

# ZAGOTAVLJANJE KAKOVOSTI GEOREFERENCIRANJA PODATKOV AEROLASERSKEGA SKENIRANJA ZA UPRAVLJANJE VODA

QUALITY ASSURANCE OF GEOREFERENCING AIRBORNE LASER SCANNING DATA  
FOR WATER RESOURCE MANAGEMENT

*Vasja Bric, Sandi Berk, Mihaela Triglav Čekada*

UDK: 528.8:628.179.000.34(497.4)

## IZVLEČEK

*V prispevku je obravnavana problematika zagotavljanja kakovosti podatkov aerolaserskega skeniranja. Predstavljeni so delni rezultati projekta, imenovanega »Lasersko skeniranje in aerofotografiranje Slovenije 2011«. Opisani so postopki nadzora kakovosti rezultatov s poudarkom na georeferenciranju, ki bi ustrezalo merilom za njihovo uporabo pri upravljanju voda. Izpostavljeni so dejavniki, ki vplivajo na kakovost podatkov. Dosežena kakovost neposrednega georeferenciranja je ocenjena na podlagi izkušenj, pridobljenih pri nadzoru kakovosti rezultatov projekta. Obravnavana je tudi kakovost transformacij v državni ravninski in višinski referenčni sistem. Podana so priporočila za naknadno izboljšanje kakovosti podatkov, ki bo mogoče z vzpostavitvijo novega državnega višinskega referenčnega sistema in novega modela geoida.*

## KLJUČNE BESEDE

*georeferenciranje, kakovost podatkov, upravljanje voda, lidar, aerolasersko skeniranje*

Klasifikacija prispevka po COBISS-u: 1.02

## ABSTRACT

*This paper deals with the problems of quality assurance for airborne laser-scanning data. Partial results of the project entitled 'Laser Scanning and Aerial Photographing of Slovenia 2011' are presented, and the quality control procedure is described. The focus is on the quality assurance of the geo-referencing used for water resource management. Important issues with an impact on the quality of data are addressed and evaluated. The quality of direct geo-referencing was investigated, and some experiences gained in the quality control of the project results are presented. The quality of the transformation of data into the national horizontal and height reference systems is also discussed. Some recommendations for the quality improvement of airborne laser-scanning data are given. This will be possible with the realisation of the new national height reference system and with the creation of the new geoid model.*

## KEY WORDS

*airborne laser scanning, data quality, georeferencing, LiDAR, water resource management*

## 1 UVOD

Aerolasersko skeniranje (v nadaljevanju: ALS), v tuji literaturi imenovano airborne laser scanning (ALS) oziroma aero lidar, je metoda daljinskega zaznavanja, ki je v dobrih dveh desetletjih, kolikor so na trgu komercialni sistemi, postala najtočnejša metoda daljinskega zajema podatkov o zemeljskem površju (Liu, 2008). Aerolasersko skeniranje je vedno bolj uveljavljen način za zajem podatkov za tvorbo kakovostnega digitalnega modela višin (v nadaljevanju: DMV), ki je primeren tudi za najzahtevnejše uporabnike.

Kakovost DMV, ki ga lahko delimo na digitalni model reliefa (v nadaljevanju: DMR) in digitalni model površja (v nadaljevanju: DMP), je še posebej pomembna pri upravljanju voda. Za

upravljanje voda se izvajajo natančne študije zemeljskega površja, ki vključujejo tudi hidravlično modeliranje in izdelavo kart poplavne nevarnosti (Gosar in sod., 2007; Šantl in Rak, 2010). Kakovosten DMR, ki ga zagotavlja aerolasersko skeniranje, omogoča natančno določitev reliefnih in hidroloških danosti, kot so odvodnice, razvodnice, padnice, prelomnice, plastnice, karakteristične točke terena, nagibi ipd. Zahteva po kakovostnem DMR je posebej poudarjena za območja izrazite reliefne razgibanosti. Kakovosten DMP pa omogoča izločanje stavb in vegetacijskega pokrova.

Uporabnost DMV za hidrološke študije je odvisna predvsem od (Kenward in sod., 2000):

- stopnje podrobnosti modela (ločljivosti), torej velikosti celice mreže, ter
- dosežene točnosti koordinat in višin zajetih točk.

DMP se nanaša na ploskev, ki jo določajo strehe stavb, krošnje dreves in druge vrste vegetacije, torej vse, od česar se najprej odbije laserski žarek. Za hidrološke študije je uporaben predvsem DMR, torej model gola terena (angl. bare earth) brez vegetacije in zgrajenih objektov. Surovi podatki ALS vključujejo horizontalni koordinati in višino terenske točke, od katere se je odbil laserski žarek, zaporedno številko odboja (za isti žarek lahko senzor zazna več odbojev), jakost odboja in druge podatke v odvisnosti od zahtevanega formata. Te dodatne informacije se uporabljajo za ugotavljanje vrste odboja in torej klasifikacijo zajetih točk. Za tvorbo DMR je zelo pomembna pravilna klasifikacija točk – uporabne so zgolj točke na tleh. Kakovost DMR je tako odvisna predvsem od kakovosti georeferenciranja točk ALS, njihove klasifikacije (filtriranja) in od kakovosti interpolacije (Liu, 2008; Mongus in Žalik, 2012; Podobnikar in Vrečko, 2012).

V nadaljevanju bo podrobneje obravnavana predvsem problematika georeferenciranja podatkov ALS. Pri uporabi DMR za hidrološke študije moramo biti posebej pozorni na višinsko sestavo prostorskega referenčnega sistema. V idealnem višinskem referenčnem sistemu bi bilo zagotovljeno, da:

- predstavljajo točke z višino 0 ploskev srednjega nivoja morja, podaljšano pod kontinent (tj. ploskev geoida), in
- so točke z isto višino na ploskvi z enakim težnostnim potencialom – v takšnem sistemu voda vedno steče navzdol.

To je torej fizikalno opredeljen sistem nadmorskih višin. Podatki ALS so rezultat neposrednega georeferenciranja, ki temelji na GNSS-meritvah položaja in INS-meritvah nagibov nosilca senzorjev v času zajemanja podatkov. Dobljene višine so zato geometrijsko določene in se nanašajo na referenčno ploskev, ki je rotacijski elipsoid (Triglav Čekada, 2010). Pri uporabi laserskih podatkov za hidrološke študije moramo biti zato posebej pozorni na transformacijo podatkov ALS, ki vključuje tako horizontalno kot višinsko sestavino. V prispevku so predstavljene izkušnje, pridobljene v okviru projekta »Lasersko skeniranje in aerofotografiranje 2011« (v nadaljevanju: LSA 2011) – prvega vsedržavnega laserskega skeniranja Slovenije (Triglav Čekada in sod., 2012). Poudarek je na postopkih obdelave in zagotavljanju kakovosti georeferenciranja podatkov ALS.

## 2 GEOREFERENCIRANJE PODATKOV ALS

Postopke georeferenciranja podatkov ALS lahko razdelimo na:

- neposredno georeferenciranje zajetih točk ALS (združenega GNSS/INS/LiDAR-merilnega sistema),
- naknadne medsebojne korekcije pasov in absolutne korekcije zajetega oblaka točk ALS,
- preračun elipsoidnih v nadmorske višine ter
- datumsko transformacijo ravninskih koordinat točk ALS.

Na točnost neposrednega georeferenciranja zajetih točk ALS vplivajo trije osnovni nizi napak:

- napake samega skenerja oziroma napake določitve razdalje med skenerjem in točko na zemeljski površini (Huising in Gomes Pereira, 1998),
- napake, ki so posledica spreminjanja geometrije skeniranja oziroma spreminjanja vpadnega kota žarka na podlago (Schaer in sod., 2007), in
- napake določanja položaja in nagibov skenerja med skeniranjem (Skaloud in Lichti, 2006; Legat in sod., 2006).

Nekatere vplive teh napak je mogoče zmanjšati z naknadnimi obdelavami, ki vključujejo usklajevanje pasov na podlagi ujemanja na območjih prekrivanja pasov ter izboljšanje absolutne orientacije oblaka točk z uporabo izmerjenih točk na terenu (Ressl in sod., 2008). Med naknadnimi obdelavami izvornih podatkov laserskega skeniranja je mogoče uporabiti tudi kontrolne točke in prečne pasove (Csanyi in Toth, 2007), ki še izboljšajo položajno točnost rezultatov ALS.

Povprečen naročnik laserskega skeniranja lahko izbira med različnimi ponudniki, običajno pa težko vpliva na izbiro opreme za izvedbo laserskega skeniranja, niti ne more nadzirati izvajalca po posameznih fazah, ker za to nima niti ustrezne opreme niti znanja. Rezultati ALS vključujejo širok nabor elementov, od surovih podatkov (GNSS- in INS-opazovanja ter razdalje za posamezne točke odboja), prek georeferenciranih originalnih pasov ALS do klasificiranega oblaka točk in DMR in DMP. Za obdelavo surovih podatkov se zahteva posebna programska oprema, medtem ko je mogoče georeferencirane pasove, ki se medsebojno prekrivajo, kontrolirati že z običajno opremo za obdelavo podatkov ALS (Kager, 2004).

Pri uporabi podatkov ALS za hidrološke študije je poleg točnosti zajema točk ALS (v homogenem, geometrijsko definiranem prostorskem referenčnem sistemu) enako pomembna tudi naknadna obdelava podatkov oziroma prehoda v:

- fizikalno definiran in zastarel državni višinski sistem ter
- na klasični tehnologiji izmere temelječ in zato nehomogen državni ravninski sistem – velika večina preostalih prostorskih podatkov je namreč še vedno na voljo v starem sistemu (D48/GK).

Izkaže se, da je kakovost končnih izdelkov ALS za namen hidroloških študij bolj kot od točnosti neposrednega zajema odvisna od kakovosti obstoječega državnega prostorskega referenčnega sistema oziroma od dosegljive natančnosti transformacij v državni horizontalni in še posebej

višinski referenčni sistem. To pa ni odvisno od kakovosti zajema točk ALS. Rezultat neposrednega georeferenciranja in naknadnih korekcij pasov ter absolutnih korekcij zajetega oblaka točk ALS so elipsoidne višine v kakovostnem terestričnem referenčnem sistemu – v Sloveniji je to realizacija ETRS89.

## 2.1 Določitev višin točk ALS (elipsoidne → nadmorske)

Referenčna ploskev za višine točk ALS je ploskev rotacijskega elipsoida GRS80. Elipsoidna višina točke na zemeljskem površju je njena oddaljenost od referenčnega elipsoida, merjena po normali nanj. Količina je torej geometrijsko določena. Za transformacijo v nadmorske višine je bil za podatke LSA 2011 uporabljen absolutni model geoida iz leta 2000 – v nadaljevanju AMG 2000 (Pribičević, 2000).

V Sloveniji se sedaj uporablja sistem normalnih ortometričnih višin, pri katerem (Koler in sod., 2007):

- ni geometrične razlage višin,
- določitev višin ni neodvisna od poti niveliranja,
- točke z isto višino ne ležijo na ploskvi z enakim težnostnim potencialom ter
- ničelna nivojska ploskev nima fizikalne podlage in se ne ujema s srednjim nivojem morja.

Takšen sistem je posledica tehnoloških omejitev v času, ko je bil vzpostavljen. Problematiko sedanjega višinskega sistema lahko razdelimo na:

- določitev višinskega geodetskega datuma,
- opredelitev višinskega sistema (tj. izbor tipa višin) in
- sólo realizacijo višinskega sistema.

Višinski geodetski datum Slovenije temelji na enoletnih mareografskih opazovanjih, ki so bila v letu 1875 izvedena na pomolu Sartorio v Trstu, zato ga imenujemo tudi datum Trst. Napaka zaradi prekratkega časa opazovanj naj bi po rezultatih raziskav različnih avtorjev znašala od 10 do 20 centimetrov (Koler in sod., 2007). Kakovostna določitev višinskega geodetskega datuma je pomembna predvsem za hidrološke študije v priobalnem pasu ter pri čezmejnih študijah, kjer se kaže neuskkljenost s podatki sosednjih držav. Zastareli sistem normalnih ortometričnih višin je kompromis, saj se za izračun popravkov merjenih višinskih razlik namesto zahtevnih meritev težnostnega pospeška uporabljajo izračunane vrednosti – tako imenovani normalni težnostni pospešek. Ta sistem je bil realiziran z nivelmanskimi mrežami I. NVN (po drugi svetovni vojni), II. NVN (v začetku sedemdesetih let) in mrežo I. reda (po letu 1989). Glede na ocenjene hitrosti vertikalnih premikov na območju Slovenije (geodinamika) lahko razlike višin točk zgolj zaradi časovne raznovrstnosti opazovanj na nekaterih območjih znašajo tudi do 10 centimetrov (Koler in sod., 2007).

Takšno je torej stanje višinskega sistema v Sloveniji. Še večja težava kot (ne)kakovost obstoječega višinskega sistema pa je transformacija podatkov ALS vanj. Za prehod iz elipsoidnih v nadmorske višine namreč potrebujemo kakovosten model geoida. Sedaj se uporablja AMG 2000. Izračunana ploskev je bila vpeta na 163 GNSS/nivelmanskih točk, ki so dokaj enakomerno razporejene po

celotnem ozemlju Slovenije, vendar so bile njihove višine večinoma določene s trigonometričnim višinomerstvom, ki po kakovosti ne dosega geometričnega nivelmana (Koler in sod., 2012). Poleg kakovosti določitve ploskve geoida je bilo torej pomanjkljivo tudi njeno vpetje. Nekaj k odstopanjem prispeva še datum GPS-koordinat uporabljenih točk, saj je bil novi terestrični geodetski datum D96 določen šele leta 2003. Za izračun AMG 2000 so bile uporabljene koordinate iz predhodnih izračunov, vendar so razlike po višini relativno majhne – manj kot dva centimetra (Berk in sod., 2004). Po zadnji raziskavi, ki temelji na 352 GNSS/nivelmanskih točkah, je natančnost transformacije, ki jo zagotavlja AMG 2000, približno osem centimetrov (standardni odklon), največja absolutna odstopanja pa dosežejo skoraj 30 centimetrov (Kuhar in sod., 2011).

## 2.2 Določitev koordinat točk ALS (D96/TM → D48/GK)

Koordinate točk ALS, ki so rezultat neposrednega georeferenciranja, so transverzalne Mercatorjeve koordinate v novem slovenskem državnem geodetskem datumu. GNSS-sprejemnik na letalu namreč dobiva popravke položaja iz omrežja SIGNAL (na primer storitev RTK VRS), kar omogoča neposredno določitev D96/TM-koordinat; koordinate stalnih postaj omrežja so namreč usklajene s koordinatami EUREF-točk (Berk in sod., 2011). Za transformacijo v stari državni koordinatni referenčni sistem, torej D48/GK, ki je potrebna, ker je večina državnih prostorskih podatkov še vedno na voljo zgolj v tem sistemu, je bila za podatke LSA 2011 uporabljena državna trikotniška transformacija (Berk in Komadina, 2013). Model transformacije temelji na nizu 899 virtualnih veznih točk, ki tvorijo 1776 Delaunayjevih trikotnikov. Znotraj vsakega trikotnika se izvede afina ravninska transformacija. Koordinate virtualnih veznih točk so bile določene na podlagi 1958 geodetskih točk s koordinatami, določenimi tako v D48/GK kot v D96/TM. Ta transformacija omogoča prehod v stari, nehomogeni koordinatni referenčni sistem, ki za pretežni del države zagotavlja položajna odstopanja, manjša od 10 centimetrov. Transformacija je povratna in povsod zvezna. Slednje je tudi glavni argument za uporabo trikotniške transformacije pri vsedržavnem laserskem skeniranju Slovenije, saj v nasprotju z lokalnimi in regionalnimi transformacijami omogoča enoličnost in sledljivost postopkov obdelave ter morebitnega naknadnega izboljšanja kakovosti podatkov.

## 3 LASERSKO SKENIRANJE SLOVENIJE

Namen projekta LSA 2011 je bil pokriti celotno Slovenijo s tremi različnimi gostotami laserskih točk. Štirje zemeljski plazovi in devet poplavno najbolj ogroženih območij, opredeljenih kot območje A, naj bi bili skenirani z gostoto 10 točk/m<sup>2</sup>. Visokogorje in območja velikih gozdov, opredeljeni kot območje C, naj bi bili skenirani z gostoto 2 točki/m<sup>2</sup>. Preostalo območje, opredeljeno kot območje B, naj bi bilo skenirano z gostoto 5 točk/m<sup>2</sup>. Žal je bil projekt spomladi 2012 prekinjen, tako da so na voljo podatki le za šest območij (tako imenovanih blokov), ki obsegajo štiri bloke z območja A in dva bloka z območja B (slika 1). Hrani jih Geodetska uprava Republike Slovenije. Zahtevana ravninska točnost v koordinatnem referenčnem sistemu D96/TM je ± 0,30 metra (RMSE, 1 sigma), točnost (elipsoidnih) višin pa ± 0,15 metra (RMSE, 1 sigma).



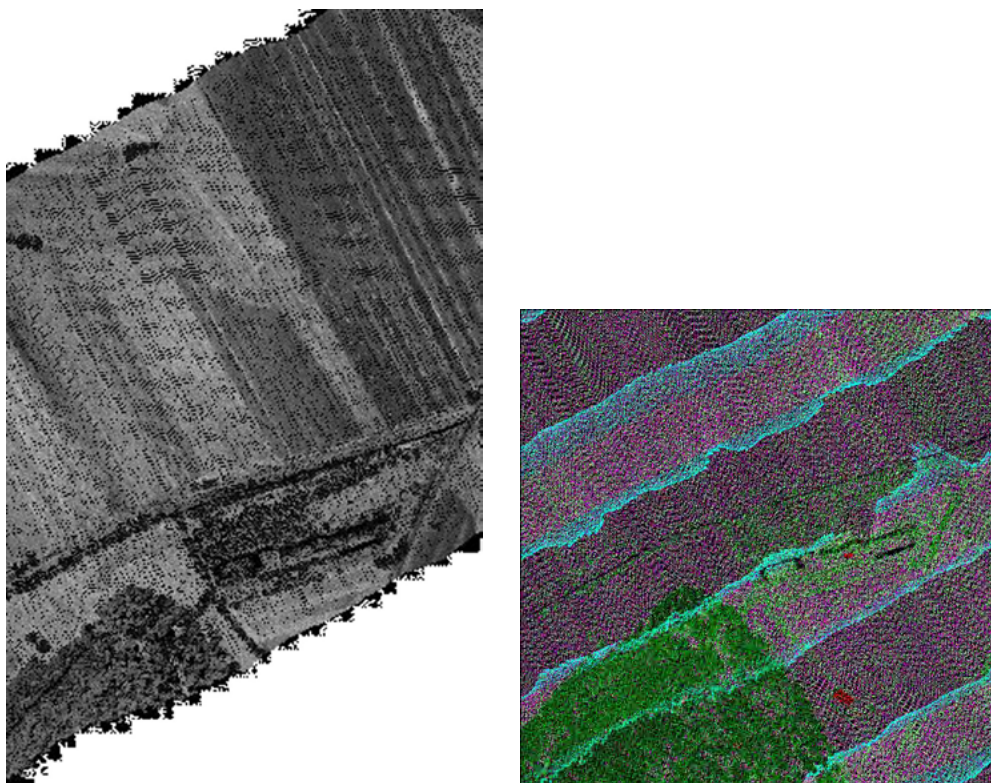
Slika 1: Predani bloki laserskega skeniranja

Osnovni oddani podatki so shranjeni v izvornem koordinatnem sistemu meritev D96/TM z elipsoidnimi višinami, izvedeni podatki pa v obeh koordinatnih sistemih: D96/TM in D48/GK z nadmorskimi višinami.

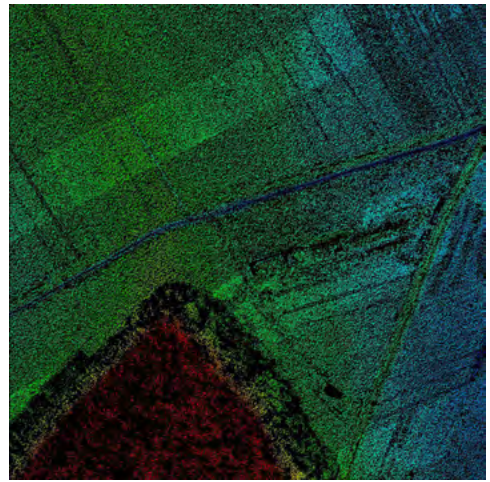
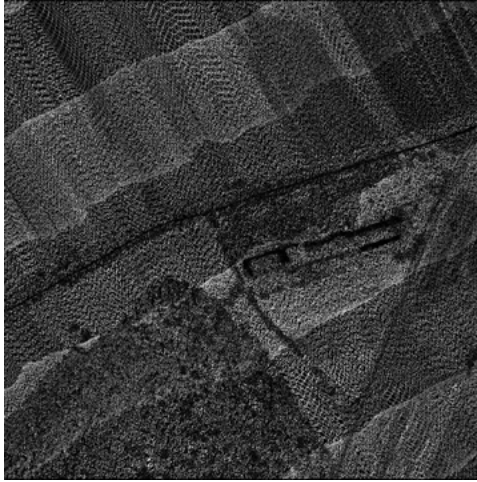
Predvideni rezultati projekta so bili:

- georeferenciran oblak točk (v nadaljevanju: GOT), v katerem so točke zapisane v koordinatnem sistemu D96T/TM z elipsoidno višino; podatki so shranjeni v originalnih LAS-datotekah, ki pomenijo snemalne pasove (slika 2);
- georeferenciran in klasificiran oblak točk (v nadaljevanju: GKOT), v katerem so točke zapisane v formatu LAS v obeh koordinatnih sistemih: D48/GK in D96/TM z nadmorsko višino; datoteke so razrezane na liste v velikosti 1 km<sup>2</sup> za območja B in C ter na 0,25 km<sup>2</sup> za območja A; ime datoteke sestavljajo tri (1 kilometer – za območja B in C) oziroma štiri številke (500 metrov za območja A) koordinate E (vzhodno) in N (severno), ki določajo lokacijo levega spodnjega vogala 1 km<sup>2</sup> ali 0,25 km<sup>2</sup> (sliki 2 in 3);
- oblak točk reliefa (v nadaljevanju: OTR), v katerem so shranjene točke, ki so bile klasificirane v GKOT kot točke na terenu in so shranjene v razrezu listov enake nomenklature; podatki OTR so podani v obeh koordinatnih sistemih in z nadmorskimi višinami, enako kot GKOT (slika 3);
- digitalni model reliefa (v nadaljevanju: DMR) z velikostjo celice 1 m × 1 m, ki je izdelan z interpolacijo točk OTR ter srednjo višinsko točnostjo 15 centimetrov in srednjo ravninsko točnostjo 30 centimetrov; podatki so shranjeni z enako nomenklaturou listov in v obeh koordinatnih sistemih enako kot GKOT (slika 4);

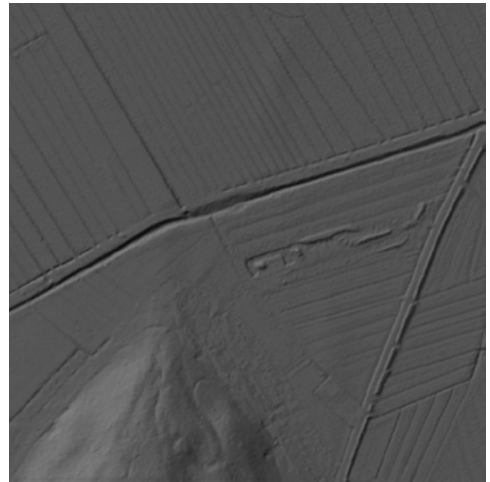
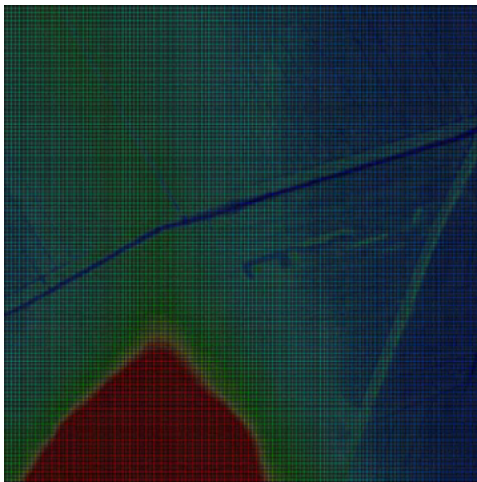
- podoba analitičnega senčenja (v nadaljevanju: PAS), ki je zapisan kot slika (TIFF) z dolžino talnega intervala (angl. GSD)  $0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$ ; PAS-datoteke obsegajo območja velikosti  $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ ; podatki so shranjeni v obeh koordinatnih sistemih, v D48/GK samo kot TFW (slika 4), ter
- samo za območja A so na voljo še aerofotografije in ortofoti; orientacijski parametri aerofotografij, pridobljeni na podlagi neposrednega georeferenciranja, so shranjeni samo v koordinatnem sistemu D96/TM z elipsoidnimi višinami; ortofoti so shranjeni v obeh koordinatnih sistemih D96/TM in D48/GK z razrezom na liste enake nomenklature kot GKOT.



Slika 2: Prikazana sta izdelka GOT (levo), ki prikazuje intenziteto laserskih točk izseka iz originalno skeniranega pasu, in GKOT (desno) za kvadrat v velikosti  $0,25 \text{ km}^2$  klasificirane točke za vegetacijo, stavbe in teren. Obe podobi vsebujeta podatke za isto območje.



Slika 3: Prikazana sta izdelka GKOT (levo), ki prikazuje podatek o intenziteti laserskih točk, in OTR (desno), ki prikazuje obarvanost glede na nadmorsko višino točk. Oba izseka prikazujeta isto območje kot na sliki 2.



Slika 4: DMR1 (levo) je obarvan glede na višino, PAS (desno) pa prikazuje senčenje izdelka DMR1 za isto območje kot na sliki 2.

Geodetska uprava Republike Slovenije in Geodetski inštitut Slovenije sta izvedla nadzor kakovosti za vsak blok posebej v naslednjih korakih:

- popolnost pokritja z rezultati projekta;
- pravilnost zapisa rezultatov na elektronski medij;
- berljivost in pravilnost uporabljenih formatov;
- popolnost in ustreznost poročil;
- preveritev izvedbe notranje kontrole izvajalca;
- ustreznost gostote in njene porazdelitve glede na zahteve iz razpisne dokumentacije;
- pravilnosti klasifikacije oblaka točk;



- pravilnost transformacije elipsoidnih višin v nadmorske;
- ocena ravninske in višinske točnosti OTR in DMR1;
- pravilnost transformacije iz D96/TM v D48/GK;
- pravilnost izdelave PAS ter
- kakovost aerofotografij in ortofotov.

## 4 NADZOR KAKOVOSTI GEOREFERENCIRANJA

### 4.1 Kakovost georeferenciranja

Kljub uveljavljeni tehnologiji zajema podatkov ALS za velika območja manjkajo zanesljive, praktične, cenovno učinkovite in splošno priznane metode nadzora kakovosti ALS. Uporabnik naj bi poznal, kako sistem za zajem podatkov in njegovi parametri ter sistematski pogreški vplivajo na položajno točnost koordinat oblaka točk. Če bi želeli imeti večji nadzor nad končnimi rezultati, bi morali razumeti naslednje (Habib in sod., 2008):

- Kateri so parametri, kakšna je njihova medsebojna korelacija in kako vplivajo na proces kalibracije?
- Kako izvesti ustrezno kalibracijo sistema za zajem podatkov?
- Kako naj se izvede let nosilca senzorjev, da bodo parametri neodvisni in dobro določeni?
- Kako naj se izvede kontrola točnosti kalibracije, saj uporaba kontrolnih točk, ki je uveljavljena pri uporabi fotogrametričnega sistema, ni ustrezna?
- Kako naj se izvede nadzor kakovosti, da bo učinkovit, praktičen, ekonomičen in dovolj enostaven za končnega uporabnika?

Z odgovori na navedena vprašanja je lažje opredeliti vhodne parametre za izvedbo laserskega skeniranja. Uporabnik, ki pogosto naroča zajem podatkov s tehnologijo ALS, bo pomembne vhodne parametre razumel in jih opredelil v obliki specifikacij. Nadzor kakovosti teh parametrov lahko imenujemo tudi notranji/relativni (Habib in sod., 2008) nadzor kakovosti, v nadaljevanju pa bomo bolj poudarili zunanji/absolutni nadzor kakovosti. Za uporabnike, ki v svojih aplikacijah uporabljajo predvsem končne izdelke ALS, kot sta OTR ali DMR, je dovolj, da poznajo položajno točnost podatkov, torej zunanjo/absolutno kakovost.

Za kontrolo točnosti višin se največkrat uporabi primerjava OTR ali DMR s terensko izmerjenimi kontrolnimi točkami. Za kontrolo na večjih površinah se za meritev kontrolnih točk največkrat uporablja GNSS - izmera, ki omogoča, da v kratkem času izmerimo več kontrolnih točk s trikrat boljšo točnostjo, kot je zahtevana za položajno točnost točk OTR. Uporabili bi lahko tudi obstoječe geodetske višinske točke - reperje (Liu, 2011), vendar njihova neposredna uporaba pri nas večinoma ni mogoča, saj so navadno vgrajeni v stene stavb ali objekte prometne infrastrukture. Ker želimo kontrolirati predvsem kakovost rezultatov izvajalca ALS, primerjava z reperji ni primerna, in sicer tudi zaradi že navedenih težav z višinskim sistemom. Med terensko izmerjenimi kontrolnimi točkami in OTR ali DMR se izračuna kvadratni koren povprečne kvadratne napake (angl. root mean square error - RMSE). Ta primerjava (glej preglednico 1) se opravi za več

različnimi vrstami rabe, kot so naselje, travnik, gozd in grmičevje (Hodgson in Bresnahan, 2004). Tako namreč poleg kakovosti georeferenciranja (naselje in travnik) preverimo tudi uspešnost odstranitve vegetacije (gozd in grmičevje) v procesu klasifikacije izvornega oblaka točk.

Določitev ravninske točnosti oblaka točk je bolj zahtevna od določitve višinske točnosti. Poznamo več metod za določitev ravninske točnosti, in sicer z uporabo:

- tarč (Csanyi in Toth, 2007);
- presekov slemen dvokapnih streh sosednjih stavb (Höhle in Pedersen, 2010) in
- topografskih značilnosti, ki jih prepoznamo na sliki intenzitete (Toth in sod., 2007).

Zaradi zahtevnosti se kontrola ravninske točnosti izvaja na manj kontrolnih območjih kot kontrola višinske točnosti.

## 4.2 Nadzor kakovosti georeferenciranja izdelkov LSA 2011

Nadzor kakovosti rezultatov LSA 2011 je bil razdeljena v štiri sklope. Omenjene so samo kontrole, ki se nanašajo na georeferenciranje:

### 1. sklop kontrol: GOT in GKOT

- Kontrola notranje kontrole izvajalca: višinska odstopanja med prekrivajočimi se pasovi

Izvajalec v okviru te kontrole poroča o relativnih odstopanjih po višini na območju prekrivajočih se pasov. Če taka odstopanja obstajajo in so večja od 5 centimetrov, jih je treba zmanjšati. Večja odstopanja lahko kažejo na morebitne grobe napake v izvornih podatkih laserskega skeniranja, kar je opozorilo za izvajalca, da vnovič preveri pravilnost neposrednega georeferenciranja obeh pasov in njune okolice.

- GKOT: kontrola točnosti transformacije iz elipsoidnih v nadmorske višine

V okviru te kontrole smo izbrali 25 testnih točk, ki so enakomerno razporejene po celotnem območju bloka. V radiju enega metra okrog testnih točk smo nato iz GOT izbrali vse pripadajoče točke in njihove parametre, kot sta intenziteta in številka odboja. Za izbrane točke smo nato z uporabo uradnih podatkov o geoidu izračunali nadmorske višine. Enako kot iz GOT smo nato izbrali točke iz izdelka GKOT. S primerjavo ravninskih koordinat in drugih parametrov smo izračunali razlike med nadmorskimi višinami točk izvajalca in na novo preračunanimi višinami. Če odstopanje ni bilo večje od  $RMSE = 2$  centimetra, je bil preračun višin pravilen.

- GKOT: kontrola točnosti transformacije iz D96/TM v D48/GK

Podobno kot pri kontroli preračuna nadmorskih višin smo izvedli kontrolo kakovosti transformacije med novim in starim ravninskima koordinatnima sistemoma na podlagi 25 točk, enakomerno razporejenih po bloku. Za transformacijo je bila uporabljena trikotniška transformacija, ki je opisana v nadaljevanju.

### 2. sklop kontrol: OTR, DMRI in PAS

- Kontrola notranje kontrole izvajalca: primerjava s terenskimi kontrolnimi točkami

Izvajalec v skladu z zahtevami razpisne dokumentacije izvede primerjavo med OTR in terensko izmerjenimi kontrolnimi točkami (KT) na štirih različnih vrstah rabe, in sicer: v naseljih, na

travnikih, med grmičevjem in v gozdu. Enak izračun odstopanj se izvede za kontrolo točnosti DMR1. RMSE naj po višini (1 sigma) ne bi bila večja od zahtevanih 15 centimetrov, ravninska RMSE (1 sigma) pa naj ne bi bila slabša od 30 centimetrov.

- OTR in DMR: kontrola višinske točnosti v primerjavi s terensko izmerjenimi kontrolnimi točkami

V okviru projekta so bile za potrebe kontrole ravninske in višinske točnosti za vsak blok izmerjene terenske kontrolne točke s trikrat boljšo točnostjo, kot jo zahteva razpisna dokumentacija za končne izdelke, torej z RMSE do 10 centimetrov za ravninske koordinate in do 5 centimetrov po višini. Vse terenske meritve in izračune kontrolnih točk je opravila Geodetska uprava Republike Slovenije (GURS). Za vsako lokacijo, na kateri se je kontrolirala višinska točnost, je bilo na štirih različnih vrstah rabe (naselje, travnik, grmičevje in gozd) izmerjenih po 25 KT (Höhle in Höhle, 2009). Petinsedemdeset takih lokacij je enakomerno razporejenih po Sloveniji in se uporabljajo predvsem za kontrolo višinske točnosti OTR in DMR1. V blokih za območje B sta bili izbrani dve lokaciji, za preostale bloke (iz območja A in C) pa po ena.

Blok	Naselje	Travnik	Grmičevje	Gozd	Skupaj
A03	0,14 m	0,05 m	0,05 m	0,05 m	0,13 m
A05	0,04 m	0,04 m	0,31 m	0,11 m	0,12 m
A06	0,07 m	0,03 m	0,07 m	0,07 m	0,06 m
A08	0,12 m	0,04 m	0,19 m	0,09 m	0,12 m
B21_1	0,07 m	0,12 m	0,15 m	0,15 m	0,12 m
B21_2	0,05 m	0,09 m	0,13 m	0,18 m	0,12 m
B25_1	0,04 m	0,04 m	0,08 m	0,06 m	0,06 m
B25_2	0,05 m	0,09 m	0,09 m	0,07 m	0,08 m

Preglednica 1: Ocena višinske točnosti DMR1 (RMSE) za posamezno vrsto rabe in skupno

Poleg navedenih 75 lokacij za kontrolo višin je bilo izmerjenih 25 kontrolnih točk na petih lokacijah (večja mesta) za potrebe določitve ravninske točnosti oblaka točk. Kontrola ravninske točnosti naj bi se izvajala le v večjih naseljih, kjer so geometrijske oblike v oblaku točk dovolj dobro prepoznavne, da jih lahko primerjamo s kontrolnimi točkami. V predanih podatkih je bila vključena le ena lokacija (25 kontrolnih točk) za določitev ravninske točnosti, ki ima RMSE (1 sigma) = 28 centimetrov.

- Kontrola točnosti transformacije iz D96/TM v D48/GK

Kontrola transformacije iz D96/TM v D48/GK se izvaja enako kot pri kontroli GKOT. Potrebna je, ker se na primer klasifikacija ali interpolacija laserskih točk ne izvaja posebej za vsak koordinatni sistem, temveč se izvede v D96/TM in se nato rezultat transformira v D48/GK.

### 3. sklop kontrol: aerofotografije samo za območje A

- Kontrola notranje kontrole izvajalca: kontrola točnosti neposrednega georeferenciranja z izvedbo aerotriangulacije za nekaj aerofotografij

V okviru te kontrole izvajalec izvede aerotrinagulacijo za manjši blok ter rezultate primerja z elementi zunanje orientacije aerofotografij z elementi, pridobljenimi z neposrednim georeferenciranjem. Odstopanja morajo biti v okviru toleranc, zapisanih v razpisnih pogojih.

#### 4. sklop kontrol: ortofoto samo za območje A

- Kontrola notranje kontrole izvajalca: kontrola ravninske točnosti OF z uporabo terenskih kontrolnih točk

Izvajalec primerja terensko izmerjene kontrolne točke z ortofotom in izračuna odstopanja, ki marajo biti v okviru toleranc zapisanih v razpisnih pogojih.

- Kontrola notranje kontrole izvajalca: kontrola točnosti transformacije iz D96/TM v D48/GK

Izvajalec izvede tudi kontrolo transformacije datotek TFW, in sicer predvsem zato, da se izogne morebitnim sistematskim ali grobim napakam.

- OF: kontrola ravninske točnosti OF z uporabo terenskih kontrolnih točk

Kontrolor uporabi kontrolne točke, izmerjene v naseljih, in kontrolira odstopanja ortofota tako, da izračuna RMSE, ki ne smejo biti večja od toleranc, zapisanih v razpisnih pogojih.

## 5 RAZPRAVA

Za upravljanje voda bi bil verjetno idealen sistem dinamičnih višin, v katerem so višine točk podane v metrih, so neodvisne od poti niveliranja, točke z isto višino ležijo na isti ekvipotencialni ploskvi, obstaja pa tudi matematična povezava z elipsoidnimi višinami. Vendar pa se srečujemo tudi z drugimi pogoji, ki jih mora izpolnjevati sodoben višinski sistem; največ jih izpolnjujejo normalne višine (Kuhar in sod., 2011). Strategija vzpostavitve novega višinskega sistema Slovenije tako predvideva uvedbo normalnih višin, ki so opredeljene kot količnik geopotencialne kote in srednje vrednosti normalnega težnostnega pospeška vzdolž normale (Koler in sod., 2012). Poleg redefinicije višinskega sistema, katerega realizacija bo temeljila na nivelmanskim in gravimetričnim mreži, vključuje prehod na nov višinski sistem tudi uvedbo novega višinskega datuma, ki bi lahko temeljil na opazovanjih leta 2005 prenovljene mareografske postaje Koper.

Ključen za uporabnost podatkov ALS pa bo predvsem nov, kakovostnejši model geoida. Testni model geoida iz leta 2010 je nakazal možnost bistvene izboljšave kakovosti glede na obstoječi model iz leta 2000. Že v obstoječem višinskem sistemu je ocenjena natančnost transformacije s testnim modelom geoida približno 3,5 centimetra (std. odklon), največja absolutna odstopanja pa dosežejo 10 centimetrov. Težave testnega modela so predvsem slabi gravimetrični podatki na mejnem območju z Italijo, enakomerno pa bo treba tudi zgostiti mrežo GNSS/nivelmanskih točk, ki se bodo uporabljale za kakovostno vpetje geoida (Kuhar in sod., 2011).

Podatke LSA 2011 in vseh prihodnjih snemanj do uvedbe novega, kakovostnejšega višinskega referenčnega sistema in novega modela geoida bo torej mogoče naknadno bistveno izboljšati. Za podatke ALS z Gauß-Krügerjevimi koordinatami (D48/GK) in višinami v obstoječem državnem višinskem sistemu (datum Trst) bo prehod v novi ravninski in prihodnji nov višinski referenčni sistem potekal po naslednjem postopku:

- datumska transformacija koordinat iz D48/GK v D96/TM – trikotniška transformacija;
- transformacija višin iz nadmorskih (stari sistem) v elipsoidne z uporabo AMG 2000;
- transformacija višin iz elipsoidnih v nadmorske (novi sistem) z uporabo prihodnjega novega AMG.

Tako bodo podatki praktično ohranili natančnost zajema v referenčnem sistemu izmere, ki je na podlagi izvedenih kontrol ocenjena v tem prispevku. Posebej velja opozoriti na pomen skrbnega vodenja metapodatkov, kar bo omogočalo sledljivost postopkov obdelave podatkov ALS.

Iz preglednice 1 je razvidno, da so skupne (vse štiri vrste rabe) točnosti višin v okviru zahtevane tolerance (RMSE), tj. 15 centimetrov. Največja odstopanja niso nikjer preseгла trikratne vrednosti RMSE. Če se omejimo na bloke z območja A, kjer je zahtevana gostota 10 točk/m<sup>2</sup>, smo najboljšo točnost dobili na travniku, kjer je teren najmanj razgiban, nekaj slabšo v gozdu in naselju ter najslabšo v grmičevju. Ker je bilo lasersko skeniranje izvedeno v obdobju neolistanosti, je veliko laserskih žarkov doseglo tla v gozdu, kar omogoča dobro določitev reliefa pod vegetacijskim pokrovom. V mestu so lahko težave z identifikacijo manjših prelomnih linij (na primer robnikov ceste ali nižjih ograj), zato so rezultati nekoliko slabši, kot bi pričakovali na primer v primerjavi s travniki. Grmičevje pomeni najbolj raznoliko vrsto rabe, ki obsega živo mejo, okrasne grme in bolj ali manj zaraščene bregove vodotokov in gozdnih robov.

Na obeh blokih območja B so razlike med različnimi vrstami rabe nekoliko manjše. Največjo točnost višin beležimo v naseljih, sledijo travniki in nato grmičevje ter gozd. Zanimiva je primerjava med blokoma z območja B, ki kaže na slabšo točnost v bloku ob morju, kar je zelo verjetno posledica večje razgibanosti terena.

Na podlagi le nekaj blokov ne moremo predpostaviti, da bo povsod v državi dosežena taka natančnost, še posebej, če vemo, da noben izmed blokov z območja B ne vključuje visokogorja in velikih gozdov, kjer se zajem izvaja z manjšo gostoto točk in slabšo geometrijo ALS kot v navedenih dveh blokkih.

## 6 SKLEP

Predstavljeni so prvi rezultati nadzora kakovosti podatkov LSA 2011. Kontrola točnosti višin se nanaša na koordinatni sistem izvornih meritev. Preverjene so bile torej elipsoidne višine zajetih točk, in sicer z GNSS-izmero na izbranih testnih območjih. Ugotovimo lahko, da so višine točk znotraj predpisanih  $\pm 15$  centimetrov (RMSE). Zaradi slabe kakovosti obstoječega višinskega referenčnega sistema in absolutnega modela geoida je po transformaciji elipsoidnih višin točk v nadmorske višine, ki so uporabne za hidrološke študije, njihova točnost bistveno slabša.

Rezultati projekta LSA 2011 so shranjeni v izvornem koordinatnem sistemu meritev, torej v D96/TM z elipsoidnimi višinami, pa tudi v D48/GK z nadmorskimi višinami. S skrbnim vodenjem metapodatkov in zagotavljanjem sledljivosti obdelave bo mogoče podatke projekta LSA 2011 po določitvi novega, kakovostnega absolutnega modela geoida spet transformirati in dobiti bolj točne nadmorske višine. Pomembno je tudi, da se za vsako lasersko skeniranje za potrebe upravljanja voda izvede ustrezen nadzor kakovosti rezultatov, še posebej višinske točnosti zajetih točk.

## Literatura in viri:

- Berk, S., Bajec, K., Kozmus Trajkovski, K., Stopar, B. (2011). Status of the SIGNAL Positioning Service and Transformation between the Local and ETRS89 Coordinates in Slovenia. 2. CROPOS konferenca, Zagreb, 8. april 2011. Zbornik radova, Državna geodetska uprava, Zagreb, 73–82.
- Berk, S., Komadina, Ž. (2013). Local to ETRS89 Datum Transformation for Slovenia: Triangle-Based Transformation Using Virtual Tie Points. *Survey Review*, 45(328), 25–34. DOI: 10.1179/1752270611Y.0000000020.
- Berk, S., Komadina, Ž., Marjanovič, M., Radovan, D., Stopar, B. (2004). The Recomputation of the EUREF GPS Campaigns in Slovenia. Report on the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF). Toledo, 4.–7. junij 2003. Reports of the EUREF Technical Working Group (TWG) – EUREF publication, št. 13. Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, zv. 33, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt na Majni, 132–149.
- Csanyi, N., Toth, C. K. (2007). Improvement of LiDAR Data Accuracy Using LiDAR-Specific Ground Targets. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73(4), 385–396.
- Gosar, L., Rak, G., Steinman, F., Banovec, P. (2007). Z LiDAR tehnologijo zajeta topografija v hidravličnih analizah vodotokov. *Gradbeni vestnik*, 56(5), 115–123.
- Habib, A. F., Al-Durgham, M., Kersting, A. P., Quackenbush, P. (2008). Error Budget of LiDAR Systems and Quality Control of the Derived Point Cloud. XX1st ISPRS Congress. Peking, 3.–11. julij 2008. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, letn. 37(B1), 203–209.
- Hodgson, M. E., Bresnahan, P. (2004). Accuracy of Airborne LiDAR-Derived Elevation: Empirical Assessment and Error Budget. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(3), 331–339.
- Höhle, J., Höhle, M. (2009). Accuracy Assessment of Digital Elevation Models by Means of Robust Statistical Methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4), 398–406. DOI: 10.1016/J.ISPRSJPRS.2009.02.003.
- Höhle, J., Pedersen, C. Ø. (2010). A New Method for Checking the Planimetric Accuracy of Digital Elevation Models Data Derived by Airborne Laser Scanning. Accuracy 2010 Symposium. Leicester, 20.–23. julij 2010. *Proceedings of the Ninth International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*, University of Leicester, 253–256.
- Huising, E. J., Gomes Pereira, L. M. (1998). Errors and Accuracy Estimates of Laser Data Acquired by Various Laser Scanning Systems for Topographic Applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53(5), 245–261. DOI: 10.1016/S0924-2716(98)00013-6.
- Kager, H. (2004). Discrepancies between Overlapping Laser Scanning Strips: Simultaneous Fitting of Aerial Laser Scanner Strips. XXth ISPRS Congress. Istanbul, 12.–23. julij 2004. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, letn. 35(B1), 555–560.
- Kenward, T., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., Fielding, E. (2000). Effects of Digital Elevation Model Accuracy on Hydrologic Predictions. *Remote Sensing of Environment*, 74(3), 432–444. DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00136-X.
- Koler, B., Medved, K., Kuhar, M. (2007). Uvajanje sodobnega višinskega sistema v Sloveniji. *Geodetski vestnik*, 51(4), 777–792.
- Koler, B., Urbančič, T., Medved, K., Vardjan, N., Berk, S., Omang, O. C. D., Solheim, D., Kuhar, M. (2012). Novi višinski sistem Slovenije in testni izračun geoida. Raziskave s področja geodezije in geotizike 2011. Ljubljana, 26. januar 2012. Zbornik predavanj. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 91–101.
- Kuhar, M., Berk, S., Koler, B., Medved, K., Omang, O., Solheim, D. (2011). Vloga kakovostnega višinskega sistema in geoida za izvedbo GNSS-višinomerstva. *Geodetski vestnik*, 55(2), 226–234.
- Legat, K., Skaloud, J., Schmidt, R. (2006). Reliability of Direct Georeferencing Phase 2: A Case Study on Practical Problems and Solutions. Checking and Improving of Digital Terrain Models. *EuroSDR Official Publication*, 51. Frankfurt na Majni, 169–184.
- Liu, X. (2008). Airborne LiDAR for DEM Generation: Some Critical Issues. *Progress in Physical Geography*, 32(1), 31–49. DOI: 10.1177/0309133308089496.
- Liu, X. (2011). Accuracy Assessment of LiDAR Elevation Data Using Survey Marks. *Survey Review*, 43(319), 80–93. DOI: 10.1179/003962611X12894696204704.
- Mongus, D., Žalik, B. (2012). Parameter-Free Ground Filtering of LiDAR Data for Automatic DTM Generation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67(1), 1–12. DOI: 10.1016/J.ISPRSJPRS.2011.10.002.

Podobnikar, T., Vrečko, A. (2012). Digital Elevation Model from the Best Results of Different Filtering of a LiDAR Point Cloud. *Transactions in GIS*, 16(5), 603–617. DOI: 10.1111/J.1467-9671.2012.01335.X.

Pribičević, B. (2000). *Uporaba geološko-geofizičnih in geodetskih baz podatkov za računanje ploskve geoida Republike Slovenije*. Doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.

Ressl, C., Kager, H., Mandlbürger, G. (2008). Quality Checking of ALS Projects Using Statistics of Strip Differences. *XXIst ISPRS Congress*, Peking, 3.–11. julij 2008. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, letn. 37(B3b), 253–260.

Schaer, P., Skaloud, J., Landtwing, S., Legat, K. (2007). Accuracy Estimation for Laser Point Cloud Including Scanning Geometry. *The 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT2007)*, Padova, 29.–31. maj 2007. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, letn. 36(5/W8), 7 str.

Skaloud, J., Lichti, D. (2006). Rigorous Approach to Bore-Sight Self-Calibration in Airborne Laser Scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61(1), 47–59. DOI: 10.1016/J.ISPRSIPRS.2006.07.003.

Šantl, S., Rak, G. (2010). Analiza poplavne nevarnosti in odtočnega režima – uporaba različnih tipov hidravličnih modelov. *Gradbeni vestnik*, 59(6), 147–156.

Toth, C., Paska, E., Brzezinska, D. (2007). Using Pavement Markings to Support the QA/QC of LiDAR Data. *Photogrammetric Image Analysis (PIA07)*, München, 19.–21. september 2007. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, letn. 36(3/W49B), 173–178.

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

Triglav Čekada, M., Bric, V., Oven, K. (2012). Prvo vsedržavno lasersko skeniranje Slovenije. *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2011–2012*. Ljubljana, 25. september 2012. *GIS v Sloveniji*, 11. Založba ZRC, Ljubljana, 191–196.

**Prispelo v objavo: 7. januar 2013**

**Sprejeto: 12. februar 2013**

**mag. Vasja Bric, univ. dipl. inž. geod.**

Geodetski inštitut Slovenije, Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana  
e-pošta: vasja.bric@gis.si

**Sandi Berk, univ. dipl. inž. geod.**

Geodetski inštitut Slovenije, Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana  
e-pošta: sandi.berk@gis.si

**dr. Mihaela Triglav Čekada, univ. dipl. inž. geod.**

Geodetski inštitut Slovenije, Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana  
e-pošta: mihaela.triglav@gis.si