

PRIMERJAVA METOD ZA GEOMORFOMETRIČNE ANALIZE HRAPAVOSTI POVRŠJA NA PRIMERU VIPAVSKE DOLINE

COMPARISON OF METHODS FOR GEOMORPHOMETRIC ANALYSIS OF SURFACE ROUGHNESS IN THE VIPAVA VALLEY

Tomislav Popit, Blaž Supej, Žiga Kokalj, Timotej Verbošek

UDK: 551.4:528.8.044.6(497.4)Vipavska dol.

Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01

Prispelo: 31. 3. 2016

Sprejeto: 4. 6. 2016

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2016.02.227-240

SCIENTIFIC ARTICLE

Received: 31. 3. 2016

Accepted: 4. 6. 2016

IZVLEČEK

Pri opredelitvi prostorske spremenljivosti oblik površja na primarnih kamninah in njihovih pobočnih gruščih na severnem robu Vipavske doline smo za potrebe prostorskih analiz izbrali metodo, ki najizraziteje podaja posamezne geomorfometrične elemente. Pri pregledu in izbiri geomorfometričnih metod na podlagi laserskega skeniranja površja smo preizkusili morfometrične kazalnike hrpavosti površja, ki so poleg ukrivljenosti površja najbolj v rabi. Detajlno smo proučili pet metod, ki jih lahko uporabimo za analizo hrpavosti površja in so potencialno uporabne za proučevanje kamninske podlage in predvsem gruščnatih pobočnih sedimentov. Kot najprimernejša se je izkazala metoda variabilnosti višin, ki je uporabno dopolnilo tradicionalnemu terenskemu evidentiranju, izdelani zemljevidi variabilnosti višin pa so lahko nepogrešljiv pripomoček pri geološkem in geomorfološkem kartiranju.

ABSTRACT

A method that gives the clearest individual geomorphometric elements for the requirements of spatial analysis was selected to define the spatial variability of landforms on primary bedrocks and their slope deposits on the northern edge of the Vipava Valley in Slovenia. We tested the most frequently used morphometric indicators of surface roughness, other than the curvature of the surface, and reviewed them based on their performance with lidar data. We analysed in detail five methods that can be used for surface roughness evaluation and that have a potential for the study of the bedrock and slope deposits. Height variability was identified as the most appropriate method. We have also found that maps of properly portrayed height variability can be an indispensable tool for geological and geomorphological mapping.

KLJUČNE BESEDE

geomorfologija, lidar, hrpavost površja, variabilnost višin, Vipavska dolina

KEY WORDS

geomorphology, lidar, surface roughness, height variability, Vipava Valley

1 UVOD

Kamninska sestava in reliefna izoblikovanost sta na območju Vipavske doline pestri in raznoliki. Topografijo Vipavske doline določa specifična kamninska zgradba narivnega sistema. Njena severna in severovzhodna karbonatna ostenja določata narivna robova Trnovskega in Hrušiškega pokrova, ki sta del narivnega sistema Zunanjih Dinaridov (Placer, 1998; Vrabc in Fodor, 2006) in sta zgrajena iz mezozojskih karbonatnih kamnin, medtem ko spodnje, položnejše dele pobočij gradi naguban in tektonsko porušen eocenski fliš. Pod čelom narivnega roba se pojavljajo obsežne akumulacije karbonatnega gruščja, ki so značilne za ves severni in severovzhodni rob Vipavske doline.

Vpadi plasti in močna tektonska pretrtost kamnin povzročajo veliko mehansko nekoherentnost kamnin, ki razpadajo in se v obliki melišč odlagajo pod vznožjem sten Nanosa. V zgornjem delu, na prevojih pobočij ob vznožjih strmih karbonatnih sten na meji z relativno položnim flišnim ozemljem, so odložena večja ali manjša telesa melišč, sestavljena iz nesprijetega in deloma sprijetega karbonatnega gruščja. Nižje po pobočju se karbonatni gruščji širijo v obliki velikih jezičastih in pahljačastih sedimentnih teles, ki so odložena na flišni podlagi in se razširjajo v dno Vipavske doline, na primer plaz Selo (Popit in Košir, 2003). Zaradi različnih litoloških lastnosti materiala (karbonat in fliš) je bilo pričakovati, da bo tudi stopnja hrapavosti površja teh dveh materialov različna. Sestava in geneza kvartarnih sedimentov sta na območju celotnega roba izredno kompleksni (Popit in Košir, 2010; Popit s sod., 2014a; Popit s sod., 2014b; Popit s sod., 2014c), zato je tudi geomorfometrična analiza posameznih sedimentnih teles pomemben način proučevanja sedimentacijskih procesov.

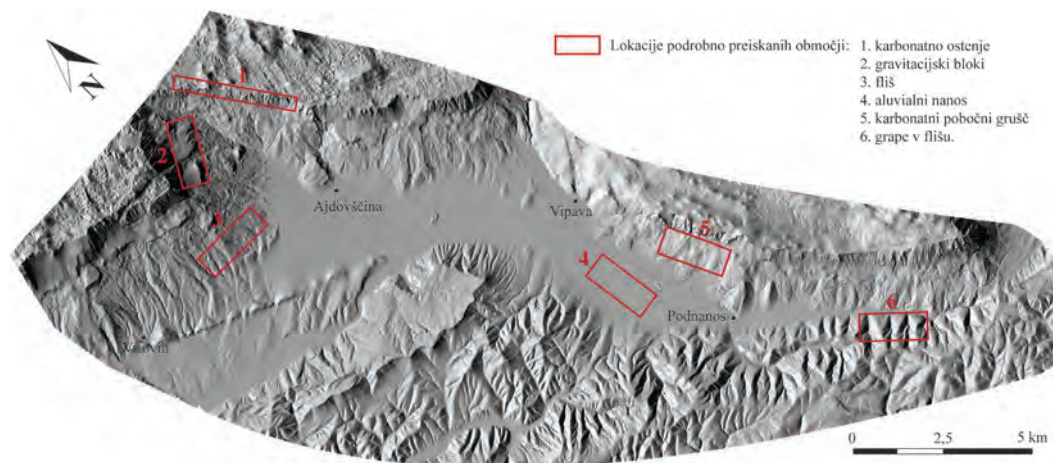
Z ugotavljanjem geomorfometričnih lastnosti in njihovim prostorskim spreminjanjem lahko izoblikovanost površja tudi kvantitativno opredelimo (Hrvat in Perko, 2003; Ruszkiczay-Rüdiger s sod., 2009). Kvantitativno merjenje oblik površja omogoča objektivno primerjavo reliefnih oblik (Ruszkiczay-Rüdiger s sod., 2009) in se pogosto uporablja pri prepoznavanju in opredeljevanju zemeljskega površja (Scott in Pinter, 2003; Ruszkiczay-Rüdiger s sod., 2009), modeliranju površinskih procesov in tektonski geomorfologiji (na primer Jordan s sod., 2005).

Detajlni analitično senčen digitalni model reliefa (DMR), ki smo ga pridobili z zračnim laserskim skeniranjem (lidarjem), omogoča kakovostne vizualne preglede terena na širšem območju Vipavske doline od Razdrtega na jugovzhodni strani prek Vipave, Ajdovščine, Predmeje in vse do Vrtovina na zahodni strani (slika 1). Celotno območje je z izjemo strmih sten na jugozahodnem območju Nanosa in Trnovskega gozda ter v osrednjem delu Vipavske doline pod gostim rastjem, zato so bili lidarski podatki zelo primerni in uporabni za proučevanje različnih reliefnih oblik na tem območju. Za obdelavo smo izbrali šest območij, in sicer: karbonatno ostenje, gravitacijska bloka, fliš, aluvialni nanos, karbonatni pobočni grušč in grape v flišu (slika 1). Vsa območja obsegajo enako površino, in sicer 155 ha.

V okviru geomorfometričnih analiz smo uporabili več morfometričnih kazalnikov hrapavosti površja (angl. *surface roughness*), ki so poleg ukrivljenosti površja zelo uporabni za proučevanje in prepoznavanje fosilnih in recentnih pobočnih sedimentov. »Hrapavost« površja v smislu popisa površine veliko pove o izoblikovanosti površja. Tudi v nasprotnem primeru, kadar je hrapavost površja nizka

oziroma je ni, to območje poimenujemo »zglajeno«. Nekateri hrapavost površja poimenujejo tudi »razgibanost« površja (Hrvat in Perko, 2003; Perko, 2007), ki pa je lahko v nekaterih primerih (merilih) zavajajoča. Območje je namreč lahko zelo razgibano v obliki hribov in dolin, njegovo površje pa izredno gladko, zato menimo, da je uporaba izraza »hrapavost« površja za obravnavani primer bolj primerna.

Kvantifikacijo variabilnosti hrapavosti površja smo izvedli z metodami, ki so v ta namen na voljo v programskem orodju ESRI ArcGIS. Rezultate smo ovrednotili in izbrali najboljšo metodo za prepoznavanje posameznih geomorfometričnih elementov na površini kvartarnih pobočnih sedimentov.



Slika 1: Senčen modela reliefa s prostorsko ločljivostjo 1 meter dela Vipavske doline in položaji detajlno obravnavanih območij.

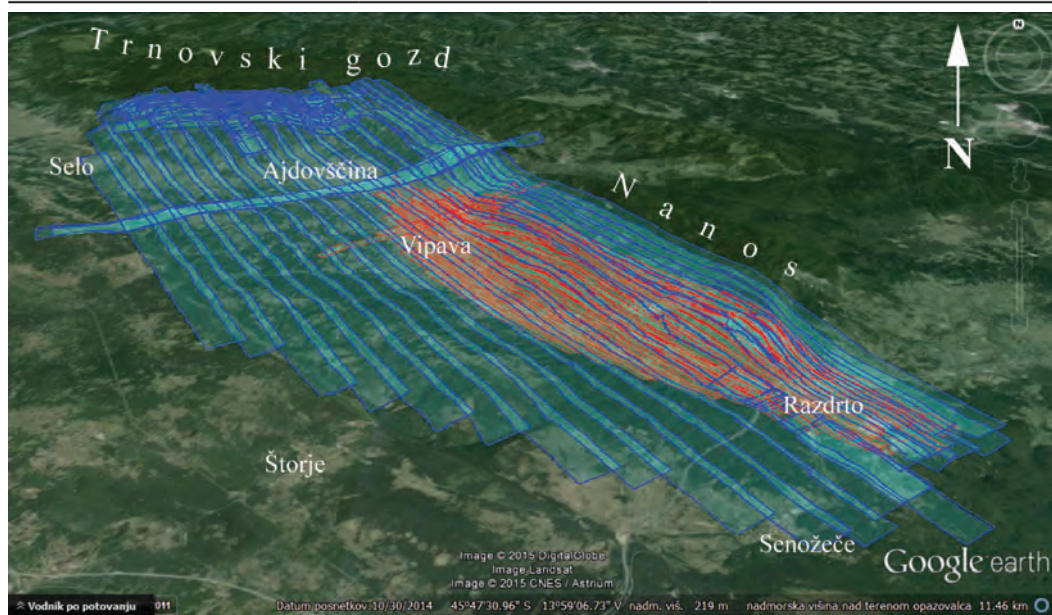
2 METODE

2.1 Lasersko skeniranje in izračun digitalnega modela reliefa

Oblak lidarskih točk za raziskavo je zagotovilo podjetje Geodetski inženiring Maribor, d. o. o. (Geoin, 2011). Podatki so bili zajeti s sistemom za lidarsko snemanje Optech ALMT Gemini, nameščenim na turbopropellerskem letalu Canguro SF600. Navedeni lidarski sistem lahko podatke zajema s frekvenco snemanja (angl. *scanning frequency*, hitrost skeniranja vidnega polja) do 70 Hz in hitrostjo oddajanja laserskega pulza (angl. *pulse repetition rate*, hitrost oddajanja in sprejemanja laserskega žarka) med 33 in 167 kHz, pri čemer je najvišja višina leta 4000 metrov. Snemalne parametre in lastnosti snemanja Vipavske doline prikazuje preglednica 1. Lidarsko snemanje Vipavske doline je potekalo v 12 kilometrov širokem in 30 kilometrov dolgem pasu, in sicer v dveh delih, med Razdrtim prek Ajdovščine vse do Sela ter zaradi višinske razlike terena na dveh različnih nadmorskih višinah. Dne 16. aprila 2010 je bilo posneto območje Rebrnic na višini 700 in 1000 metrov, kasneje, 24. junija, pa v dveh delih še celotno območje med Razdrtim in Selom ter detajlno še širše območje plazu Slano blato (slika 2). Dosežena je bila srednja gostota vseh odbojev 2,6 točke/m² (Triglav-Čekada, 2010), oziroma gostota talnih točk na poraščenem terenu 0,8 točke/m².

Preglednica 1: Snemalni parametri lidarskega snemanja.

Parameter	Snemanje 16. 4. 2010	Snemanje 24. 6. 2010
Instrument	Optech ALTM GEMINI	Optech ALTM GEMINI
Platforma	letalo	letalo
Skupna velikost območja	12 x 30 km	12 x 30 km
Višina leta nad terenom	700 in 1000 m	700 in 1000 m
Prekrivanje preletnih linij	30 %	23 %
Hitrost leta	110 kts (203 km/h)	110 kts (203 km/h)
Število snemalnih linij	16 in 15 (dve misiji)	17
Širina med posameznimi pasovi	170 m	710 m
Frekvenca laserja	100 kHz	70 kHz
Frekvenca snemanja	70 Hz	34 Hz
Kot snemanja	10 in 7 stopinj	16 stopinj
Razdalja med točkami prečno	0,34 m	0,98 m
Razdalja med točkami vzdolžno	0,40 m	0,83 m
Gostota točk	7,2 točke/m ²	1,4 točke/m ²
Širina snemalnega pasu	250 m	920 m
Višinska napaka laserskih meritev	med 5 in 8 cm	med 5 in 8 cm
Prostorska ločljivost DMV	1 m	1 m



Slika 2: Obravnavano območje in poti letala. Rdeče linije označujejo snemalne pasove, katerih meritve so bile izvedene 16. aprila 2010, modre pa snemalne pasove, katerih meritve so bile izvedene 24. junija 2010.

Digitalni model reliefa s prostorsko ločljivostjo 1 m je bil pridobljen s kombinacijo filtriranja in odstranjevanja netalnih točk s prilagodljivim goščenjem mreže neenakih trikotnikov (ATIN – angl. *adaptive triangulated irregular network densification*) (Axelsson, 2000; izvedba v Terrascan 11) ter rastriranja s ponavljajočo se interpolacijo (REIN – angl. *repetitive interpolation*, Kobler s sod., 2007). Algoritem REIN uporablja dvostopenjski proces pridobivanja rastrskega reliefa. V prvi fazi se z geomorfološkim filtrom odstranijo vsi odboji, ki ležijo pod tlemi, in večina, vendar ne nujno vsi, odboji, ki ležijo nad terenom. V drugi fazi so iz prvotno filtriranega oblaka točk odstranjeni še preostali netalni odboji ter izdelan rastrski model reliefa (Popit s sod., 2014a). Prvo fazo, torej geomorfološki filter, smo nadomestili s filtrom ATIN, katerega prednost je sposobnost obravnavanja nepovezanega površja, kar je posebno uporabna značilnost na urbanih območjih (Sithole in Vosselman, 2004). S tem smo združili prednosti obeh algoritmov, torej dobro delovanje v urbanem okolju (ATIN) in na nagnjenem gozdnatem terenu (REIN). Z večkratno triangulacijo rastriran relief je tudi primernejši za nadaljnjo obdelavo kot relief, pridobljen z neposrednim rastriranjem, saj algoritem REIN uporablja več ocen višine terena za vsako posamezno točko rastrske mreže, ki jih dobi z interpolacijo z okoliških točk odboja v mreži neenakih trikotnikov (TIN).

Model reliefa vsebuje nekatere grobe napake, ki so posledica neprekrivajočih se preletnih linij. Manjkajoče točke lidarskih meritev so bile nadomeščene z interpoliranimi točkami precej bolj grobega, petmetrskega državnega modela reliefa, zato na teh območjih, skupne površine 0,31 km², ni bilo mogoče slediti drobni krajevni izoblikovanosti reliefa.

V pomoč vizualnemu pregledu smo z orodjem Relief Visualization Toolbox (različica 1.1, <http://iaps.zrc-sazu.si/en/rvt>) iz modela terena izračunali senčen modela terena in delež vidnega neba. Njuna kombinacija namreč poudari robove, vdolbine in izbokline, kar olajša geomorfološko interpretacijo terena (Kokalj s sod., 2011; Zakšek s sod., 2011).

2.2 Hrapavost površja

Za geomorfometrične analize smo uporabili kazalnike hrapavost površja, ki so zelo uporabni tudi pri proučevanju in prepoznavanju fosilnih plazov (Staley s sod., 2006; Cavalli, 2008; Cavalli in Marchi, 2008; Jaboyedoff s sod., 2012) in/ali recentnih plazov (McKean in Roering, 2004; Glenn s sod., 2006; Van Den Eeckhaut s sod., 2007, 2011; Amundsen s sod., 2010).

Programsko orodje ESRI ArcGIS (ESRI, 2012) omogoča številne pristope za analizo hrapavosti površja. Najbolj poznani so (<http://gis4geomorphology.com/roughness-topographic-position>):

- relativna lega (angl. *Relative Position*; Jenness 2002),
- variabilnost naklonov (angl. *Slope Variability*; Ruszkiczay-Rudiger s sod., 2009),
- variabilnost višin (angl. *Height Variability*; Ruszkiczay-Rudiger s sod., 2009),
- hrapavost v merilu hidrografskega bazenov (angl. *Basin-scale Ruggedness*; Collins in Bras, 2010),
- razmerje med 2D- in 3D-območjem (angl. *2D Area : 3D Area Ratio*; Berry, 2007),
- Meltonova vrednost hrapavosti (angl. *Melton Ruggedness Number*; Melton, 1965),
- indeks TRI (*Topographic Ruggedness Index*) po Rileyju (angl. *Topographic Ruggedness Index Riley*; Riley, DeGloria in Elliot, 1999),

- indeks TRI po Nellemannu (angl. *Topographic Ruggedness Index Nellemann*; Nellemann in Fry, 1995),
- indeks hrapavosti RIX (Ruggedness IndeX) (angl. *RIX Site Ruggedness Index*; Mortensen s sod., 2007; Bowen and Mortensen, 2004),
- standardni odklon naklona (angl. *Standard Deviation of Slope*) (Grohmann s sod., 2011),
- prvi odvod smeri toka (angl. *1st Derivative of Flow Direction*).

Izmed naštetih metod smo uporabili le nekatere, saj druge niso ustrezale osnovnih kriterijem uporabe. Tako nismo uporabili hrapavosti v merilu hidrografskih porečij, ker je metoda uporabna za topografsko sklenjene hidrografske bazene, čemur v tem prispevku analizirano območje ne ustreza. Iz istega razloga nismo uporabili Meltonove vrednosti hrapavosti in metode prvega odvoda smeri toka. Metoda razmerja med 2D- in 3D-območjem ni primerna, ker temelji na primerjavi površine na sklenjenem območju in ker nanjo vpliva tudi ločljivost rastrskih podatkov. Indeksa TRI po Nellemannu (Nellemann in Fry, 1995) nismo računali, ker temelji na metodi z izohipsami in preseki z umetnimi linijami na terenu (česar na analiziranem območju ni). Indeksa hrapavosti RIX (Mortensen s sod., 2007; Bowen in Mortensen, 2004) nismo uporabili, ker zahteva umetno postavljeno mejo kritičnega naklona.

V nadaljevanju so na kratko povzete proučene in preizkušene metode. Vse temeljijo na računskih operacijah v iskalnem oknu 3 krat 3 celice oziroma 3 krat 3 metre, ki je optimalno za tovrstne izračune pri originalni ločljivosti podatkov 1 meter. Rezultati pri tako majhnem iskalnem oknu namreč prikazujejo zelo podrobno hrapavost površja, pri večjih iskalnih oknih pa so bili za naš namen detajli reliefa že preveč posplošeni.

1. **Relativna lega** (angl. *Relative position*; Jenness 2002). Gre za pristop, kjer vsaki centralni celici v iskalnem oknu pripišemo vrednost:

$$\frac{DMV - DMV_{min}}{DMV_{max} - DMV_{min}}$$

kjer so:

- DMV – višina v sredinski celici iskalnega okna,
- DMV_{min} – najmanjša višina v iskalnem oknu in
- DMV_{max} – največja višina v iskalnem oknu.

Rezultat je brezdimenzijsko število, ki podaja »relativno lego« glade na najmanjšo višino v okolici. Število se večja z večanjem razlike med najmanjšo in največjo vrednostjo ter bližanjem vrednosti proučevane celice najvišji vrednosti.

2. **Variabilnost naklonov** (angl. *Slope Variability*; Ruszkiczay-Rudiger s sod., 2009). Metoda poda razliko med največjim in najmanjšim naklonom: $S_{max} - S_{min}$. Rezultat je podan kot razlika naklonov v odstotkih ali stopinjah.

Uporabili smo tudi spremenjeno metodo variabilnosti naklona, ki je opisana v nadaljevanju pri rezultatih.

3. **Indeks TRI po Rileyju** (angl. *TRI Riley*; Riley s sod., 1999). Metoda poda koren razlike kvadratov največje in najmanjše višine:

$$TRI = \sqrt{|DMV_{max}^2 - DMV_{min}^2|}$$

4. **Standardni odklon naklona** (angl. *Standard Deviation of Slope*) (Grohmann s sod., 2011). Metoda poda spremenljivost naklonov v iskalnem oknu. Rezultat je podan v odstotkih ali stopinjah, odvisno od vhodnih podatkov.
5. **Variabilnost višin** (angl. *Height Variability*) je podobna variabilnosti naklonov (angl. *slope variability*), kot je opredeljena v programskem orodju ArcGIS (Ruszkicay-Rudiger s sod., 2009), le da namesto naklonov upoštevamo razliko med največjo in najmanjšo višino v iskalnem oknu: $DMV_{\max} - DMV_{\min}$ (Popit in Verbovšek, 2013). Rezultat je zemljevid razlik višin v metrih.

Poleg vizualnih primerjav rezultatov smo opravili tudi kvantitativno primerjavo vrednosti hrapavosti med posameznimi območji oziroma litološkimi enotami po posameznih metodah. Razlike smo ugotavljali statistično s Kruskal-Wallisovim testom, primerjali pa smo medsebojno po dve analizirani območji v parih.

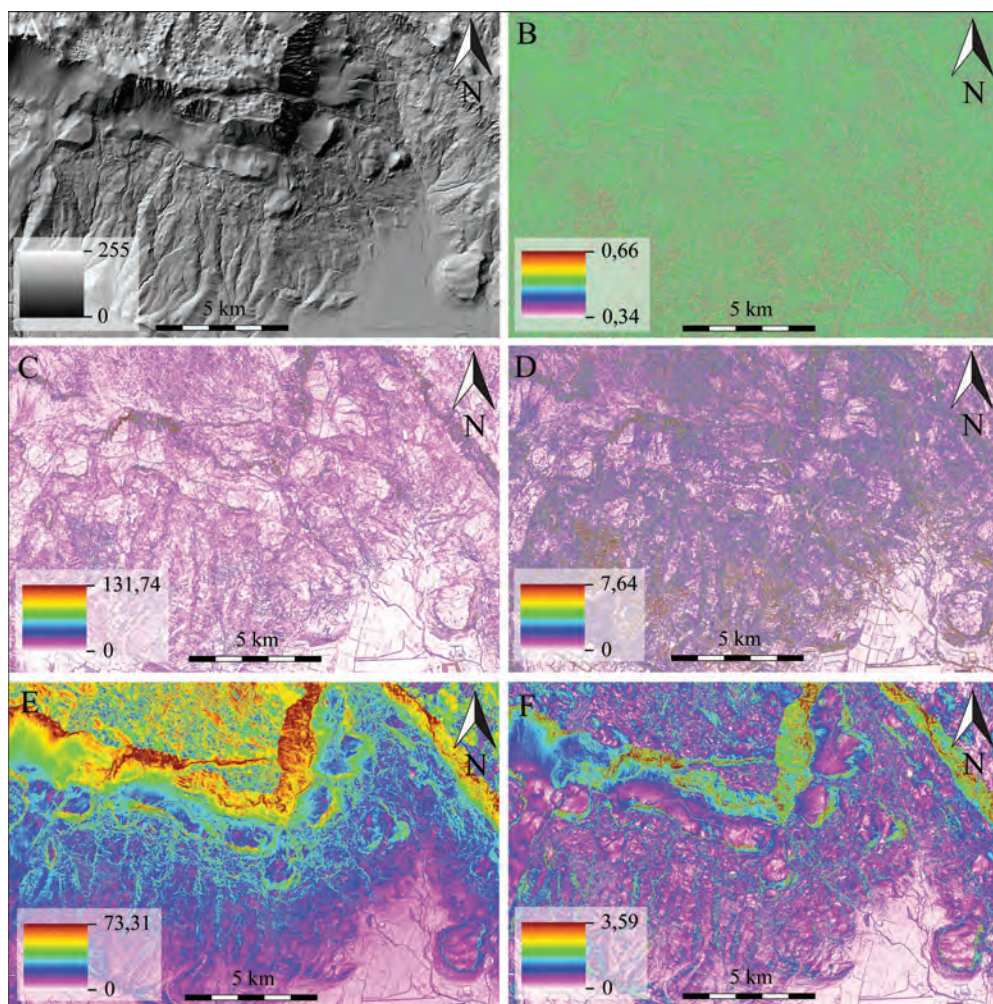
3 REZULTATI IN RAZPRAVA

Rezultati uporabljenih metod se zelo razlikujejo pri prikazovanju hrapavosti površja. Pomembno vlogo ima tudi subjektivni faktor izbora barvne lestvice in načina prikaza, saj s tem poudarimo ali skrijemo razlike v hrapavosti. Pri vseh zemljevidih smo v prid boljše primerljivosti med območji uporabili isto barvno lestvico ter linearni razteg med najmanjšo in največjo prikazano vrednostjo. Vizualno interpretacijo izdelanih zemljevidov smo podprli z numerično opredelitvijo razlik med območji in metodami z analizo histogramov.

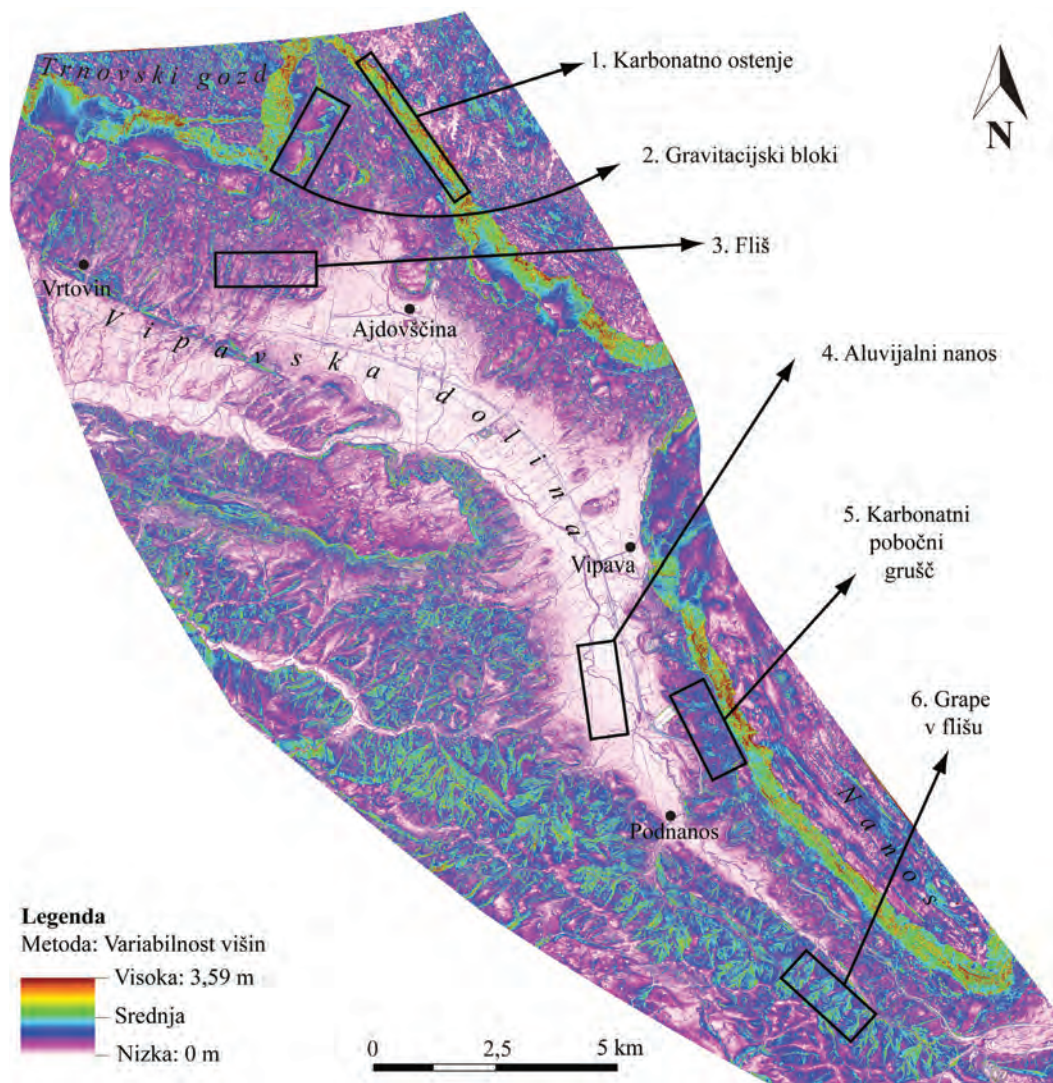
Rezultati metode *relativne lege* ne odsevajo dobro razlik v hrapavosti površja (slika 3B), saj na metodo močno vpliva majhno iskalno okno, zato prevladujejo srednje vrednosti in so dobro vidni le zelo poudarjeni robovi (na primer robovi nasutij in jarkov). Na karti ni jasno vidnih razlik med območji z različnimi lastnostmi, česar ne izboljša niti uporaba večjega iskalnega okna. *Variabilnost naklonov* (slika 3C) je vizualno lažje interpretirati, saj se na zemljevidu dobro ločijo manj hrapava območja od bolj hrapavih. Izraziteje so poudarjene ekstremne vrednosti, torej ravna območja in zelo razgibana območja, srednjih vrednosti je manj. Podobno kot variabilnost naklonov tudi *standardni odklon naklona* (slika 3D) poudari le nekatere razrede in zato hrapavosti ne prikaže jasno. *Indeks TRI po Rileyju* omogoča jasn prikaz razlik med različno hrapavimi območji površja (slika 3E). Tako so jasno vidne posamezne morfološke oblike, kot so robovi sedimentnih teles, strma ostenja karbonatnih kamnin in posamezni odlomni robovi plazov. Zaradi kvadriranja vrednosti pa na rezultat vpliva absolutna nadmorska višina. Zato da na primer 10-metrski razpon višin pri nižjih nadmorskih višinah drugačen rezultat kot enak razpon višin pri višjih nadmorskih višinah. Metoda je zato po našem mnenju manj ustrezna za analizo hrapavosti površja, kjer bi morale biti poudarjene le krajevne razlike, neodvisno od absolutne višine. Tej težavi se izogne metoda *variabilnosti višin*, kot jo podrobno opisujeta Popit in Verbovšek (2013), in zato še jasneje podaja območja z različno hrapavostjo površja (slika 3F). Rezultat je zelo podoben analizi TRI po Rileyju, pri zelo majhnem iskalnem oknu tudi sliki naklonov, vendar z nekoliko bolj poudarjenimi razlikami. Po našem mnenju sta za tovrstne analize metoda variabilnosti višin in TRI po Rileyju edini primerni metodi, pri čemer je metoda variabilnosti višin iz zgoraj opisanih razlogov boljša.

Primerjavo med vsemi analiziranimi metodami smo izdelali na podlagi histogramov, kjer so prikazane porazdelitve vrednosti hrapavosti površja na izbranih območjih. Izmed vseh analiziranih metod smo na

podlagi vizualne interpretacije najboljše rezultate pridobili z metodo variabilnosti višin (slika 4). Metoda dobro prikazuje razlike v hrapavosti površja glede na litološko raznolikost dveh vrst kamnin, in sicer karbonatnega grušča, ki pripada posameznim sedimentnim telesom, karbonatnemu ostenju in večjim splazelim gravitacijskim blokom, ter flišnih kamnin, ki so matična kamnina ter so danes v podlagi in neposredni okolici kvartarnih nanosov. Karbonatni pobočni grušč ali kamnine na robovih sedimentnih teles in gravitacijskih blokov imajo povečini visoko variabilnost višin, znotraj teles pa so območja večinoma zglajena. S takšnim kontrastom v stopnji hrapavosti površja so posamezna sedimentna telesa zelo dobro prepoznavna in močno izstopajo na flišni podlagi. Fliš ima z izjemo grap, ki so vrezane v flišno podlago, nizko variabilnost višin in je torej območje z nizko stopnjo hrapavosti površja, površje pa je na teh območjih razmeroma gladko (slika 4).



Slika 3: Različne metode hrapavosti površja in senčen model reliefa s prostorsko ločljivostjo 1 m: (A) senčen DMR (1 x 1 m); (B) relativna lega (angl. *Relative Position*); (C) variabilnosti naklonov (angl. *Slope Variability*); (D) standardni odklon naklonov (angl. *Standard Deviation of Slope*); (E) TRI (angl. *TRI Riley*); (F) variabilnost višin (angl. *Height Variability*).



Slika 4: Zemljevid variabilnosti višin (angl. *Height Variability*) in označena posamezna detajlno proučevana območja.

Barve v legendi na zemljevidu (sliki 3 in 4) smo razdelili na tri stopnje, ki označujejo nizko, srednjo in visoko variabilnost višin. Odenki belih in vijoličnih ustrezajo nerazgibanemu površju (na primer dno Vipavske doline), modro-zeleni toni barv ustrezajo srednjim vrednostim, topli (rumeno-rjavi) toni barv pa ustrezajo območjem z grobo oziroma hrapavo površino (na primer ostenje Čavna na Trnovskem gozdu, slika 4). Prav barvni prikaz omogoča ponazoritev območij z nizko in/ali visoko variabilnostjo višin in je odlično dopolnilo senčnim modelom reliefa. Raznoliko hrapavost površja sedimentnih teles in njihove neposredne okolice je mogoče razbrati tudi z vizualno interpretacijo senčnega modela reliefa (slika 3A), vendar izračunani sloj variabilnosti višin omogoča tudi dobro ločevanje sedimentacijskih procesov v posameznem telesu (Popit in Verbovšek, 2013). Na pod-

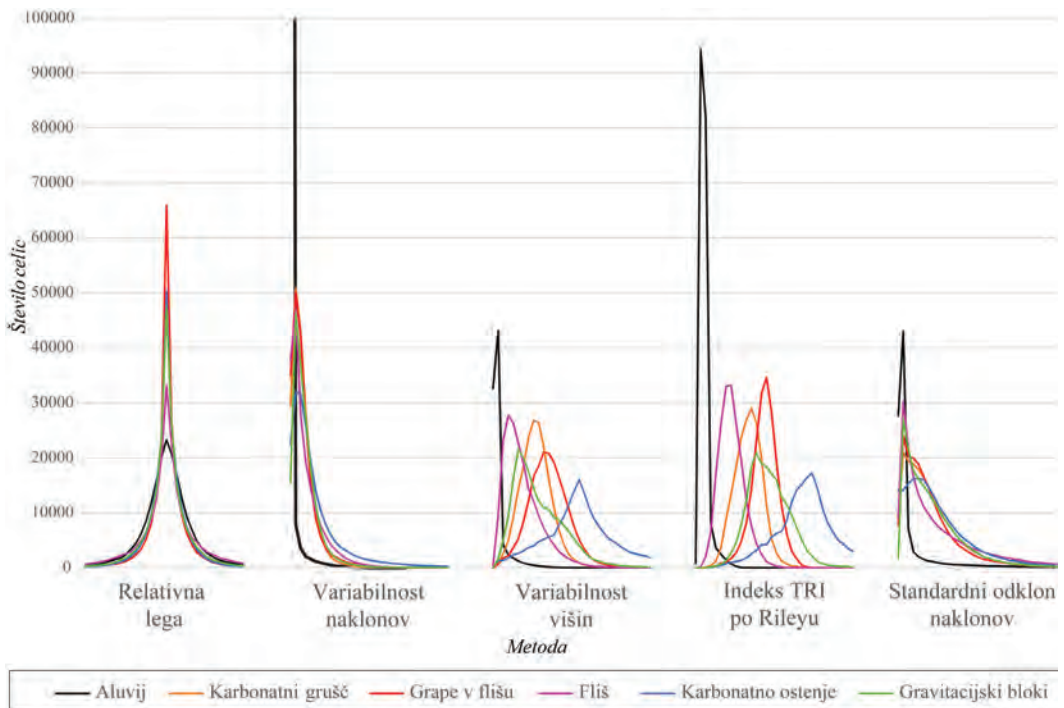
lagi analize hrapavosti površja sedimentnega telesa Sveta Magdalena na Rebrnicah sta Popit in Verbovšek (2013) ugotovila, da se vrednost hrapavosti znotraj posameznega telesa zelo spreminja. Višja vrednost hrapavosti površja se pojavlja v obrobem in spodnjem delu v obliki dobro izražene pahljačaste oblike telesa, ki kaže na sedimentni gravitacijski tok. Prav tako so bili prepoznani nekateri drugi geomorfometrični elementi, kot na primer usločeni (lokasti) grebeni, ki lahko kažejo na zaporedne valove v nenasičenem masnem toku, ki prekrivajo predhodni drobir (Major, 1994; Popit in Verbovšek, 2013).

V prid kvantitativni opredelitvi ocene hrapavosti površja smo izdelali histograme, kjer so na abscisi prikazane različne stopnje hrapavosti površja (normirane na vrednosti od 1 do 256 in združene v 32 enako velikih razredov), na ordinati pa je število rastrskih celic, ki v danem območju ustrezajo določeni vrednosti na zemljevidu (slika 5). Skupno število točk oziroma podatkov v histogramih je enako, ker zajemajo območja enake površine. Do zelo majhnih razlik med številom celic posameznih območij prihaja zaradi določitve območij v vektorski obliki in računanjem v rastrski obliki, vendar so te razlike zanemarljive. Večjo hrapavost površja izražajo v desno pomaknjeni histogrami (asimetričnost oziroma vrh na desni), saj odražajo višje število celic z visokimi vrednostmi hrapavosti površja. Podobno kot na sliki 4B je tudi iz histogramov razvidno, da metoda relativna lega slabo odseva razlike v hrapavosti površja (slika 5). Prevladujoča srednja stopnja hrapavosti površja povzroči, da imajo vsa območja visoke vrednosti (višje vrhove) v srednjem delu histograma. Območja, ki so močno gladka (na primer območje aluvialnega nanosa), ali izrazito hrapava območja (na primer karbonatno ostenje) pa so v histogramu metode slabo prepoznana oziroma so kumulativne vrednosti zelo nizke v primerjavi z vrednostmi srednje stopnje hrapavosti površja. Histogrami metod variabilnost naklonov in standardni odklon naklona (slika 5) so si podobni, enako kot velja za prej opisane zemljevide (sliki 3C in D). Ti metodi sta sicer bolj uporabni kot prva (relativna lega), saj prikažeta večjo razliko med območji z manjšo in večjo stopnjo hrapavosti površja. Močno so poudarjeni viški, torej gladka in hrapava območja. Pri metodi variabilnosti naklonov je vrednost za aluvij enaka 580.084 in presega mejo na grafu (100.000) (slika 5). Histogrami na sliki 5 prikazujejo izredno visoke vrednosti (visoke vrhove) zglaženega površja na območju aluvialnega nanosa, saj so krivulje na histogramih pri vseh metodah pomaknjene na levo stran, torej na visoko število nizkih vrednosti hrapavosti.

Podobno kot pri zemljevidih, ki prikazujejo indeks TRI po Rileyju (slika 3E) in variabilnost višin (slika 3F), je tudi pri histogramih teh metod (slika 5) najlaže prepoznati razlike v hrapavosti površja. V primerjavi z drugimi metodami, kjer se krivulje na histogramih prekrivajo, je za ti metodi razvidno, da se krivulje dobro ločijo med seboj. Obe metodi sta torej sposobni ločiti litoško drugačna območja. Podani so vsi razredi hrapavosti površja, tako območja z zglaženim kot tudi hrapavim površjem in vsemi vmesnimi vrednostmi stopnje hrapavosti površja. Na histogramu metod variabilnosti višin in TRI po Rileyju (slika 5) lahko vidimo, da najvišje vrednosti visoke stopnje hrapavosti površja (razvidno kot zamik histograma v desno proti visokim vrednostim) pripadajo karbonatnemu ostenju in grapam v flišu, nekoliko manj pa karbonatnemu grušču in splazelim gravitacijskim blokom. Območje aluvialnega nanosa ima v primerjavi z drugimi območji podobno kot že v zgoraj navedenih histogramih (slika 5) nizko hrapavost površja ter izredno

nizke vrednosti srednje stopnje hrapavosti površja. Podobno velja za območje fliša, kjer je najbolj pogosta vrednost nizke stopnje hrapavosti površja ter postopoma manj pogoste vrednosti srednje in redko visoke stopnje hrapavosti površja.

Kvantitativna primerjava vrednosti hrapavosti površja med posameznimi območji oziroma litološkimi enotami po posameznih metodah s Kruskal-Wallisovim testom (preglednica 2) pokaže, da se statistično (95-odstotna stopnja zaupanja) večinoma ločijo aluvialni nanosi in karbonatno ostenje od ostalih skupin, saj največ metod pokaže statistične razlike. Prav tako se loči fliš od večine ostalih litoloških skupin. Razlike so komajda opazne med grapami v flišu in rotacijskimi bloki ter karbonatnim ostenjem in rotacijskimi bloki, ni pa jih med karbonatnim gruščem in grapami v flišu. Najbolj izstopajo oziroma se od ostalih skupin razlikujejo torej aluvialni nanosi, ki imajo najbolj gladko površino, po drugi strani pa je površje karbonatnega ostenja najbolj hrapavo, kar je razvidno tudi iz histogramov. Ostale skupine so si po vrednostih in porazdelitvah precej podobne in jih je težko ločiti med seboj.



Slika 5: Histogrami hrapavosti površja na posameznih območjih. Metoda relativne lege (angl. *Relative Position*), variabilnost naklonov (angl. *Slope Variability*), variabilnost višin (angl. *Height Variability*), TRI (angl. *TRI Riley*) in standardnega odklona naklona (angl. *Standard Deviation of Slope*). Pri metodi variabilnosti naklonov je vrednost za aluvij enaka 580.084 in presega mejo na grafu (100.000).

Iz preglednice 2 je razvidno tudi, da največ razlik med skupinami pokažeta metodi variabilnosti višin in metoda TRI po Rileyju, saj pokažeta po 10 in 12 razlik. Manj razlik daje metoda relativne lege (8 razlik), najmanj pa metoda standardnega odklona naklonov (4 razlike) in variabilnosti naklonov (3 razlike). Najbolj sta torej primerni prvi dve metodi, saj zaznata največ razlik.

Preglednica 2: Statistične razlike med obravnavanimi območji po posameznih metodah. Oznaka metode pomeni, da je razlika statistično značilna po 95-odstotni stopnji zaupanja. Kratice metod: RL: relativna lega, VN: variabilnost naklonov, VV: variabilnost višin, TRI: indeks TRI po Rileyu, SN: standardni odklon naklona. Oznaka –: ni statističnih razlik.

	Aluvij	Karbonatni grušč	Grape v flišu	Fliš	Karbonatno ostenje	Rotacijski bloki
Aluvij	/					
Karbonatni grušč	RL, VV, TRI, SN	/				
Grape v flišu	RL, VV, TRI, SN	–	/			
Fliš	VN, VV, TRI	RL, VN, TRI	RL, VN	/		
Karbonatno ostenje	RL, VV, TRI, SN	VN, VV, TRI	VN, TRI	RL, VV, TRI	/	
Gravitacijski bloki	RL, VV, TRI, SN	VV, TRI	TRI	RL, VN, VV, TRI	VV	/

4 SKLEP

Proučili smo pet metod, ki se uporabljajo za analizo hrapavosti površja in so potencialno uporabne za študije razgibanosti površja na območju Vipavske doline na podlagi lidarskih podatkov. Z izdelavo zemljevidov in histogramov ter njihovo vizualno analizo je bilo ugotovljeno, da je za ločevanje hrapavosti površja na območjih z različno litološko podlago najbolj uporabna metoda variabilnosti višin (angl. *Height Variability*). Metoda variabilnosti višin, ki podaja razliko med največjimi in najmanjšimi nadmorskimi višinami znotraj iskalnega okna, daje najboljše rezultate v primerjavi z ostalimi metodami, saj so razlike v hrapavosti površja posameznih litoloških elementov (karbonatno ostenje, gravitacijski bloki, flišna podlaga, aluvialni nanos, karbonatni pobočni grušč in grape v flišu) najbolj razvidne. Metoda variabilnosti višin je zato odlično dopolnilo tradicionalnemu terenskemu delu, izdelani zemljevidi variabilnosti višin pa so dober pripomoček pri geološkem in geomorfološkem kartiranju. Metoda variabilnosti višin je še posebno priporočljiva pri vizualnem prepoznavanju in omejevanju kvartarnih pobočnih gruščev, saj je območje Vipavske doline litološko zelo pestro. Metoda je seveda uporabna tudi v drugih litoloških okoljih s pestro reliefno razgibanostjo. Kvantitativna analiza histogramov hrapavosti površja po posameznih območjih in metodah kaže, da se med skupinami najbolj razlikujejo aluvialni nanosi, ki imajo najmanjšo hrapavost površja, po drugi strani pa je površje karbonatnega ostenja najbolj hrapavo. Največ razlik med skupinami pokažeta metodi variabilnosti višin in metoda TRI po Rileyju, ki sta zato bolj primerni od ostalih za ugotavljanje hrapavosti površja.

Literatura in viri:

- Amundsen, J., Johnson, S., Rouse, K., Wang, H. (2010). Using LiDAR-derived DEMs to delineate and characterize landslides in Northern Kentucky and Hamilton County, Ohio. http://www.trishock.com/academic/pdf/lidar_landslides.pdf, pridobljeno 22. 5. 2013.
- Axelsson, P. (2000). DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33, B4-1, 110–117.
- Berry, J. K. (2007). Beyond Mapping III: Procedures and applications in GIS modeling. http://www.innovativegis.com/basis/BeyondMappingSeries/BeyondMapping_III/Default.htm, pridobljeno 30. 6. 2014.
- Bowen, A. J., Mortensen, N. G. (2004). Was Prediction errors sue to site orography. *Risø-R-995(EN)*. Roskilde.
- Cavalli, M., Marchi, L. (2008). Characterisation of the Surface Morphology of an Alpine Alluvial Fan Using Airborne LiDAR. ed. L. Marchi. *Natural Hazards and Earth System Science*, 8(2), 323–333. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-8-323-2008>
- Cavalli, M., Tarolli, P., Marchi, L., Dalla Fontana, G. (2008). The Effectiveness of Airborne LiDAR Data in the Recognition of Channel-bed Morphology. *Catena*, 73(3), 249–260. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2007.11.001>
- Collins, D. B. G., Bras, R. L. (2010). Climatic and ecological controls of equilibrium drainage density, relief, and channel concavity in dry lands. *Water Resources Research*, 46(4), 1–18. DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/2009wr008615>
- ESRI, I. (2012). *ArcGIS v.10*. ESRI, Inc., Redlands, CA, ZDA.
- Geoin. LIDAR. <http://www.geoin.com/si/strani/12/LIDAR.html>, pridobljeno 20. 8. 2011.
- Glenn, N. F., Streutker, D. R., Chadwick, D. J., Thackray, G. D., Dorsch, S. J. (2006). Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. *Geomorphology*, 73(1-2), 131–148. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.07.006>
- Grohmann, C. H., Smith, M. J., Riccomini, C. (2011). Multiscale Analysis of Topographic Surface Roughness in the Midland Valley, Scotland. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(4), 1200–1213. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/tgrs.2010.2053546>
- Hrvatín, M., Perko, D. (2003). Surface roughness and land use in Slovenia. *Acta Geographica Slovenica*, 43(2), 33–86. DOI: <http://dx.doi.org/10.3986/ags43202>
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.-H., Loye, A., Metzger, R., Pedrazzini, A. (2012). Use of LiDAR in Landslide Investigations: A Review. *Natural Hazards*, 61(1), 5–28. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-010-9634-2>
- Jenness, J. S. (2004). Calculating landscape surface area from digital elevation models. *Wildlife Society Bulletin*, 32(3), 829–839. DOI: [http://dx.doi.org/10.2193/0091-7648\(2004\)032\[0829:clsafd\]2.0.co;2](http://dx.doi.org/10.2193/0091-7648(2004)032[0829:clsafd]2.0.co;2)
- Jordan, G., Meijninger, B. M. L., Hinsbergen, D. J. J. V., Meulenkamp, J. E., Dijk, P. M. V. (2005). Extraction of Morphotectonic Features from DEMs: Development and Applications for Study Areas in Hungary and NW Greece. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 7(3), 163–182. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2005.03.003>
- Kobler, A., Pfeifer, N., Ogrinc, P., Todorovski, L., Ostir, K., Dzeroski, S. (2007). Repetitive interpolation: A robust algorithm for DTM generation from aerial laser scanner data in forested terrain. *Remote Sensing of Environment*, 108(1), 9–23. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2006.10.013>
- Kokalj, Ž., Zakšek, K., Ostir, K. (2011). Application of sky-view factor for the visualization of historic landscape features in lidar-derived relief models. *Antiquity*, 85(327), 263–273. DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S0003598X00067594>
- McKean, J., Roering, J. (2004). Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. *Geomorphology*, 57(3-4), 331–351. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X\(03\)00164-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00164-8)
- Melton, M. A. (1965). The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in southern Arizona. *Journal of Geology*, 73(1), 1–38. DOI: <http://dx.doi.org/10.1086/627044>
- Mortensen, N. G., Rathmann, O., Tindal, A., Landberg, L. (2008). Field validation of the DRIX performance indicator for flow in complex terrain. *Proceedings of the 2008 European Wind Energy Conference and Exhibition, March 31 to April 3. Brusej, Belgija.*
- Nellemann, C., Fry, G. (1995). Quantitative analysis of terrain ruggedness in reindeer winter grounds. *Arctic*, 48(2), 172–176. DOI: <http://dx.doi.org/10.14430/arctic1239>
- Perko, D. (2007). *Morfometrija površja Slovenije*. Georitem 3. Ljubljana.
- Placer, L. (1998). Contribution to the macrotectonic subdivision of the border region between Southern Alps and External Dinarides. *Geologija*, 41, 223–255. DOI: <http://dx.doi.org/10.5474/geologija.1998.013>
- Popit, T., Košir, A. (2003). Pleistocene debris flow deposits in the Vipava Valley, SW Slovenia. V: I. Vlahovič (ur.). *22nd IAS Meeting of Sedimentology: e-Abstracts book (str 161)*. Zagreb: Institute of geology.
- Popit, T., Košir, A. (2010). Kvarterni paleoplazovi na Rebrnicah. V: A. Košir (ur.), et al. 3. Slovenski geološki kongres: Povzetki in ekskurzije (str. 39–40). Postojna: Znanstvenoraziskovalni center SAZU, Inštitut za raziskovanje krasa; Ljubljana: Paleontološki inštitut Ivana Rakovca.
- Popit, T., Verbovšek, T. (2013). Analysis of surface roughness in the Sveta Magdalena paleo-landslide in the Rebrnice area. *RMZ - Materials and geoenvironment*, 60(3), 197–204.
- Popit, T., Rožič, B., Kokalj, Ž., Šmuc, A., Verbovšek, T., Košir, A. (2014a). A LiDAR, GIS and basic spatial statistic application for the study of ravine and palaeo-ravine evolution in the upper Vipava valley, SW Slovenia. *Geomorphology*, 204(1), 638–645. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.09.010>
- Popit, T., Verbovšek, T., Šmuc, A., Košir, A., Kokalj, Ž., Rožič, B. (2014b). Geomorfološka karta kvartarnih paleoplazov na območju Rebrnic. V: B. Rožič (ur.), T. Verbovšek (ur.) in M. Vrabec (ur.), 4. slovenski geološki kongres. Povzetki in ekskurzije (str. 57–58). Ljubljana: Naravoslovnotehniška fakulteta.
- Popit, T., Jež, J., Košir, A., Fifer Bizjak, K., Ribičič, M. (2014c). Kvarterni pobočni sedimenti severnega in vzhodnega roba Vipavske doline. V: B. Rožič (ur.), T. Verbovšek (ur.) in M. Vrabec (ur.), 4. slovenski geološki kongres. Povzetki in ekskurzije (str. 89–103). Ljubljana: Naravoslovnotehniška fakulteta.

- Riley, S. J., DeGloria, S. D., Elliot, R. (1999). A Terrain Ruggedness Index that Quantifies Topographic Heterogeneity. *Intermountain Journal of Sciences*, 5(1–4), 23–27.
- Ruszkiczay-Rüdiger, Z., Fodor, L., Horváth, E., Telbisz, T. (2009). Discrimination of Fluvial, Eolian and Neotectonic Features in a Low Hilly Landscape: A DEM-based Morphotectonic Analysis in the Central Pannonian Basin, Hungary. *Geomorphology*, 104(3–4), 203–217. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.08.014>
- Scott, A. T., Pinter, N. (2003). Extraction of Coastal Terraces and Shoreline-angle Elevations from Digital Terrain Models, Santa Cruz and Anacapa Islands, California. *Physical Geography*, 24(4), 271–294. DOI: <http://dx.doi.org/10.2747/0272-3646.24.4.271>
- Sithole, G., Vosselman, G. (2004). Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59(1–2), 85–101. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2004.05.004>
- Staley, D. M., Wasklewicz, T. A., Blaszczyński, J. S., (2006). Surficial patterns of debris flow deposition on alluvial fans in Death Valley, CA using airborne laser swath mapping data. *Geomorphology*, 74(1–4), 152–163. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.07.014>
- Triglav-Čekada, M. (2010). Zračno lasersko skeniranje in nepremičniške evidence. *Geodetski vestnik*, 54(2), 181–194. DOI: <http://dx.doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2010.02.181-194>
- Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Verstraeten, G., Vanacker, V., Nyssen, J., Moeyersons, J., Van Beek, L. P. H., Vandekerckhove, L., (2007). Use of LIDAR-derived images for mapping old landslides under forest. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(5), 754–769. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/esp.1417>
- Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Gullentops, F., Vandekerckhove, L., Hervás, J. (2011). Regionall mapping and characterization of old landslides in hilly regions using LiDAR-based imagery in Southern Flanders. *Quaternary Research*, 75(3), 721–733. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.yqres.2011.02.006>
- Vrabec, M., Fodor, L. (2006). Late Cenozoic Tectonic of Slovenia: Structural styles at the Northeastern Corner of the Adriatic Microplate. V: N. Pinter (ur.), G. Grenczy (ur.), J. Weber (ur.), S. Stein, D. Medak. *The Adria Microplate: GPS Geodesy, Tectonic and Hazards*. NATO Science Series, IV, Earth and Environmental Sciences, Springer Netherlands, 61, 151–168. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/1-4020-4235-3_10
- Zakšek, K., Oštir, K., Kokalj, Ž. (2011). Sky-View Factor as a Relief Visualization Technique. *Remote Sensing*, 3, 398–415. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/rs3020398>



Popit T., Supej B., Kokalj Ž., Verbovšek T. (2016). Primerjava metod za geomorfometrične analize hrapavosti površja na primeru Vipavske doline. *Geodetski vestnik*, 60 (2): 227–240. DOI: [10.15292/geodetski-vestnik.2016.02.227-240](http://dx.doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2016.02.227-240)

asist. dr. Tomislav Popit, univ. dipl. inž. geol.
 Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta
 Privoz 11, SI-1000 Ljubljana
 e-naslov: tomi.popit@ntf.uni-lj.si

Blaž Supej, inž. gr.
 Mensuras d.o.o.
 Ulica arhitekta Novaka 13, SI-9000 Murska Sobota
 e-naslov: blaz.supej@mensuras.si

dr. Žiga Kokalj, univ. dipl. geograf
 ZRC SAZU, Inštitut za antropološke in prostorske študije
 Novi trg 2, SI-1000 Ljubljana
 e-naslov: zkokalj@zrc-sazu.si

izr. prof. dr. Timotej Verbovšek, univ. dipl. inž. geol.
 Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta
 Privoz 11, SI-1000 Ljubljana
 e-naslov: timotej.verbovsek@ntf.uni-lj.si