m² natanko eno točko na tleh. Tudi po poročanjih drugih tujih raziskovalcev lahko trdimo, da je stopnja penetracije odvisna predvsem od sestojnega sklepa in tako znaša od nekaj odstotkov do nekaj deset (Chasmer in sod., 2006; Hyppä in sod., 2000; Popescu, 2002; Kraus in Pfeiffer, 1998). Ugotovitve raziskav kažejo tudi na pozitiven vpliv frekvence snemanja na stopnjo penetracije, saj nižja frekvenca (50 kHz v primerjavi z 100

kHz) prodre globlje v krošnje in prinaša boljše rezultate (Chasmer in sod. 2006).

Zbiranje informacij o stanju gozdnih sestojev je časovno in finančno najzahtevnejše opravilo v procesu izdelave gozdnogospodarskega načrta gozdnogospodarske enote (Poljanec in Gartner, 2009). Načrtovalec, podobno kot drugi uporabniki daljinsko pridobljenih podatkov, išče kompromis med potrebami po informacijah in časom ter denarjem, ki ga ima na voljo za zbiranje informacij. Racionalizacija in učinkovitost dela pri pridobivanju informacij o gozdnih sestojih narekuje uporabo vzorčnih metod (Poljanec in Gartner, 2009). V Sloveniji strošek kontrolne vzorčne metode znaša od 40 do 57 € na stalno vzorčno ploskev (upoštevajoč režijske, materialne in vse druge stroške), cena je zelo odvisna od terenskih razmer (Kozorog, 2009). Po ugotovitvah Kozoroga (2009) se je poraba časa in stroškov v zadnjih desetletjih zmanjšala za več kot šestkrat. Ali je mogoče z uporabo podatkov zračnega laserskega sekiranja površja še racionalneje pridobiti podatke o gozdovih, bo pokazal čas, vsekakor pa primeri uporabe podatkov zračnega laserskega skeniranja površja, navedeni v tem prispevku, nakazujejo na smotrnost uporabe podatkov zračnega laserskega skeniranja v gozdnogospodarskem načrtovanju na večjih površinah. Do podobnih ugotovitev so prišli tudi Hummel in sodelavci (2011), ki so proučevali primernost daljinsko pridobljenih podatkov (v kombinaciji z vzorčnimi ploskvami) s tradicionalnimi opisi sestojev in ugotovili, da so natančnost in stroški podatkov zračnega laserskega skeniranja podatkov primerljivi tradicionalnim metodam. Vendar pa s podatki zračnega laserskega skeniranja površja v istem času zagotovimo informacije za veliko večje območje.

S prispevkom skušamo prikazati možnosti sodobnih tehnologij daljinskega zaznavanja podatkov v gozdarstvu. Kot je razvidno, obravnavana tehnologija ponuja za gozdarstvo zanimive rešitve. Hkrati se v bližnji prihodnosti obetajo podatki laserskega skeniranja površja za celotno državo in je le še vprašanje časa, kdaj jih bomo pridom začeli uporabljati pri vsakdanjem delu gozdarjev v operativi (načrtovalci, gozdarski tehnologi itn.).

5 SUMMARY

5 POVZETEK

Airborne Laser Scanning (ALS) is one of the latest remote sensing methods being used in different spatial sciences. Light Detection and Ranging (LiDAR) is a method for surface scanning based on detection (of time difference) of transmitted laser pulse between laser scanner and scanned surface. For exact determination of the reflection point in three dimensional (3D) space, the exact position, angle of the measuring instrument (laser scanner) and the deviation of the laser pulse emitted from the central axis of the instrument are needed. The result of ALS is a 3D cloud of points with spatial information determining the x, y and z coordinates of the reflections. In forestry, ALS is used for evaluation of directly measurable stand parameters (e.g. tree height) and for indirectly executed stand characteristics (e.g. growing stock). The biggest feature of ALS in forestry is that the laser pulse penetrates even through the stand canopy; therefore it is possible to detect the surface below the canopy and also different parts of tree (e.g. branches, leaves, and trunk). This article describes basics of ALS data processing in different spatial scales (e.g. landscape, forest stand, and single tree). One of the most important applications of ALS landscape processing is production of high-resolution digital terrain models (DTM), which is a basis for studies on forest stand level or single-tree level. Recently ALS data were also used for at-time series studies. The article presents the first results of tree gaps arisen after ice storm in 2014. In addition, guidelines for scanning of high-resolution data and economic aspect of data acquisition on a large scale in forestry are presented. Discussed method offers interesting cost effective solutions for forestry and forest management planning.

6 ZAHVALA

6 ACKNOWLEDGEMENT

Delo je nastalo v sklopu mednarodnega projekta „NewFor – NEW technologies for a better mountain FOREst timber mobilization“, program financiranja Alpine Space. Podatki so bili zbrani v okviru CRP projektu V4-0541 „Pomen talnih

lastnosti in mikroklimatskih razmer za proizvodno sposobnost jelke na rastiščih dinarskih jelovo bukovih gozdov“ ter programske skupine P4-0107 „Gozdna biologija, ekologija in tehnologija“. Za recenzijo in nasvete pri pripravi prispevka se avtorji zahvaljujemo doc. dr. Alešu Kaduncu.

7 VIRI

7 REFERENCES

- Alberti, G., Boscutti F., Pirotti F., Bertacco, C., De Simon, G., Sigura, M., Cazorzi, F., Bonfanti, P., 2013. A LiDAR-based approach for a multi-purpose characterization of Alpine forests: an Italian case study. *iForest - Biogeosciences & Forestry*, 6, 3: 156–168.
- Anderson, J., Martin, M. E., Smith, M. L., Dubayah, R.O., Hofton, M.A., Hyde, P., Peterson, B.E., Blair, J.B., Knox, R.G., 2006. The use of waveform lidar to measure northern temperate mixed conifer and deciduous forest structure in New Hampshire. *Remote Sensing of Environment*, 105, 3: 248–261.
- Axelsson, P. E., 1999. Processing of laser scanner data-algorithms and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, 2/3: 138–147.
- Barilotti, A., Turco, S., Alberti, G., 2006. LAI determination in forestry ecosystems by LiDAR data analysis. *3D Remote Sensing in Forestry*. V:3DRS in Forestry, International Workshop, Vienna, 14.–15.Februar 2006. (<http://www.rali.boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H85000/H85700/workshops/3drsforestry/presentations/8b.3-barilotti.pdf>)
- Bátori, Z., Körmöczi, L., Erdős, L., Zalatnai, M., Csiky J., 2012. Importance of karst sinkholes in preserving relict, mountain, and wetwoodland plant species under sub-Mediterranean climate: a case study from southern Hungary. *Journal of Cave and Karst Studies*, 74, 1: 127–134.
- Bergen, K. M., Goetz, S. J., Dubayah, R. O., Henebry, G. M., Hunsaker, C. T., Imhoff, M. L., Nelson, R. F., Parker, G. G., Radeloff, V. C., 2009. Remote sensing of vegetation 3-D structure for biodiversity and habitat: review and implications for lidar and radar spaceborne missions. *Journal of Geophysical research*, 114: 1–13.
- Bremer, M., Sass, O., 2012. Combining airborne and terrestrial laser scanning for quantifying erosion and deposition by a debris flow event. *Geomorphology*, 138, 1: 49–60.
- Chasmer, L., Hopkinson, C., Smith, B., Treitz, P., 2006. Examining the Influence of Changing Laser Pulse Repetition Frequencies on Conifer Forest Canopy Returns. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72, 12:1359–1367.

- Chen, G., Hay, G. J., Castilla, G., St-Onge, B., Powers, R., 2011. A Multiscale Geographic Object-based Image Analysis to Estimate Lidar-measured Forest Canopy Height using Quickbird Imagery. International Journal of Geographical Information Science, 25, 6: 877–893.
- Chen, Q., Baldocchi, D., Gong, P., Kelly, M., 2006. Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 72, 8: 923–932.
- Chen, Q., Gong, P., Baldocchi, D., Tian Y.Q., 2007. Estimating Basal Area and Stem Volume for Individual Trees from Lidar Data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 73, 12: 1355–1365.
- Dalponte, M., Bruzzone, L., Gianelle, D., 2011. A System for the Estimation of Single-Tree Stem Diameter and Volume Using Multireturn LIDAR Data. Geoscience and Remote Sensing, 49,7: 2479 – 2490.
- Diedershagen, O., Koch, B., Weinacker, H., 2004. Automatic segmentation and characterisation of forest stand parameters using airborne LiDAR data, multispectral and FOGIS dataV: Proceedings of the ISPRS working group VIII/2.Freiburg, Germany: 208–212.
- Doctor, D. H., Young, J. A., 2013. An evaluation of automated GIS tools for delineating karst sinkholes and closed depressions from 1-meter LiDAR-derived digital elevation data. V: Proceedings of the 13th Multidisciplinary Conference on Sinkhole and Engineering and Environmental Impacts of Karst, National Cave and Karst research Institute Symposium 2. Carlsbad, New Mexico: 449 – 458.
- Drake, J. B., Dubayah, R. O., Clark, D. B., Knox, R. G., Blair, J. B., Hofton, M. A., Chazdon, R. L., Weishampel, J. F., Prince, S., 2002. Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint LiDAR. Remote Sensing of Environment, 79, 2/3: 305–319.
- Elmqvist, M., 2001. Ground estimation of lasar radar data using active shape models, Paper presented at the OEEPE workshop on airborne laserscanning and interferometric SAR for detailed digital elevation models 1–3 March 2001, paper 5 (8 pages). Royal Institute of Technology Department of Geodesy and Photogrammetry 100 Stockholm, Sweden.
- Englhart, S., Jubanski, J., Siegert, F., 2013. Quantifying Dynamics in Tropical Peat Swamp Forest Biomass with Multi-Temporal LiDAR Datasets. Remote Sensing, 5, 5: 2368–2388.
- Erikson, M., 2003. Segmentation of individual tree crowns in colour aerial photographs using region growing supported by fuzzy rules. Canadian Journal of Forest Research, 33, 8: 1557–1563.
- Eysn, L., Hollaus, M., Schadauer, K., Pfeifer, N., 2012. Forest Delineation Based on Airborne LIDAR Data. Remote Sensing, 4, 3: 762–783.
- Falkowski, M. J., Smith, A. M. S., Hudak, A. T., Gessler, P. E., Vierling, L. A., Crookston, N. L., 2006. Automated estimation of individual conifer tree height and crown diameter via two-dimensional spatial wavelet analysis of lidar data. Canadian Journal of Remote Sensing, 32, 2: 153–161.
- Gougeon, F. A., 1995. A crown-following approach to the automatic delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images. Canadian Journal of Remote Sensing, 21, 3: 274–284 s.
- Heurich M., Thoma, F., 2008. Estimation of forestry stand parameters using laser scanning data in temperate, structurally rich natural European beech (*Fagus sylvatica*) and Norway spruce (*Picea abies*) forests. Forestry, 81, 5: 645–661.
- Hollaus, M., Dorigo, W., Wagner, W., Schadauer, K., Höfle, B., Maier, B., 2009. Large-area growing stock estimation based on airborne laser scanning and national forest inventory data. http://publik.tuwien.ac.at/files/pub-geo_2023.pdf (23.3.2014)
- Honkavaara, E., Litkey, P., Nurminen, K., 2013. Automatic Storm Damage Detection in Forests Using High-Altitude Photogrammetric Imagery. Remote Sensing, 5, 1405–1424.
- Hopkinson, C., Chasmer, L., 2009. Testing LiDAR models of fractional cover across multiple forest ecozones. Remote Sensing of Environment, 113, 1: 275–288.
- Hummel, S., Hudak, A.T., Uebler, E.H., Falkowski, M.J., Megown, K.A., 2011. A comparison of accuracy and cost of LiDAR versus stand exam data for landscape management on the Malheur National Forest. Journal of Forestry, July/August: 267–273.
- Hyppä, J., Hyppä, H., Leckie, D., Gougeon, F., Yu, X., Maltamo, M., 2008. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. International Journal of Remote Sensing, 29, 5: 1339–1366.
- Hyypä, J., Inkinen, M., 1999. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. The photogrammetric Journal of Finland, 16: 27–42.
- Hyypä, J., Pyysalo, U., Hyypä, H., Samberg, A., 2000. Elevation accuracy of laser scanning-derived digital terrain and target models in forest environment. V: Proceeding of EARSeL – SIG Workshop LIDAR. Dresden. 1: 139–147.
- Hyypä, J., Yu, X., Hyypä, H., Vastaranta, M., Holopainen, M., Kukko, A., Kaartinen, K., Jaakkola, A., Vaaja, M., Koskinen, J., Alho, P., 2012. Advances in Forest Inventory Using Airborne Laser Scanning. Remote Sensing, 5: 1190–1207.
- Jakubowski, M. K., Guo, Q., Kelly, M., 2013. Tradeoffs between lidar pulse density and forest measurement

- accuracy. *Remote Sensing of Environment* 130: 245–253.
- Johansen, K., Phinn, S., Witte, C., 2010. Mapping of riparian zone attributes using discrete return LiDAR, QuickBird and SPOT-5 imagery: Assessing accuracy and costs. *Remote Sensing of Environment*, 114, 11: 2679–2691.
- Kankare, V., Vastaranta, M., Holopainen, M., Räty, M., Yu, X., Hyppä, J., Hyppä, H., Alho, P., Viitala, R., 2013. Retrieval of Forest Aboveground Biomass and Stem Volume with Airborne Scanning LiDAR. *Remote Sensing*, 5: 2257–2274.
- Kobal, M., 2011. Vpliv sestojnih, talnih in mikrorastiščnih razmer na rast in razvoj jelke (*Abies alba* Mill.) na visokem krasu Snežnika: doktorska disertacija. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 148 str.
- Kobal, M., Hladnik, D., 2013. Možnosti uporabe podatkov LiDAR za ocenjevanje produkcijske sposobnosti gozdnih rastišč. V: Bončina A. (ur.), Matijašič D. (ur.). Produkcijska sposobnost gozdnih rastišč v Sloveniji : zbornik prispevkov. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire in Zavod za gozdove Slovenije: 37–39.
- Kobler, A., 2011. Nove metode za obdelavo podatkov letalskega laserskega skenerja za monitoring gozdnih ekosistemov: doktorska disertacija. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 131 str.
- Kobler, A., Pfeifer, N., Ogrinc, P., Todorovski, L., Oštir, K., Džeroski, S., 2007. Repetitive interpolation: a robust algorithm for DTM generation from Aerial Laser Scanner Data in forested terrain. *Remote Sensing of Environment*, 108, 1: 9–23.
- Kobler, A., Zafran, J., 2006. Podatki letalskega lidarskega snemanja in njihova uporaba pri gospodarjenju z gozdom. V: Hladnik D. (ur.). Monitoring gospodarjenja z gozdom in gozdnato krajino. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 83–96.
- Koch, B., Heyder, U., Weinacker, H., 2006. Detection of individual tree crowns in airborne lidar data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72, 4: 357–363.
- Kozorog, E., 2009. Časovno in stroškovno ovrednotenje kontrolne vzorčne metode in primerjava z drugimi metodami izmere gozdov. V: Planinšek Š. (ur.). Kontrolna vzorčna metoda v Sloveniji – zgodovina, značilnosti in uporaba: 39–46.
- Kraus, K., Pfeifer, N., 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 53: 193–203.
- Kušar, G., Hočevar, M., 2000. Fototerestična inventura gozda. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*, 62: 117–148.
- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Acker, S. A., Spies, T. A., Parker, G. G., Harding, D., 1999b. Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-Fir Western Hemlock forests. *Remote Sensing of Environment*, 70, 3: 339–361.
- Lefsky, M. A., Harding, D., Cohen, W. B., Parker, G. G., Shugart, H. H., 1999a. Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA. *Remote Sensing of Environment*, 67, 1: 83–98.
- Leppänen, V. J., Tokola, T., Maltamo, M., Mehtätalo, L., Pusa, T., Mustonen, J., 2008 Automatic delineation of forest stands from LIDAR data. *Geobia, 2008 – Pixels, Objects, Intelligence: GEOgraphic Object Based Image Analysis for the 21st Century*. V: Hay G J., Blaschke T., Marceau, D. (ed.). University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada: 271–277.
- Li, W., Guo, Q., Jakubowski, M., Kelly, M., 2012. A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 78, 1: 75–84.
- Lindberg, E., Hollaus, M., Mücke, W., Fransson, J.E.S., Pfeifer, N., 2013. Detection of lying tree stems from airborne laser scanning data using a line template matching algorithm. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W2.
- Lohmann, P., Koch, A., Schaeffer, M., 2000. Approaches to the filtering of laser scanner data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33, B3/1: 534–541.
- McGaughey, R.J., 2009. FUSION/LDV: software for LIDAR data analysis and visualization. Available from http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/FUSION_manual.pdf
- Measures, R.M., 1992. *Laser remote sensing: fundamentals and applications*. Krieger Publishing Company. 524 str.
- Meng, X., Currit, N., Zhao, K., 2010. Ground Filtering Algorithms for Airborne LiDAR Data: A Review of Critical Issues. *Remote Sensing*, 2, 3: 833–860.
- Mücke, W., Deaák, B., Schroiff, A., Hollaus, M., Pfeifer, N., 2013. Detection of fallen trees in forested areas using small footprint airborne laser scanning data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 39, S1, S32–S40.
- Næsset, E., 1997. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment*, 61, 2: 246–253.
- Nilsson, M., 1996. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system. *Remote Sensing of Environment*, 56, 1: 1–7.
- Nord-Larsen, T., Schumacher, J., 2012. Estimation of

- forest resources from a country wide laser scanning survey and national forest inventory data. *Remote Sensing of Environment* 119: 148–157.
- Nyström, M., Holmgren, J., Fransson, J.E.S., Olsson, H., 2014. Detection of windthrown trees using airborne laser scanning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 30, 21–29.
- Obu, J., Podobnikar, T., 2013. Algoritam za prepoznavanje kraških kotanj na podlagi digitalnega modela reljefa. *Geodetski vestnik*, 57, 2: 260–270.
- Pirotti, F., 2011. Analysis of full-waveform LiDAR data for forestry applications: a review of investigations and methods. *Journal of Biogeosciences and Forestry*, 4: 100–106.
- Poljanec, A., Gartner, A., 2009. Izkušnje s kontrolno vzorčno metodo v gozdnogospodarskem območju Bled. *Kontrolna vzorčna metoda v Sloveniji – zgodovina, značilnosti in uporaba*: 47–55.
- Popescu, S. C., 2002. Estimating Plot-Level Forest Biophysical Parametres Using Small-Footprint Airborne Lidar Measurments. Doctor dissertation. Blacksburg. Virginia. 145 str.
- Popescu, S. C., Wynne, R. H., Nelson, R. F., 2003. Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Canadian Journal of Forest Research*, 29,5: 564–577.
- Reitberger, J., Krzystek, P., Stilla, U., 2008. Analysis of full waveform LIDAR data for the classification of deciduous and coniferous trees. *International Journal of Remote Sensing*, 29: 1407–1431.
- Roth, B. E., Slatton, K. C., Cohen, M. J., 2007. On the potential for high-resolution LiDAR to improve rainfall interception estimates in forest ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5: 421–428.
- Van Leeuwen, M., Hilker, T., Coops, N. C., Frazer, G. W., Wulder, M. A., Newnham, G. J., Culvenor, D. S., 2011. Assessment of standing wood and fiber quality using ground and airborne laser scanning: a review. *Forest Ecology and Management*, 261, 9: 1467–1478.
- Vastaranta, V., Korpela, I., Uotila, U., Hovi, A., Holopainen, M., 2012. Mapping of snow-damaged trees based on bitemporal airborne LiDAR data. *European Journal of Forest Research*, 131, 1217–1228.
- Vepakomma, U., Kneeshaw, D., St-Onge, B., 2010. Interactions of multiple disturbances in shaping boreal forest dynamics: a spatially explicit analysis using multi-temporal lidar data and high-resolution imagery. *Journal of Ecology*, 98, 3: 526–539.
- Warner, T. A., Lee, J. Y., McGraw, J. B., 1998. Delineation and identification of individual trees in the eastern deciduous forest. V: Hill D.A., Leckie D.G. (ur.). *Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry*. Victoria, British Columbia, Canada: 81–91.
- Watt, M. S., Adams, T., Gonzalez Aracil, S., Marshall H., Watt, P., 2013. The influence of LiDAR pulse density and plot size on the accuracy of New Zealand plantation stand volume equations. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 43, 1: 1–10.
- Wulder, M. A., Bater, C. W. Coops, N. C., Hilker, T., White, J. C., 2008. The role of LiDAR in sustainable forest management. *The Forestry Chronicle*, 84, 6: 807–826.
- Wulder, M.A., White, J. C., Nelson, R. F., Næsset, E., Ørka, H. O., Coops, N. C., Hilker, T., Bater, C.W., Gobakken, T., 2012. Lidar sampling for large-area forest characterization: A review. *Remote Sensing of Environment*, 121: 196–209.
- Yao, W., Krzystek, P., Heurich, M., 2012. Tree species classification and estimation of stem volume and DBH based on single tree extraction by exploiting airborne full-waveform LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 123: 368–380.
- Yu, X., Hyppä, J., Kaartinen, H., Maltamo, M., 2004. Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, 90, 4: 451–462.
- Zhang, K., Simard, M., Ross, M., Rivera-Monroy, V.H., Houle, P., Ruiz, p., Twilley, R.R., Whelan, K.R.T., 2008. Airborne Laser Scanning Quantification of Disturbances from Hurricanes and Lightning Strikes to Mangrove Forests in Everglades National Park, USA. *Sensors*, 8, 2262–2292.