

# *Koliko točk? Gostota lidarskih snemanj za arheološke prospekcije*

## *How many points? Lidar point density in archaeological prospections*

© Dimitrij Mlekuž

Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije, Center za preventivno arheologijo in Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za arheologijo, dmlekuz@gmail.com

© Gašper Rutar

Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije, Center za preventivno arheologijo, gasper.rutar@zvkd.si

**Izvleček:** V članku ugotavljamo optimalne parametre za načrtovanje lidarskih snemanj na območju Slovenije za potrebe arheološke interpretacije. V njej analiziramo podatke laserskega snemanja 40 km<sup>2</sup> velikega študijskega območja v okolici Škocjana, na dveh manjših območjih simuliramo nižje gostote točk, analiziramo rezultate snemanja v pogojih zelo goste vegetacije in opazujemo vpliv gostote na prepoznavanje arheoloških značilnosti. Arheološke prospekcije so specifične, saj običajno zahtevajo večjo ločljivost, še posebej je visoka gostota snemanja pomembna za zagotavljanje dovolj talnih točk v gosti vegetaciji. Tako predlagamo, da je ob idealnih pogojih snemanja (pozna zima, odprte površine, listnat gozd) minimalna gostota vzorčenja za potrebe arheološke interpretacije vsaj 10 pulzov/m<sup>2</sup>. V praksi pa glede na poraščenost ozemlja Slovenije in dejstvo, da večina snemanj vsaj v delu zajema tudi poraščene površine, kjer so tudi arheološki sledovi na površini najbolj vidni, pa mora biti na prostorih z gosto vegetacijo, iglavci ali gosto podrastjo gostota snemanja še višja, več ali enaka od 20 pulzov/m<sup>2</sup>.

**Ključne besede:** daljinsko zaznavanje, LiDAR, ALA, gostota točk lidarskega snemanja za arheološke interpretacije

### *Uvod*

Daljinsko zaznavanje je nabor metod, s katerimi lahko od daleč – običajno iz zraka – opazujemo površje Zemlje. Opazovanja iz zraka s pomočjo različnih senzorjev predstavljajo hiter, sistematičen, neinvaziven in relativno ekonomičen način pridobivanja podatkov o arheoloških najdiščih in časovni globini krajine. Tradicionalne metode daljinskega zaznavanja v arheologiji – predvsem aerofotografija – v Sloveniji niso imele nikoli velikega vpliva na arheološko prakso in varovanje dediščine. Za slednje je poleg zemljiške razdrobljenosti glavni razlog ta, da večino Slovenije prekriva gozd (okoli 60 %), kar ima za posledico to, da z omenjenimi metodami tal skoraj ni mogoče opazovati.

V Sloveniji se je zato kot zelo izpovedna pokazala metoda laserskega skeniranja površja ali lidar (glej Mlekuž 2009, 2012), s katerim lahko opazujemo tudi gozdna tla. Velike površine, ki so bile do sedaj za tradicionalna opazovanja zaprte, so pokazale množico zelo dobro ohranjenih sledov. Gozd je prekril starejše krajine in jih tako obvaroval

**Abstract:** The article tackles the optimal parameters for airborne lidar prospections in Slovenia to be used in archaeological interpretation. It presents the analysis of a 40km<sup>2</sup> large area around Škocjan with 20 points/m<sup>2</sup> pulse density and the simulation of lower pulse densities on two small-scale case studies. This was used to determine the role of the point density on the visibility and interpretation of archaeological features. Airborne lidar prospections for archaeology are specific, because they usually require a higher resolution to discern small-scale features. High point density plays an important role in the classification of the ground points under the vegetation. We suggest that, in optimal survey conditions (late winter, open surfaces or open deciduous forest), minimal pulse density should be at least 10 pulses/m<sup>2</sup>. However, Slovenia is a heavily forested country and all surveys include at least some areas of dense vegetation, hence the point density should be higher, at least 20 pulses/m<sup>2</sup>.

**Keywords:** Remote sensing, LiDAR, ALA, LiDAR point density for archaeological prospections

pred uničenjem zaradi oranja in drugih aktivnosti, hkrati pa so v gozdu potekale specifične aktivnosti, ki so puščale nove sledove.

Uporaba lidarskega snemanja se je v preteklih letih uveljavila na številnih področjih, kot so kartografija, gozdarstvo in hidrološke (poplavne) študije, predvsem pa v prostorskem planiranju.

Lidarsko snemanje je zaenkrat postalo sestavni del ocene arheološkega potenciala večinoma le na območjih državnih ali občinskih prostorskih načrtov, saj je tu zaradi „vpletenosti“ številnih resorjev in njihovih specifičnih potreb, lidarsko snemanje tudi sestavni del projektov.

Ključni parameter pri lidarskem snemanju je gostota snemanja, oziroma gostota meritev na enoto površine. Pri dosedanjih raziskavah arheologi domala nismo imeli vpliva na kakovost podatkov, saj smo bili v veliki večini odvisni od podatkov, ki so jih za svoje potrebe ali potrebe projektantov naročili investitorji. Tudi kadar smo raziskave načrtovali sami, smo parametre snemanja določali intuitivno. Ob začetku projekta Geodetske uprave Slovenije

„Lasersko snemanje in aerofotografiranje“ (Splet 1), ki je predvideval sistematično pokritje Slovenije z relativno nizko gostoto točk (1–10 točk/m<sup>2</sup>, glej Triglav Čekada et al. 2012), smo menili, da je gostota snemanja prenizka za uporabo teh v arheologiji, prepoznavanje arheološki sledov in varovanje kulturne dediščine.

V članku ugotavljamo optimalne parametre za načrtovanje lidarskih snemanj na območju Slovenije za potrebe arheološke interpretacije. V njej analiziramo podatke laserskega snemanja 40 km<sup>2</sup> velikega študijskega območja v okolici Škocjana,<sup>1</sup> na dveh manjših območjih simuliramo nižje gostote točk, analiziramo rezultate snemanja v pogojih zelo goste vegetacije in opazujemo vpliv gostote na prepoznavanje arheoloških značilnosti.

## Lidar

Besedna zveza lasersko skeniranje ali lasersko snemanje opisuje vsako tehnologijo, ki s pomočjo laserskega žarka natančno in na gosto meri razdaljo od naprave do cilja. Omenjene meritve zbere kot množico koordinat ali oblak točk, iz katerega je moč pridobiti podatke o obliki skeniranega predmeta. Zračni LiDAR (ang. *Light Detection and Ranging*, „svetlobno zaznavanje in merjenje razdalj“) ali ALA (ang. *Airborne Laser Altimetry*, „lasersko merjenje višin iz zraka“) je skupek tehnologij, ki omogoča lasersko skeniranje zemeljskega površja iz zraka in vključuje laserski skener, napravo za natančno pozicioniranje (GNSS in inercialne merilce), sistem za zapis podatkov skupaj nameščeno na platformi, običajno na letalu ali helikopterju. Laserski skener pošilja laserske žarke proti tlom. Večina sistemov uporablja laser valovnih dolžin blizu infrardečega dela spektra, čeprav npr. batimetrični lidarski sistemi delujejo v zelenem delu spektra. Laser nepretrgano oddaja zelo kratke pulze proti tlom. Tipična dolžina pulza je med 4 in 10 ns, kar pomeni da je frekvenca vzorčenja med 100 in 150 kHz ali med 100.000 in 150.000 pulzi v sekundi. Zrcalo usmerja žarek proti tlom prečno na smer leta letala znotraj t. i. kota skeniranja (ang. *scanning angle*). Za usmerjanje žarka so v uporabi različni sistemi, kot so oscilirajoča zrcala, vrteča se zrcala, vrteče se prizme ali nihajoča zrcala, vsako izmed njih pa producira svoj značilen vzorec meritev na tleh imenovan tudi vzorec skeniranja (ang. *scan pattern*). Snemanje pokriva pas meritev

v smeri leta, širina pasu pa je odvisna od višine letala in maksimalnega prečnega kota skeniranja.

Ko žarek doseže površino Zemlje ima običajno premer (ang. *echo width*) okoli 10 cm. Če doseže drevje, se del žarka odbije od listov in ali vej, del pa prodira skozi odprtine dokler ne doseže drugih predmetov (listov, vej ali tal) od koder se odbije nazaj. Obstajata dva načina za vzorčenje odbitega žarka. Prvi je sistem diskretnih odbojev (ang. *discrete-return lidar system*), ki zazna odboj, ko amplituda oziroma intenzivnost odbitega žarka preseže določen prag in zapiše čas, ki ga je žarek potreboval do vrnitve. Diskretni lidarski sistemi pa običajno zapisujejo od dva do štiri odboje vsakega žarka. Sistemi, ki zapisujejo polno valovno obliko (ang. *full waveform systems*) zapisujejo intenzivnost odbojev v rednih intervalih in tako vzorčijo obliko odbitega pulza. Na ta način lahko natančno dokumentiramo interakcijo žarka z objektom, kot je npr. drevo. Tako lahko – s pomočjo primerne programske opreme – lažje določimo talne točke in razločimo nizke strukture kot so gomile ali suhi zidovi od nizke vegetacije (prim. Doneus et al. 2008).

Iz časa, ki ga je pulz potreboval, da se je vrnil nazaj do sprejemnika, izmerjenega z zelo natančno uro, in iz hitrosti svetlobe lahko izračunamo natančno razdaljo do tal. S pomočjo informacij o poziciji letala, ki ga izmerimo s kinematičnim GNSS iz naklona zrcala, in podatkov o naklonu letala, izmerjenim z inercialnimi merilci lahko iz razdalje do tal izračunamo koordinate točke, od koder se je žarek odbil. Surovi lidarski podatki so sestavljeni iz množice zapisov o času in intenzivnosti odbitih laserskih žarkov. Pasove meritev uskladimo s pomočjo koordinat kontrolnih točk izmerjenih na tleh. Tako dobimo oblak točk, v katerem vsebuje vsaka točka vsebuje atributne informacije kot so GPS čas, intenzivnost žarka, kot merjenja, številka pasu in prostorske koordinate. Oblake točk zaradi njihove velikosti shranjujemo in z njimi delamo v binarnem formatu LAS (Samberg 2007).

Zračni lidar je tehnologija, ki se še vedno zelo hitro razvija, tako na področju senzorjev kot procesiranja podatkov. Tekmovanje med proizvajalci lidarskih senzorjev se osredotoča predvsem na večanje frekvence skeniranja, kar pomeni povečanje števila točk, ki jih zberemo v sekundi. Višja gostota podatkov omogoča, da zapisujemo površine z večjo natančnostjo in ločljivostjo. Na drugi strani pa pomeni velika količina podatkov bistveno več časa za njihovo obdelavo. Ključni del procesa obdelave

<sup>1</sup> Projekt je financiralo Ministrstvo za kulturo RS, izvedli pa smo ga na Centru za preventivno arheologijo Zavoda za varstvo kulturne dediščine Slovenije.

je klasifikacija točk. Točke v oblaku točk moramo razdeliti na točke tal in točke odbojev od vegetacije. Procesiranje vsebuje predpostavke o lastnostih tal, bodisi eksplisitno bodisi vgrajene v algoritem, s katerim procesiramo podatke. Te predpostavke imajo velik vpliv na kvaliteto podatkov. Iz talnih točk interpoliramo digitalne modele reliefa (DMR) in digitalne modele površja (DMP).

### Terminologija

Pri navajanju gostote laserskega skeniranja se srečujemo s terminološko zmedo, saj imamo za merjenje „gostote“ vsaj tri različne metodologije. Prva je gostota točk (ang. *point density*), ki meri število vseh točk v oblaku točk na enoto površine. Gostota točk lahko znotraj oblaka točk zelo variira, saj je odvisna od vegetacijskega pokrova, geometrije in frekvence snemanja. Pri lidarskih sistemih diskretnih odbojev, ki beležijo npr. štiri odboje vsakega laserskega pulza je gostota točk teoretično do štirikrat višja od števila laserskih pulzov. Pri lidarskih sistemih ki dokumentirajo polno valovno obliko (ang. *full-waveform*) pa gostota točk nima pravega smisla. Gostota pulzov (ang. *shot density*) je število laserskih pulzov oziroma žarkov na enoto površine, ki jih naprava odda. Gostota pulzov ni odvisna od vegetacije, temveč le od geometrije skeniranja, frekvence, kota skeniranja, višine in hitrosti leta ter prekrivanja pasov. Gostota pulzov znotraj podatkovnega niza običajno bistveno ne variira. Tretja je gostota talnih točk (ang. *ground point density*), ki meri le število točk, klasificiranih kot tla, na enoto površine. Gostota talnih točk je tako manjša ali enaka od gostote pulzov in zelo odvisna od vegetacije, oziroma penetracije laserskega žarka do tal, pa tudi od parametrov klasifikacije in klasifikacijskega algoritma.

Za oceno gostote snemanja je boljše uporabiti podatek o gostoti pulzov, saj je le ta odvisna zgolj od parametrov snemanja in neodvisna od predmeta in pogojev snemanja. Žal mnogi izvajalci navajajo zgolj gostoto točk, ki je seveda mnogo višja od gostote pulzov ter odvisna od naprave in talnih pogojev. Za arheologijo je seveda najpomembnejša mera gostota talnih točk, saj opazujemo tla in nas odboji od vegetacije načeloma ne zanimajo.

### Študijsko območje

Študijsko območje, z velikostjo 40 km<sup>2</sup>, leži na območju med Divačo, Gornjimi Vremami, Rodikom in Vremščico,

torej na stiku med eocenskimi fliši (Brkini) ter krednimi in paleocenskimi karbonati (Kras). Na severni strani študijsko območje omejujejo pobočja Gabrka s Čebulovico in Vremščica, na vzhodu flišna pobočja Vremščice in na jugu flišni Brkini. Osrednji del tega študijskega območja pa predstavlja Škocjanski kras, obsežna uravnana pokrajina na nadmorski višini med 420 in 450 m. Škocjanski kras na zahodu preide v kraške planjave in gričevja Divaškega krasa. Za Škocjanski kras je značilna velika zakraselost, kjer prevladuje tip površja z lijakastimi vrtačami in večjimi udornicami. Popolnoma drugačno površje je na flišnatih nepropustnih tleh Brkinov, kjer se je razvila površinska dendritna rečna mreža, erozija pa je tu urezala globoke grape. Površje je bolj razgibano. Za Brkine so značilna razpotegnjena in široka slemena, kamor so se umestila tudi naselja.

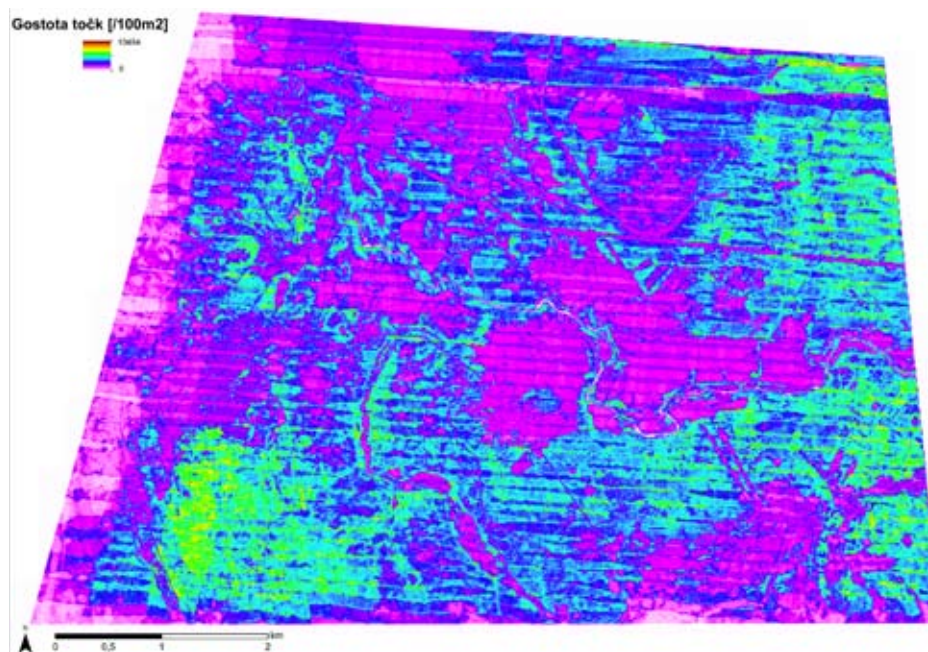
Prepletanje karbonatov in fliša je izoblikovalo tipične oblike kontaktnega krasa (Gams 2001), ki so nastale s pomočjo površinske vode, kot so slepe doline, jame in brezna. Škocjanski kras se v stopnjah znižuje proti današnji reki Reki. Preko študijskega območja poteka slepa dolina reke Reke – Vremška dolina. Pred vstopom Reke v sotesko pred ponorom v Škocjanske jame se dolina na Vremškem polju razširi. Vremsko polje leži na okoli 12 m debelih naplavinah, ki jih je Reka nanese na karbonatno podlago (Kranjc 1999).

Za to študijsko območje smo se odločili zato, ker gre za prostor z različnimi litološkimi in geomorfološkimi enotami, z zelo razgibanim površjem in velikimi razlikami v vegetaciji (od travnikov, pašnikov in njiv do pašnikov v zaraščanju, mešanih in iglastih gozdov). Poleg tega pa na tem prostoru relativno dobro poznamo arheološke ostanke (Turk, Hrobat 1999).

### Snemanje

Snemanje smo opravili dne 27. in 28. decembra 2012, pogoji zanj pa so bili odlični, saj je v začetku decembra (8. 12.) zapadel sneg, ki mu je sledila močna burja (Cegnar 2012). Snežna odeja, ki je do začetka snemanja skopnela, in burja sta povzročili, da je odpadla večina listja, sneg pa je stisnil odpadlo listje in podrast.

Višina leta je merila 550 m nad površjem, hitrost leta pa je bila 51.4 m/s (okoli 185 km/h). Frekvenca skenerja je znašala 125 kHz, kot skeniranja (ang. *scanning angle*) v intervalu pa  $\pm 25$  stopinj. Izvajalec je uporabil senzor



Slika 1. Gostota vseh točk na študijskem območju.

Figure 1. Point density in the study area.

Optech ALTM Gemini167 (Optech 2008), torej diskretni lidarski sistem, ki zapisuje do štiri odboje (1., 2., 3. in zadnji odboj) vsakega laserskega pulza.

### Gostota snemanja

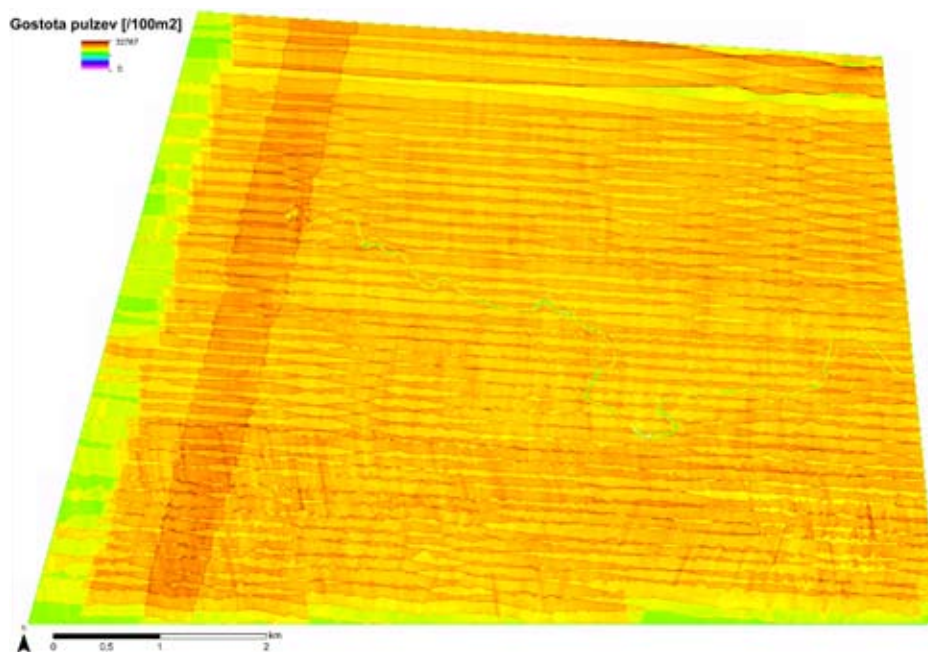
Po navedbah izvajalca snemanja je bila gostota snemanja 32 točk/m<sup>2</sup>. Naša ocena gostote snemanja z orodjem *lasinfo* (del paketa LAStools, Isenburg 2013) je pokazala da je v oblaku točk, ki prekriva 41,64 km<sup>2</sup> 1.324.707.467 točk, kar v povprečju znesi 31,81 točk/m<sup>2</sup>. Povprečna horizontalna razdalja med točkami je tako 0,18 m. Točk zadnjega odboja je 750.416.831, kar pomeni, da je povprečna gostota pulzov 18,2 pulza/m<sup>2</sup>. Horizontalna razdalja med pulzi je 0,24 m. V oblaku točk je 253.903.014 točk klasificiranih kot tla (razred 2), kar pomeni povprečno gostoto 6,1 talne točke/m<sup>2</sup>. Povprečna horizontalna razdalja med talnimi točkami je tako 0,4 m. Na študijskem območju je torej gostota točk za skoraj dvakrat večja od gostote pulzov, gostota talnih točk pa trikrat manjša od gostote pulzov. Povprečna gostota pulzov je torej pod 20 pulzov/m<sup>2</sup>.

Gostote pa se razlikujejo tudi v razponu in obliki porazdelitve. Za celotno območje smo s pomočjo modula *lasgrid* računali gostote znotraj celic 10 × 10 m in nato rezultat delili s 100. Tako smo dobili karte porazdelitve posameznih gostot (slike 1–4).

Porazdelitev gostote vseh točk precej variira saj je močno odvisna od gostote vegetacije. Po drugi strani pa je variacija distribucije gostote pulzov mnogo manjša, kar pomeni, da je povprečna gostota pulzov, v primerjavi s povprečno gostoto vseh točk, mnogo boljši indikator gostote snemanja. Razlog za variacije gostote pulzov je predvsem v prekrivanju.<sup>2</sup> Tam kjer se posamezni pasovi prekrivajo je gostota precej višja, gostota znotraj posameznih pa je skoraj identična, in sicer okoli 15 pulzov/m<sup>2</sup> (slika 4).

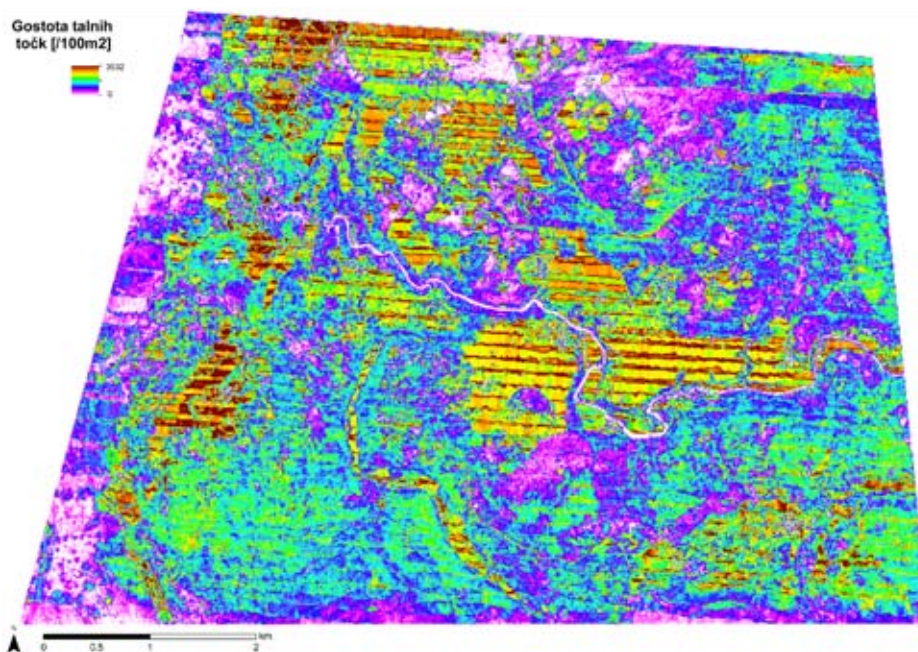
Na variacijo gostote talnih točk vpliva predvsem gostota vegetacije. Za ugotavljanje gostote vegetacije smo izdelali karto indeksa gostote vegetacije (slika 5) za celice velikosti 10 × 10 m. Indeks smo izračunali s pomočjo orodja *lascanopy*, kjer indeks vegetacije predstavlja razmerje med šte-

<sup>2</sup> Večja gostota pulzov zaradi prekrivanja pasov ne zagotavlja tudi večje kvalitete, saj tu nastopajo težave zaradi usklajevanja pasov.



Slika 2. Gostota pulzev na študijskem območju.

Figure 2. Pulse (shot) density in the study area.



Slika 3. Gostota talnih točk na študijskem območju.

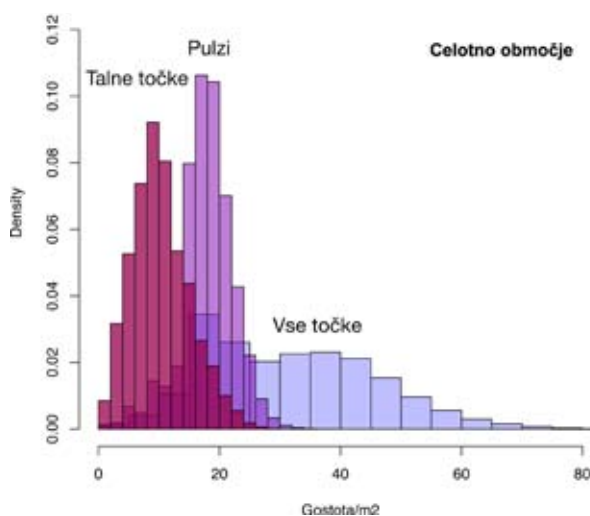
Figure 3. Ground point density in the study area.

vilom točk, klasificiranih kot vegetacija (razredi 3, 4 in 5), višjih od 1,37 m od tal in vsemi točkami znotraj celice.

Primerjava med indeksom gostote vegetacije in distribucijo gostote vseh točk ter gostoto talnih točk kaže, da igra vegetacija ključno vlogo pri vplivu na gostoto talnih točk. Na območjih brez vegetacije je gostota talnih točk enaka gostoti pulzov (oz. zadnjih odbojev), medtem ko je na območjih z visoko gostoto vegetacije število talnih točk za več kot tri četrtine manjše od števila pulzov. Prisotnost vegetacije pa povečuje tudi število vseh točk. Na območjih z gosto vegetacijo je število vseh točk do štirikrat višje od števila pulzov, štirikrat pa zato, ker naprava Optech ALTM Gemini167, uporabljena v nalogi, zapisuje do štiri odboje vsakega pulza. Povprečna gostota vseh točk in talnih točk je tako funkcija povprečne gostote vegetacije in povprečne gostote pulzov. Povprečna gostota vegetacije na študijskem območju je okoli 60, s precej visoko standardno deviacijo, kar 37.5.

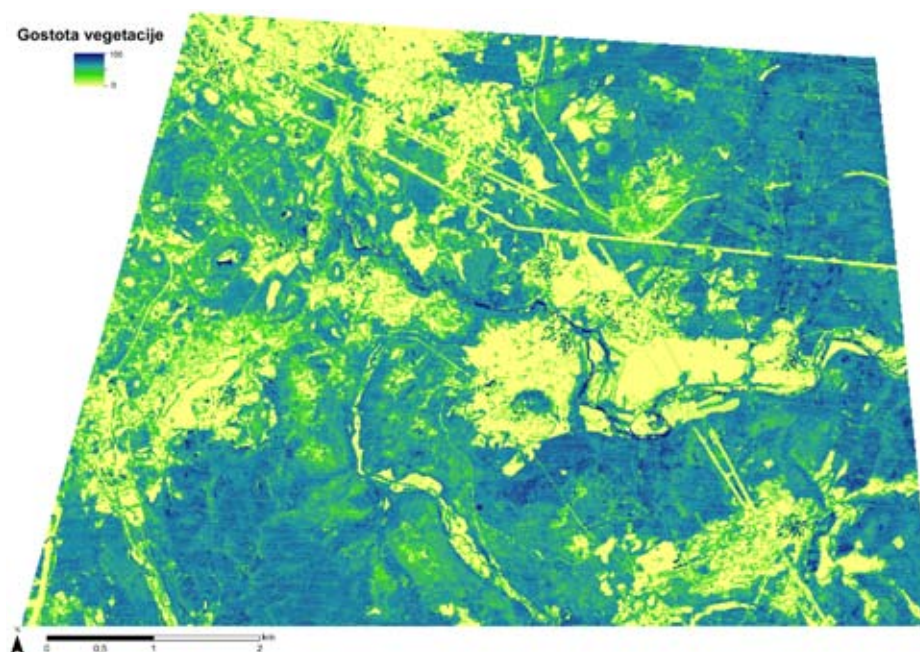
Ker je gostota vseh točk odvisna od vegetacije, je ciljno gostoto točk težko načrtovati. Mnogo lažje je načrtovati gostoto pulzov, iz katere pa je mogoče zlahka nastaviti parametre skeniranja kot je višina, hitrost, frekvenca in kot skeniranja ter tako izdelati načrt leta.

Točke smo najprej klasificirali v talne točke in ostale točke. Za to smo uporabili orodje *lasground*. Ker smo s poskusi ugotovili, da so standardni parametri preveč selektivni in tako izgublamo tudi točke povezane z arheo-



Slika 4. Histogrami gostote točk.

Figure 4. Histogram of point density.



Slika 5. Gostota vegetacije na študijskem območju.

Figure 5. Vegetation density in the study area.

loškimi značilnostmi, smo parametre spreminjali tako, da smo izgubili kar najmanj točk povezanih z arheološkimi značilnostmi. Tako smo dobili več nizov talnih točk, klasificiranih z različno selektivnimi filtri.

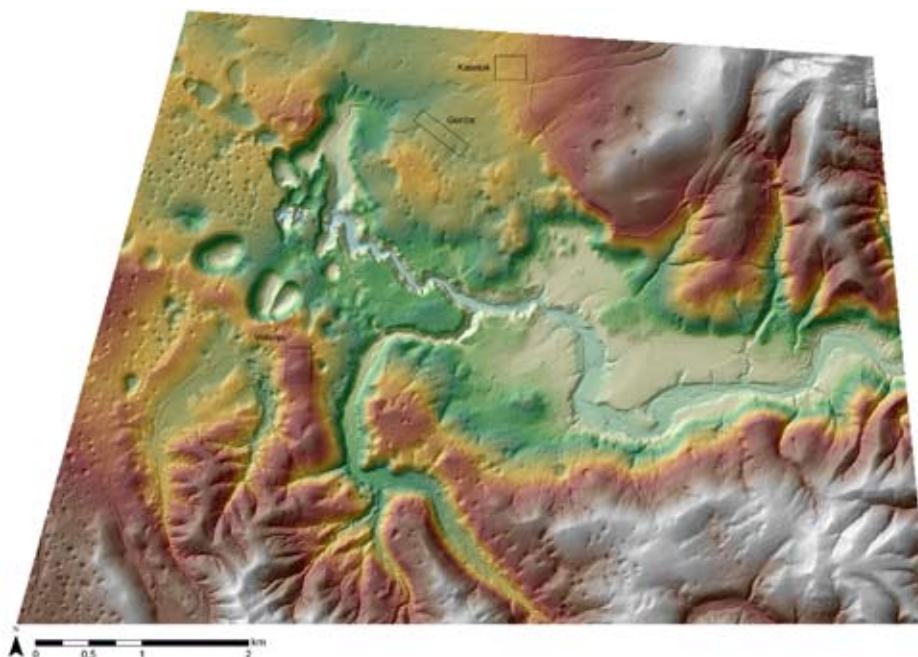
Iz talnih točk smo izdelali digitalni model reliefa ločljivosti 0,5 m (slika 6). Za izdelavo DMR z ločljivostjo 0,5 m gostoto so potrebne vsaj 4 talne točke/m<sup>2</sup> (oz. želimo, da bo horizontalna razdalja med talnimi točkami vsaj 0,5 m ali manjša), za DMR ločljivosti 1 m pa 1 točko/m<sup>2</sup>. Želimo, da je ta gostota čim bolj uniformna, to pomeni, da bi bilo celic, ki bi imele manjšo gostoto od ciljne, čim manj). Zaželena ciljna povprečna gostota talnih točk je potemtakem večja od 1 oziroma 4 točke/m<sup>2</sup>.

Izdelali smo karto celic ločljivosti 10 m, kjer je gostota talnih točk manj kot 1 oziroma 4 točke/m<sup>2</sup> (slika 7). Karta kaže, da je na večjem delu študijskega območja dovolj talnih točk za izdelavo dobrega DMR ločljivosti 1 m. Težave se pojavljajo le na robovih študijskega območja (zaradi manjšega prekrivanja pasov), prostorih z zelo gosto vegetacijo, pozidanih območjih (kjer so točke klasificirane kot stavbe) in območjih z globoko vodo, kjer odbojev

sploh ni. Celic z gostoto manjšo od 1 točke/m<sup>2</sup> je manj kot odstotek, medtem ko je celic z gostoto manjšo od 4-ih talnih točk/m<sup>2</sup> manj od deset odstotkov.

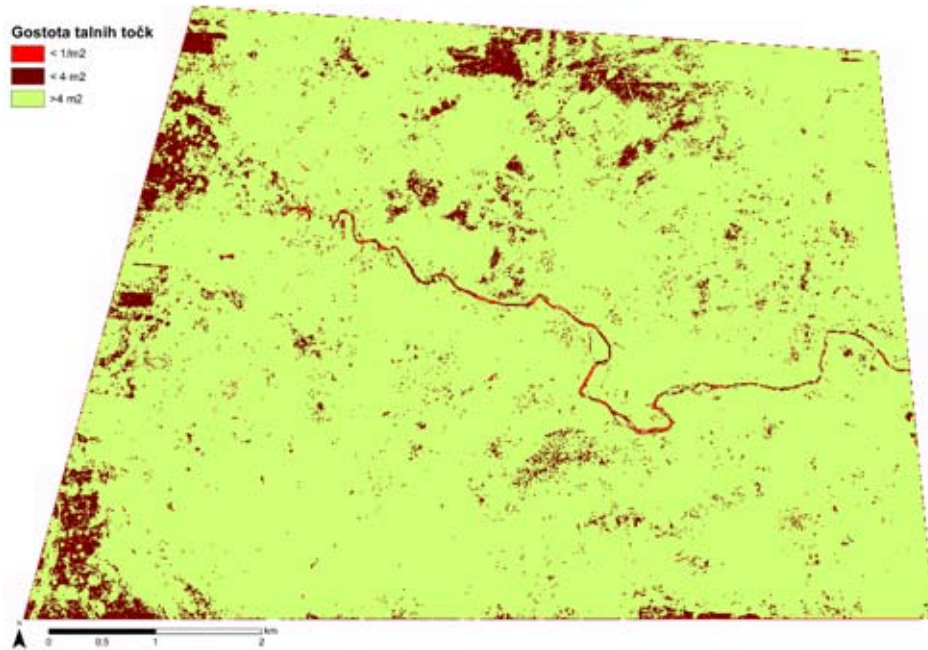
### Arheološka interpretacija

Arheološka interpretacija študijskega območja je še v teku. Do sedaj smo dokumentirali 910 pozitivnih značilnosti (gomile, nasipi, okopi in grize), 30 negativnih značilnosti (jarki, vkopi, kamnolomi), 53 apnenc, 140 ostankov stavb oziroma zidanih struktur, 1001 njivo z visokimi hrbtmi (ang. *ridge and furrow*), 1322 kulturnih teras, 14,8 km suhih zidov in okoli 8 km vojaških jarkov (slika 8). Arheološka interpretacija lidarskih podatkov je pokazala, da s pomočjo lidarja lahko mnogo bolje določimo vsebino, obliko in strukturo že znanih najdišč. Namesto velikih arheoloških območij, ki so prej posledica nepoznavanja oz. neraziskanosti arheoloških sledov, z lidarjem mnogo natančneje zamejimo najdišča ter natančno določimo in dokumentiramo strukture kot so obrambni jarki, nasipi, zidovi, gomile in podobno (Mlekuž 2012).



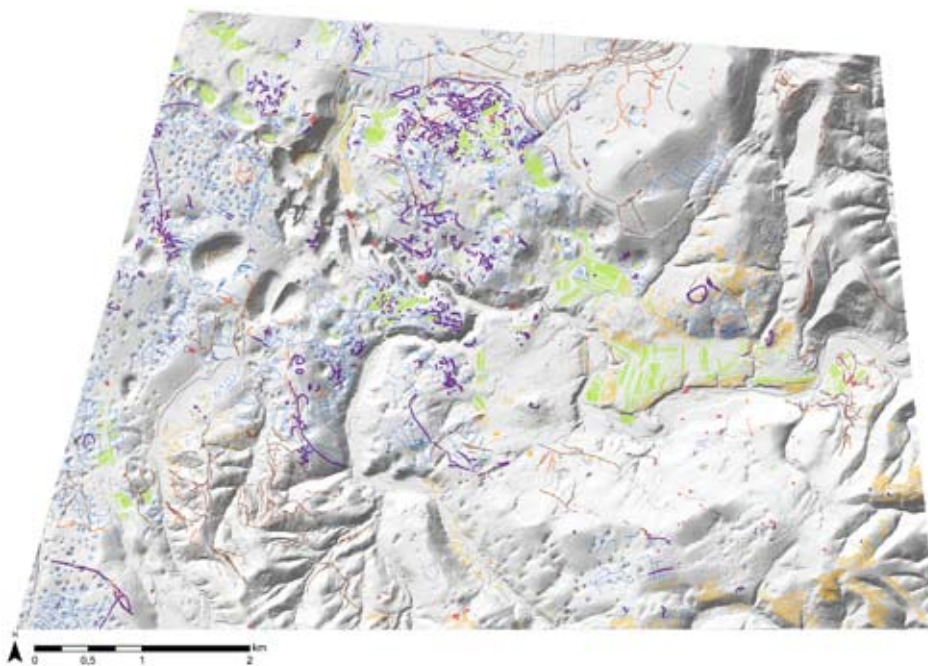
Slika 6. Analitično senčen digitalni model terena z označenimi študijskimi območji.

Figure 6. Analytical hillshade model with small-scale study areas



Slika 7. Gostote talnih točk.

Figure 7. Ground point density.



Slika 8. Prepoznane značilnosti.

Figure 8. Identified features.



Poleg natančnejšega dokumentiranja že znanih najdišč, prinaša lidarsko snemanje tudi množico drugih sledov v prostoru. Tako lahko prepoznamo sledove vsakdanjih aktivnosti kot so apnenice, kopišča, kamnolomi, ledenice, sledove rudarjenja, in kali. Poleg tega najdemo še mnogo sledov človeškega premikanja po pokrajini; poleg cest in poti lahko (predvsem na flišnati podlagi) identificiramo tudi ugreznjene poti (Mlekuž 2013), na pobočjih Vremščice pa tudi sledove gibanja, ki jih lahko povežemo s transhumanco.

Najočitnejši so sledovi kmetijstva. Tako lahko prepoznamo očiščene površine s kamnitimi grobljami in suhimi zidovi na robovih parcel; na območjih z več prsti (predvsem v večjih vrtačah in na terasah reke Reke) pa tudi sledove obdelovanja tal. Prepoznali smo sledove, ki jih lahko interpretiramo kot ostanke (vsaj) pedsrednjeveške zemljiške razdelitve, najboljši primer so zemljene gomile in nasipi, ostanki naselja in polj nepravilnih oblik v bližini Gorič. Prazgodovinska polja so prekrila kasnejša, srednjeveška in novoveška polja. Prepoznali smo polja z visokimi hrbti, ki so običajno vezana na zemljiško razdelitev na delce, in jih lahko pripišemo srednjeveški in porednjeveški izrabi tal. V Brkinih so zelo pogosti sledovi grajene kulturne terase na pobočjih.

Na študijskem območju smo prepoznali veliko sledov konfliktov, kot so strelski jarki različnih oblik, topniški položaji, mitralješka gnezda, itd., ki še niso bili dokumentirani.

Z množico novih najdišč in sledov, ki so rezultat uporabe lidarja, začenjamo razumeti arheološko dediščino drugače. Nič več ne gre za izolirana najdišča, ki ležijo v praznem prostoru, temveč se ob ožje zamejenih najdiščih pojavlja nepretrgana vrsta sledov, kar je rezultat tisočletnega bivanja v prostoru ter kopičenja, preurejanja in predelovanja sledov.

### *Gostota snemanja in interpretacija značilnosti*

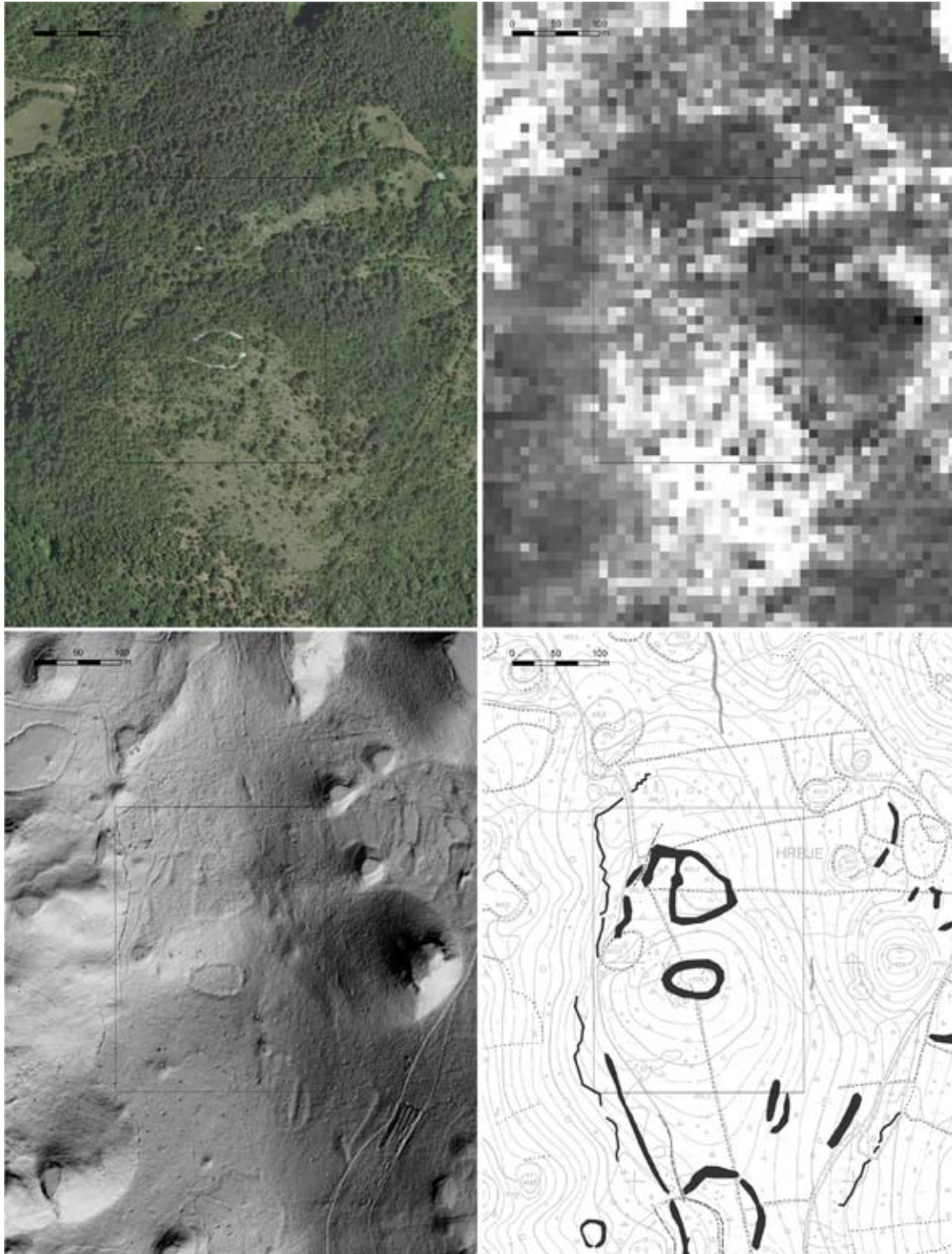
Da bi raziskali razmerje med gostoto snemanja (gostoto točk) in potencialom za arheološko interpretacijo (oz. informativnostjo izdelanega digitalnega modela reliefa), smo izbrali dve območji, kjer smo z redčenjem točk poskusili ugotoviti vpliv gostote točk na vidnost in prepoznavnost arheoloških sledov. Izbrali smo območji okoli gradišča Volarija in območje znotraj arheološkega najdišča v Snožetih pri Goričah. Na območju s toponimom

Kaselak na pobočju Vremščice smo preverili rezultate snemanja v pogojih zelo goste vegetacije (slika 6).

Za vsako od obeh območij smo simulirali nižjo gostoto snemanja tako, da smo redčili število pulzov. Dobili smo več nizov podatkov, prvega, ki vsebuje vse pulze (originalni podatki), drugega, ki vsebuje le vsak drugi pulz (prepolovili smo število pulzov in tako simulirali za polovico manjšo gostoto snemanja), in vse nadaljnje nize, ki vsebujejo vsak četrti, osmi, šestnajsti in dvaintrideseti pulz. Vsak izmed dobljenih nizov podatkov je rezultat polovice manjše gostote snemanja. Če je originalna povprečna gostota pulzov okoli 18 pulzov/m<sup>2</sup>, to pomeni, da simuliramo gostoto snemanja s povprečno gostoto okoli 9 pulzov/m<sup>2</sup> (za niz podatkov z vsakim drugim pulzom), okoli 4 pulze/m<sup>2</sup> (za niz podatkov, kjer upoštevamo vsak četrti pulz) ter 2 pulza/m<sup>2</sup>, 1 pulz/m<sup>2</sup> in manj kot 1 pulz/m<sup>2</sup> (za niz podatkov z vsakim 32 pulzom). Dobljene oblake točk smo klasificirali v talne točke in vegetacijo, izračunali gostoto pulzov in talnih točk, izdelali opisno statistiko gostote in iz klasificiranega oblaka točk pa smo izdelali digitalni model reliefa. Senčen digitalni model reliefa iz klasificiranih talnih točk smo primerjali s senčnim digitalnim modelom reliefa izdelanim iz originalnih, torej neredčenih podatkov in kvalitativno ugotavljali razlike in izgubo informativnosti.

### *Študijski primer 1: Dane pri Divači – Gradišče Volarija*

Prvo je 0,08 km<sup>2</sup> veliko študijsko območje v okolici gradišča Volarija pri Danah pri Divači (slika 9). Območje je pretežno prekrto z gozdom in podrastjo, vendar samo gradišče leži na robu pašnika v zaraščanju. Kamnit napis gradišča je tako viden tudi na ortofoto posnetku, prav tako kot gomila na severnem pobočju pod gradiščem. V Registru nepremične kulturne dediščine je opisano kot „prazgodovinsko gradišče manjših dimenzij, z enojnim vencem obrambnega okopa, ki je v celoti ohranjen.“ V resnici pa bi ga lahko, glede na velikost (1800 m<sup>2</sup>) in pomanjkanje struktur znotraj nasipa, prej označili za ogrado. Že C. Marchesetti je najdišče, zaradi pomanjkanja keramičnih najdb in naselbinske stratigrafije, opredelil kot kratkotrajno naseljeno najdišče, morda pa le kot zatočišče ali strateško razgledno točko (1903, 87).

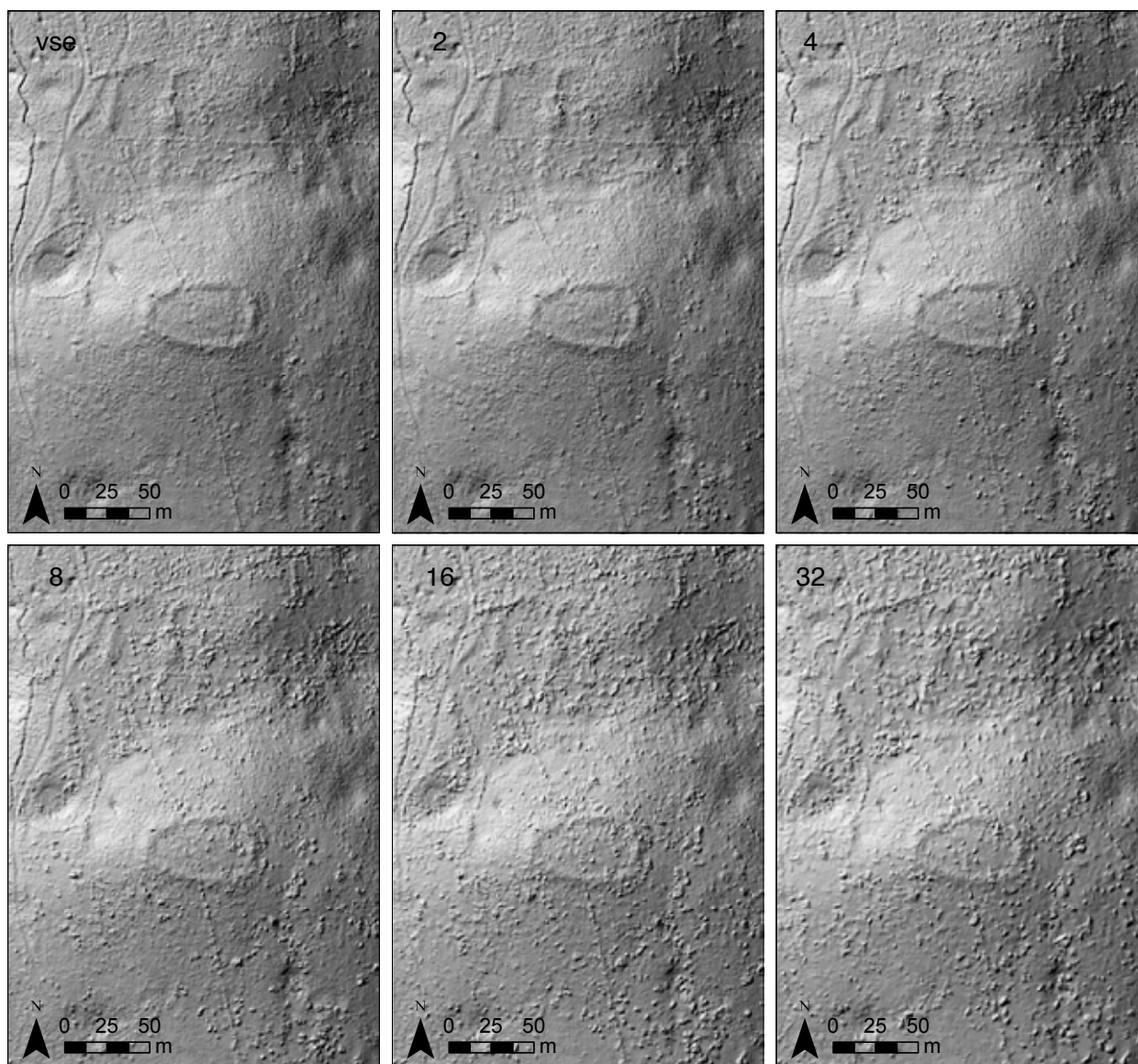


Slika 9. Študijsko območje Volarija: digitalni ortofoto, gostota vegetacije, analitično senčen DMR in prepoznane značilnosti.

Figure 9. Volarija study area: digital ortho-photo, vegetation density, analytical hillshade model and identified features.

Na digitalnem modelu reliefa lahko zelo dobro prepoznamo pozitivno obliko nasipa ograde, ki leži na vrhu manjše vzpetine. Dimenzija ograde znaša okoli  $50 \times 25$  m, nasip pa je dobro ohranjen; tekstura nasipa priča, da je sestavljen iz kamenja. Na severni in jugovzhodni strani je nasip prekinjen. V notranjosti ograde ne prepoznamo drugih značilnosti. Poleg ograde lahko na severni strani, ob vzhodni vzpetini opazimo nasip, ki omejujejo pro-

stor približno trapezoidne ali trikotne oblike, dimenzije  $120 \times 140$  m. Na vzhodnem nasipu je v okop vključena nizka „gomila“, ki ima premer okoli 15 m. Pozitivne oblike so nizke, a relativno dobro vidne. Razlika v teksturi prostora, ki ga omejujejo, z okolico, kaže, da je bil prostor očiščen kamenja, ki je bilo verjetno uporabljeno za gradnjo struktur. Podobne, a manjše in krajše pozitivne oblike lahko opazimo tudi na jugovzhodni strani



Slika 10. Primerjava med analitično senčenimi DMR študijskega območja Volarija izdelani za različno redčene oblake točk.

Figure 10. Volarija case study: Comparison of analytical hillshade models derived from simulated lower point densities.

vzpetine. Na jugozahodni strani lahko opazimo podobno linearno značilnost, ki sega izven študijskega območja. Najbrž gre za linearni mejni nasip, verjetno prazgodovinske starosti (cf. Oswald 2011). Na digitalnem modelu reliefa lahko opazimo tudi mrežo suhih zidov, ki spoštuje moderne parcelne meje in se ne ozirajo na pozitivne značilnosti, opisane zgoraj (kar sugerira, da so značilnosti starejše od predmoderne krajine, verjetno prazgodovinske starosti).

Opazimo pa tudi strelski jarek cikcakaste oblike, ki teče po zahodnem robu študijskega območja, na robu strmega pobočja. Poleg opisanih značilnosti je na digitalnem modelu reliefa moč prepoznati tudi poti (negativne linearne oblike) in več negativnih oblik neznanega namena. Najverjetneje gre za majhne priložnostne kamnolome.

Število vseh pulzov na študijskem območju je 944.655, povprečna gostota pulzov je  $18/m^2$ ; število vseh točk pa okoli  $24/m^2$ . Povprečna horizontalna razdalja med pulzi je 0,24 m, med točkami pa 0,2 m. Število vseh točk bistveno bolj variira (medkvartilna razdalja pulzov je 6, medtem, ko je medkvartilna razdalja vseh točk 10). Povprečna gostota pulzov na študijskem območju Volarija je primerljiva z povprečno gostoto pulzov na celotnem območju, medtem ko je število vseh točk bistveno nižje (20 v primerjavi s 30 za celotno območje), kar kaže, da je omenjeno območje manj poraščeno od celotnega območja, saj je njegov povprečni indeks vegetacije 46 v primerjavi s 60 za celotno območje.

Z redčenjem točk gostota pulzov upada z faktorjem redčenja in doseže gostoto  $0,5/m^2$  (1 točka/2  $m^2$ ) pri faktorju redčenja 32. Distribucija gostote pulzov pri redčenju kaže na uniformno manjšanje števila točk po celotni površini; večja gostota, ki je rezultat prekrivanja pasov, postane čedalje manj izrazita.

Za vsak faktor redčenja smo v z modulom *lasground* klasificirali oblak točk v točke tal in ostale (uporabili smo parameter *-extra\_fine* in korak 1,5 m. Porazdelitev gostote talnih točk, kaže na velik vpliv vegetacije. Na območjih goste vegetacije je tako že brez redčenja veliko celic brez talnih točk, z redčenjem pa to postane še bolj očitno. Več talnih točk je na območjih prekrivanja pasov; večja gostota pulzov pomaga klasifikacijskemu algoritmu razločiti talne točke. Zaradi slednjega postane jasno, da je velika intenzivnost snemanja namenjena predvsem pridobivanju talnih točk na območjih z gosto vegetacijo,

ne pa izdelavi zelo natančnih DMR na območjih brez vegetacije. Talne točke smo interpolirali v digitalni model reliefa ločljivosti 0,5 m (uporabili smo modul *las2dem* iz paketa LAStools). Digitalne modele reliefa smo senčili. Rezultat je prikazan na sliki 10.

Slika 10 nam prikazuje primerjavo med nizi redčenih podatkov. Očitno je da se z redčenjem gostote pulzov hitro poslabšuje klasifikacija talnih točk. Že v polovično redčenem podatkovnem nizu (2) je opaziti kar nekaj nepravilno klasificiranih točk, in sicer ko algoritem točke podrasti zamenjuje za tla. Na analitično senčenem DMR jih lahko opazimo kot ostre, majhne pozitivne oblike. To postane še očitneje z nadaljnjim redčenjem, pri faktorju redčenja 8 napačno klasificirane točke tal niso opazne le na območjih z gosto vegetacijo temveč tudi drugje, pri faktorju redčenja 32, pa napačno klasificirane točke prekrivajo celotno površino.

Zmanjševanje vidnosti detajlov arheoloških značilnosti je opazno že pri faktorju redčenja 2; robovi gomile in nasipa ograde v vznožju so manj jasni, prekinitve v obzidju ograde ni več moč prepoznati. Pri faktorju redčenja 4 lahko opazimo, mnogo manj detajlov v strelskem jarku, njegov rob je zmešan. Suhi zidovi niso več kontinuirane črte, temveč linearne vrste posameznih pozitivnih točk. Pri faktorju redčenja 8 nasipe ograde v vznožju komaj prepoznamo, pri faktorju redčenja 16 pa skoraj niso več prepoznavne. Jarek je komaj prepoznaven. Ob faktorju redčenja 32 večina značilnosti izgine, prepoznaven je le še nasip ograde in smeri največjih suhih zidov. Detajlov ni moč več prepoznati.

### *Študijski primer 2: Goriče pri Famljah – Arheološko najdišče V Snožetih*

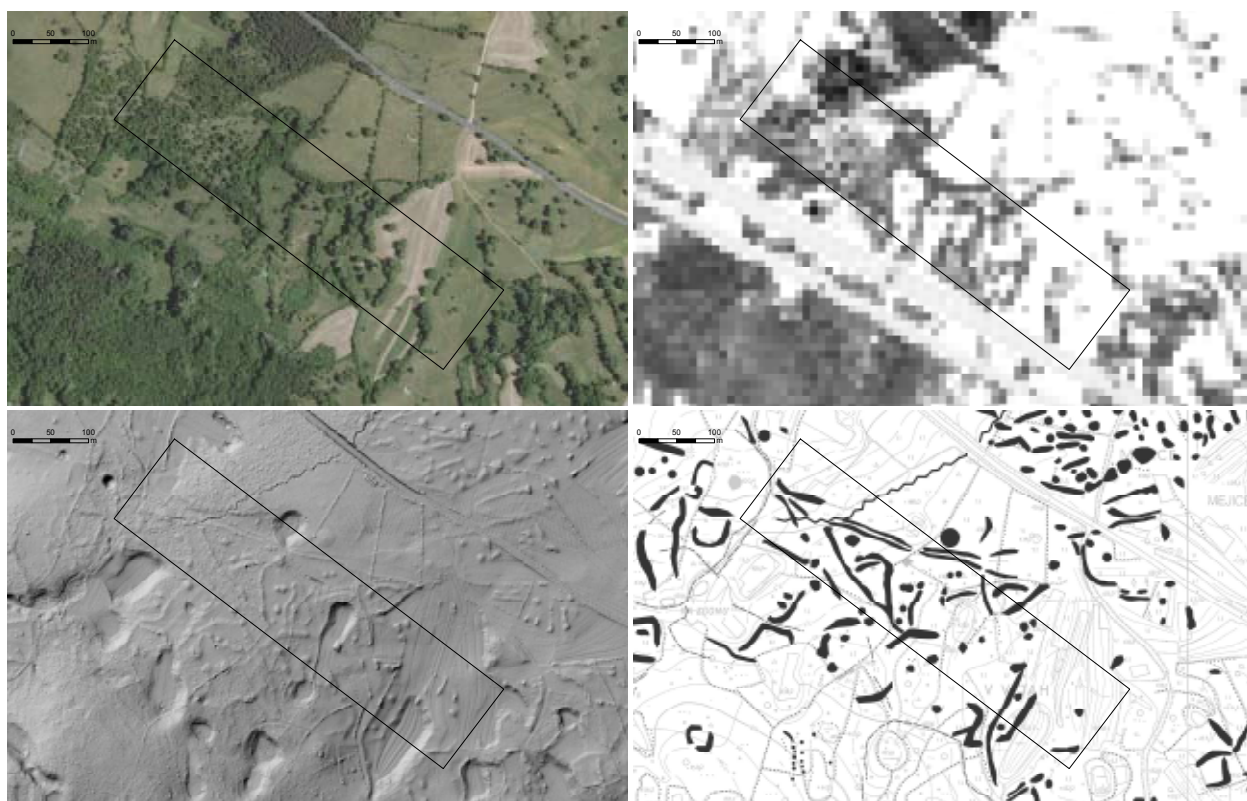
Drugo študijsko območje je velikosti 0,07  $km^2$  in leži na območju najdišča V Snožetih pri Goričah pri Famljah (slika 11). Območje je pretežno odprto, nekaj zaplat je poraslih z gozdom, tudi borovim in gosto podrastjo. Večino tega območja prekrivajo pašniki in travniki v zaraščanju. Vegetacija, predvsem podrast raste ob parcelnih mejah, nad kamnitimi zidovi. Na severnem robu je zaplata zelo goste nizke vegetacije, v njej pa so tudi iglavci. V Registru nepremične kulturne dediščine je najdišče opredeljeno kot naselbina in opisano kot: „več umetnih kopastih struktur; glede na raziskave in najdbe lončenine gre verjetno za ostanke prazgodovinske naselbine.“ Na

digitalnem modelu reliefa so zelo očitne pozitivne linearne značilnosti. Nekatere linearne značilnosti so med seboj vzporedne in omejujejo komunikacijo, ki poteka v smeri vzhod–zahod, in omejuje prostore trikotne oblike, dimenzije  $80 \times 70$  m. Prepoznamo tudi več pozitivnih okroglih oblik, ki so podobne gomilam. Na podlagi analogij iz Velike Britanije (McOmish 2011) gre morda za razpršeno prazgodovinsko poselitev z ostanki parcelne razdelitve, za ostanke nepravilnih ograjenih polj in naselja (ang. *irregular enclosed fields and settlement*). Študijsko območje leži na južnem robu območja, kjer nastopajo pozitivne linearne strukture; te so pogostejše in bolj ohranjene na travnikih in pašnikih severno od ceste Divača–Vremski Britof.

Na vzhodnem robu so v vrtačah opazni sledovi polj z visokim hrbtom, najverjetneje srednjeveške in post-srednjeveške starosti (Mlekuž 2012). Ta polja so ponekod uničila pozitivne linearne oblike, ki so opisane zgoraj.

Opazimo pa tudi strelski jarek cikcakaste oblike, ki teče po zahodnem robu študijskega območja.

Število vseh pulzov je 1.323.374, število vseh točk pa 1.651.954. Povprečna gostota pulzov na študijskem območju je  $17,8/m^2$ , povprečna gostota vseh točk je  $22,24/m^2$ ; povprečna horizontalna razdalja med točkami je 0,21 m, med pulzi pa 0,24 m. Medkvartilna razdalja pulzov je 10, medtem, ko je medkvartilna razdalja vseh točk 8. Povprečna gostota pulzov na študijskem območju Goriče je podobna povprečni gostoto pulzov na celotnem območju, medtem ko je gostota vseh točk nižja (20 v primerjavi s 30 za celotno območje), kar kaže, da je to območje, v primerjavi s celotnim, manj poraščeno (povprečni indeks vegetacije je le 26 v primerjavi s 60 za celotno območje). Kljub temu pa so tu zaplate zelo goste vegetacije (maksimum indeksa vegetacije doseže vrednost 98).



Slika 11. Študijsko območje Goriče: digitalni ortofoto, gostota vegetacije, analitično senčen DMR in prepoznane značilnosti.

Figure 11. Goriče study area: digital ortho-photo, vegetation density, analytical hillshade model and identified features.

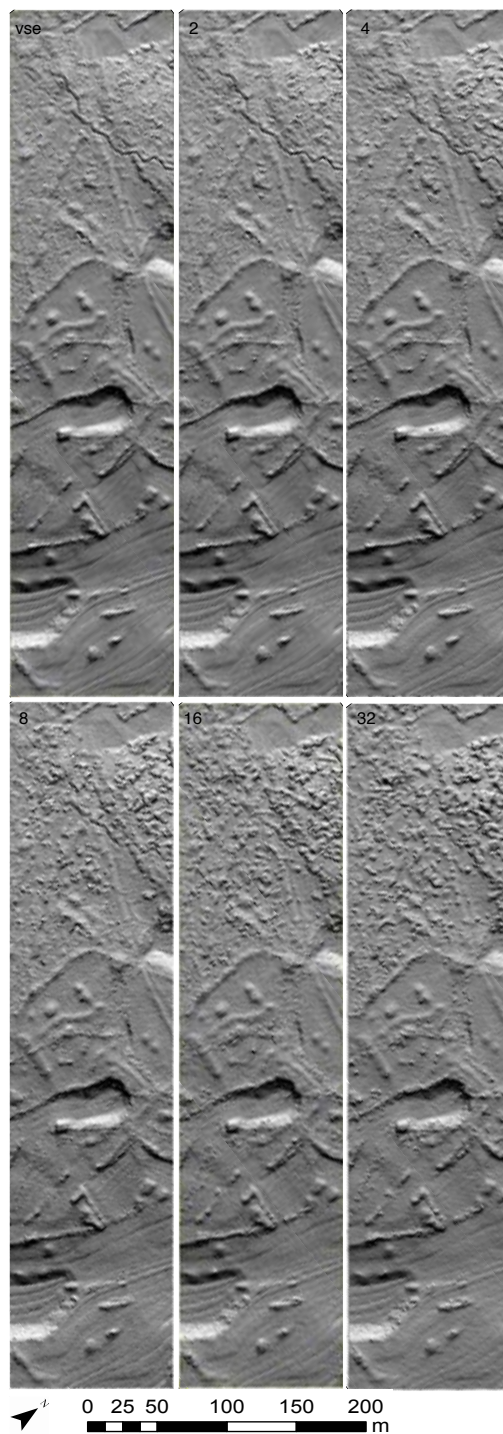
Z redčenjem točk gostota pulzov upada s faktorjem redčenja in doseže gostoto  $0,5/m^2$  (1 točka/ $2\ m^2$ ) pri faktorju redčenja 32. Distribucija gostote pulzov pri redčenju kaže na uniformno manjšanje števila točk po celotni površini; večja gostota, ki je rezultat prekrivanja pasov, postane čedalje manj izrazita.

Za vsak faktor redčenja smo v z modulom *lasground* klasificirali oblak točk v točke tal in ostale (uporabili smo parameter *-fine* in korak 2 m). Distribucija gostote talnih točk kaže na velik vpliv vegetacije. Na območjih goste vegetacije (severni rob) je potemtakem že brez redčenja veliko celic brez talnih točk, kar postane z redčenjem še bolj očitno. Talne točke smo interpolirali v digitalni model reliefa resolucije 0,5 m (uporabili smo modul *las2dem* iz paketa LAStools). Digitalne modele reliefa smo senčili. Rezultat je prikazan na sliki 12.

Primerjavo med nizi redčenih podatkov prikazuje slika 12. Tako kot pri študijskem območju Volarije je očitno, da se z redčenjem gostote pulzov hitro poslabšuje klasifikacija talnih točk, predvsem na zaplatah goste vegetacije. Že v polovično redčenem podatkovnem nizu (2) je opazno kar nekaj nepravilno klasificiranih točk, ko algoritem točke podrasti zamenjuje za tla. To pa postane še očitneje z nadaljnjim redčenjem. Pri faktorju redčenja 32 so napačno klasificirane točke povsod tam, kjer študijsko območje prekriva vegetacija.

Zmanjševanje vidnosti detajlov arheoloških značilnosti je opazno že pri faktorju redčenja 2. Robovi linearnih nasipov v gozdu so manj izraziti, nekatere pozitivne okrogle značilnosti so težje prepoznavne. Pri faktorju redčenja 4 lahko opazamo mnogo manj detajlov v strelskem jarku; na območju z gosto vegetacijo napačno klasificirane točke tal zakrivajo vse površinske detajle. Pri faktorju redčenja 8 jarek že težko prepoznamo, nizke linearne strukture v gozdu so komaj opazne. Pri faktorju redčenja 16 pa skoraj izginejo. Jarka ob faktorju redčenja 32 ne prepoznamo več, prepoznavne so le še strukture na odprtem. Detajlov je tudi na odprtem manj; v gozdu ni moč prepoznati ničesar več.

Manjšanje gostote snemanja povzroči predvsem zelo hitro izgubo talnih točk na območjih z gosto vegetacijo. To je tudi posledica napačne klasifikacije točk, saj algoritem točke v podrasti klasificira kot talne točke, kar v končni fazi povzroči izgubo detajlov reliefa (tal). Ob gostoti 5 pulzov/ $m^2$ , ki je teoretično dovolj za izdelavo DMR z lo-



Slika 12. Študijsko območje Goriče: Analitično senčen digitalni model reliefa za različno redčene oblake točk.

Figure 12. Goriče study area: comparison of analytical hillshade models derived from simulated lower point densities.



Slika 13. Študijsko območje Kaselak: digitalni ortofoto, gostota vegetacije, analitično senčen DMR in prepoznane značilnosti.

Figure 13. Kaselak study area: digital ortho-photo, vegetation density, analytical hillshade model and identified features.

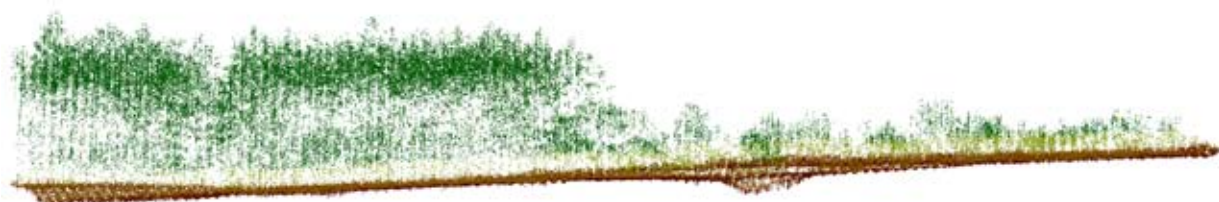
čljivostjo 0,5 na odprtih površinah, na območjih z gosto vegetacijo talnih skorajda ni več. Tako izgublamo ne le detajle, temveč tudi oblike značilnosti. Na primeru Goriče je že na prostoru z gosto vegetacijo originalna gostota snemanja prenizka, da bi lahko zagotovili kontinuirano pokritost s talnimi točkami. Lahko rečemo, da je za uspešno prepoznavanje arheoloških značilnosti pogojno zadostuje povprečna gostota 9 pulzov/m<sup>2</sup>, kljub temu pa na območjih z gosto vegetacijo potrebujemo višjo gostoto pulzov.

### Študijski primer 3: Kaselak

Območje Kaselaka na pobočju Vremščice smo izbrali, da preverimo rezultate snemanja v zelo gosti vegetaciji. Območje porašča sklenjen, zelo gost borov gozd; indeks gostote vegetacije presega vrednost 90 in dosega maksimalno gostoto. Na vzhodni strani strnjeno poraščenega območja je manjša vrtača v zaraščanju, na kateri raste gosta podrast.

Gostota talnih točk kaže, da ja na vsej poraščeni površini gostota manjša od 4-ih točk/m<sup>2</sup>, ponekod celo manj od 1 točke/m<sup>2</sup>. Vizualni pregled digitalnega modela reliefa pokaže, da je mnogo točk napačno klasificiranih. Groba tekstura znotraj ograde je rezultat napačno klasificiranih točk, saj je algoritem točke podrasti klasificiral kot tla (slika 14). Gostota talnih točk je tako previsoka. Posledično je napačen tudi indeks gostote vegetacije. Groba tekstura tal znotraj gosto poraščenega območja sugerira, da je tudi tu precej napačno klasificiranih točk.

Na digitalnem modelu reliefa smo prepoznali nekaj značilnosti, gre predvsem za negativne linearne značilnosti, ki potekajo v smeri vzhod–zahod in jih lahko interpreti-



Slika 14. Presek čez oblak točk študijskega območja Kaselak. Položaj preseka je na sliki 13.

Figure 14. Point cloud cross-section of the Kaselak study area. The position of the cross-section is marked on figure 13.

ramo kot poti. Prepoznali smo tudi suhi zid okoli vrtače na severozahodu in apnenico v vrtači na skrajnem severnem robu. Na južnem robu pa lahko prepoznamo nasipe vezane na prazgodovinsko zemljiško razdelitev.

Očitno je, da so značilnosti znotraj gosto poraščene območja mnogo slabše vidne kot tiste, ki so zunaj območja. Poti znotraj gozda težko sledimo, značilnost niso ostre. Snop poti na odprti površini vzhodno od gozda pa sugerira, da je poti v gozdu najbrž več, le da jih ne moremo prepoznati. Prav tako ne moremo prepoznati suhega zidu, ki obdaja vrtačo poraslo s podrastjo, čeprav je zid na aerofotografiji viden. Groba tekstura sugerira, da mnoge manjše značilnosti morda sploh niso vidne.

Študijski primer Kaselaka kaže, da v pogojih zelo goste vegetacije, predvsem ko gre za gosto podrast in iglaste gozdove, tudi relativno visoka gostota pulzov (18 pulzov/m<sup>2</sup>) ne zadostuje, da bi dobili dovolj talnih točk za digitalni model reliefa, na katerem bi lahko prepoznali arheološke značilnosti. Ta primer še enkrat ilustrira, da je visoka gostota snemanja je pomembna predvsem za zagotavljanje zadostnega števila talnih točk v gosti vegetaciji. Uspešnost klasificiranja talnih točk bi sicer lahko povečali z uporabo lidarskega sistema, ki dokumentira polno valovne obliko (prim. Doneus et al. 2008), vendar pa programska oprema za polno izkoriščanje potenciala polne valovne oblike še ni širše dostopna.

### *Zaključek in sklepi*

V Sloveniji se je lidarsko snemanje najprej uporabilo za izmero tras elektrovodov (Bilc 2002), kasneje pa se je hitro razmahnilo na hidrološke študije (Gosar et. al 2007), gozdarstvo (Kobler, Zafran 2006), prostorsko načrtovanje (Kolega et al. 2008; Barborič et al. 2008; Triglav Čekada 2009; Triglav Čekada 2010) in druge prostorske študije (Podobnikar et al. 2010; Janža et al. 2009), že zelo zgodaj pa tudi v arheologijo (Mlekuž et al. 2006). V zadnjem času pa se njegova uporaba širi tudi v manjša, a natančnejša merila za potrebe nepremičninskih evidenc in modeliranje stavb (Triglav Čekada et al. 2010; Zalokar 2010; Triglav Čekada 2010b). Redko pa je zaslediti podatke o potrebni gostoti snemanja za specifične potrebe. M. Triglav Čekada s sodelavci (2010) je ugotavljala optimalne gostote lidarskega snemanja za zajem topografskih podatkov. Empirično so ugotovili, da je za karte v merilu 1:5000 potrebna med 12 in 20 točk/m<sup>2</sup>, za topografske

karte 1:10000 pa med 3 in 5 točk/m<sup>2</sup>. V Sloveniji torej obstaja precejšnje število lidarskih snemanj z različnimi namembnostmi in gostotami snemanj. Kljub temu da so med naročniki snemanj večinoma javne ustanove, pa bi zaman iskali evidenco s podatki o obsegu in kvaliteti snemanj. Uporaba starih snemanj bi bila, kljub različnim parametrom snemanj, smotrna in bi v kombinaciji z novimi omogočila (najmanj) spremljanje sprememb v prostoru (v primeru arheologije npr. nedovoljene posege v arheološka najdišča), čeprav kvaliteta oz. gostota zajema narašča in so se snemanja v zadnjih letih povsem približala gostoti snemanja potrebni za arheološko interpretacijo. Niso se pa vedno izvajala tudi v primernem času snemanja (pozna zima), nekatera snemanja z načeloma dovolj veliko gostoto so tako na pogozdenem območju za arheološko interpretacijo popolnoma neuporabna (glej Mlekuž 2011).

Na kakovost lidarskih podatkov poleg intenzivnosti snemanja vplivajo tudi drugi parametri, kot je kot snemanja, višina leta, smer leta, prekrivanje pasov in drugo. Za končno uspešno uporabo lidarskih snemanj pri arheoloških prospekcijah vpliva več dejavnikov. Poleg gostote (in vrste snemanja) snemanja tudi vsi koraki nadaljnje obdelave; klasifikacija talnih točk, način interpolacije (glej tudi Podobnikar 2012) ter nenazadnje arheološka interpretacija, rezultati katere so odvisni od znanja in zmožnosti interpretatorja pri prepoznavanju arheoloških sledi, njegovega poznavanja prostora in njegovih posebnosti (poznavanje geoloških posebnosti, sledov agrarne oz. gospodarske rabe prostora v preteklosti in danes). V pričujoči raziskavi smo se osredotočili zgolj na en sam parameter, gostoto snemanja, ki ga izražamo v povprečni gostoti pulzov. Ta parameter je veliko lažje pretvoriti v parametre snemanja kot gostoto točk. Gostota točk je zavajajoč in slabo opredeljen termin, saj je pri tem potrebno natančno specificirati ali gre za gostoto vseh točk, gostoto pulzov ali gostoto talnih točk. Ključen parameter za prepoznavanje arheoloških sledov je gostota talnih točk, ki je funkcija gostote snemanja in gostote vegetacije ter seveda kvalitete klasifikacijskega algoritma in parametrov. Poleg povečanja gostote pulzov lahko število talnih točk, s tem pa vidnost arheoloških sledov, najlažje zagotovimo, če snemamo v idealnih pogojih, brez listnega pokrova ter po snegu, ki stisne podrast in odpadlo listje. Gostota snemanja je posebno pomembna na prostorih z gosto vegetacijo. Na odprtih površinah, kot so denimo travniki, za izdelavo digitalnega modela reliefa (DMR)



ločljivosti 0,5 potrebujemo gostoto vsaj 4 pulze/m<sup>2</sup>, za izdelavo DMR z ločljivostjo 1 m pa vsaj 1 pulz/m<sup>2</sup>. Na območjih z gosto vegetacijo, ko je denomo gozd, podrast in podobno, pa je potrebna višja gostota pulzov. Višja gostota pulzov pomeni višjo verjetnost, da žarek doseže tla. Dovolj velika gostota odbojev od tal pa pomaga klasifikacijskemu algoritmu razločiti talne točke od ostalih. Na podlagi tega postane jasno, da je velika gostota snemanja namenjena predvsem pridobivanju talnih točk na območjih z gosto vegetacijo, in ne izdelavi zelo natančnih DMR na območjih brez nje. Na celotnem študijskem območju je delež talnih točk okoli polovica vseh pulzov; na študijskem območju Volarija okoli 60 % in na študijskem območju Goriče okoli 65 %. Na študijskem območju Kaselak je gostota talnih točk prenizka za izdelavo digitalnega modela reliefa z ločljivostjo 0,5 m. Veliko točk je zaradi goste vegetacije napačno klasificiranih, saj so točke podrasti razvrščene med talne točke. Tako že originalna gostota snemanja z gostoto 18 pulzov/m<sup>2</sup> ne zagotavlja kontinuirane pokritosti s talnimi točkami.

Arheološke prospekcije so specifične, saj običajno zahtevamo večjo ločljivost. Tako predlagamo, da je ob idealnih pogojih snemanja (pozna zima, odprte površine, listnat gozd) minimalna gostota vzorčenja za potrebe arheološke interpretacije vsaj 10 pulzov/m<sup>2</sup>. V praksi pa mora biti na prostorih z gosto vegetacijo, iglavci ali gosto podrastjo gostota snemanja še višja, enaka ali višja originalni gostoti snemanja, torej več ali enaka od 20 pulzov/m<sup>2</sup>. Ta predlog izvira iz dejstva o poraščenosti ozemlja Slovenije in dejstva, da večina snemanj, vsaj v delu, zajema tudi poraščene površine, kjer so tudi arheološki sledovi na površini najbolj vidni.

## *How many points? Lidar point density in archaeological prospections*

### *(Summary)*

The article tackles optimal parameters for airborne lidar prospections in Slovenia to be used in archaeological interpretation. The study analyses a 40 km<sup>2</sup> large area in the Slovenian Karst, between Divača, Gornje Vreme, Rodik and Vremščica, and simulates lower pulse densities on two small-scale case studies aimed at determining the role of the point density on the visibility and interpretation of archaeological features. The study area shows a very diverse landscape situated in the contact zone between carbonate limestone (Karst) and eocene flysch (Brkini). Lidar point density is a poorly defined concept and a source of confusion; it can mean at least three different things. Pulse or shot density is the number of laser pulses per unit area. It is influenced only by the frequency and geometry of a survey. Point density measures the number of all points in a point cloud in the area unit. Besides geometry and frequency of measurement, point density is influenced by vegetation, as each pulse produces several points when it interacts with vegetation. On the other hand, ground point density is the number of points, classified as ground, per unit area. It is equal or lower than pulse density and depends on vegetation density as well as the choice of classification algorithm and parameters. The airborne lidar survey was conducted in December 2012. Ground conditions were optimal, with no low leaf cover or a blanket of compressed dry leaves. The obtained average point density is 31.8 points/m<sup>2</sup> and the average distance between points is 0.18m. The pulse density is 18.2 points/m<sup>2</sup> with 0.24m of average horizontal distance between points. The ground point density is much lower, 6.1 points/m<sup>2</sup> with 0.4m spacing between ground points. The first study area, of the Volarija hillfort near Škocjan, measures 0.08km<sup>2</sup>. Besides the stone hillfort rampart, the survey also identified linear boundary earthworks, stone enclosures and WWI trenches. The area is covered with forest and shrubbery. The second study area is 0.07km<sup>2</sup> large and lies in the area of the V Snožetih archaeological site near Goriče. The landscape here is mostly abandoned pasture and meadowland, with patches of coniferous forest and shrubs located at field edges. We identified earthworks that can be interpreted as a part of an irregular prehistoric land division, as well as WWI trenches.

A simulated reduction of density causes a rapid loss of ground points in the densely forested areas. This leads to an erroneous classification of undergrowth as ground points and a reduction of detail. With the simulated den-

sity of 5 pulses/m<sup>2</sup>, which is theoretically high enough for the interpolation of a 0.5m resolution DMR in open areas, archaeological features in the forest can no longer be discerned. In some cases, the original density is too low to grant sufficient penetration through vegetation and thus an evenly distributed coverage with ground points. The third study area, Kaselak, on the slopes of Vremščica, is covered with a dense pine forest and shrubs in abandoned pastureland. Here, even the original density (18 pulses/m<sup>2</sup>) is not enough to produce a useful digital elevation model for archaeological interpolation.

High point density plays an important role in the classification of the ground points under the vegetation. We suggest that, in the optimal survey conditions (late winter, open surfaces or deciduous open forest), minimal pulse density should be at least 10 pulses/m<sup>2</sup>. In the case of Slovenia, however, which is heavily forested and where all surveys include at least some areas of dense vegetation, the point density should be higher, i.e. at least 20 pulses/m<sup>2</sup>.

## Literatura

- BARBORIČ, B., M. TRIGLAV ČEKADA, S. BERK, M. KOSMATIN FRAS 2008, Metodologija za izboljšavo in harmonizacijo geodetskih podlag za potrebe čezmejnega prostorskega načrtovanja. – *GIS v Sloveniji 2007–2008*, 273–286.
- BILC, A. 2002, Ali dobiva klasična fotogrametrija konkurenco? Poročilo o prvem projektu LIDAR v Sloveniji. – *Geodetski vestnik* 46(4), 404–410.
- CEGNAR, T. 2012, Podnebne spremembe v decembru 2012. – *Naše okolje, bilten agencije RS za okolje* 12, 3–23.
- CHALLIS, K., C. CAREY, M. KINCEY, A. J. HOWARD 2011, Airborne lidar Intensity and geoarchaeological prospection in river valley floors. – *Archaeological Prospection* 18, 1–13.
- DEVEREUX, B. J., G. S. AMABLE, P. CROW 2008, Visualisation of LiDAR terrain models for archaeological feature detection. – *Antiquity* 82(316), 470–9.
- DONEUS, M., C. BRIESE, M. FERA, M. JANNER 2008, Archaeological prospection of forested areas using full-waveform airborne laser scanning. – *Journal of Archaeological science* 35, 882–893.
- GAMS, I. 2001. Pojem in oblike kontaktnega krasa. – *Acta carsologica* 30/2, 33–64.
- GOSAR, L., G. RAK, F. STEINMAN, P. BANOVEC 2007, Z LIDAR tehnologijo zajeta topografija v hidravličnih analizah vodotokov. – *Gradbeniški vestnik* 56, 115–123.
- ISENBURG, M. 2013, LAStools – efficient tools for LiDAR processing, version 111216; <http://www.lastools.com>
- JANŽA, M., M. KOMAC, A. KOBLER, D. STOJANOVA, K. OŠTIR, A. MARSETIČ, S. DŽEROSKI, A. GOSAR 2009, Metodologija ocene višine in gostote vegetacijskega pokrova z daljinsko zaznanimi podatki in možnosti njene uporabe v geologiji. – *Geološki zbornik* 20, 58–61.
- KOKALJ, Ž., K. ZAKŠEK, K. OŠTIR 2012, Visualizations of lidar derived relief models. – V/In: R. S. Opitz, D. C. Cowley (ur./ed.), *Interpreting Archaeological Topography: Lasers, 3D Data, Observation, Visualisation and Applications*, Oxford, 102–116.
- KOLEGA, N., A. ŽERJAL, B. KRAPEŽ, P. SLAVEC 2008, Uporaba lidarskih podatkov za občinsko prostorsko načrtovanje in upravljanje. – *GIS v Sloveniji 2007–2008*, 267–271.
- KRANJC, A., V. LIKAR, M. ŽALIK HUZZAN (ur./eds.) 1999, *Kras: pokrajina – življenje – ljudje*. Ljubljana.
- MARCHESETTI, C. 1903, *I castellieri preistorici di Trieste e della regione Giulia*. Trieste.
- McOMISH, D. 2011, Field systems. Introduction to heritage assets, English heritage; <http://www.english-heritage.org.uk/publications/iha-field-systems/>
- MENSURAS 2012, *Podatki laserskega snemanja Divača–Gornje Vreme. Mensuras d. o. o.* – Murska Sobota.
- MENG, X., N. CURRIT, K. ZHAO 2010, Ground Filtering Algorithms for Airborne LiDAR Data. A Review of Critical Issues. – *Remote sensing* 2(3), 833–860.
- MLEKUŽ, D., M. BUDJA, N. OGRINC 2006, Complex landscape and settlement dynamics of the Iščica floodplain (Ljubljana Marshes, Slovenia). – *Documenta Praehistorica* 33, 253–271.
- MLEKUŽ, D. 2009, Poplavne ravnice v novi luči: LiDAR in tafonomija aluvialnih krajin. – *Arheo* 26, 7–22.
- MLEKUŽ, D. 2011, Arheološka interpretacija lidar posnetkov, metoda 4. – V/In: G. Rutar, I. Klokočovnik, D. Mlekuž, B. Nadbath, M. Bricelj, M. Jereb, Š. Karo, N. Veršnik, *Ocena arheološkega potenciala območja DPN za vodnogospodarsko ureditev reke Dravinje od Stogovcev do Koritnega, metode 1-6*. ZVKDS, CPA, Ljubljana (neobjavljeno).
- MLEKUŽ, D. 2012, Messy landscapes: lidar and practices of landscaping. – V/In: R. S. Opitz, D. C. Cowley (ur./ed.), *Interpreting Archaeological Topography: Lasers, 3D Data, Observation, Visualisation and Applications*, Oxford, 102–116.
- OPITZ, R. 2012, An overview of airborne and terrestrial laser scanning in archaeology. – V/In: R. S. Opitz, D.

C. Cowley (ur./eds.), *Interpreting Archaeological Topography: Lasers, 3D Data, Observation, Visualisation and Applications*, Oxford, 13–31.

OPTIECH 2008, Gemini. Tehnična specifikacija: [www.optech.ca/pdf/Brochures/ALTM-GEMINI.pdf](http://www.optech.ca/pdf/Brochures/ALTM-GEMINI.pdf)

OSWALD, A. 2011. Prehistoric Linear Boundary Earthworks. Introduction to heritage assets, English heritage; <http://www.english-heritage.org.uk/publications/iha-prehist-linear-boundary-earthworks/>

PODOBNIKAR, T., B. SZÉKELY, M. HOLLAUS, A. RONCAT, P. DORNINGER, C. BRIESE, T. MELZER, C. PATHE, B. HÖFLE, N. PFEIFER 2010, Vsestranska uporaba aero-laserskega skeniranja za ugotavljanje nevarnosti zaradi naravnih nesreč na območju Alp. – V/ In: M. Zorn, B. Komac, M. Pavšek, P. Pagon (ur./eds.), *Od razumevanja do upravljanja, Naravne nesreče 1*, 125–137.

PODOBNIKAR, T. 2012. Multidirectional visibility index for analytical shading enhancement. – *Cartographic Journal* 49(3), 195–207.

SAMBERG, A. 2007, An Implementation of the ASPRS LAS Standard. – *The Analyst* XXXVI, 363–72; [http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3W52/final\\_papers/Samberg\\_2007.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3W52/final_papers/Samberg_2007.pdf)

TRIGLAV ČEKADA, M. 2009, Optimizacija metodologije obdelave in analiza natančnosti letalskega laserskega skeniranja pri zajemu geodetskih podatkov za lokalno prostorsko planiranje. Doktorska disertacija, Fa-

kulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani (neobjavljeno).

TRIGLAV ČEKADA, M., F. CROSILLA, M. KOSMATIN FRAS 2010, Teoretična gostota lidarskih točk za topografsko kartiranje v največjih merilih. – *Geodetski vestnik* 54(3), 403–416.

TRIGLAV ČEKADA, M. 2010b, Zračno lasersko skeniranje in nepremičninske evidence. – *Geodetski vestnik* 54(2), 181–194.

TRIGLAV ČEKADA, M., V. BRIC, K. OVEN 2012, Prvo vsedržavno lasersko skeniranje Slovenije. – *GIS v Sloveniji 2011–2012*, 191–196.

TURK, P. K. HROBAT 1999, Arheološka najdišča regijskega parka Škocjanske jame. – Poročilo, Oddelek za arheologijo, Filozofska fakulteta, Univerza v Ljubljani (neobjavljeno).

ZALOKAR, M. 2010, Trirazsežno modeliranje zgradb iz lidarskih podatkov na primeru mesta Domžale. Diplomaska naloga Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani (neobjavljeno).

### *Spletni vir*

Splet 1/Web 1: [http://www.gu.gov.si/fileadmin/gu.gov.si/pageuploads/novice/Teksti\\_novic/LIDAR\\_opis.pdf](http://www.gu.gov.si/fileadmin/gu.gov.si/pageuploads/novice/Teksti_novic/LIDAR_opis.pdf) (dostop 7. 1. 2014).