

UDK/UDC: 528.8.042:627.222(497.4)(282.24)

Prejeto/Received: 23.10.2017

Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 29.12.2017

## NATANČNOST LIDARSKIH PODATKOV Z VIDIKA HIDRAVLIČNEGA MODELIRANJA POVRŠINSKIH VODA

## THE ACCURACY OF LIDAR DATA IN TERMS OF SURFACE WATER HYDRAULIC MODELLING

Marjan Moderc<sup>1,\*</sup>, Regina Kolenc<sup>1</sup>, Sašo Petan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Agencija RS za okolje, Vojkova ulica 1b, 1000 Ljubljana

### Izveček

Agencija RS za okolje je v okviru projekta FRISCO1 spomladi 2017 izvedla klasične geodetske meritve 270 prečnih profilov vzdolž celotnega toka reke Sotle, s katerimi smo pridobili več kot 5000 ročno izmerjenih točk neposredne okolice struge Sotle. Izmerjene geodetske točke smo primerjali s prosto dostopnimi podatki Laserskega skeniranja Slovenije (LSS) iz leta 2014, da bi ugotovili, kakšna je višinska natančnost razpoložljivih lidarskih podatkov na območju vodnih teles. Ugotovili smo, da obravnavani lidarski podatki nudijo zajem splošne topografije manjše rečne struge s povprečno višinsko natančnostjo okoli 0,5 m, točke zunaj omočenega dela struge dosega višinsko natančnost dobrih 10 cm, lidarske točke na odprtih, ravnih površinah pa se višinam geodetskih meritev približajo že na povprečno 5 cm. Omenjene višinske napake posameznih točk na nivoju prečnih profilov prinesejo povprečno 15 % zmanjšanje površine prečnega prereza in posledično prevodnosti profila. Študija ugotavlja, da se podatki Laserskega snemanja Slovenije kot zanesljiv podatkovni vir v hidravličnem modeliranju kažejo za topografske elemente, kot so poplavne površine, plitvejši rečni odseki ter večji linijski infrastrukturni in hidrotehnični objekti, neprimerni pa so za pridobivanje podatkov o geometriji zacevitev in prepustov, poteku dna struge rečnih odsekov z večjo globino in zahtevnejših hidrotehničnih objektov. Tekom študije smo razvili tudi preprosto in učinkovito orodje za izdelavo prečnih profilov iz lidarskih podatkov ter obdelavo terenskih snemanj profilov Xsection, ki je brezplačno na voljo za prenos in uporabo.

**Ključne besede:** LIDAR, hidravlično modeliranje, geodetske meritve, višinska natančnost, prečni prerezi.

### Abstract

In the spring of 2017 the Slovenian Environment Agency conducted a geodetic survey of the Sotla River as part of the FRISCO1 project. 270 river cross sections were measured, consisting of more than 5000 surveyed points. Those were used as a height reference for accurately evaluating the freely available Slovenian lidar dataset acquired in 2014. The analysis of the lidar data in the vicinity of water surfaces showed that the lidar data offer an extraction of near water surface topography with mean vertical accuracy of 0.5 m. Moreover, terrain that lies outside the wet areas can be extracted with an average 10 cm vertical accuracy, whereas a flat and open air surface can be extracted with an average 5 cm accuracy. This adds up to an average of 15% cross-

---

\* Stik / Correspondence: [marjan.moderc@gov.si](mailto:marjan.moderc@gov.si)

© Moderc M. et al.; Vsebina tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [licence Creative Commons Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0](#).

© Moderc M. et al.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – Non Commercial – ShareAlike 4.0 Licence](#).

section area decrease, causing similar decrease in river conductivity. The study concludes that for river flood modelling purposes, topographical elements such as flood plains, river sections with relatively shallow water, and linear infrastructure and hydraulic structures such as roads, railways, embankments, and dams could be obtained from the lidar data with mostly sufficient accuracy. On the other hand, elements such as deeper river sections, river crossings, and complex hydraulic structures could not be properly described using the available lidar data only. A simple and efficient tool for generating river cross sections from lidar data, called Xsection, has also been developed during the study and it is freely available for download and use.

**Keywords:** LIDAR, hydraulic modelling, geodetic surveying, vertical accuracy, cross section.

## 1. Uvod

Agencija Republike Slovenije za okolje (v nadaljevanju ARSO) sodeluje pri projektu Čezmejno usklajeno slovensko-hrvaško zmanjševanje poplavne ogroženosti – negradbeni ukrepi, imenovanem tudi FRISCO1 (FRISCO1, 2017), katerega dolgoročni namen je zmanjšati poplavno ogroženost na porečjih, ki ležijo na meji med Slovenijo in Hrvaško (spletna stran FRISCO1).

Projektne aktivnosti ARSO so se v prvi fazi nanašale predvsem na zbiranje in zajem primernih ter natančnih prostorskih podatkov v podporo upravljanju poplavnih tveganj, potrebnih za izdelavo raziskav na čezmejnih porečjih Sotle, Mure in Dragonje. V okviru zadanih nalog je ARSO med decembrom 2016 in marcem 2017 izvedel geodetsko snemanje prečnih profilov in hidrotehničnih objektov vzdolž celotnega toka Dragonje in Sotle (Slika 1).



**Slika 1:** Geodetske meritve profilov reke Sotle v februarju 2017. Foto: Regina Kolenc.

**Figure 1:** Geodetic survey of the Sotla River in February 2017. Photo: Regina Kolenc.

Pri zbiranju prostorskih podatkov za preliminarno hidravlične študije smo si še pred izvedbo terenskih geodetskih meritev izdatno pomagali z lidarskimi podatki, ki so bili pridobljeni v okviru projekta Lasersko snemanje Slovenije (LSS) (Triglav Čekada et al., 2015) in jih Ministrstvo za okolje in prostor od leta 2015 prek portala eVode širši javnosti posreduje v prosto uporabo (eVode, 2017).

Ob zaključku izvajanja geodetskih meritev smo tako razpolagali z dvema neodvisnima viroma topografskih podatkov na območju Dragonje in Sotle: z geodetskimi meritvami ARSO in rezultati lidarskega snemanja LSS.

Snemanje topografije z lidarjem ima nekatere tehnične omejitve s pomembnimi posledicami za vodarsko stroko:

- do odboja žarka lahko pride že na stiku z vodno gladino, zato dobimo informacijo o višini gladine, ne pa o višini rečnega dna,
- na stiku z gladino lahko prihaja do odboja žarkov stran od skenerja, zato meritev ni na voljo,
- pri potovanju skozi vodno telo žarki zaradi disperzije izgubljajo veliko energije, zato so talni odboji mogoči le za čiste in zelo plitve odseke.

V praksi so zato na območjih vodnih teles zaradi motnosti, turbulence in globine vode uspešno odbiti žarki precej redki in nenatančni (Mandlbürger et al., 2013). To težavo za plitka vodna telesa sicer relativno uspešno rešuje batimetrični lidar, kjer se uporabljajo močnejši žarki z 2- do 3-krat krajšo valovno dolžino (Waters, 2013), a gre za precej dražjo metodo snemanja, ki pa v projektu Laserskega skeniranja Slovenije ni bila uporabljena (Geodetski inštitut, 2014).

V nadaljevanju predstavljamo analizo, v kateri smo s primerjavo višin lidarskih točk in klasično

izmerjenih točk želeli ovrednotiti višinsko natančnost lidarskih podatkov na realnem odseku vodnega telesa in s tem posredno oceniti primernost omenjenih podatkov masovnega daljinskega zajema za uporabo v hidravličnih študijah.

## 2. Metode

Analiza je zasnovana kot študija primera, saj so kljub precejšnji splošnosti ugotovitev obravnavani konkretni podatki na konkretnem območju: gre za do 80 m širok obrežni pas vzdolž reke Sotle od Dobovca pri Rogatcu do izliva v reko Savo.

### 2.1 Obravnavano območje

Za analizo smo izbrali podatke snemanja reke Sotle, saj se ta ponaša s pestro hidromorfološko sliko. Vzdolž celotnega toka z raznovrstnim rečnim dnom se zvrstijo tako naravni (tj. zaraščeni in meandrirajoči) kot tudi močno regulirani odseki. Struga je predvsem v spodnjem toku obdana s številnimi protipoplavnimi nasipi, vzdolž večine struge so številni linijski infrastrukturni objekti (ceste in železnica), med drugim tudi suh zadrževalnik, zajezen z velikim umetnim nasipom. Porečje reke Sotle ima prispevno površino slabih 600 km<sup>2</sup> in se tako uvršča v samo povprečje slovenskih rek, daljših od 20 km. Zato ocenjujemo, da s svojimi lastnostmi predstavlja dokaj celovit in reprezentativen primer za aplikacijo ugotovitev te analize na številna druga slovenska območja.

### 2.2 Podatkovni viri

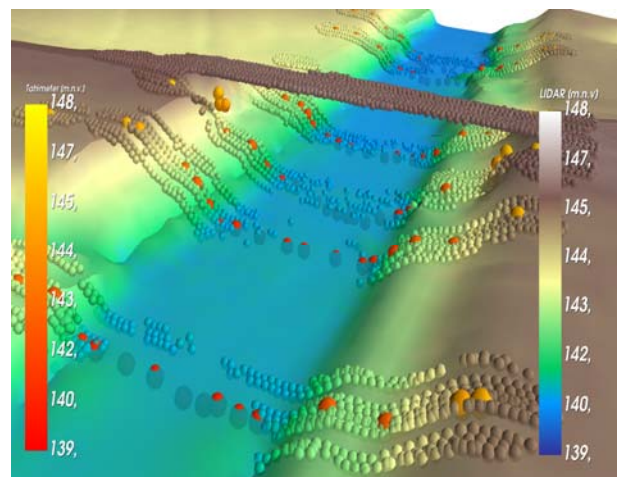
V analizi smo uporabili okrog 5000 klasično izmerjenih terenskih točk, ki so bile vzdolž celotnega odseka reke Sotle posnete zunaj rastne sezone, med januarjem in marcem 2017 (velike točke na sliki 2). Točke smo izmerili z geodetskimi merskimi metodami, in sicer s kombinacijo izmere GNSS RTK in klasične tahimetrične izmere. Večina obravnavanih točk (več kot 4550) predstavlja 270 prečnih profilov, ki smo jih merili v medsebojni oddaljenosti okrog 500 m, analizirali pa smo tudi natančnost približno 500 začetnih orientacijskih točk, ki so bile izmerjene izključno s profesionalnim sprejemnikom GNSS RTK. S temi točkami smo območje analize razširili malce zunaj samega

rečnega koridorja, skoraj vse pa ležijo na ravnih območjih brez ovir proti nebu. Glede na metodo zajemanja podatkov ocenjujemo, da imajo geodetski podatki, ki so služili kot vhodni podatek v naši analizi, povprečno položajno natančnost pribl. 2 cm in vertikalno natančnost pribl. 2 cm.

Podatki lidarskega snemanja, ki smo jih uporabili za primerjavo s klasično izmerjenimi točkami, so bili zajeti marca 2014. V analizi smo uporabili dva neposredna, javno dostopna produkta:

- oblak točk reliefa v formatu .las, kjer smo iz klasificiranega oblaka točk uporabili le točke, ki so bile klasificirane kot tla (v nadaljevanju LAS), in
- digitalni model reliefa kot rastrski prikaz površja v formatu .tif z ločljivostjo 1 × 1 m (v nadaljevanju DMR).

Gostota točk talnega odboja, zajetih z lidarskim snemanjem, je bila na obravnavanem območju večinoma nad 2 točki/m<sup>2</sup>, pri čemer nad večjimi omočenimi območji globljih odsekov same struge pogosto ni nobenega odboja. Ocenjena absolutna natančnost izmerjenih lidarskih točk je okoli 6 cm v vseh koordinatnih smereh (Geodetski inštitut, 2014).



**Slika 2:** Grafični prikaz obravnavanih prostorskih podatkov (raster DMR, točke LAS (manjše) in geodetsko izmerjene točke (večje)).

**Figure 2:** Example of the analyzed geospatial input data (DEM raster, LAS points (smaller), and surveyed points (bigger)).

### 2.3 Postopek izračuna

Za vse izmerjene geodetske točke smo izračunali višinsko vrednost pripadajoče celice z rastra DMR in višinsko vrednost ravninsko najbližje točke reliefa iz datoteke LAS. Postopek je bil opravljen avtomatično s skripto, napisano v programskem jeziku Python, zato je predvsem na območjih z majhnim številom uspešnih lidarskih odbojev pri iskanju najbližjih lidarskih točk prihajalo do nereprezentativnih napak, a smo z namenom ugotovitve stopnje natančnosti lidarskega vira ob masovnem (oz. popolnoma samodejnem) zajemu zavestno sprejeli ta del napake.

Že analiza višinske natančnosti posameznih točk je dala dober vpogled v natančnost lidarskih podatkov. Še bolj pa nas je zanimal vpliv višinske napake posameznih točk na obliko in velikost prečnega rečnega profila. V enodimenzionalnih modelih je prečni prerez namreč osnovni element, s katerim opisujemo geometrijo in s tem hidravlične lastnosti rečne struge, zato je skladnost oblike prečnega prereza z realnim stanjem pomemben pokazatelj primernosti podatkovnega vira za uporabo v hidravličnih študijah. Za vse profile smo zato izračunali maksimalno pretočno površino prečnega prereza glede na posamezni podatkovni vir.

Za vse profile smo s pomočjo Manningove enačbe (Manning, 1891) (enačba 1) za vrednost povprečnega padca reke Sotle 0,5 % in Manningov koeficient 0,035 izračunali tudi maksimalni pričakovani pretok na omenjenih profilih.

$$Q = \frac{1}{n_g} \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{S} \quad (1)$$

### 2.4 Program za avtomatsko izdelavo profilov Xsection

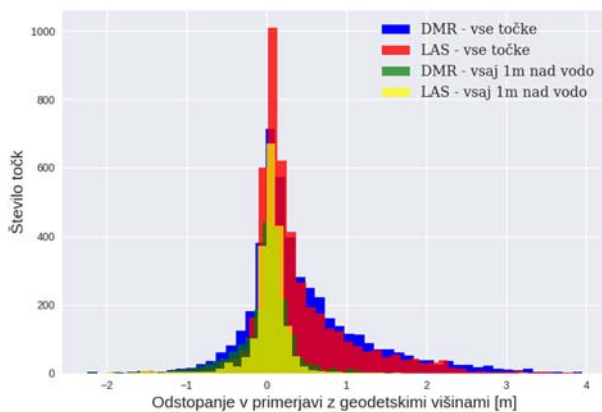
V fazi zbiranja podatkov za izdelavo preliminarne modelov in tekom izdelave pričujoče analize je bilo razvito orodje za lažje črpanje in izdelavo prečnih profilov iz DMR ter obdelavo terenskih snemanj profilov. Gre za preprosto, a precej učinkovito orodje, ki ga poganjamo v ukazni vrstici, spisano pa je v programskem jeziku Python. Program je brezplačno na voljo za prenos in uporabo. Podrobnejša navodila za namestitev in uporabo se

nahajajo na spletnem naslovu: <http://xsection.readthedocs.io>.

### 3. Rezultati in razprava

Prvi, najbolj splošen, a morda tudi najbolj informativen podatek o kakovosti lidarskih podatkov je izračun absolutne višinske napake DMR in LAS za vsako geodetsko izmerjeno točko terenske izmere. »Surova« absolutna višinska napaka v povprečju znaša slabih 60 cm za točke DMR in slabih 50 cm za točke LAS. S to prvo in grobo oceno izvemo, da lahko s pomočjo lidarskih podatkov tudi z »brezglavim« masovnim zajemom točk v okolici vodnih teles sicer pridobimo spodobno topografsko predstavitev površja znotraj pravega velikostnega razreda višinskih vrednosti, ki pa neposredno še ni povsem uporabna v hidravličnih študijah. Če s pomočjo mediane vsaj malo omilimo vpliv točk z največjimi napakami na skupno sliko, ugotovimo, da je mediana višinskih razlik že skoraj dvakrat manjša (34 cm za DMR in 22 cm za LAS), kar nakazuje na obstoj točk z izrazito velikim odstopanjem. Te se, kot že vemo, nahajajo večinoma na območjih, ki jih prekriva voda. To se je potrdilo tudi s filtriranjem točk: če smo v analizi upoštevali le točke, ki so ležale višje od 1 m nad gladino v času geodetske izmere (43 % vseh točk), je mediana povprečne napake padla na 14 cm za DMR in le 10 cm za LAS. Posebej smo analizirali tudi točke za orientacijo tahimetra, posnete izključno z geodetskim GNSS-sprejemnikom. Omenjene točke so tipično ležale na odprtih ravnih površinah, zato je bilo pričakovati višje stopnje ujemanja višinskih vrednosti. To se je potrdilo tudi z našo analizo, saj so točke LAS dosegale povprečne odklone 7 cm, mediana pa je padla celo na 5 cm. Korelacijo med lidarskimi in geodetskimi vrednostmi smo ovrednotili tudi s priljubljenim kazalnikom, korenem povprečne kvadratne napake (angl. root-mean-square error – RMSE), a smo pričakovano dobili vrednosti v velikosti dvakratnika povprečnih absolutnih napak (pribl. 1 m). Ker RMSE »kaznuje« odstopanja s kvadratno odvisnostjo, točke s sistematičnimi, najvišjimi pogreški (ravno tiste, ki bi jih lahko ročno izločili iz analize) nesorazmerno veliko vplivajo na nižanje stopnje korelacije.

Opisani rezultati so predstavljeni v preglednici 1, ki prikazuje absolutne napake vseh izmerjenih točk glede na podatkovni vir in skupino točk, razvrščenih od največje do najmanjše. Razpršenost dobljenih absolutnih napak je prikazana na sliki 3, kjer iz histograma odstopanj višinskih vrednosti lidarskih podatkov glede na geodetsko določene višine lahko opazimo, da imajo točke DMR tako večjo absolutno napako kot tudi večjo razpršenost te napake v primerjavi s točkami LAS.



**Slika 3:** Histogram odstopanj višin različnih skupin in virov lidarskih točk glede na geodetsko izmerjene točke.

**Figure 3:** Absolute vertical error of the different groups and sources of lidar points compared to the geodetically surveyed points.

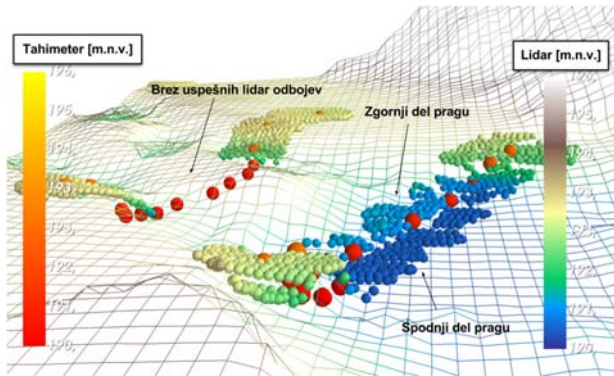
**Preglednica 1:** Pregled višinske natančnosti različnih skupin točk.

**Table 1:** Overview of the vertical accuracy for different point groups.

Skupina točk		Število točk	zapis LIDAR	Absolutna višinska napaka [cm]	
				Mediana	Povprečje
Vseh 270 profilov	Vse točke profilov	4566	DEM	34	59
			LAS	22	48
	Točke profilov 1 m nad gladino vode	1969	DEM	14	25
			LAS	10	16
237 "smiselnih" profilov	Vse točke profilov	4047	DEM	32	54
			LAS	21	43
	Točke profilov 1 m nad gladino vode	1763	DEM	14	24
			LAS	10	16
Orientacijske točke GPS		422	DEM	6	10
			LAS	5	7

### 3.1 Kakovost prečnih profilov

Poleg analize surovih točk kot samostojnih, nepovezanih elementov smo skladno z namenom raziskave (uporabnost podatkov v hidravličnih analizah) opravili tudi analizo kakovosti samih prečnih profilov. Že izris profilov iz posameznih podatkovnih virov je osvetlil številne vzroke slabše natančnosti osnovnih lidarskih točk. Lepo je namreč razvidna že v tehničnem poročilu dokumentirana nezveznost rastrov DMR nad vodno gladino vodotokov zaradi premajhnega števila točk (Geodetski inštitut, 2014). Algoritem za interpolacijo točk na pravilno rastrsko mrežo namreč območja brez uspešnih meritev terena pogosto interpretira kot izboklino namesto kot ravno površino (oz. celo vboklino). Slika 4 ta pojav ponazarja na primeru profilov SOTL088 in SOTL089. Jasno se vidi posneti prag (profil SOTL089) z višinsko razliko pribl. 0,5 m, gorvodno pa v območju profila SOTL088 ni lidarskih odbojev. Zato je algoritem za izdelavo rastra DMR območje interpoliral kot izboklino, algoritem iskanja najbližjih točk LAS pa je v odsotnosti razpoložljivih odbojev v neposredni bližini prav tako dal že navidezno naključne rezultate. Posledično zajem višinskih vrednosti na omočenem delu profila SOTL088 po obeh metodah ni prinesel zadovoljivih rezultatov.



**Slika 4:** Razpoložljivost lidarskih podatkov na vodnih telesih in okoli njih na primeru okolice profilov SOTL088 in SOTL089. Jasno so razvidni številni odboji v okolici vodnega pragu (desno) ter njihova odsotnost na globljem odseku gorvodno od pragu, kar je povzročilo napačno interpolacijo točk v pravilni rastrski mreži.

**Figure 4:** Lidar data coverage on and around water bodies – profiles SOTL088 and SOTL089. Water cascade on the right side of the figure is well detected and basically there is no lidar data coverage over the deeper upstream section, which caused false interpolation of the points in a regular raster grid.

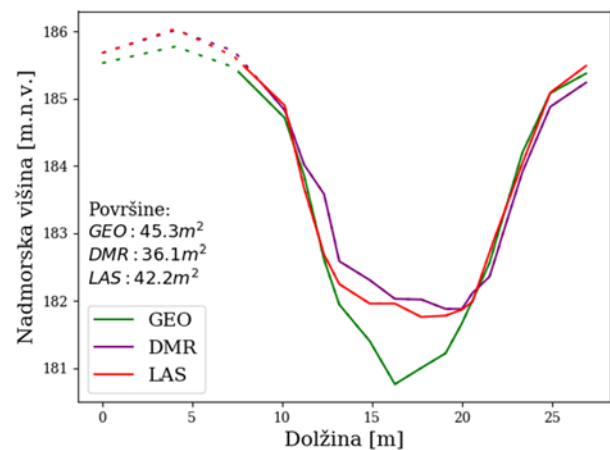
Svoj delež k manjši kakovosti profilov, izdelanih iz lidarskih točk, prispevajo tudi točke, ki jih je algoritem za klasifikacijo lidarskih točk pomotoma prepoznal kot tla. Poleg že opisanega odboja od vodne gladine med primeri najdemo tudi premostitve (primer je lepo viden na slikah 2 in 6), kjer algoritem za prepoznavo grajenih objektov ni izločil železniškega oz. cestnega mostu čez Sotlo.

Kljub opisanim virom slabšanja kakovosti podatkov pa lahko rečemo, da na območjih s pretežno nizkim vodostajem avtomatični zajem profilov iz lidarskih podatkov daje presenetljivo dobre rezultate. V preglednici 2 sta prikazana primera odličnega in slabšega ujemanja lidarskih profilov z izmerjenimi. Zgovorna je predvsem druga vrstica slik, kjer barvna lestvica točk označuje absolutno napako vrednosti DMR za vsako posamezno točko geodetsko izmerjenega profila. V obeh primerih lahko opazimo zelo dobro ujemanje lidarskih podatkov in geodetske izmere v suhem delu profila, v omočenem delu profila pa v obeh primerih prihaja do odstopanj. V primeru profila SOTL274 so

odstopanja povečini zanemarljivo majhna, pri profilu SOTL193 pa je zaradi »interpolacijske izbokline« nad globljimi odseki višinska napaka dvakratnik globine in je tako primer profila, ki je brez ročnega popravljanja praktično neuporaben.

### 3.2 Površina in pretočnost prečnih profilov

Za vse profile smo za vsak podatkovni vir izračunali še maksimalno pretočno površino, ki smo jo v analizi opredelili kot površino tistega dela profila, ki se nahaja pod nižjim izmed bregov. S tem smo poskušali numerično ovrednotiti stopnjo ujemanja oblike profilov. Primerjava velikosti prečnih profilov v odvisnosti od vhodnega podatkovnega vira je pokazala, da imajo profili, izdelani iz točk lidarskega snemanja, večinoma manjše površine, kar gre predvsem na račun večinoma slabih opisov struge pod vodno gladino. Profili, izdelani iz rastrskih vrednosti DMR, v povprečju dosegajo dobrih 82 %, profili iz točk LAS pa dobrih 87 % površine referenčnih geodetsko izmerjenih profilov. Primer profila SOTL120 na sliki 5 grafično ponazarja postopek izračuna maksimalne pretočne površine profilov.



**Slika 5:** Primer izračuna maksimalne omočene površine profila.

**Figure 5:** Example of the maximum wetted profile area calculation.



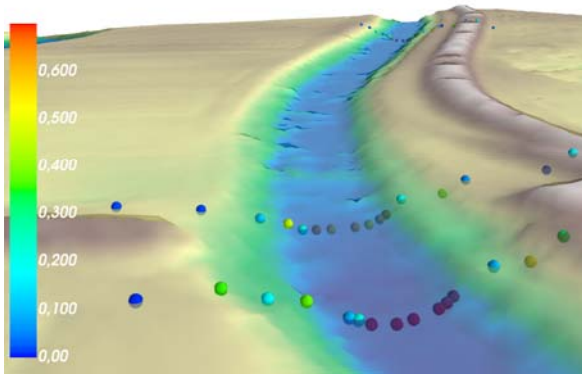
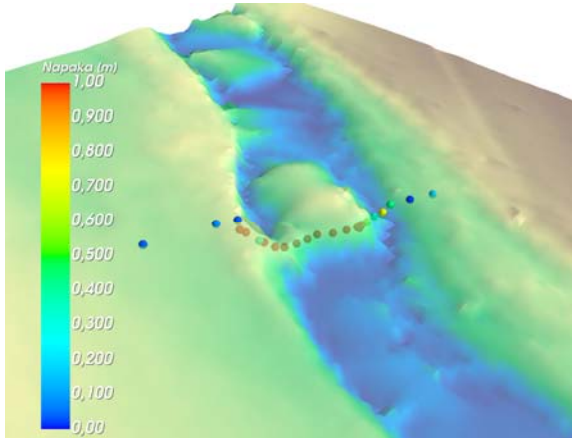
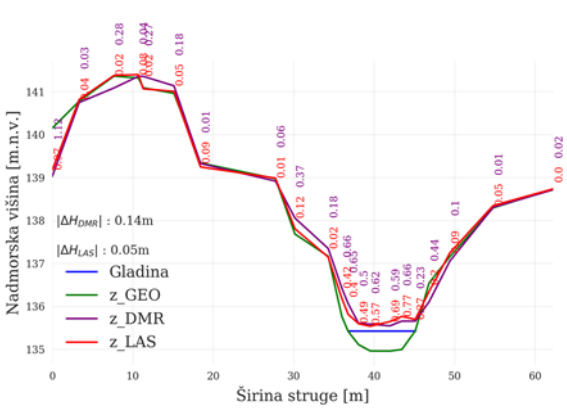
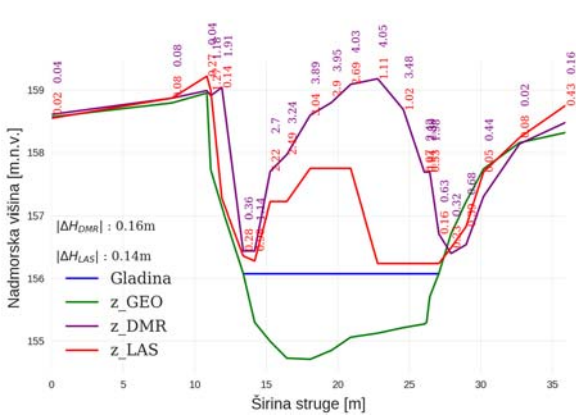
Rezultati primerjave hidravlične prevodnosti profilov iz različnih podatkovnih virov so pričakovano podobni razmerjem površin prečnih prerezov: povprečna pretočnost profila znaša pribl. 81 % referenčnega maksimalnega pretoka za profile

DMR in dobrih 85 % referenčnega maksimalnega pretoka za profile LAS. A lidarskim podatkom v prid govori dejstvo, da bi morale biti te vrednosti v praksi še večje oz. razlika v pretokih manjša: večina razlike v površini prečnega profila namreč izvira iz

talnega dela profila, kjer so zaradi večje hidravlične hrapavosti hitrosti manjše od povprečne hitrosti profila, česar pa enostavna Manningova enačba (1) s predpostavko uniformnih hitrostnih profilov ne upošteva.

**Preglednica 2:** Grafični prikaz primera dobrega in slabega vzorčenja profila na podlagi lidarskih podatkov.

**Table 2:** Graphical overview of a good and a bad example of profile extraction from lidar data.

	Primer dobrega zajema, profil SOTL274	Primer slabega zajema, profil SOTL193
DMR s senčenjem		
3D pogled DMR z absolutno višinsko napako DMR za vsako točko profila		
Prečni profil z napako DMR in LAS za vsako točko		

### 3.3 Razprava

V študiji primera reke Sotle smo imeli na voljo vzorec 270 profilov s prečnim prerezom od 3 m<sup>2</sup> do skoraj 200 m<sup>2</sup>, sestavljenih iz skupno več kot 5000 točk. Ugotovili smo, da lahko izključno iz lidarskih podatkov s popolnoma avtomatiziranimi postopki točke v okolici vodnih površin zajemamo s povprečno napako 0,5 m, točke, ki so zagotovo na suhem, s povprečno napako okoli 10 cm, točke na ravnih in odprtih površinah pa s povprečno napako okoli 5 cm. Na nivoju profilov to pomeni povprečno 15 % zmanjšanje površine pravega prečnega prereza in s tem prevodnosti profila. V medsebojni primerjavi obeh uporabljenih tipov lidarskih podatkov (DMR in LAS) smo ugotovili, da uporaba tehnike iskanja najbližjih točk iz oblaka točk LAS prinaša od 20 do 40 % manjše absolutne višinske napake v primerjavi z uporabo že izvedenih rastrskih digitalnih modelov površja DMR. Ugotovimo lahko, da se deterministično vzorčenje višin na podlagi surovih lidarskih talnih odbojev kljub precej večji procesni zahtevnosti in nevarnosti zajemanja nereprezentativnih točk ob avtomatskem iskanju najbližjih odbojev kaže kot precej boljši podatkovni vir v primerjavi z (uporabniku prijaznejšimi in bolj enostavnimi) rastrji DMR. To je razumljivo, če vemo, da je DMR poenostavljen produkt, izdelan prav s povprečenjem LAS-datotek.

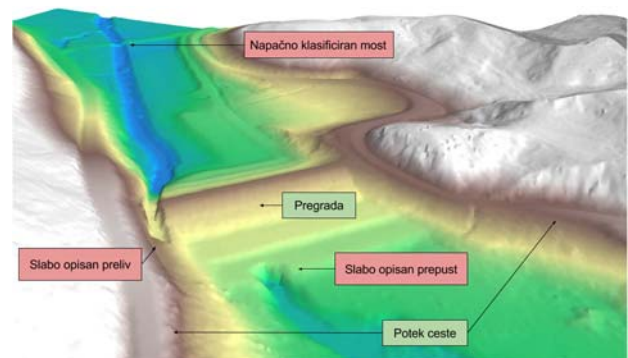
Na podlagi te analize ocenjujemo, da so lidarski podatki ob doslednem upoštevanju tehnoloških danosti (starost zajema, hidrološke razmere v času zajema, spremenljivost površja, gostota zajema itd.) v postopkih hidravličnega modeliranja ustrezen oz. celo zadosten vir za naslednje topografske elemente:

- poplavne površine,
- suhi ali zelo malo omočeni profili (globina vode do 20 cm) s širino nad 5 m,
- suhi del brežin širših rek,
- večji linijski infrastrukturni in hidrotehnični objekti (nasipi, jezovi, pregrade, skoki, krone mostov, ceste, železnice).

Pomembni topografski elementi v hidravličnem modeliranju, za katere LIDAR sam po sebi nikakor ne daje primernih rezultatov, pa so:

- potek dna struge globljih odsekov rek,
- prepusti, mostovi, zacevitve,
- manjši in hidravlično zahtevni hidrotehnični objekti.

Predstavljene ugotovitve morda najlepše opiše digitalni model okolice pregrade na Vonarskem jezeru (slika 6). Na eni sliki opazujemo lepo opisano strukturo zemeljske pregrade, cestne useke v pobočje in naravno strugo, pa tudi slabo opisan visokovodni pretočni kanal, pomanjkanje hidravlično pomembnih visokovodnih zapornic ter slabo odstranjeno premostitev Sotle v zgornjem delu slike. Slednji se v modelu površja kaže kot nekakšen talni prag, a ga v praksi tam seveda ni.



**Slika 6:** Digitalni model pregrade na Vonarskem jezeru, lep primer lidarskih podatkov kot zanesljivega podatkovnega vira v hidravličnih študijah.

**Figure 6:** Digital elevation model of the Vonarje dam – a great example of lidar as a reliable data source in hydraulic studies.

Podatkovni vir, ki rezultate našega modela že v samem začetku obremeni s 15 % napako, bi sicer lahko mirno ovrgli, a treba se je zavedati številnih vidikov, ki govorijo v prid pogostejši uporabi lidarskih podatkov. V kontekstu hidravličnega modeliranja lahko omenjeno napako ovrednotimo šele, ko se zavedamo stopnje nezanesljivosti drugih podatkovnih virov v hidravličnih modelih: tu imamo v mislih predvsem začetne hidrološke pogoje (npr. izračuni pretokov s 100-letno povratno dobo), ki so predvsem za območja s slabo



pokritostjo hidrometeorološke merilne mreže pogosto obremenjeni s širokim intervalom zaupanja. Tudi določitev zelo pomembnega Manningovega koeficienta hidravlične hrapavosti površja je prepuščena precej subjektivnim ocenam stanja v reki in ima pogosto vlogo kompenzatorja slabega opisa topografije in umerjanja modela. Zaradi procesne zahtevnosti dvodimenzionalnih računalniških modelov se v postopku redčenja računske mreže pogosto redči tudi topografija oz. digitalni model površja, s čimer lahko izgubimo pomembne detajle, ki jih je tudi lidar opisal povsem zadovoljivo. Ob dejstvih, kot sta precejšnja spremenljivost površja in težka določljivost številnih empiričnih vhodnih parametrov, se je zato vredno na konkretnem primeru vprašati, ali oz. kje nas mora pri sestavljanju našega hidravličnega modela skrbeti zaradi nekaj centimetrov (!) višinske napake v zajemu topografije.

Zelo pomemben metapodatek končnih rezultatov je tudi dejstvo, da je bil celotni postopek izpeljan izključno avtomatično. Črpanje višinskih vrednosti iz lidarskih podatkovnih virov je potekalo po že predstavljenem algoritmu, sama lokacija izmere profilov pa je bila določena popolnoma neodvisno od pričujoče raziskave. Če bi se izdelave profilov lotili izključno na podlagi lidarskih podatkov, bi ob predhodni vizualizaciji lidarskih podatkov zlahka prepoznali območja, ki so obremenjena z večjo napako (npr. odsotnost meritev, napačno interpolirana območja). S smiselnim premikanjem lokacij profilov že za nekaj metrov gor- ali dolvodno bi se lahko (in še vedno brez ročnih korekcij samih višinskih vrednosti) izognili grobim napakam, ki so v naši avtomatizirani študiji primera pomembno vplivale na kakovost rezultatov.

V nadaljevanju razprave želimo predstaviti še nekaj pomembnih vidikov, ki nam mimo surovih števil lahko pomagajo osvetliti vrednost in uporabnost lidarskih podatkov v hidravličnih študijah.

Najprej želimo poudariti, da rezultatov študije nikakor ne smemo tolmačiti kot analize delovanja lidarja pod vodo. V rezultatih analize se namreč skriva kombinacija več tehničnih omejitev, ki spremljajo laserski zajem (ob)vodnih zemljišč; poleg vode natančen zajem praviloma otežujeta tudi gosta vegetacija in pestra razgibanost površja.

Hidravlični modeli rek se večinoma izdelujejo za potrebe poplavnih študij oz. simulacije visokovodnih razmer. Lidarski podatki pa nasprotno pogosto zajemajo podatke v času običajnih oz. celo nizkovodnih hidroloških razmer. Obseg omočenega (tj. z lidarjem »izgubljenega«) dela profila je zato v primerjavi s poplavno situacijo, na katero so modeli pogosto umerjeni, predvsem na rekah z malo zaježitvami ali velikim povprečnim padcem, zanemarljivo majhen.

Treba je upoštevati tudi dejstvo, da je največja napaka v določanju višin točk večinoma narejena na območjih z večjo globino vode, ki se pogosto nahajajo neposredno nad zožitvami, pragovi, jezovi, prelivi, drčami in podobnimi naravnimi ali hidrotehničnimi elementi. Nasprotno, globlji oz. »ojezerjeni« odseki po navadi ne predstavljajo hidravličnih ozkih grl, zato ob slabšem zajemu ne kvarijo pretočne hidravlične slike toliko kot slabo zajete zožitve.

Pri primerjavi obravnavanih tehnik podatkovnega zajema enostavno ne moremo mimo ekonomske plati: utečena ekipa treh sodelavcev ARSO je zunaj rastne sezone na dan izmerila v povprečju 10 prečnih profilov s povprečno medsebojno oddaljenostjo točk 2 m, lidarski podatki pa na drugi strani na območju celotne Slovenije s stališča uporabnika omogočajo praktično brezplačen in relativno hiter zajem poljubnega števila profilov poljubne gostote. Čeprav so bile na terenu točke izmerjene na vseh pomembnejših lomih prečnega profila in je bila tako osnovna oblika profila dobro vzorčena, se kljub temu zdi na mestu tudi vprašanje, kateri pristop nam vrne boljši opis geometrije rečnega prostora: ročno izmerjeni profili visoke višinske natančnosti, a v prečni gostoti nekaj metrov in vzdolžni gostoti nekaj sto metrov, ali avtomatsko generirani profili malo manjše natančnosti, a v praktično poljubni prečni in vzdolžni gostoti.

V navdušenju nad tehnologijo in dostopnostjo prostorskih podatkov pa nikakor ne smemo pozabiti nepogrešljive vrednosti terenskega ogleda obravnavnega območja, saj še tako dobri podatki in algoritmi ne bodo popolno opisali realnega stanja. Lep primer za to je presenetljivo veliko število naravnih zaježitev in zožitev strug v obliki podrhtih dreves, ki so pogosto tvorila cele pregrade. Nekatere

izbokline v strugah iz lidarskih podatkov tako niso nujno le pokazatelj odsotnosti uspešnih odbojev, pač pa posledica večjih naravnih ovir v strugi, ki bi jih z avtomatskim zaznavanjem prehitro interpretirali kot napačen podatek.

#### 4. Zaključki

Tehnologija lidar kot vrsta daljinskega zaznavanja omogoča relativno hiter in natančen zajem izredno velikih količin prostorskih podatkov. Naraščajoča cenovna dostopnost, kakovost produktov in masovnost zajema so glavni razlogi, da postaja vse bolj priljubljena alternativa klasičnim geodetskim meritvam na številnih področjih, še posebej tam, kjer ni potrebe po natančnosti najvišjega razreda. Enostavno uporabo lidarja v vodarstvu in hidrotehniki otežuje predvsem njegova nezanesljivost pri pridobivanju podatkov o vodni gladini kot tudi o terenu pod vodno gladino.

Rezultati analize potrjujejo dejstvo, da zaradi motenega delovanja lidarskih žarkov v vodnih telesih uporaba lidarskih podatkov kot izključnega topografskega vira v hidravličnih študijah nikakor ni mogoča, saj tehnične omejitve lidarskega snemanja zajema točk ne omogočajo ravno na mestih, ki so hidravlično pogosto najpomembnejša: okolica prepustov, strmih ali zaprtih kompleksnejših hidrotehničnih objektov.

Topografski podatki masovnega lidarskega snemanja zato zaenkrat vsaj na območju vodnih teles še nikakor ne morejo popolnoma nadomestiti klasičnih metod za zajem prostorskih podatkov. Kljub temu pa ugotavljamo, da lahko ob predhodni vizualizaciji smiselna, kritična in predvsem previdna uporaba lidarskih podatkov praktično brez večjih posledic nudi ogromen potencial za veliko ekonomsko in časovno optimizacijo klasičnih geodetskih snemanj. Naloga slednjih pa ostaja kakovosten zajem hidravlično kompleksnejših odsekov, pomembnejših globljih predelov, snemanje hidrotehničnih objektov, mostov in splošen nadzor kakovosti lidarskih podatkov. Slovenija je s svojo 100-odstotno pokritostjo z lidarskimi podatki in njihovo brezplačno dostopnostjo svojevrstna posebnost v svetovnem merilu. Prosto dostopni lidarski podatki bodo še

nekaj let večinoma dovolj aktualni, da bodo predstavljali izredno uporaben vir tudi za uporabo v hidravličnem modeliranju, še posebej na območjih brez kompleksnejših hidrotehničnih objektov ali naravnih pretočnih ozkih grl. Velika škoda bi bila, če jih samo zaradi nepoznavanja tehnologije, splošnega nezaupanja v zanesljivost rezultatov ali pomanjkanja primernih orodij za obdelavo ne bi izkoristili tudi na področju hidravličnega modeliranja. Ob pravilni uporabi lahko dolgoročno vsekakor doprinesejo k hitrejšim, cenejšim in tudi kakovostnejšim analizam v hidravličnem modeliranju.

#### Viri

Geodetski inštitut (2014). Izvedba laserskega skeniranja Slovenije Blok 14 – tehnično poročilo o izdelavi izdelkov. Geodetski inštitut, Ljubljana. [http://gis.arso.gov.si/related/lidar\\_porocila/b\\_35\\_izdela\\_va\\_izdelkov.pdf](http://gis.arso.gov.si/related/lidar_porocila/b_35_izdela_va_izdelkov.pdf) (pridobljeno 1. 8. 2017).

eVode (2017). Spletni portal eVode s pregledovalnikom za prenos LIDAR podatkov Slovenije: <http://evode.arso.gov.si> (pridobljeno 20. 7. 2017).

FRISCO1 (2017). Spletna stran projekta FRISCO1: <https://frisco-project.eu/sl/> (pridobljeno 1. 8. 2017).

Mandlbürger, G., Pfennigbauer, M., Pfeifer, N. (2013). Analyzing near water surface penetration in laser bathymetry – a case study at the river Pielach. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-5/W2, 2013, Antalya, 175–180.

Manning, R. (1891). On the flow of water in open channels and pipes. *Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland* 20, 161–207.

Triglav Čekada, M., Bric, V. (2015). Končan je projekt laserskega skeniranja Slovenije. *Geodetski vestnik* 59(3), 586–592.

Waters, K. (2013). Bathymetry Lidar: harder than it looks. Noaa Digital Coast GeoZone. <https://geozoneblog.wordpress.com/2013/09/25/bathymetry-lidar-harder-than-it-looks/> (pridobljeno 1. 8. 2017).