

LOČEVANJE IGLAVCEV IN LISTAVCEV NA PODLAGI NEOBDELANE INTENZITETE LASERSKIH TOČK

DECIDUOUS AND CONIFEROUS TREE SEPARATION BASED ON THE RAW INTENSITY OF LASER POINTS

Mihaela Triglav Čekada, Maja Lavrič, Mojca Kosmatin Fras

UDK: 528.7:582.09

Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01

Prispelo: 16. 12. 2016

Sprejeto: 16. 3. 2017

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2017.01.23-34

SCIENTIFIC ARTICLE

Received: 15. 12. 2016

Accepted: 16. 3. 2017

IZVLEČEK

Podatki aerolaserskega skeniranja med drugim podajo informacijo o odbojnosti površine, od katere se je odbil laserski žarek, zapisana je kot intenziteta laserske točke. S primerjavo povprečnih vrednosti nenormaliziranih intenzitet posameznih drevesnih vrst smo ugotavljali, ali lahko drevesne vrste, ki rastejo v Sloveniji, med seboj ločimo samo na podlagi laserskih podatkov. V analizi smo preučevali 113 samostojnih dreves (57 iglavcev in 56 listavcev), ki smo jih določili tudi na terenu. Uporabili smo štiri laserske nize podatkov. Prva dva sta bila zajeta z valovno dolžino 1550 nm: prvi spomladi (15. 5. 2012), drugi pa pozno poleti (18. 9. 2012). Zadnja dva niza sta bila zajeta z valovno dolžino 1064 nm: tretji pozimi (5. 3. 2013) in četrti poleti (7. 7. 2014). Med drugim smo ugotovili, enako kot že raziskovalci pred nami: (i) da so povprečne intenzitete listavcev v obeh valovnih dolžinah višje od iglavcev v času olistanosti, medtem ko je v času neolistanosti ravno nasprotno; (ii) da ločevanje na intenzitete prvih in edinih odbojev v primerjavi z intenzitetami vseh odbojev kaže, da so povprečne vrednosti prvih (samo prvi in edini odboji skupaj) višje od drugih (vsi odboji) v času olistanosti, v času neolistanosti je ravno nasprotno. Med preučevanjem oreha, javorja, jesena in lipe (ali lipovca) smo ugotovili, da rezultati preučevanja povprečnih intenzitet laserskih podatkov, posnetih v časovnih vrstah, nakazujejo tudi na možnost določevanja razlik v fenološki fazi listavcev spomladi.

KLJUČNE BESEDE

lidar, nenormalizirana intenziteta, valovna dolžina, listavci, iglavci

ABSTRACT

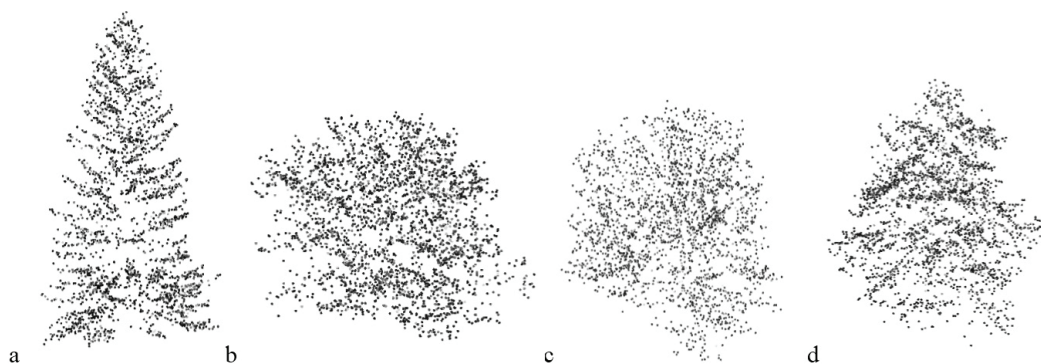
Aerial laser scanning provides information about the reflectivity of the surface from which the laser beam was reflected; this information is given as an intensity of a laser point. By comparing the average non-normalised intensity values for different tree species growing in Slovenia in laser scanning data sets acquired with different wavelengths, whether tree species can be separated based only on laser scanning intensity data was investigated. We studied 113 single trees (57 coniferous and 56 deciduous trees), identified in the field and in four laser data sets. The first two were acquired in the 1550 nm wavelength: the first set in spring (May 15, 2012), the second in late summer (September 18, 2012). The last two sets were acquired in the 1064 nm wavelength: the third in winter (March 5, 2013) and the fourth in summer (July 7, 2014). Among other things, we have determined, the same as researchers before us: (i) that the average intensities of deciduous trees in both wavelengths are higher in the leaf-on season, while it is the opposite in the leaf-off season; (ii) that the average intensities of the combined class of first and the only reflections is higher than the average intensities of all reflections in leaf-on season; during the leaf-off season it is the opposite. The behavior of tree species *Juglans regia*, *Acer Pseudoplatanus*, *Fraxinus excelsior* and *Tilia cordata* (or *Tilia Platyphylolus*) also implies that the differences in the average intensities in laser time series enable the determination of the phenological phase of deciduous trees in the spring.

KEY WORDS

lidar, non-normalised intensity, wavelength, deciduous, coniferous

1 UVOD

Lasersko skeniranje je aktivna metoda daljinskega zaznavanja, pri kateri laser odda lasersko svetlobo v obliki kratkega pulza, ki se lahko na poti proti tlom večkrat odbije od različnih delov površja, kar je najvidnejše na vegetaciji. Tako dobimo laserske točke z različnimi redi odboja. Prvi odboj se zgodi na vrhu ali blizu vrha vegetacije, naslednji v notranjosti krošnje drevesa ali grmovja. Če vegetacija ni pregosta in če snemamo z dovolj visoko gostoto točk, se zadnji odboj najverjetneje zgodi od tal. Aerolasersko skeniranje tako omogoča zapis vertikalne strukture drevja ali druge vegetacije (slika 1). Zato lasersko skeniranje v svetu in pri nas s pridom uporabljajo za različne gozdarske namene na ravni gozdnogospodarskih enot, gozdnih sestojev in posameznih dreves (Šturm et al., 2016). Če se osredotočimo na posamezna drevesa, ki jih bomo obravnavali tudi v naši raziskavi, lahko z laserskimi podatki identificiramo vrhove in določimo višine posameznih dreves. Vrhove posameznih dreves v gozdnem sestoju lahko ločimo med seboj z različnimi algoritmi, ki iščejo lokalne maksimume v surovih podatkih ali na digitalnih modelih krošenj (Reitberger et al., 2008; Kim et al., 2009; Li et al., 2012; Mongus in Žalik, 2015).



Slika 1: Krošnje dreves v laserskem oblaku točk z gostoto 15 točk/m²: a) smreka, b) oreh, c) jesen, d) lipa.

Če k preučevanju geometrijskih odvisnosti med točkami dodamo še preučevanje intenzitete odbitih laserskih točk, lahko raziskave razširimo na preučevanje zmožnosti določitve posameznih drevesih vrst v laserskih podatkih (Holmgren in Persson, 2004; Moffiet et al., 2005; Kim et al., 2009; Ørka et al., 2009; Korpela et al., 2010). Ker je intenziteta laserskih točk odvisna od različnih parametrov, ta naloga še zdaleč ni enostavna in rešena. Na vrednost intenzitete vplivajo (na primer Triglav Čekada, 2011): valovna dolžina laserskega senzorja, višina leta nad terenom, kot skeniranja, pod katerim je laserski žarek zadel tarčo, odbojnost tarče, velikost tarče (na primer majhen proti velikemu listu), divergenca laserskega žarka, značilnosti posamezne drevesne vrste, od katere se odbijajo točke (razporeditev listja in vej v drevesni krošnji), atmosferske razmere med snemanjem (mogoč vpliv na slabljenje signala med snemanjem) idr. Rezultate klasifikacije drevesnih vrst na podlagi intenzitete je sicer mogoče izboljšati, če uporabimo normaliziramo intenziteto, kjer odpravimo nekatere vplive na vrednost intenzitete (Korpela et al., 2010), vendar lahko razločimo posamezne drevesne vrste tudi na podlagi nenormaliziranih intenzitet. Tako sta Holmgren in Persson (2004) preučevala razločevanje smreke, rdečega bora in breze na Švedskem ter ugotovila, da so vrednosti povprečnih intenzitet pri smrekah višje od bora. Ørka et al. (2009) so preučevali smreko in brezo na Norveškem. Reitberger et al. (2008) so preučevali le razlike med listavci in iglavci v Nemčiji, kjer so bile dominantne vrste smreka, bukev in javor. Suranto et al.

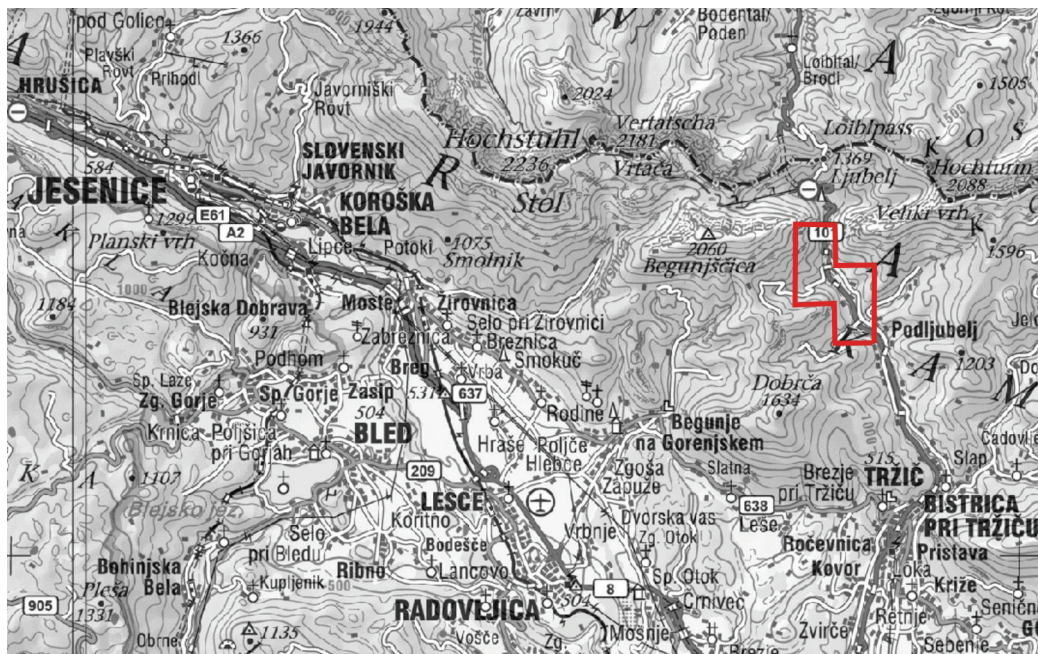
(2009) so preučevali območje z večjimi višinskimi razlikami in bolj raznolikimi iglavci v Severni Ameriki. Večinoma so avtorji uporabljali laserske podatke valovne dolžine 1064 nm.

Podobnih raziskav v Sloveniji nismo zasledili, zato smo preučili možnosti razlikovanja drevesnih vrst iz intenzitet časovne serije laserskih podatkov, posnetih na območju Slovenije. Prvič smo preučevali tudi intenzitete v dveh valovnih dolžinah (1550 nm in 1064 nm), saj v tujih raziskavah preučujejo intenzitete samo v eni valovni dolžini. Praktični del raziskave je bil izveden v okviru magistrske naloge (Lavrič, 2016), v kateri je opisan tudi več podrobnosti raziskave.

2 METODOLOGIJA RAZISKAVE

2.1 Podatki

Kot testno območje smo izbrali območje velikosti 4 km² ob cesti na Ljubelj v Karavankah (slika 2). Njegova povprečna nadmorska višina je približno 750 metrov. Zaradi lažjega ločevanja posameznih dreves med seboj smo izbrali samostojna drevesa ob cesti (slika 3), ki jih lahko brez težav prepoznamo na ortofotu in tudi najdemo na terenu.



Slika 2: Območje obravnave na državni pregledni karti 1 : 250.000 (vir: GURS).

Uporabili smo štiri nize aerolaserskih podatkov (preglednica 1), od katerih so bili trije posneti v času, ko je listnato drevje deloma ali popolnoma olistano, en pa v času, ko so bila drevesa brez listov. Dva niza sta posneta z valovno dolžino 1550 nm in dva z valovno dolžino 1064 nm. Vsa štiri laserska skeniranja je izvedlo podjetje FlyCom, d. o. o, prva dva niza z istim skenerjem (Riegl LMS-Q560), zadnja dva pa z enakim tipom skenerja (Riegl LMS-Q780), vendar dvema različnima instrumentoma. Oba tipa skenerjev delujeta v polnovalovnem načinu, vendar so ob prvi obdelavi podatki izvoženi v pulzno obliko zapisa, ki

jo dobi naročnik in jo berejo vsi programi za obdelavo laserskih podatkov. V raziskavi smo uporabljali samo podatke, zapisane v pulznem načinu. Na prvih dveh snemanjih je bilo skupaj z laserskim skeniranjem izvedeno še aerofotografranje, zato imamo na voljo tudi ortofote. Pri zadnjih dveh nizih podatkov je bilo izvedeno samo lasersko skeniranje. Prvi, drugi in četrti niz podatkov so bili snemani s primerljivo gostoto, medtem ko je bil tretji niz sneman z višjo gostoto točk.

Preglednica 1: Opis značilnosti posameznega niza laserskih podatkov

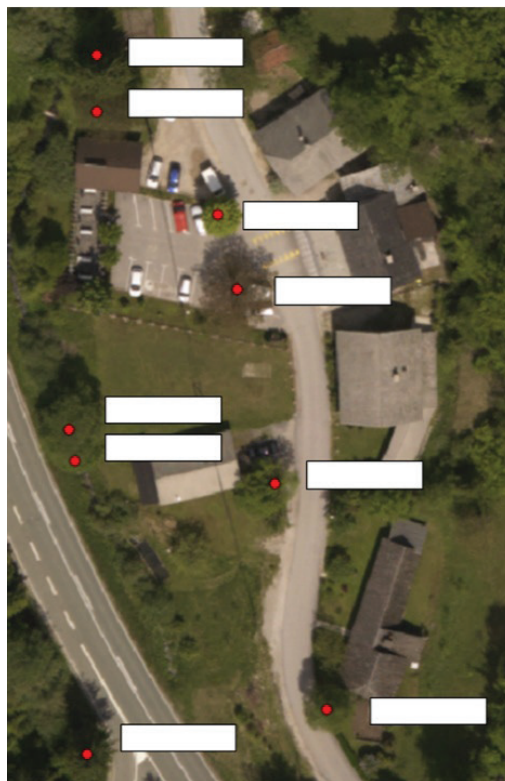
	NIZ 1	NIZ 2	NIZ 3	NIZ 4
Datum snemanja	15. 5. 2012	18. 9. 2012	5. 3. 2013	7. 7. 2014
Olistanost	olistano	olistano	neolistano	olistano
Valovna dolžina (nm)	1550	1550	1064	1064
Gostota snemanja (točk/m²)	8	8	15	5
Višina leta nad terenom	700 m	700 m	1000 m	1200–1400 m

2.2 Metodologija

Na podlagi ortofotov, ki jih imamo poleg prvih dveh nizov laserskih podatkov, smo izdelali terenske skice (slika 3). Na njih smo že pred terenskim ogledom označili drevesa, ki smo jih nameravali preučiti (majhni krogi na sliki 3). Na skico smo dodali tudi bele kvadratke, v katere smo na terenu vpisovali vrste dreves. Določali smo jih s klasifikacijskim ključem iz knjige *Drevesne vrste na Slovenskem* (Brus, 2012). Izbirali smo predvsem samostojna drevesa ali drevesa na gozdnem robu, da smo jih lažje prepoznali na terenu in v oblaku laserskih točk. Krošnje samostojnih dreves ali dreves z gozdnega roba so pravilneje oblikovane, zato omogočajo lažjo določitev. Skupno smo na terenu določili vrsto 113 drevesom: od tega jih je bilo 57 iglastih in 56 listnatih. Podrobno analizo povprečnih intenzitet za posamezno vrsto smo naredili le za najpogostejše drevesne vrste na območju obravnave: 51 smrek (*Picea abie*), 4 macesne (*Larix decidua*), 14 orehov (*Juglans regia*), 9 javorjev (*Acer pseudoplatanus*), 5 jesenov (*Fraxinus excelsior*) in 4 lipe oziroma lipovce (*Tilia cordata* ali *Tilia platyphyllos*). Za splošno primerjavo med iglavci in listavci smo uporabili med iglastimi drevesi samo smreke, izpustili smo dva bora (*Pinus sylvestris*), ker jih je premalo, in macesne, ker odvržejo iglice. Pri listavcih smo, poleg zgornjih naštetih, upoštevali še: tri slive (*Prunus*), tri jabolane (*Malus*), tri hruške (*Pyrus*), dve češnji (*Prunus*), tri hraste (*Quercus petraea*), dva kostanja (*Castanea sativa*), eno bukev (*Fagus sylvatica*), dva gabra (*Carpinus betulus*), eno brezo (*Betula pendula*) in štiri druge listavce.

Posamezno drevo smo ročno poiskali v posameznem podatkovnem nizu laserskih podatkov. Uporabili smo klasificirane oblake laserskih točk, v katerih so zapisane originalne intenzitete odbojev. S programom LAStools (<http://www.cs.unc.edu/~isenburg/lasertools/>) smo ročno izrezali krošnjo drevesa iz laserskih podatkov, za izrez smo uporabili samo točke iz treh klasifikacijskih razredov: nizke, srednje in visoke vegetacije. Za vsako drevo smo tako dobili ločeno datoteko, v kateri so ostale samo točke, ki ponazarjajo krošnjo izbranega drevesa. Točk, ki so se odbile od tal, v tej datoteki ni več. Krošnjo posameznega drevesa predstavlja večinoma od 200 do 3000 laserskih točk. Število točk na krošnji posameznega drevesa je odvisno od gostote osnovnega oblaka točk, vrste drevesa in olistanosti med snemanjem. Oblak točk posameznega drevesa smo izvozili v format ASCII, kjer smo poleg koordinat posamezne točke ohranili še naslednje attribute: intenziteto, red odboja, število vseh zabeleženih odbojev posameznega pulza in klasi-

fikacijski razred. Z ASCI-datotekami smo izračunali statistike za posamezno drevo: povprečno vrednost intenzitete in standardni odklon intenzitet za posamezno drevo.



Slika 3: Primer terenske skice (vir podlage: ortofoto NH-WF iz leta 2012).

Povprečne vrednosti intenzitet posameznih drevesnih vrst za posamezen podatkovni niz smo najprej primerjali za vse laserske točke v krošnji drevesa. Potem smo analizo ponovili še za združene prve (prvi od mnogih odbojev enega pulza) in edine odboje (samo ta odboj enega pulza). Združeni prvi in edini odboji prikazujejo samo vrhno plast drevesa oziroma zunanji listni ovoj drevesa, od katerega se najprej odbije laserski žarek.

3 REZULTATI

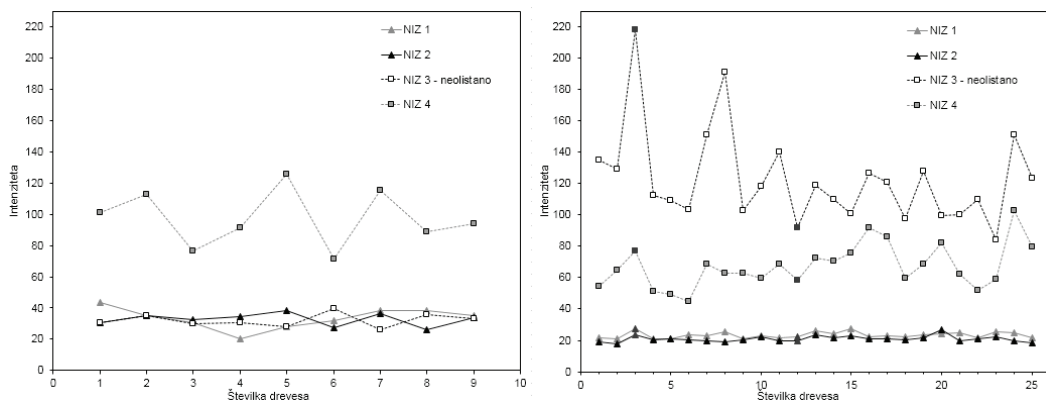
3.1 Razpršenost intenzitet na posameznem drevesu

Najprej smo primerjali povprečne intenzitete posameznih dreves ene drevesne vrste glede na podatkovni niz. Na sliki 4 vidimo primera javorja in smreke. Za osnovno primerjavo med drevesnimi vrstami smo uporabili povprečno intenziteto posameznega drevesa, kot cenilko razpršenosti intenzitet pa standardni odklon intenzitet posameznega drevesa.

Smreka je zimzelena iglavca, zato lahko med seboj primerjamo prva dva in zadnja dva podatkovna niza, da bi odkrili razliko v prikazovanju intenzitet glede na valovno dolžino. Na sliki 4b takoj opazimo, da

imata prvi in drugi niz, oba posneta z valovno dolžino 1550 nm, manjše povprečne intenzitete z veliko manjšimi standardnimi odkloni 23 ± 11 , kot so v zadnjih dveh nizih, ki sta posneta z valovno dolžino 1064 nm. Standardni odkloni intenzitet so v zadnjih dveh nizih tudi veliko višji, 123 ± 108 enot. Pri javorju lahko primerjamo med seboj le prvi, drugi in četrti niz podatkov, ki prikazujejo drevesa v času olistanosti. Enako opazimo, da so povprečne intenzitete v prvih dveh nizih (1550 nm) nizke (34 ± 16 enot), v četrtem nizu pa je (1064 nm) veliko višja (98 ± 80 enot). V preglednici 2, kjer so zapisane povprečne intenzitete tudi drugih preučevanih drevesnih vrst, vidimo enak pojav. Pri valovni dolžini 1550 nm imamo nižje povprečne intenzitete in nižje povprečne standardne odklone posameznih dreves, pri valovni dolžini 1064 nm pa sta obe povprečji višji. Ugotovimo lahko, da je povprečna intenziteta iglavcev in listavcev v času olistanosti v valovni dolžini 1064 nm približno trikratnik vrednosti v valovni dolžini 1550 nm. Povprečni standardni odklon intenzitete posameznega drevesa iglavcev in listavcev v času olistanosti je v valovni dolžini 1064 nm kar trikratnik ali višji večkratnik vrednosti pri valovni dolžini 1550 nm. Torej je pri valovni dolžini 1064 nm sipanje intenzitet na posameznem drevesu veliko večje.

Na sliki 4 tudi opazimo, da lahko med seboj ločimo posamezne primerke dreves že samo na podlagi njihove povprečne intenzitete, saj ima neko drevo visoko intenziteto v primerjavi z drugimi drevesi iz iste drevesne vrste v obeh valovnih dolžinah, če primerjamo vrednosti povprečnih intenzitet posameznega drevesa in vseh dreves ene vrste v času olistanosti. Lahko govorimo o značilnem razponu intenzitet posamezne drevesne vrste v posamezni valovni dolžini. Oglejmo si smreki številka 3 in 12. Smreka 3 (temno sivo obarvana točka v vseh štirih nizih) ima v vseh štirih podatkovnih nizih visoko povprečno intenziteto glede na skupno povprečno vrednost vseh smrek iz posameznega podatkovnega niza, medtem ko ima smreka številka 12 (enako temno sivo obarvana v vseh štirih nizih) nizko povprečno intenziteto v vseh podatkovnih nizih. Pri javorju lahko med seboj primerjamo le vrednosti posameznih dreves v drugem (1550 nm) in četrtem nizu (1064 nm), ki sta bila oba posneta v času polne olistanosti. Če pogledamo javorjeva drevesa od 4 do 7, vidimo enak vzorec višanja in nižanja povprečnih intenzitet v drugem in četrtem nizu (glej črne trikotnike in sive kvadrate).



Slika 4: Povprečne intenzitete posameznih dreves: a) javor (levo), b) smreka (desno). Zaradi večje preglednosti je izrisana le polovica dreves, saj smo tam, kjer je stalo v skupini več dreves, na grafu izrisali samo eno intenziteto.

Preglednica 2: Povprečne intenzitete in povprečni standardni odklon intenzitet na posameznem drevesu pri različnih drevesnih vrstah

	NIZ 1	NIZ 2	NIZ 3	NIZ 4
Smreka	24±11	21±8	123±108	67±53
Macesen	26±12	21±9	58±47	68±51
Oreh	19±8	26±10	42±34	85±67
Javor	34±16	33±13	32±26	98±80
Jesen	24±13	27±11	38±30	94±83
Lipa	34±14	32±14	35±28	99±70

3.2 Primerjanje povprečnih intenzitet glede na drevesno vrsto

S prikazom povprečnih vrednosti intenzitet za celoten vzorec ene drevesne vrste bomo ponazorili še razlike med posameznimi drevesnimi vrstami. Preučili bomo tudi razlike med povprečnimi vrednostmi, izračunanimi za vse odboje ter ločeno za združene prve in edine odboje. Prvi in edini odboji skupaj prikazujejo prvi stik laserskega žarka z drevesom, torej zunanji ovoj krošnje drevesa. V preglednici 3 hitro opazimo, da so odstotki prvih in edinih odbojev v posameznem podatkovnem nizu primerljivi med različnimi iglastimi in listnatimi drevesi. Zato lahko sklepamo, da je skupni delež prvih in edinih odbojev odvisen od posameznega uporabljenega laserskega skenerja in parametrov skeniranja. Izstopa le macesen z 20 % nižjo vrednostjo prvih in edinih odbojev v vseh štirih podatkovnih nizih, vendar je vzorec dreves premajhen (štiri drevesa), da bi omogočil dokončno sklepanje. Če macesna ne upoštevamo, dobimo povprečni skupni delež prvih in edinih odbojev v prvem nizu 84 %, drugem 86 %, tretjem 55 % in četrtem 78 %. Prva dva niza, ki sta bila posneta z istim skenerjem in tudi ob podobnih parametrih skeniranja, imata skoraj enake vrednosti deležev prvih in edinih odbojev. Najmanjši delež enojnih in edinih odbojev je pri tretjem nizu podatkov, ki je bil posnet z najvišjo gostoto točk (15 točk/m²) in v času, ko listnato drevje in macesen nimajo listja/iglic (5. 3. 2013). Malo več kot polovica odbojev se zgodi znotraj krošnje dreves neodvisno od tega, ali se odbijejo od iglavcev ali neolistanih listavcev. Ker v tem nizu ne moremo ločiti med seboj listavcev od iglavcev samo na podlagi deleža prvih in edinih odbojev, lahko iz tega tudi sklepamo, da testno območje med snemanjem ni bilo zasneženo. Če bi bilo, bi teoretično morali dobiti pri smreki veliko višji delež prvih in edinih odbojev od listavcev, saj bi obsežnejša snežna odeja na smrekah preprečevala prodiranje laserskega žarka v notranjost krošnje in pojavljanje sekundarnih odbojev enega laserskega žarka. Če primerjamo deleže prvih in edinih odbojev iz prvega in drugega niza podatkov, kjer so bili parametri skeniranja podobni, ter deleže iz tretjega in četrtega niza, ki se razlikujejo za približno 20 %, lahko tudi iz tega sklepamo, da sta bila tretji in četrti niz posneta ob različnih parametrih skeniranja. Vendar to že vemo od prej iz preglednice 1.

Preglednica 3: Povprečni skupni delež prvih in edinih odbojev glede na vse odboje po drevesnih vrstah

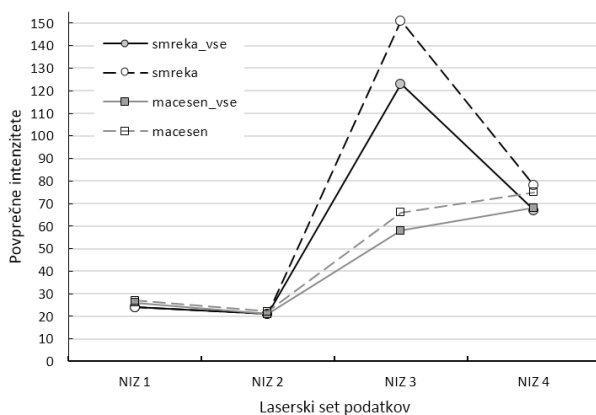
	NIZ 1	NIZ 2	NIZ 3	NIZ 4
Smreka	86 %	90 %	52 %	74 %
Macesen	65 %	66 %	37 %	65 %
Oreh	81 %	84 %	51 %	76 %
Javor	88 %	88 %	64 %	80 %
Jesen	82 %	88 %	58 %	82 %
Lipa	82 %	80 %	49 %	77 %

V preglednici 4 so zapisane povprečne vrednosti intenzitet z dodanim standardnim odklonom povprečnih intenzitet v posamezni drevesni vrsti, če v analizi upoštevamo vse odboje. Če primerjamo standardne odklone povprečnih intenzitet drevesne vrste, vidimo, da se povprečne intenzitete znotraj vrste najbolj spreminjajo (največji standardni odkloni) v tretjem in četrtem nizu, torej pri valovni dolžini 1064 nm. Povprečne intenzitete različnih drevesnih vrst v četrtem nizu, ko so drevesa olistana, so različne in potencialno zanimive za ločevanje drevesnih vrst. Zaradi velike razlike v povprečnih intenzitetah vsekakor omogočajo ločitev iglavcev (povprečne intenzitete približno 70 enot) od listavcev (povprečne intenzitete približno 95 enot).

Preglednica 4: Povprečne intenzitete vseh odbojev in standardni odklon povprečnih intenzitet glede na drevesno vrsto

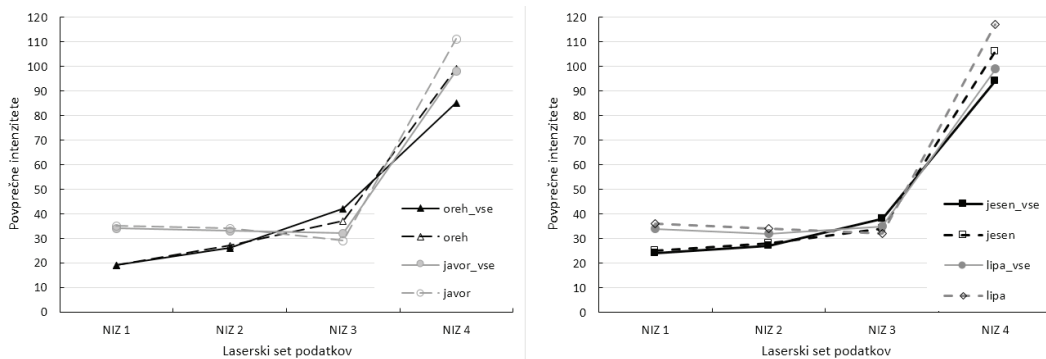
	NIZ 1	NIZ 2	NIZ 3	NIZ 4
Smreka	24±2	21±2	123±30	67±14
Macesen	26±1	21±1	58±22	68±9
Oreh	19±2	26±4	42±8	85±21
Javor	34±7	33±4	32±4	98±18
Jesen	24±4	27±4	38±11	94±6
Lipa	34±4	32±3	35±3	99±32

Na sliki 5 so prikazane povprečne vrednosti intenzitet za iglavce: smreka (povprečje 51 dreves) in macesen (4). S polnimi črtami so povezana povprečja vseh točk na posameznem drevesu, s črtkanimi pa povprečja samo prvih in edinih odbojev skupaj. Povprečja intenzitet prvih in edinih odbojev skupaj so višja od povprečnih intenzitet vseh odbojev za podatke v obeh valovnih dolžinah, le da so razlike v prvem in drugem nizu podatkov veliko manjše (za eno enoto intenzitete). V tretjem in četrtem nizu so razlike med povprečnimi intenzitetami prvih in edinih odbojev od povprečnih intenzitet vseh točk za smreko in bor višje povprečno za 30 enot, za macesen pa le za 8 enot. Povprečne intenzitete v prvem, drugem in četrtem nizu so za vse tri iglaste drevesne vrste podobne, saj imajo takrat vsi iglice. V tretjem nizu, posnetem pozimi, pa lepo ločimo višje povprečne intenzitete smreke in bora od povprečnih intenzitet macesna, ki je takrat brez iglic. Povprečne intenzitete vseh odbojev macesna so za 65 enot nižje od smreke in za 40 enot nižje od bora.



Slika 5: Povprečne intenzitete posameznih iglastih drevesnih vrst. Polne črte ponazarjajo vse podatke, črtkane črte samo prve in edine odboje skupaj.

Na sliki 6 so prikazani listavci, na levi strani oreh (povprečje 14 dreves) in javor (9), na desni strani pa jesen (5) in lipa (4). S polnimi črtami so povezana povprečja vseh točk na posameznem drevesu, s črtkanimi črtami pa povprečja samo prvih in edinih odbojev skupaj. Večinoma so povprečne intenzitete prvih in edinih odbojev skupaj višje od povprečnih intenzitet vseh odbojev, le v tretjem nizu podatkov so nižje. Tretji niz podatkov je posnet pozimi (5. 3. 2013), ko listavci niso olistani. S primerjavo tretjega in četrtega niza, posnetega v valovni dolžini 1064 nm, tako vidimo, da so povprečne intenzitete listavcev v času neolistanosti nižje kot povprečne intenzitete v času olistanosti. Enak vzorec lahko prepoznamo še pri orehu in jesenu v prvem in drugem nizu podatkov, ki sta posneta z valovno dolžino 1550 nm. Prvi niz podatkov je posnet zgodaj spomladi (15. 5. 2012), ko nekateri listavci na takšni nadmorski višini (750 m) še niso olistani. Brus (2012) za vse štiri preučevane drevesne vrste trdi, da cvetijo in olistajo nekje v aprilu ali maju. Iz nižje intenzitete v prvem nizu proti višji intenziteti v drugem nizu (pri orehu za sedem enot nižja vrednost, pri jesenu za tri enote nižja vrednost) lahko sklepamo, da oreh in jesen 15. 5. 2012 še nista bila popolnoma olistana. Predvsem lahko to trdimo za oreh, ki kaže največja odstopanja med prvim in drugim nizom. Medtem sta bila javor in lipa najverjetneje že olistana tudi v prvem nizu podatkov, saj so vrednosti prvega in drugega niza primerljive. Dokončno bomo te trditve lahko potrdili le ob preučevanju večjih vzorcev dreves. Pri javorju so intenzitete prvega niza višje od drugega niza za eno enoto in v primeru lipe za dve enoti.



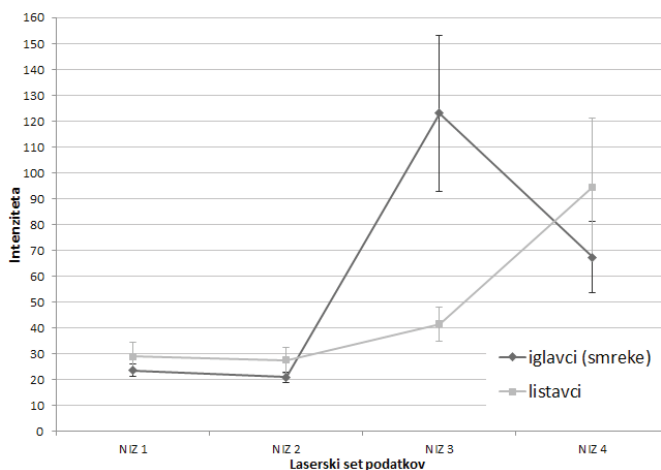
Slika 6: Povprečne intenzitete posameznih listnatih drevesnih vrst. Polne črte ponazarjajo vse podatke, črtkane črte pa samo prve ali edine odboje.

Če primerjamo med seboj še macesen in listavce (sliki 5 in 6), vidimo, da ima macesen v prvem nizu podatkov višje povprečne intenzitete kot v drugem nizu podatkov (za pet enot), zato lahko iz prejšnjih izvajanj sklepamo, da so bile takrat na njem že razvite iglice. Prav tako imata smreka in bor višje intenzitete v prvem kot v drugem nizu podatkov (za tri in eno enoto). Verjetno to lahko pripišemo fenološki fazi prvih iglic na smreki in boru, saj je smreka znana kot drevo, ki z razvojem novih poganjkov oznanja pomlad (Žust, 2015). Tako so morali biti 15. 5. 2013 na preučevanih drevesih razviti že dovolj dolgi poganjki, ki se po intenziteti ločijo od starih poganjkov, zaznanih konec poletja v drugem nizu podatkov (18. 9. 2012). Med tretjim in četrtem nizu podatkov pri macesnu ne opazimo tako drastične razlike v intenzitetah kot pri listavcih, ki so odvrgli liste, vendar so vrednosti v tretjem nizu nižje od vrednosti v četrtem nizu, kar je enak vzorec kot pri listavcih. To nam še enkrat potrjuje, da lahko ločimo drevesa brez iglic in listov od dreves z listi ali iglicami le na podlagi povprečnih intenzitet odbojev, če med seboj primerjamo dva laserska niza podatkov, posneta ob različnih letnih časih in z isto valovno dolžino.

3.2 Primerjava med iglavci in listavci

V primerjavi iglavcev in listavcev smo uporabili vsa analizirana drevesa, razen dreves macesna, za katerega smo v prejšnjem poglavju videli, da je po intenzitetah bolj podoben listavcem. Med iglavci smo obravnavali samo smreke. Med listavce pa smo poleg oreha, javorja, jesena in lipe vključili še slivo, jablo, hruško, hrast, češnjo, kostanj, bukev, brezo in štiri druga listnata drevesa. Skupno smo uporabili 51 iglastih in 56 listnatih dreves.

Na sliki 7 so prikazane povprečne intenzitete in standardni odkloni povprečnih intenzitet iglavcev in listavcev za vse preučevane laserske točke. V prvem, drugem in četrtem nizu podatkov, ko so listavci olistani, so povprečne intenzitete listavcev višje od iglavcev oz. smrek. V prvem in drugem nizu, ki sta oba posneta z valovno dolžino 1550 nm, so razlike manjše kot v četrtem nizu, posnetem z valovno dolžino 1064 nm. V tretjem nizu (5. 3. 2013), ko listavci niso olistani, pa je ravno nasprotno, povprečne intenzitete listavcev so nižje od iglavcev. Povprečne intenzitete iglavcev v valovni dolžini 1064 nm so približno trikratnik povprečnih intenzitet listavcev v času neolistanosti. Zanimiva je tudi primerjava standardnih odklonov povprečnih intenzitet v valovni dolžini 1064 nm (tretji in četrti niz): neolistanata listnata drevesa imajo veliko nižje standardne odklone povprečnih intenzitet kot olistana drevesa. To lahko pripišemo podobnemu značilnemu razponu intenzitet na golih vejah na različnih listnatih drevesnih vrstah in različnemu razponu intenzitet na olistanih drevesih različnih drevesnih vrst. Različne značilne razpone intenzitet na različnih listnatih drevesnih vrstah v četrtem podatkovnem nizu (7. 7. 2014) smo videli že na sliki 6.



Slika 7: Povprečne intenzitete iglavcev (samo smreke) in vseh obravnavanih listavcev z dodanimi standardnimi odkloni povprečnih intenzitet.

4 RAZPRAVA IN SKLEPNE UGOTOVITVE

Izvedli smo analizo povprečnih intenzitet 56 listnatih in 57 iglastih dreves v dveh laserskih podatkovnih nizih, posnetih z valovno dolžino 1550 nm, in dveh z valovno dolžino 1064 nm. V nasprotju s Kim et al. (2009), Ørka et al. (2009) in Suranto et al. (2009) smo v naši raziskavi primerjali med seboj veliko več različnih listnatih drevesnih vrst (oreh, javor, jesen in lipa oziroma lipovec). Žal smo uporabili premajhne vzorce dreves, da bi nam omogočali dokončno sklepanje. Kljub temu lahko podamo začetne sklepe in jih primerjamo z ugotovitvami tujih raziskovalcev:

- Vsako posamezno drevo ima svojo značilno povprečno intenziteto znotraj drevesne vrste v času olistanosti (na primeru 51 smrek in 9 javorjev), zato lahko posamezna drevesa ločimo med seboj glede na velikost njihove povprečne intenzitete. Če je povprečna intenziteta drevesa visoka glede na preostala drevesa te vrste v valovni dolžini 1064 nm, bo visoka tudi v valovni dolžini 1550 nm, in nasprotno. To nam lahko pomaga pri identifikaciji posameznih dreves, ki odstopajo od povprečja (na primer posebna razvojna faza drevesa – starost, zdravstveno stanje drevesa) ali celo pri identifikaciji potencialno napačno določene drevesne vrste. Že Holmgren in Person (2004) sta ugotovila, da je povprečna intenziteta za smrekova drevesa višja od povprečne intenzitete borovih dreves zaradi različne strukture krošnje posamezne drevesne vrste (gostejša krošnja smrek v primerjavi z bori).
- Povprečni skupni delež prvih in edinih odbojev glede na vse odboje po drevesnih vrstah je odvisen od posameznega skenerja in parametrov skeniranja (višina leta, maksimalni kot skeniranja, gostota točk, letni čas snemanja).
- Povprečne intenzitete prvih in edinih odbojev so višje od vseh odbojev za čas olistanosti. To so za nenormalizirane intenzitete pri valovni dolžini 1064 nm ugotovili že Ørka et al. (2009), ki so preučevali razlike med smreko in brezo. Suranto et al. (2009) so odkrili, da imajo edini odboji veliko višjo intenziteto kot večkratni odboji, kar je posledica porazdelitve energije enega pulza med več odbojev. Oboji tudi ugotavljajo, da je delež različnih redov odbojev (prvi, srednji, zadnji odboji) zelo odvisen od strukture krošnje posamezne preučevane drevesne vrste, torej od gostote listja ali iglic, relativne količine vej v primerjavi z listjem in vrzelmi v krošnji. Odbojnost je seveda odvisna še od odbojnosti listov/iglic posamezne drevesne vrste. To Suranto et al. (2009) prikažejo s primerjavo med duglazijo in borom, kjer ima slednji veliko nižje intenzitete prvih odbojev zaradi večjega deleža vej v krošnji, od katerih se odbije laserski žarek, kot pri duglaziji, kjer se večina odbojev zgodi na iglicah.
- Povprečne intenzitete iglavcev (smreka, bor, macesen), izračunane samo iz prvih in edinih odbojev, so višje od povprečnih intenzitet, izračunanih iz vseh odbojev. Povprečne intenzitete listavcev (oreh, javor, jesen, lipa), izračunane samo iz prvih in edinih odbojev, so višje od povprečnih intenzitet, izračunanih iz vseh odbojev za čas olistanosti. V času neolistanosti so nižje. Tako smo tudi mi potrdili, da analiza povprečne intenzitete samo prvih in edinih odbojev omogoča razlikovanje med odboji od listnate krošnje in od vejevja/debla. Zato lahko povprečne intenzitete uporabimo za identifikacijo fenološke faze, v kateri je določen listavec. V našem primeru lahko sklepamo, da jesen in oreh, rastoča na 750 metrih nadmorske višine, 15. 5. 2012 še nista bila popolnoma olistana, v nasprotju z lipo in javorjem, ki sta že bila olistana.
- Povprečne intenzitete listavcev v času olistanosti so v obeh valovnih dolžinah (1550 nm, 1064 nm) višje od povprečnih intenzitet iglavcev (smrek). V času neolistanosti je ravno nasprotno.

Ugotovili smo, da nenormalizirane intenzitete laserskih podatkov, posnete v časovnih vrstah (vsaj dva niza laserskih podatkov, posneta v isti valovni dolžini), omogočajo razločevanje iglavcev od listavcev ter preiskovanje fenoloških faz posamezne drevesne vrste že z uporabo enostavnih statistik, kot so povprečne intenzitete posameznih dreves. Raziskava je nakazala tudi na možnost ločevanja različnih listnatih drevesnih vrst na podlagi preučevanja povprečnih intenzitet predvsem v valovni dolžini 1064 nm, ko so razlike med drevesnimi vrstami znatne. Za podrobnejše ugotovitve glede značilnih razponov intenzitet za posamezne drevesne vrste bomo morali izvesti nadaljnje raziskave na večjih vzorcih dreves s statističnim ovrednotenjem rezultatov in v gostejših časovnih vrstah laserskih snemanj.

Zahvala

Za podatke, uporabljene v tej raziskavi, se najlepše zahvaljujemo Geodetskemu inštitutu Slovenije, ki jih je pridobil v okviru čezmejnega projekta Slovenija-Avstrija 2011–2014: Naravne nesreče brez meja (NH-WF). Za podatke laserskega skeniranja Slovenije se zahvaljujemo Ministrstvu za okolje in prostor Republike Slovenije.

Literatura in viri:

- Brus, R. (2012). Drevesne vrste na Slovenskem. Ljubljana: Mladinska knjiga.
- Holmgren, J., Persson, Å. (2004). Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sensing of Environment*, 90, 415–423. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00140-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00140-8).
- Kobal, M., Triplat, M., Krajnc, N. (2014). Pregled uporabe zračnega laserskega skeniranja površja v gozdarstvu. *Gozdarski vestnik*, 72 (5–6), 235–248.
- Kim, S., McGaughey, R. J., Andersen, H., Schreuder, G. (2009). Tree species differentiation using intensity data derived from leaf-on and leaf-off airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment*, 113, 1575–1586. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2009.03.017>
- Korpela, I., Ørka, H. O., Maltamo, M., Tokola, T. & Hyypä, J. (2010). Tree species classification using airborne LiDAR – effects of stand and tree parameters, downsizing of training set, intensity normalization, and sensor type. *Silva Fennica*, 44 (2), 319–339.
- Lavrič, M. (2016). Določevanje vrst drevoja v različnih valovnih dolžinah aerolaserskih podatkov. Magistrsko delo, Ljubljana, UL FGG.
- Li, W., Guo, Q., Jakubowski, M. K., Kelly, M. (2012). A New Method for Segmenting Individual Trees from the Lidar Point Cloud. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 8 (1), 75–84.
- Mongus, D., Žalik, B. (2015). An efficient approach to 3D single tree-crown delineation in LiDAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 108, 219–233. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.08.004>
- Moffiet, T., Mengersen, K., Witte, C., King, R., Denham, R. (2005). Airborne laser scanning: Exploratory data analysis indicates potential variables for classification of individual trees or forest stands according to species. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59, 289–309. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2005.05.002>
- Ørka, H. O., Naeset, E., Bollandsås, O. M. (2009). Classifying species of individual trees by intensity and structure features derived from airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment*, 113, 1163–1174. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2009.02.002>
- Reitberger, J., Schnörr, Cl., Heurich, M., Krzystek, P., Stilla, U. (2008). Towards 3D mapping of forests: A comparative study with first/last pulse and full waveform Lidar data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII. Part B8. Beijing.
- Suranto, A., Seielstad, C., Queen, L. (2009). Tree species identification in mixed coniferous forest using airborne laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, 683–693. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.07.001>
- Šturm, T., Pisek, R., Kobler, A., Beguš, J., Matjašič, D. (2016). Možnosti uporabe lidarskih podatkov na Zavodu za gozdove Slovenije. *GIS v Sloveniji*, 13, 105–113.
- Triglav Čekada, M. (2011). Možnosti uporabe zračnega laserskega skeniranja (lidar) za geomorfološke študije. *Geografski vestnik*, 83 (2), 81–93.
- Žust, A. (2015). Fenologija v Sloveniji, Priročnik za fenološka opazovanja. Ministrstvo za okolje in prostor, 1–4. <http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/agromet/product/document/sl/Brosura0515.pdf>, pridobljeno 15. 12. 2016.



Triglav Čekada M., Lavrič M., Kosmatin Fras M. (2017). Ločevanje iglavcev in listavcev na podlagi neobdelane intenzitete laserskih točk. *Geodetski vestnik*, 61 (1): 23–34. DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2017.23-34

Dr. Mihaela Triglav Čekada, univ. dipl. inž. geod.
Geodetski inštitut Slovenije
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: mihaela.triglav@gis.si

Doc. dr. Mojca Kosmatin Fras, univ. dipl. inž. geod.
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: mojca.kosmatin-fras@fgg.uni-lj.si

Maja Lavrič, mag. inž. geod. geoinf.
Šegova vas 11, 1318 Loški Potok
e-naslov: maja.lavric11@gmail.com