

NADGRADNJA MODELA RELIEFA SLOVENIJE Z VISOKOKAKOVOSTNIMI PODATKI

HIGH-QUALITY DATA FOR ENHANCEMENT OF THE TERRAIN MODEL OF SLOVENIA

Tomaz Podobnikar

UDK: 004.6:528.9:659.2

POVZETEK

Predmet raziskave je digitalni model reliefa (DMR) kot podatkovni sloj, ki podrobno opisuje obliko zemeljskega površja. DMR je digitalni zapis nadmorskih višin, predstavljen z neprekinjeno ploskvijo. V Sloveniji imamo dolgoletno tradicijo pri izdelavi DMR-ja, od konca 60. let prejšnjega stoletja, ko smo začeli razvijati DMR 100. Trenutno je aktualen DMR Slovenije in okolice kot zbirka digitalnih podatkov višin DMV 12,5, 25 in 100 ter izohips in skeleta reliefa. Model je bil izdelan leta 2005 po lastni metodi integracije obstoječih podatkov. V povezavi s potrebnim vzdrževanjem modela (skupaj s pretvorbo v nov koordinatni sistem) ter z razvojem novih tehnologij, kot je lasersko skeniranje in metode kontrole kakovosti podatkov, predlagamo smernice nadaljnega razvoja. Izboljšani DMR Slovenije naj bi poleg že vključenih slojev vseboval še podatke DMV-ja 12,5 brez antropogenih vplivov, iz podatkov laserskih skeniranj izdelana DMV 1 in DMP 1 (digitalni model ploskve) ter zbirki surovih podatkov laserskih skeniranj in podatkov podvodnega reliefa ter drugih virov.

KLJUČNE BESEDE

digitalni model reliefa, integracija podatkov, visokoločljivostni model, lasersko skeniranje,

Klasifikacija prispevka po COBISS-u: 1.02

ABSTRACT

The objective of this study is the digital terrain model (DTM) as a data set that describes the shape of the Earth's surface in a detail. The DTM is a digital record of the height values that are resembled by continuous surface. In Slovenia there is a long tradition of DTM production that started in the end of 60s when we started developing DTM 100. The present DTM is a DTM of Slovenia and its surroundings that include a database of digital elevation models DEM 12.5, 25, and 100 together with contour lines and terrain skeleton. The model was produced in 2005 with our own method of data integration. The model needs maintenance so we suggest some guidelines for further development (including transformation to a new coordinate system) that should be supported by the development of new technologies, such as laser scanning and methods of a data quality control. Besides incorporated data, the enhanced DTM of Slovenia would also include DEM 12.5 data without anthropogenic influences; laser-scanning produced DEM 1 and DSM 1 (digital surface model); a raw data database from laser scanning missions; and an underwater relief database with other data sets.

KEY WORDS

digital terrain model, data integration, high-resolution model, laser scanning, Slovenia

1 UVOD

V raziskavi smo se osredotočili na slovenski digitalni model reliefa (DMR) kot podatkovni sloj, ki podrobno opisuje obliko površja. DMR je digitalni zapis oblikovanosti zemeljskega površja, pri

čemer gre za predstavitev nadmorskih višin z neprekinjeno ploskvijo. Pomen pojma DMR lahko vključuje poleg vrednosti višin v obliki pravilnih kvadratah celic ali grida (kar poznamo pod izrazom DMV) tudi druge objekte, ki opisujejo ploskev reliefa, kot so linije padnic, točke vrhov ali vrtač (Podobnikar, 2002, 2005b).

V Sloveniji imamo dolgoletno tradicijo pri izdelavi DMR-ja za celotno državo, od konca 60. let prejšnjega stoletja. Premoremo znanje, izkušnje in podatke, primerne za izdelavo kakovostnega in uporabnega modela reliefa. Pri tem je treba poudariti, da smo se z zasnovo izdelave DMR-ja 100 v začetku 70. let prejšnjega stoletja gibali v svetovnem vrhu. Prav tako ne gre zanemariti široke uporabnosti DMR-ja Slovenije in okolice, posebno enega izmed sestavnih delov, digitalnega modela višin (DMV) ločljivosti 12,5 m. Model je bil leta 2005 izdelan z integracijo obstoječih podatkov Geodetske uprave RS in drugih institucij (Podobnikar, 2005b; Podobnikar in Mlinar, 2006).

Ne glede na pretekle dosežke se lahko uporabnost DMR-ja zmanjša, če bomo zanemarili njegovo vzdrževanje. Ob njegovi izdelavi leta 2005 je bila predlagana metodologija, ki lahko zagotavlja kakovostno vzdrževanje modela reliefa z novimi podatki. Metodologija je povezana predvsem z izboljšavo prostorskih podatkov Geodetske uprave RS kot glavnim virom za izdelavo DMR-ja Slovenije (Podobnikar in Mlinar, 2006) ter z osnovnim načelom, ki temelji na vzdrževanju le enega kakovostnega modela reliefa - v kontekstu DMR-ja Slovenije.

V tem prispevku predlagamo nadgradnjo metodologije vzdrževanja in izpopolnjevanja DMR-ja Slovenije (osnovna verzija je v grobem opisana v Podobnikar in Mlinar (2006)), ki jo določajo v glavnem pričakovani dejavniki, povezani z razvojem znanosti in tehnoloških zmožnosti v preteklih letih, ki so v grobem naslednji:

- vedno večja zahteva po podrobnejših in kakovostnejših podatkih, povezana predvsem s tehnološkim razvojem (v ospredju je strojna in programska oprema):
 - o za izdelavo DMR-ja: razvoj senzorjev laserskega skeniranja (snemanja) ipd.,
 - o za aplikacije DMR-ja: reševanje zahtevnejših nalog in večja avtomatizacija (npr. simulacija poplavne ogroženosti, gravimetrija, dialektometrija),
- na voljo je veliko kakovostnih podatkov, predvsem zbranih z laserskim skeniranjem (aero in terestrično),
- izdelava DMV-ja 5 v letu 2007, ki ga lahko opredelimo kot nedodelano izvedenko DMV-ja 12,5 (oz. DMR-ja Slovenije),
- sprememba državnega koordinatnega sistema v letu 2008,
- zahteva po nizkih stroških vzdrževanja; periodično vzdrževanje, ki upošteva tudi dejanske spremembe površja,
- potreba po izdelavi modela reliefa srednje ločljivosti (npr. 12,5 m), brez vidnih antropogenih sprememb oz. posegov v prostor (Podobnikar et al., 2008).

Nadgradnjo modela reliefa Slovenije z visokoločljivostnimi podatki opredeljujejo pregled razvoja DMR-ja v svetu in Sloveniji, metodologija izdelave DMR-ja Slovenije, aplicirana na izdelavo iz

leta 2005, zadnji dosežki tehnike, pomembni za izdelavo DMR-ja, ter mogoče smernice nadaljnega razvoja DMR-ja Slovenije.

2 PREGLED RAZVOJA DMR-JA

Zamisel o analognem modelu reliefa kot pomanjšani predstavitvi pokrajine sega vsaj 30.000 let v preteklost (Podobnikar in Mlinar, 2006). Takšen model je lahko učinkovit pripomoček pri učinkovitejšem poznavanju in obvladovanju prostora. Za verodostojen prikaz modela je bilo pomembno dobro obvladovanje geometrije in kartografije.

2.1 Svet

Zamisel o izdelavi DMR-ja je stara skoraj toliko kot informacijska doba in uveljavljanje digitalnega računalništva, torej najmanj 50 let. Izraz sta sredi 50. let prejšnjega stoletja prva uporabila Američana s Cambridgea, Miller in Laflamme (1958) (Doyle, 1978). V času od njegovega nastanka so bile razvite različne tehnike za izdelavo. V zadnjih desetletjih so se tehnike razvijale predvsem v smeri izdelave DMR-ja večje kakovosti in verodostojnosti. Prav nezanesljiva in v praksi težko dosegljiva pričakovana kakovost podatkov reliefa je pogosto vplivala na njegovo dejansko uporabnost.

O samem razvoju DMR-ja je bilo veliko napisanega, npr. v Doyle (1978), Rihtaršič in Fras (1991), Kvamme et al. (1997), Bourough in McDonnell (1998), Maune (2001), Podobnikar (2003). Izmed zadnjih dosežkov velja omeniti razvoj in uporabo velikega števila metod za zajem podatkov, predvsem tistih, ki se nanašajo na satelite in letala oziroma helikopterje (aero). Za manjša merila se pogosto uporablja interferometrična tehnika (IfSAR) (npr. Burrough in McDonnell, 1998; Maune, 2001), s kakršno izdelujejo globalne DMR-je. Primeri so SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), ki ga je izdelala NASA, s položajno ločljivostjo 3", tekoča projekta EuroDEM s položajno ločljivostjo 2" (60 m) in vertikalno 6 do 8 m (EuroGeographics, 2008) ter TanDEM-X Nemške vesoljske agencije (DLR) za izdelavo DMR-ja ločljivosti 12 m. Za večja merila in bolj lokalno uporabo (npr. za posamezne manjše države, predvsem v Evropi, za območja mest ipd.) je aktualna metoda zračnega (aero) in v nekaterih primerih celo terestričnega laserskega skeniranja za izdelavo DMR-ja ločljivosti okoli 1 m (npr. Kraus in Pfeifer, 1998; Kraus, 2007).

V nekaterih po velikosti ozemlja in razgibanosti površja Sloveniji primerljivih sosednjih državah (Perko, 2007) je stanje visokokakovostnih DMR-jev takšno: v Švici imajo dva modela z ločljivostjo 2 m, in sicer do nadmorske višine 2000 m: digitalni model ploskve – Digitales Oberflächenmodell, DOM, ter digitalni model višin – Digitales Terrainmodell der Amtlichen Vermessung, DTM-AV. Sicer so na voljo DMV-ji z ločljivostjo 25, 50, 100, 200 in 1000 m (Swisstopo, 2008). V Avstriji ponujajo pravi DMR z višinami, izohipsami in strukturnimi linijami v ločljivosti 10, 25, 50, 100, 250 in 500 m za vso državo, ki ga ciklično obnavljajo v določenih intervalih (BEV, 2008).

Ob vsem tem se velja dotakniti povoda za največje povečanje uporabnosti DMR-ja v preteklih letih, ki je dejansko apliciran v vsakdanji rabi in ima z njim opravka tako rekoč vsakdo. Gre namreč za t. i. virtualne globuse (Google Earth, Microsoft Virtual Earth, NASA World Wind ipd.) ali za samodejne načrtovalnike potovanj motornih vozil (angl. route planner), predvsem pa kolesarjev

in pešcev, pri čemer se izračunavajo profili poti, najstrmejši odseki ipd. (npr. Radrouten Planer). Liberalizacija in razvoj orodij torej zelo povečujeta uporabo DMR-ja. Kakovost samih podatkov ni najpomembnejši dejavnik, vse dokler nima pomembnega vpliva na uporabnost aplikacij. Ob tem velja poudariti, da je za navedene aplikacije dovolj že DMR povprečne kakovosti, medtem ko so »tradicionalni« uporabniki DMR-ja precej zahtevnejši.

2.2 Slovenija

Slovenija na področju izdelave DMR-ja v glavnem pozorno sledi svetovnim smernicam, včasih pa jih tudi prekaša. Prve zamisli o izdelavi DMR-ja Slovenije segajo v konec šestdesetih let prejšnjega stoletja (Banovec in Lesar et al., 1975). DMR 100, ki so ga začeli izdelovati leta 1973, so dokončali leta 1984 in vzdrževali vse do leta 1997. Leta 1975 je bil izdelan prvi digitalni model reliefa za vso Slovenijo, in sicer DMR 500. Od konca osemdesetih in v devetdesetih letih ni bilo vidnega napredka, v ozadju pa je bilo izdelanih kar nekaj študij (Podobnikar, 2003). Od leta 1995 do 2005 so izdelovali DMR 25 kot vzporedni proizvod digitalnega ortofota v merilu 1 : 5000. Leta 2000 je bil dokončan t. i. InSAR DMV 25, leta 2005 pa iz geodetskih podatkov različne kakovosti - z metodo integracije obstoječih podatkov - DMR Slovenije z bližnjo okolico, z ločljivostjo posameznih DMV-jev 12,5, 25 in 100 m (Podobnikar, 2003; Podobnikar in Mlinar, 2006). Zadnji v vrsti DMR-jev za vso Slovenijo je DMV 5 iz leta 2007, izdelan s prevzorčenjem DMV-ja 12,5 ter s fotogrametrično obdelavo.

Preglednica 1 obravnava osnovne parametre, kot so obdobja izdelave in uporabe, vzdrževanje in metode izdelave pomembnejših DMR-jev za območje Slovenije. Omeniti je treba, da so v zadnjem obdobju posamezne organizacije naročile precejšnje število lokalnih DMV-jev predvsem iz laserskega skeniranja ali pa so jih same izdelale za interno uporabo.

Najširšo uporabnost DMR-ja Slovenije opredeljujejo podobno kot v svetovnem merilu nekatere aplikacije, kot so Geopedia, Atlas okolja, Gremo na pot ipd.

3 DMR SLOVENIJE – OPREDELITEV IZHODIŠČ

V tem delu je na kratko predstavljena zgodovina DMR-ja Slovenije z bližnjo okolico, skupaj s spremljajočimi sloji - od zasnove do izdelave v letu 2005. Predstavljen je tudi DMV 5 in opisan problem uvedbe novega državnega koordinatnega sistema v letu 2008. Opredeljeno je lasersko skeniranje kot pomemben prihodnji vir za izdelavo. Predlagane so tudi nekatere tehnike za kontrolo kakovosti DMR-ja kot izjemno pomembno orodje za povečanje njegove uporabnosti.

3.1 DMR Slovenije

Motiv za izdelavo DMR-ja iz obstoječih podatkov v okviru Geodetske uprave RS se je oblikoval v začetku leta 1998 (Podobnikar, 2003). Takrat je bilo na Geodetski upravi RS že na voljo precej atributiranih digitalnih prostorskih podatkov, ki bi jih bilo mogoče brez dodatnega zajema vključiti v izdelavo DMR-ja. Po drugi strani je bilo mnenje nekaterih, da zadošča zbiranje podatkov za modeliranje reliefa v obliki digitalne zbirke, iz katere bi lahko vsak potencialen uporabnik po želji sam izdeloval DMR. Druga varianta bi bila prezahtevna in bi zahtevala primerno programsko opremo ali/in precej več znanja uporabnika.

<i>Naziv</i>	<i>Obdobje izdelave</i>	<i>Obdobje uporabe</i>	<i>Vzdrževanje</i>	<i>Metoda izdelave</i>
relief občine Domžale (500 m)	konec 60. let (lokalni)	prvi poskusi	–	ročno odčitavanje
več modelov (10 do 500 m)	do sredine 70. let (lokalni)	prvi poskusi	–	ročna digitalizacija
DMR 100 (prvi zasnovan za vso Slovenijo)	1972–1984	do 2000	do 1997	TTN 5/10, TK 25 ročna dig. na mrežo na prozornem papirju
DMR 500 (prvi izdelan za vso Slovenijo)	1973–1975	do 1984	–	podobno kot DMR 100
DMR 25	1995–2005	v uporabi	do 2005	DOF 5, stereofotogrametrija (slikovno ujemanje)
InSAR DMV 25, 100	2000	do 2005	ne	več podatkov, radarska interferometrija
DMR Slovenije (DMV 12,5, 25, 100) (Slovenija z okolico)	2001–2005	v uporabi	predvideno, a še ni zaživel	integracija obstoječih geodetskih podatkov
DMV 5	2006–2007	v uporabi	ne	prevzorčen DMV 12,5, stereofotogrametrija, lokalna obdelava z orodji CAD

Preglednica 1: Pregled izdelave, uporabe, vzdrževanja in metod izdelave DMR-ja za območje Slovenije

Odločili smo se za izdelavo DMR-ja Slovenije, torej prvo varianto. Med prvimi testiranjmi se je kaj hitro pokazalo, da so podatki, ki so bili na voljo, v precej slabšem stanju, kot smo predvidevali. Različne institucije so jih namreč zajemale po neenotnih standardih. Po koncu projektov ni podatkov praviloma nihče več vzdrževal. Poleg tega jih je večina vsebovala precej grobih ali celo sistematičnih napak, ki jih ni bilo slutiti v metapodatkih, vrh vsega so bili metapodatki težko medsebojno primerljivi. Kljub vsemu smo menili, da je mogoče iz takih podatkov izdelati model reliefa, ki bo precej boljši od obstoječih modelov, in to brez vsakršnega dodatnega zajema podatkov (Podobnikar, 2005b; Podobnikar in Mlinar, 2006). Ključna ideja je bila, da vsi, še tako slabi podatkovni sloji vsebujejo informacije, ki so verodostojne in bi lahko pomagale pri izboljšavi DMR-ja. Ob primerni obdelavi pa bi bilo možno odpraviti napake, izpostaviti najboljše lastnosti in jih integrirati v model, ki bi bil v celoti boljši od posameznega vira (Podobnikar, 2005b). Omenjeni ideji je med drugim pavšalno nasprotovalo v stroki uveljavljeno pravilo, ki pravi, da pri integriranju podatkov ne smemo medsebojno mešati podatkov različne kakovosti – da torej s slabšimi podatki ne moremo izboljševati boljših oz. da če bomo uporabili slabe podatke, potem lahko pričakujemo tudi podobno slabe rezultate (angl. »garbage in, garbage out« – GIGO).

Osnovna zamisel integracije podatkov različnih virov je temeljila na utežnem seštevanju virov z geomorfološkimi popravki. V modelu so bile uteži podatkov upoštevane glede na statistično testirane vire, geomorfološke lastnosti pa ob upoštevanju vizualno ovrednotenih virov. Za izvedbo DMR-ja Slovenije smo pripravili metodologijo, ki zajema celovit sistem za vzdrževanje modela reliefa z novimi, kakovostnejšimi podatki o reliefu. Metodologija je zasnovana tako, da podpira lokalno vzdrževanje modela reliefa na območjih, ki pokrivajo le manjši del Slovenije, kot tudi vzdrževanje na celotnem ozemlju. Več o metodologiji in dejanski izdelavi modela za Slovenijo je navedeno v literaturi, npr. Podobnikar (2005a, 2005b) in Podobnikar in Mlinar (2006).

Ob tem velja omeniti vire, ki so bili uporabljeni pri izdelavi DMR-ja Slovenije (Podobnikar in Mlinar, 2006). To so bili trirazsežnostni podatki o površju in celo dvorazsežnostni podatki, ki so dodatno opisovali obliko zemeljskega površja, kot sta rečna mreža ali cestno omrežje. V DMR Slovenije je bilo vključenih več kot 30 različnih virov, zajetih od leta 1947, in sicer modeli reliefa z ločljivostjo od 10 do 600 m, digitalizirane izohipse, območja stoječih voda in sloji cest različnih meril, geodetske točke, točke zemljiškega katastra ipd. Glede na kakovost, format zapisa, kartografske projekcije ipd. so bili podatki zelo nehomogeni.

Bistvene značilnosti DMR-ja Slovenije so (Podobnikar, 2005a; Podobnikar in Mlinar, 2006):

- uporabljeni so bili le obstoječi podatki brez zamudnega in dragega zajema:
 - o model je zaradi vključitve različnih virov nekakšen kolaž, kar pomeni, da se njegove lastnosti spreminjajo glede na kakovost (in količino) uporabljenih virov na določenem območju,
 - o ocenjena natančnost modela je 3,2 m za območje vse Slovenije, in sicer 1,1 m za ravnine, 2,3 m za gričevja, 3,8 m za hribovja in 7,0 m za gorovja pri ločljivosti 12,5 m,
 - o model pokriva tudi okolico Slovenije s skupno površino 55 087,5 km², kar je 2,7-kratna velikost države,
 - o poleg DMV-jev 12,5, 25 in 100 obsega DMR Slovenije še plastnice z ekvidistanco 10 m,

- skelet reliefa z značilnimi črtami in točkami ter sloje o kakovosti uporabljenih virov.
- skupaj s kontrolo kakovosti so bile odpravljene grobe in sistematčne napake vseh uporabljenih virov:
 - o za vsako točko modela je znana potencialna natančnost ter delež vsakega uporabljenega vira,
 - o z odstranitvijo grobih napak so bili izboljšani naslednji viri podatkov: TOPO25-relief (izohipse), potencialne grobe napake geodetskih točk,
 - o izdelane so bile zbirke podatkov, ki dodatno opredeljujejo DMR Slovenije: sloj kamnolomov in peskokopov ter sloja vrhov in vrtač,
 - o rezultati kontrole kakovosti so pregledni, pri čemer so vizualne in druge geomorfološke kontrole kakovosti enakovredne statističnim,
- metodologija izdelave omogoča vzdrževanje modela z novimi viri podatkov glede na natančno ovrednoten izdelani model z znanimi spremembami površja v preteklosti,
- podatki DMV-ja 12,5 so primerni za lokalne analize na območjih, kjer je kakovost večja, npr. na območju Ljubljane, manj pa v hribovitih območjih (slika 1); DMV 25 je primernejši za analize na ravni regij in za zahtevnejše analize za celotno državo; DMV 100 je uporaben za analize na ravni celotne Slovenije.

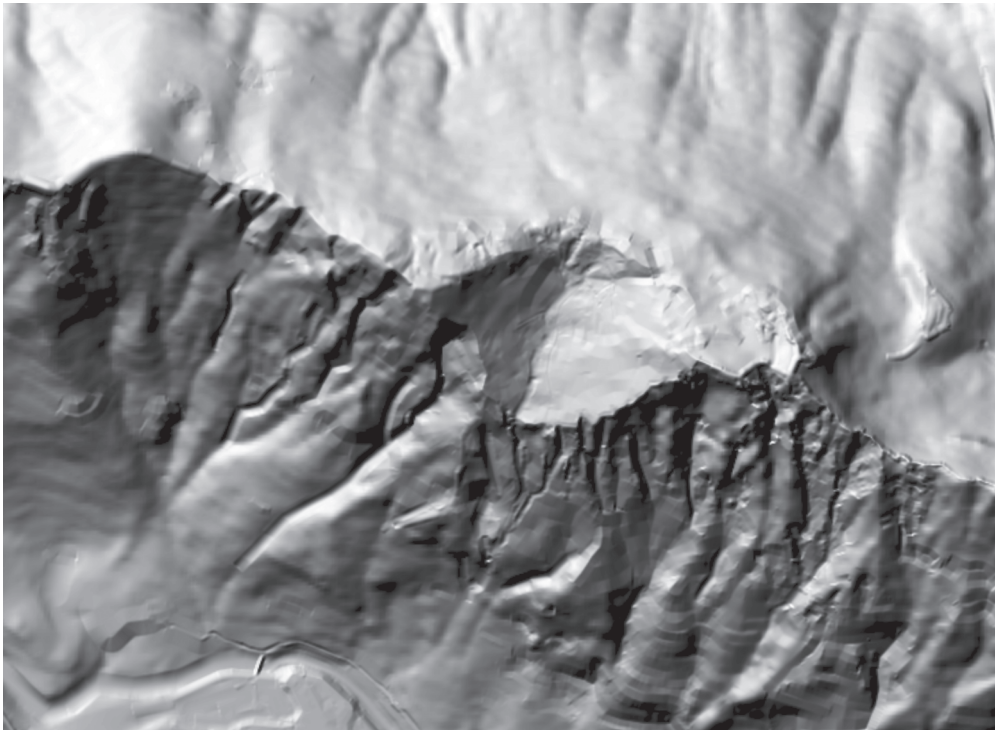
3.2 Drugi podatki in DMV 5

V zadnjih letih je bilo zajetih precej novih podatkov, ki bodo lahko ob premišljeni zasnovi igrali pomembno vlogo pri izboljšavi DMR-ja Slovenije. Geodetska uprava nadaljuje zajem podatkov za državno topografsko karto za raven merila 1 : 5000 – DTK 5 in zbirni kataster komunalnih naprav. Podatke za DTK 5 zajemajo fotogrametrično iz stereoparov letalskih posnetkov, pri čemer vključujejo tudi značilne (strukturne) črte kot elemente prostora. To so predvsem podatki o strugah vodotokov in bregovih jezer ter območjih večjih posegov v prostor (ceste in železnice). Omeniti velja vesplošno uporabo laserskega skeniranja v zadnjih letih. Po neuradnih virih je posnetih precej območij v Sloveniji, predvsem na bolj poseljenih ravninskih delih, kjer so izdelovali natančne DMR-je in druge sloje za najrazličnejše namene.

V letu 2007 je bil po naročilu Geodetske uprave RS izdelan digitalni model višin z ločljivostjo 5 m in s predpisanim srednjim odklonom višin med 1 in 3 m. V članku Podobnikar in Mlinar (2006) smo izrazili dvom o primernosti izdelave takega sloja. Po izkušnjah (Podobnikar, 2005b) bi bilo namreč pri 5-metrski ločljivosti namesto 1 m v ravninah pričakovati natančnost 10 do 30 cm. V ravninah je bila natančnost 1 m namreč že dosežena pri izdelavi DMR-ja Slovenije. Hkrati smo pričakovali predvsem za gorovja slabšo kakovost od načrtovane 3 m. Skratka, kakovostni preskok z 12,5 m na 5 m bi moral biti zelo velik, saj je treba pri tej ločljivosti upoštevati veliko dodatnih podrobnosti, kot npr. manjše ceste, potoke, terase ter vrsto drugih naravnih in antropogenih geomorfoloških detajlov. Poleg tega smo pričakovali, da bo DMV 5 podprt z ustreznimi metapodatkovnimi opisi in sloji ter hkrati neodvisen od obstoječih virov, sicer bi bila integracija tega sloja v DMR Slovenije po predlagani metodologiji bistveno otežena (Podobnikar in Mlinar, 2006).

Izdelava DMV-ja 5 je potekala neodvisno brez upoštevanja smernic vzdrževanja DMR-ja Slovenije. Pri tem niso bili uporabljeni metapodatki, ki za vsako točko opredeljujejo potencialno natančnost DMR-ja Slovenije in hkrati predlagajo območja popravkov modela (Podobnikar, 2005b; Podobnikar in Mlinar, 2006). Glavne značilnosti izdelanega DMV-ja 5 so naslednje:

- DMV 12,5, prevzorčen na ločljivost 5 m kot osnova za izdelavo,
- (stereo)fotogrametrična obdelava prevzorčenega modela (Podmenik, 2008) na osnovi stereoparov CAS pri uporabi ploskovnih, linijskih in točkovnih CAD-orodij, s katerimi so operaterji lokalno obdelovali DMV 5 na mestih, kjer so ugotovili večja odstopanja, in druge metode (slika 1),
- delo so opravljali operaterji, ki so bili različno usposobljeni za svoje delo, kar se pozna v kakovosti izdelka,
- ocena kakovosti DMV-ja 5 v primerjavi z DMV-jem 12,5:
 - o statistično (numerično) – če upoštevamo višinsko kakovost podatkov za vso Slovenijo – je boljši,



Slika 1: Nekatere značilnosti DMV-ja 5 (analitično senčen prikaz) pri uporabi linijskega orodja za spreminjanje grebenov in dolin ter drugih pristopov na primeru goratega območja Polovnika, z dimenzijami 3,6 krat 2,7 km (GU, 2005, 2007). Na območjih, kjer DMV 12,5 ni bil spremenjen za potrebe DMV-ja 5, se vidi prevlada uporabe sloja vektoriziranih izohips iz DTK 25 za njegovo izdelavo. Gre za geomorfološko pomanjkljivost DMV-ja pri ločljivosti 12,5 m, saj so že najmanjša odstopanja pri zajemu izohips povzročila rebrast videz (pretežni del desnega zgornjega dela slike). V tem primeru bi bil boljši DMV 25.

- o geomorfološko – če upoštevamo večja območja – je DMV 5 slabši, še posebno od DMV-ja 25, in vsebuje več grobih napak (slika 1),
 - o je izrazito bolj nehomogen od DMV-ja 12,5 (slika 1).
- uporabnost: neprimeren za večino prostorskih analiz in vizualizacij, uporaben le v primerih, ko geomorfološke značilnosti niso pomembne.

DMV 5 bo zaradi pomanjkljivih metapodatkov ter nedokumentirane kakovosti le težko uporaben pri vzdrževanju DMR-ja Slovenije. Vendar je bila višinska natančnost DMV-ja 12,5 pri izdelavi DMV-ja 5 dodatno in neodvisno testirana z izvedenimi popravki. Kot osnovo za izboljšavo DMR-ja Slovenije bi lahko identificirali vsa območja popravkov ter jih s primernimi metodami (Podobnikar, 2005b, 2008b) izboljšali ali na njihovih mestih vključili druge, nove vire podatkov. Vsekakor bi morebitna uporaba DMV-ja 5 za izboljšavo DMR-ja Slovenije potrebovala bolj poglobljeno študijo.

3.3 Uvedba novega državnega koordinatnega sistema v Sloveniji

Podobno, kot je bilo treba homogenizirati podatke za izdelavo EuroDEM-a (vanj je bil vključen tudi DMR Slovenije) z minimalnimi zahtevami po kakovosti (EuroGeographics, 2008), bo treba storiti v precej večji kakovosti pri transformaciji različnih podatkov v nov državni koordinatni sistem. Novi koordinatni sistem bo odpravil veliko pomanjkljivosti starega. Pri tem se moramo zavedati, da pri vsaki transformaciji zmanjšamo natančnost podatkov.

V Sloveniji je bil v začetku leta 2008 uveden ravninski koordinatni sistem z oznako D96/TM, stari z oznako D48/GK počasi zamira. Pri tem so bili predlagani postopki in parametri za natančno datumsko transformacijo z natančnostjo od nekaj centimetrov do 10 cm ter poenostavljeno ravninsko podobnostno transformacijo v enem koraku, z natančnostjo okoli 1 m (Berk in Duhovnik, 2007). Vsa dognanja, ki se upoštevajo pri transformacijah, so empirično določena.

Glede na položajno natančnost DMR-ja Slovenije z ločljivostjo 12,5, 25 in 100 m okoli 1 m je primerna uporaba kompleksnega modela transformacije (natančna datumsko transformacija) v novi koordinatni sistem, in sicer paketno, v enem koraku za vso državo (Berk in Duhovnik, 2007). Po transformaciji točk grida v novi koordinatni sistem točke ne bodo več tvorile pravilne mreže, ampak bo ta zamaknjena in zasukana. Zato bo treba (za format GRD, ki zahteva pravilen grid) izvesti interpolacijo višin na novodoločenem pravilnem gridu. Vse podatke, ki bodo uporabljeni za izboljšavo DMR-ja Slovenije, je smiselno že pred integracijo v izboljšani DMR posebej transformirati v novi koordinatni sistem ali jih zajeti v njem. Večji problem bo morebitna uporaba podatkov laserskih skeniranj pri izdelavi DMV-ja ločljivosti okoli 1 m. V tem primeru je zahtevana položajna natančnost nekaj centimetrov. Tudi tu se predvideva uporaba visokokakovostnega kompleksnega modela transformacije v novi koordinatni sistem. Nekajcentimetrsko natančnost pa lahko dosežemo le, če pred tem določimo posamezne homogene regije.

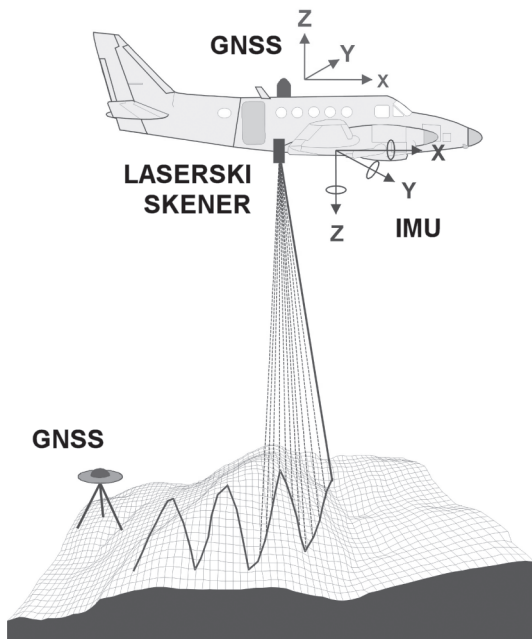
Za DMR Slovenije bo pomembna tudi uvedba novega državnega višinskega koordinatnega sistema. Predvidena je uporaba EVRS. Pred uvedbo novega višinskega koordinatnega sistema v Sloveniji

nas čakajo še natančne gravimetrične in GNSS-meritve, pa tudi sanacija nivelmana visoke natančnosti in zaključitev nekaterih nivelmanskih zank (Berk, 2008). Prehod v novi višinski koordinatni sistem bo za DMR Slovenije predvidoma enostavnejši, seveda potem, ko bodo določeni model in parametri transformacije višin. Poseben problem bodo izohipse, ki so vključene v celovito zbirko DMR-ja Slovenije, saj jih bo treba določiti na novo. S tem problemom se bodo verjetno najbolj ukvarjali kartografi.

3.4 Lasersko skeniranje – potencial za izboljšavo DMR-ja

Zračno ali aero- (letalsko in helikoptersko) lasersko skeniranje (ali analogno fotografiji – snemanje) je še vedno relativno nova tehnologija za zajem trirazsežnostnih topografskih informacij, predvsem podatkov reliefa (Kraus in Pfeiffer, 1998), ki pa z razvojem skenerjev, večanjem zmogljivosti strojne opreme ter razvojem aplikacij zelo hitro napreduje. Globalno uveljavljena okrajšava za zračno (aero-) lasersko skeniranje je ALS (Airborne Laser Scanning). Pogosto uporabljamo tudi splošen izraz LIDAR (LIght Detection and Ranging) ali LADAR (LAsER Detection and Ranging), ki bi ga lahko prosto prevedli v »zaznavanje svetlobe in merjenje razdalj (laserskih pulzov)«. Poleg ALS-ja se uporablja tudi terestrično (talno) lasersko skeniranje (TLS, Terrestrial Laser Scanning), ki se izvaja s fiksnih ali premičnih platform na tleh. Prednost TLS-ja v primerjavi z ALS-jem je predvsem nižja cena, slabosti pri izdelavi DMR-ja pa so nepokritost celotnih ciljnih območij z enega stojišča, nezmožnost prodiranja laserskih pulzov skozi gozd »s strani« ipd.

Glede na preteklo uveljavljenost stereofotogrametrije pri zajemu podatkov za izdelavo DMR-ja je to tehnologijo umestno primerjati z ALS-jem. V preteklosti, še posebno do druge polovice 90. let prejšnjega stoletja, je bila pri zajemu podatkov za DMR uveljavljena stereofotogrametrija, pri čemer so se uspešno uporabljali samodejni postopki slikovnega ujemanja (angl. matching), na zaraščenih in gosto poseljenih območjih pa so zajem izvajali operaterji. Na avtomatizacijo celotnega fotogrametričnega postopka je vplival predvsem razvoj visokoločljivostnih digitalnih snemalnih naprav (npr. Leica, 2008) in integrirani sistemi za neposredno georeferenciranje. ALS je v nasprotju s fotografskimi posnetki aktivna tehnika snemanja. Način delovanja sloni na merjenju časa potovanja oddanega laserskega pulza od laserskega skenerja do objektov na zemeljski površini in nazaj. Na splošno se beleži najmanj prvi in zadnji odboj. V kombinaciji z višino in položajem, ki ga registrira GNSS (Global Navigation Satellite System, globalni navigacijski satelitski sistem) in IMU (Inertial Measurement Unit, inercialna merska enota) ali INS (Intertial Navigation System) laserskega skenerja, dobimo trirazsežnostne koordinate praktično vsakega topografskega objekta (Kraus, 2007; slika 2). Glede na višino leta, ki ga izvajamo po pasovih, dobimo tipično gostoto nekaj točk/m². Natančnost lahko povečamo s poravnavo neskladnosti med posameznimi prekrivajočimi se pasovi laserskega skeniranja z metodo najmanjšega kvadrata (Kager, 2004). ALS-naprave zadnje generacije (npr. Riegl, 2008) operativno omogočajo zapis odbitih podatkov v obliki »full-waveform« (FWF) oz. z upoštevanjem oblike signalov odbitega valovanja. Ta oblika zapisa ne omogoča le zajema geometričnih informacij, temveč tudi ugotavljanje fizičnih lastnosti zaznanih objektov (npr. odbojnost, hrapavost), in sicer glede na parametre odboja, kot so amplituda, širina ter oblika odboja (Wagner et al., 2006; Chauve et al., 2007).

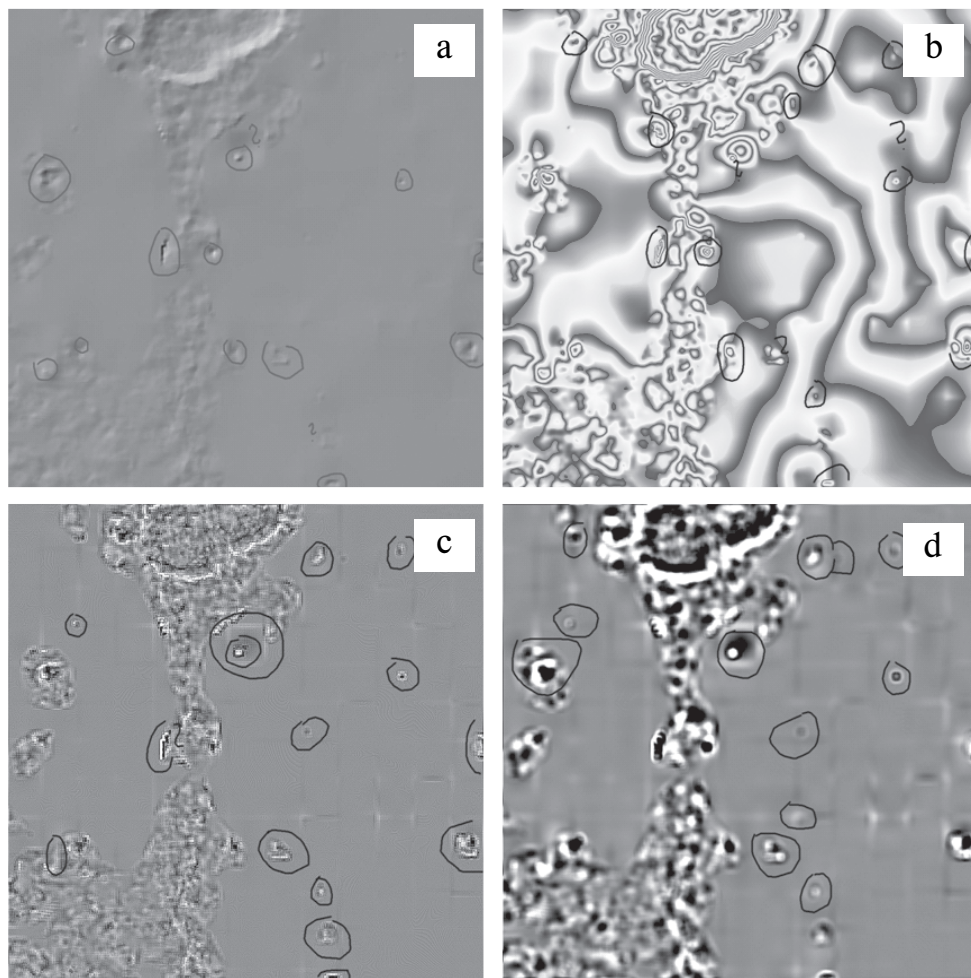


Slika 2: Načela delovanja ALS-ja (po Krausu, 2007)

Bistvena prednost ALS-ja glede na stereofotogrametrijo je v zajemu podatkov za DMR na območjih vegetacije. Pasivni senzorji (aeropsnetki) zajemajo le rastlinski pokrov. Laserski žarki ALS-ja pa lahko prodirajo skozi vrzeli med listi in zaznavajo območja pod pokrovom ter površje tal. Naslednja prednost je visoka vertikalna natančnost ALS-ja, ki omogoča detajlno zaznavanje in kartiranje geomorfoloških struktur in objektov. Poleg tega je laserski sistem aktiven in ne potrebuje sončne svetlobe za zajem podatkov, kar pomeni večjo razpoložljivost časa za polete (Podobnikar et al., 2009).

ALS omogoča zajem podatkov višin z natančnostjo 5 do 10 cm ter gostoto do okoli 6 točk/m² pri enkratnem snemanju (Kraus, 2007). Visoka natančnost in gostota podatkov, ki jo tako dosežemo, omogoča razvoj različnih tehnik za pridobivanje DMR-ja kot tudi drugih naravnih in antropogenih topografskih podatkov, npr. sestoj gozda ali poljščin, višina snežne odeje, oblika stavb, potek transportnih poti ali električnih vodov ipd.. Te podatke lahko uporabimo za izboljšavo kakovosti DMR-ja.

Še nekaj o postopku izdelave DMR-ja iz podatkov ALS-ja. Izdelava DMR-ja je močno povezana s pojmom DMP (digitalni model ploskve) ali v angleščini DSM (Digital Surface Model) (Podobnikar, 2002). DMP predstavlja ploskev ali površje, ki ga dobimo iz prvih odbojev ALS-ja. Taka ploskev vsebuje zgornje območje dreves, strehe stavb in drugih struktur nad zemeljskim površjem (Maune, 2001). Predobdelava podatkov za izdelavo DMR-ja vključuje precej zahtevnih postopkov, kot so dekompozicija, georeferenciranje, kalibracija ipd. DMR lahko pridobimo z



Slika 3: Odkrivanje morfološko umetnih in v naravi najverjetneje neobstojećih artefaktov na HRSC DMV-ju 50 manjšega območja Marsa (Candor Chasma) ter označevanje kot potencialnih grobih napak. Pri tem smo na enem DMR-ju uporabili različne metode vizualizacije: a) analitično senčenje, b) bipolarno diferenciacijo ali modulo tehniko, c) ukrivljenost površja, d) ukrivljenost površja pri uporabi generaliziranega sloja. Z različnimi tehnikami vizualizacije bolje opredelimo grobe napake. Metode vizualizacije omogočajo še precej več od opisanega: s primernimi prostorskimi analitičnimi metodami lahko identificiramo morfološke oblike, kot so grebeni, rečne črte, vrhovi, vrtače, vršaji ipd. To pa izboljšuje možnost samodejne izboljšave kakovosti DMR-ja (Podobnikar, 2008a).

uporabo tehnike hierarhičnega robustnega filtriranja (interpolacije), s klasifikacijo odboja zadnjega odboja ALS-oblaka točk v točke zemeljskega površja in v druge točke (npr. Briese et al., 2002; SCOP++, 2005). Izboljšana metoda naprednejšega filtriranja na isti osnovi uporablja podatke v obliki valovanja (full-waveform) in se najbolj izkaže na gozdnatih območjih (npr. Wagner et al., 2006). Tu je bila navedena je le ena izmed tehnik, pri čemer lahko dajo različne tehnike rezultate različne kakovosti. Pravzaprav je pri izdelavi DMR-ja visoke kakovosti, predvsem zaradi različnih geomorfoloških značilnosti reliefa, vedno optimalna kombinacija več tehnik, podobno kot smo

to prikazali pri izdelavi DMR-ja Slovenije (Podobnikar, 2005b). Zavedati se je treba kakovosti rezultata, ki je odvisna predvsem od gostote točk, naklona površja in rabe tal (Kraus et al., 2004). Tehnika samodejnega modeliranja skeleta reliefa iz oblaka ALS-točk omogoča tudi izboljšavo zbirke DMR-ja Slovenije (Podobnikar et al., 2009).

3.5 Doseganje visoke kakovosti DMR-ja

Uporabnost podatkov lahko zelo naraste, če skrbno kontroliramo njihovo kakovost. Če želimo doseči večjo ločljivost DMR-ja, moramo vložiti več truda v kontrolo kakovosti virov in v samo izdelavo. Glede na izkušnje je trud vsaj sorazmeren s kvadratom obratne vrednosti ločljivosti. Visokoločljivostni DMR-ji so torej veliko bolj občutljivi na potencialne napake. Splošno znane tehnike kontrole kakovosti DMR-ja so do 90. let večinoma temeljile na statističnih primerjavah majhnih referenčnih območij večje kakovosti z izdelanim DMR-jem, da bi zaznali nadpovprečna odstopanja oz. grobe napake. Vizualne metode (kot kvalitativne) so bile na splošno veliko bolj zanemarjane od statističnih (kot kvantitativne), ki veljajo za objektivnejše. Naslednja razloga zanemarjanja vizualnih metod v preteklosti sta bila nizka grafična zmogljivost računalnikov ter daljša tradicija statističnih pristopov v računalništvu. Vizualne metode so bile tradicionalno del kartografije.

Menimo, da so vizualne metode kontrole kakovosti DMR-ja zelo pomembne, vsaj toliko, da izničijo morebitne slabosti statističnih metod (Podobnikar, 2005b, 2008b). Uporabnosti vizualnih metod se že dlje zavedajo tudi drugi, ki jih med drugim povezujejo z empiričnimi dognanji, npr. z vplivom gostote virov na kakovost ali pa lokalno ukrivljenostjo površja ipd. (Kraus et al., 2004; Oksanen, 2006). Slika 3 prikazuje enostaven primer vizualne kontrole kakovosti podatkov pri uporabi različnih načinov prikaza enega samega DMR-ja.

V nadaljevanju obravnavamo izbrane standarde kakovosti DMR-ja, za opredelitev nekaterih idej. Standardi se sicer pogosto spreminjajo in so določeni glede na najmanjši skupni imenovalac želja in zahtev. Določeno, a precej splošno raven standardizacije DMR-ja vsebuje USGS (1998). NGA (2008) je razvila precej razširjen standard Digital Terrain Elevation Data (DTED) za enolične gride, natančnejše, za DMV-je. Ta standard določa osnovne kvantitativne podatke za aplikacije, ki potrebujejo podatke o višinah, naklonih ali hrapavosti površja. Standard določa tudi ločljivost DMV-ja po posameznih ravneh, od 0 do 5 (za 1000, 90, 30, 10, 3 in 1 m ločljivost). Dodatno je bil predlagan, vendar še ne dokončno potrjen standard High-Resolution Terrain Information (HRTI) za ravni 3 do 4 (od 12 do 1 m ločljivosti). Metapodatki kakovosti so grobo opisani z absolutno položajno (krožno)/vertikalno (linearno) napako. Tako rekoč katerikoli DMV lahko po kakovosti klasificiramo po predlaganih ravneh.

Metode kontrole kakovosti podatkov, ki smo jih predlagali za izdelavo DMR-ja Slovenije (Podobnikar, 2005b), močno prekašajo zahteve prej omenjenih standardov kakovosti DMR-ja. Ti sicer vključujejo nekatere zahteve po kakovosti, redko pa predlagajo zahtevnejše metode za kontrolo kakovosti. Podobno je z mednarodnimi standardi kakovosti geografskih informacij (npr. ISO/TC 211, 2008). Vizualnih metod skoraj ne vključujejo, predvsem zaradi njihove precejšnje subjektivnosti in zahtevnosti. Vsekakor pa so te metode še kako pomembne za razširitev standardnih

kontrol kakovosti in izboljšavo metapodatkov.

Za izdelavo kakovostnega DMR-ja predlagamo pet korakov kontrole kakovosti (Podobnikar, 2008b):

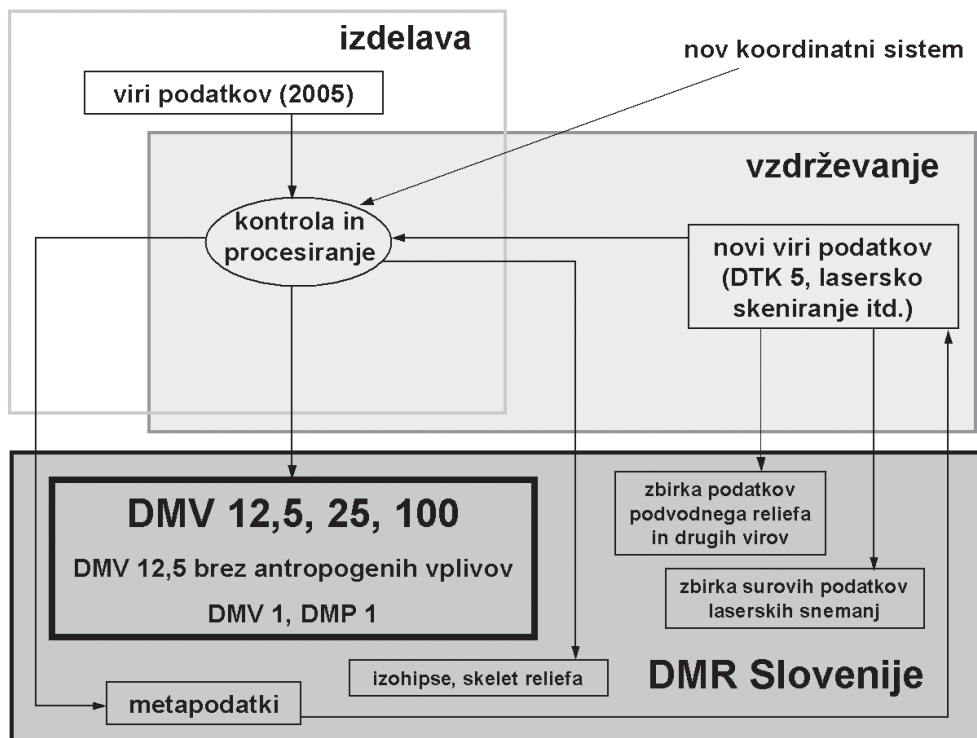
- priprava podatkov za testiranje,
- procesiranje s statističnimi ali vizualnimi metodami,
- pridobivanje rezultatov kontrole v obliki števil (numerično), tematskih kart, grafov ipd.,
- analiza (primerjava s pričakovanimi rezultati),
- pridobivanje metapodatkov ali izboljšava kakovosti DMR-ja.

5 MOŽNE SMERNICE RAZVOJA DMR-JA SLOVENIJE

DMR Slovenije je bil nastavljen tako, da bi ga bilo mogoče vzdrževati z vedno novimi podatki reliefa (Podobnikar in Mlinar, 2006). Obravnavani model reliefa namreč ni mišljen kot končni rezultat, ampak le prva verzija integracije podatkov reliefa Slovenije, ki naj bi jo periodično vzdrževali z vedno novimi viri. Pri tem bi lahko z relativno nizkimi stroški dosegali vedno večjo kakovost modela. Predlagana metodologija vzdrževanja DMR-ja Slovenije sloni na natančnih metapodatkih kakovosti posameznih virov za njegovo izdelavo. Glede na to vedenje se lahko odločamo med vključitvijo novih podatkov, ki so na razpolago, ter med načrtnim, selektivnim zajemom podatkov na območjih, kjer je DMR slabši od zahtevane kakovosti. Vse nove vire je treba pred integracijo celovito ovrednotiti z referenčnimi viri (npr. z geodetskimi točkami ali drugimi neodvisnimi podatki) in jih po potrebi popraviti z vizualnimi in statističnimi metodami kontrole kakovosti (Podobnikar, 2005b).

Glede na dosedanje izkušnje pri izdelavi DMR-ja Slovenije in drugih modelov reliefa želimo izpostaviti nekaj napotkov, pomembnih za vključevanje novih virov podatkov v model (Podobnikar, 2005b, 2008a, 2008b, 2008c; Podobnikar in Mlinar, 2006; Podobnikar et al., 2008):

- upoštevati je treba pravila, ki zadevajo definicijo DMR-ja – npr. mostovi in drugi grajeni objekti ne smejo biti del modela reliefa (Podobnikar, 2005b),
- lastnik vira podatkov mora dobro poznati metodologijo in naravo dela,
- metapodatki virov morajo biti kakovostno pripravljene, vsebovati morajo parametre, pomembne za izdelavo DMR-ja Slovenije glede na razvito tehnologijo (kar je najmanj, parametri kakovosti morajo biti zanesljivi v primerjavi s standardi kakovosti geografskih informacij oz. DMR-ja, npr. ISO/TC 211 (2008); USGS (1998); NGA (2008)),
- viri morajo biti neodvisni od predhodno uporabljenih podatkov pri izdelavi DMR-ja Slovenije, morebitna odvisnost mora biti opisana v metapodatkih,
- postopek pridobivanja novih podatkov mora biti nadzorovan in transparenten, vseskozi mora potekati celovita kontrola kakovosti (slika 4),
- povezati se je treba z drugimi upravljavci prostorskih podatkov in vključevati njihove podatke, npr. z gradbeniki, po drugi strani pa se povezovati s podjetji, ki DMR najbolj potrebujejo pri svojem delu.



Slika 4: Shema izdelave in vzdrževanja DMR-ja Slovenije

Predlagamo, da postane sistem DMR-ja Slovenije v novem koordinatnem sistemu edina skupina podatkov o površju, ki bi jih ponujala Geodetska uprava RS. Celotno zbirko naj bi ciklično vzdrževali, stare verzije naj bi bile kljub slabši kakovosti na voljo, in sicer za morebitno uporabo pri analizah spremembe površja (modeliranje dinamike, časovni preseki ipd.). Poleg DMV-ja 12,5, 25 in 100 naj vključuje še dva sloja (slika 4):

- DMV 12,5 brez antropogenih vplivov (Podobnikar et al., 2008),
- DMV 1, izdelan predvsem iz podatkov laserskega skeniranja,
- DMP 1.

Dodatno predlagamo zbirko surovih podatkov laserskega skeniranja ter zbirko podatkov podvodnega reliefa in drugih virov.

Pri ločljivosti DMV-ja okoli 25 m začnejo na analize, ki so povezane z geomorfologijo naravnega površja (npr. modeliranje pretekle pokrajine, renaturalizacija, analize značilnosti površja, kartografski prikazi), izrazito vplivati antropogeni dejavniki. Izdelava DMV-ja 12,5 brez antropogenih vplivov bi potekala na podlagi identifikacije antropogenih dejavnikov iz podatkov ALS-ja ter drugih zbirk podatkov (npr. cestna in železniška mreža iz DTK 5). Antropogene oblike iz DMV-ja 12,5 bi potem v postopku rekonstrukcije zamenjali z naravnimi pri uporabi več primernih metod (Podobnikar, 2005b; Podobnikar et al., 2009). Analogno se metode lahko uporabijo tudi

za učinkovitejšo generalizacijo DMV-ja, npr. z 12,5 m na 25 in 100 m.

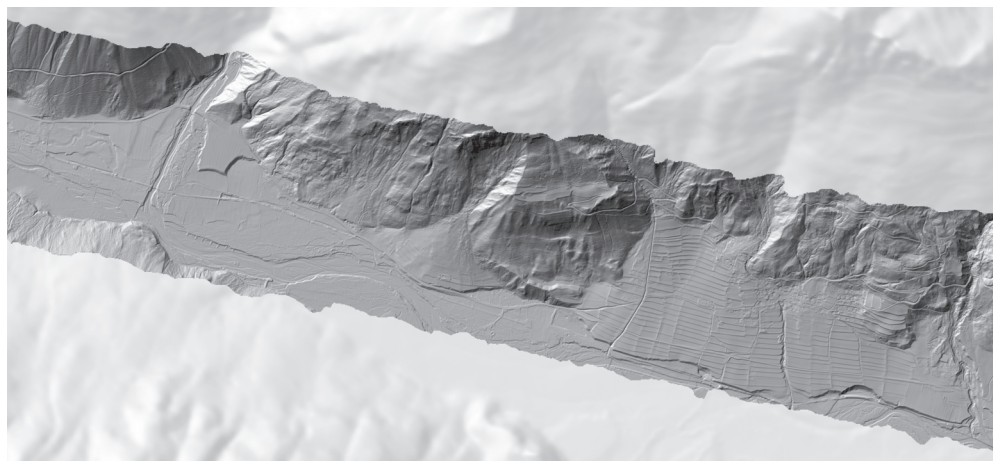
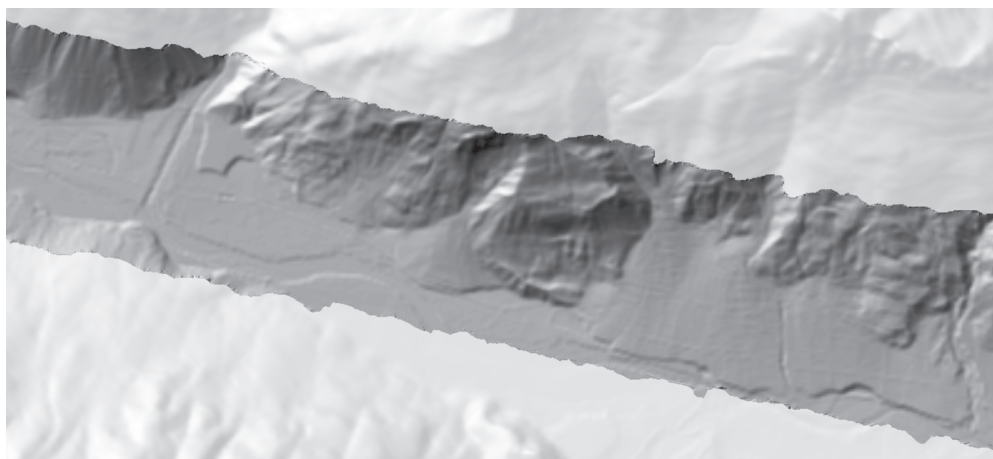
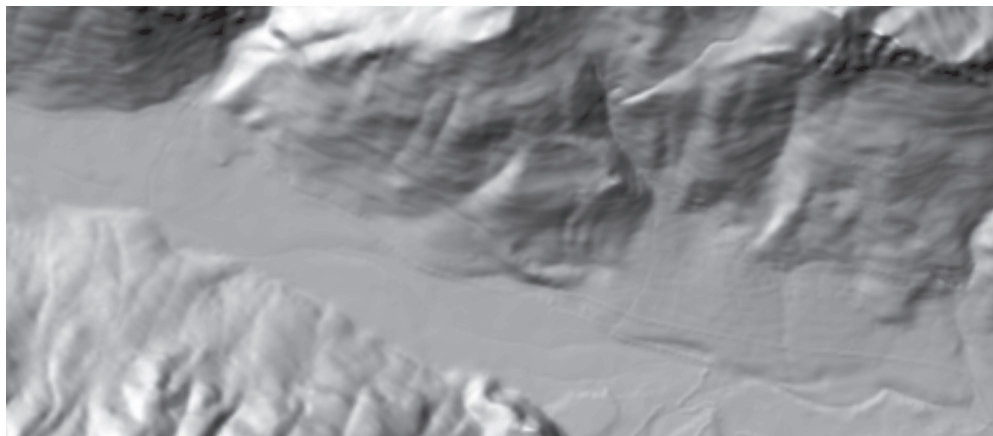
DMV 1 bi bil izdelan in kontroliran na podlagi ALS-ja in drugih geodetskih podatkov visoke natančnosti (npr. TLS, geodetske točke, DTK 5). Tak model bi se lahko uporabljal za najrazličnejše analize, pri katerih je potrebna visoka natančnost DMR-ja, npr. za simulacijo poplav, optimiziranje postavitev baznih postaj mobilne telefonije, za izdelavo načrtov obstoječe infrastrukture. Podobnih aplikacij je vedno več. Za Slovenijo bo ločljivost 1 m pomenila veliko količino podatkov, in sicer več kot 150-krat večjo od DMV-ja 12,5 (slika 5c). Takšne količine podatkov trenutno ni smiselno zapisati v en sloj, zato predlagamo uporabo sekcij (podobno kot za DTK 5), ki bodo DMV-je brezšivno spajale v celoto. Poleg tega je treba uporabnikom za vse sloje DMV-jev ponuditi primerne formate, kot so Grid ASCII, GeoTIFF, ASCII XYZ ipd., ki med drugim omogočajo delo v odprti kodi.

DMP 1 naj bi bil izdelan izključno na osnovi ALS-ja, torej neodvisno od drugih virov podatkov. Vse značilnosti naj bi bile podobne kot pri DMV-ju 1, pri čemer naj bi njegove višine opisovale ploskev površja, torej čez vrhove vegetacije, strehe ipd.

Zbirka surovih podatkov laserskih skeniranj v kakršnikoli obliki, tudi v »full-waveform«, je pomembna za zahtevne uporabnike. Ti se ne bodo zadovoljili le z modelom reliefa, temveč bodo poskušali s standardnimi ali lastnimi pristopi pridobivati še razne druge informacije iz laserskih podatkov. Pričakovati je nadaljnji razvoj številnih aplikacij na področju analize rabe tal, izdelavo modelov mest ali npr. kompleksnejših aplikacij analiz tveganj pred naravnimi nesrečami (Podobnikar et al., 2009). Poleg navedenega bi ta zbirka omogočila postopen prehod proti pravemu trirazsežnostnemu (3D) DMR-ju (Pfeifer, 2002) na območjih, kjer bi bilo to pomembno za doseganje kakovosti, vendar je samo apliciranje še v fazi razvoja.

Zbirka podatkov podvodnega reliefa in drugih virov naj bi vsebovala podvodni model reliefa in podatke hidrografskih meritev, ki bi temeljili na izmerah morskega dna (Karničnik et al., 2002), jezer, rek in dna drugih vodnih površin. Ena od možnosti je, da bi obsegala tudi modele površja pod edinima slovenskima ledenikoma. Naslednja možnost je, da bi dodali trirazsežnostne modele (ali surove podatke) jam (v povezavi s Katastrom jam Jamarske zveze Slovenije). V zbirko bi lahko vključili tudi druge podatke terestričnih laserskih skeniranj, npr. kamnolomov, deponij odpadkov in drugih človekovih posegov v prostor (Podobnikar et al., 2008). Tako bi pridobili zbirko golega zemeljskega površja, kakršno nam je v veliki meri fizično dostopno. Gre predvsem za zbiranje dodatnih podatkov, pri katerih bi bila ločljivost in kakovost precej nehomogena in neuskkljena, prav tako dostop do same zbirke, ki bi bila poleg zbirke surovih podatkov laserskih skeniranj pravzaprav vir prihodnjega trirazsežnostnega DMR-ja.

Omeniti je treba še DMV 12,5 (in 25, 100) prve verzije. Ta se bo lahko izboljševal z novimi viri, predvsem s podatki laserskega skeniranja, tako kot je bilo predlagano v Podobnikar in Mlinar (2006). Vprašanje je le, ali ni morda smiselno izdelavo DMV-ja 1 deloma ločiti od izdelave DMV-ja 12,5 in s tem optimizirati procesiranje. Vendar je to stvar natančnejše raziskave. Slika 5 prikazuje potencial izboljšanja DMV-ja 12,5 s podatki laserskega skeniranja.



Slika 5: Vizualna primerjava kakovosti senčenega reliefa, in sicer a) DMV 12,5, b) na 12,5 m prevzorčeni trije pasovi ALS DMV-ja ter c) ALS DMV z ločljivostjo 1 m (GU, 2005b, 2007; Flycom, 2008). Na območju velikosti 5,0 krat 2,4 km sta Belca in Dovje ter deloma Mojstrana.

6 SKLEP

V raziskavi je bil predstavljen razvoj DMR-ja na območju Slovenije, s poudarkom na dosežkih v zadnjih letih ter smernicah za prihodnost. Smernice so podkrepljene z nekaterimi dosežki stroke in tehničnimi zmožnostmi v zadnjih letih, ki se nanašajo predvsem na homogenizacijo koordinatnega sistema, razvoj tehnologije laserskega skeniranja ter kontrolo kakovosti podatkov. Pomemben dejavnik je, da je bil izdelan načrt vzdrževanja podatkov DMR-ja Slovenije v povezavi z nastankom njegove prve verzije leta 2005, vendar DMR od takrat še ni bil vzdrževan.

Na podlagi študije projekta izdelave DMR-ja Slovenije in nekaterih idej, ki bi potrebovale podkrepitev v bolj poglobljenih študijah, smo v članku predlagali smernice za DMR-ja Slovenije druge verzije. Smernice deloma dopolnjujejo prejšnji koncept vzdrževanja (Podobnikar, 2005b; Podobnikar in Mlinar, 2006). DMR Slovenije naj bi po tem predlogu vseboval naslednje sloje (podatke, označene v ležečem tisku, predlagamo v teh smernicah):

- *DMV 12,5, 25, 25,*
- *DMV 12,5 brez antropogenih vplivov,*
- *DMV 1, DMP 1,*
- *zbirko surovih podatkov laserskih skeniranj,*
- *zbirko podatkov podvodnega reliefa in drugih virov,*
- izohipse, skelet reliefa.

Pri odločanju uporabnikov za uporabo DMR-ja so izjemno pomembni pravilni metapodatki o kakovosti, ki poleg standardnih vsebin vsebujejo tudi podatke o kakovosti DMR-ja za vsako točko (Podobnikar, 2005b). Na podlagi takih podatkov lahko uporabniki glede na svoje zahteve veliko hitreje in bolje presodijo, ali je smiselno uporabiti DMR na območju, ki jih zanima. Takšne rešitve omogoča že prva verzija DMR-ja Slovenije, vendar so ti metapodatki za običajnega uporabnika težko dostopni.

Želimo, da bi bil pričujoči članek ena od spodbud za premislek o nadaljnjem razvoju DMR-ja Slovenije na nacionalni ravni. Potrebe po visokokakovostnem modelu reliefa so zagotovo velike. Pomembno bi bilo v okviru Geodetske uprave RS organizirati dejavnosti, ki bi pripeljale k združevanju znanja in sredstev pri vzdrževanju kakovostne zbirke podatkov reliefa in k njeni učinkoviti vzajemni povezanosti z drugimi zbirkami na državni ravni. Izhodišča imamo primerna, tuji zgledi jih dopolnjujejo.

V prihodnje bodo zapletenejša študije, postopki, naprave in podobno vključevali vsestransko uporabne postopke za kar najboljšo izdelavo DMR-ja (ontološko, epistemološko, pragmatično) z integracijo tehniških, naravoslovnih in družbenih znanosti. S tem bomo morda dosegli večjo stopnjo enostavnosti kot končno stopnjo prefinjenosti in razvoja (po Leonardu da Vinciju).

Zahvala

Večji del metodologije za integracijo podatkov pri izdelavi digitalnega modela reliefa je nastal na Znanstvenoraziskovalnem centru SAZU. Dodatne tehnike za vizualno kontrolo kakovosti sem

razvijal ob podpori projekta TIMIS.morph kot del programa HRSC na Mars Expressu s pomočjo Avstrijske agencije za promocijo znanosti v okviru programa ASAP. Pomemben del prostorskih podatkov sta posredovala Geodetska uprava RS in Flycom, d.o.o.

Literatura in viri:

- Banovec, T., Lesar, A. et al. (1975). (Sodelavci: Bergant, B., Čulav, L., Ferjan, M., Podobnikar, M., Slatnar, A., Stare, N., Šivic, P.) *Prostorsko-informacijski sistem SR Slovenije / PIS SRS/ – II. faza, elaborat št. 2, Digitalni model reliefa*. Geodetski zavod SRS, Ljubljana.
- Berk, S. (2008). *Osebna komunikacija* (12. 10. 2008).
- Berk, S., Duhovnik, M. (2007). *Transformacija podatkov Geodetske uprave Republike Slovenije v novi državni koordinatni sistem*. *Geodetski vestnik*, 51 (4), 803–826.
- BEV (2008). *Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen*, <http://www.bev.gv.at> (12. 10. 2008).
- Briese, C., Pfeifer, N., Dorninger, P., 2002. *Applications of the Robust Interpolation for DTM Determination*. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXIV (3A), 55–61.
- Burrough, P. A., McDonnell, R. A. (1998). *Principles of Geographical Systems Information Systems: Spatial Information Systems and Geostatistics*. Oxford University Press.
- Chauve, A., Mallet, C., Bretar, F., Durrieu, S., Deseilligny, M. P., Puech, W. (2007). *Processing full-waveform lidar data: Modelling raw signals*. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVI (3/W52), 102–107.
- Doyle, F. J. (1978). *Digital Terrain Models: An Overview*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 44, 1481–1487.
- GU (2005, 2007). *Geodetska uprava Republike Slovenije. DMR Slovenije ločljivosti 12,5, 25 in 100 m, DMV 5*.
- EuroGeographics (2008). *EuroDEM*. <http://www.ec-gis.org/inspire> (10. 10. 2008).
- Flycom (2008). *Flycom d.o.o., »Full-waveform« podatki za Zgornjesavsko dolino*.
- ISO/TC 211 (2008). *International Standard Organization Geographic information/Geomatic*, <http://www.isotc211.org/> (10. 10. 2008).
- Kager, H. J. (2004). *Discrepancies between overlapping laser scanner strips – simultaneous fitting of aerial laser scanner strips*. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXV (B21)*, 555–560.
- Karničnik, I., Radovan, D., Žerjal, A. (2002). *Hidrografska izmera obalne črte in priobalnega pasu slovenskega morja. Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2001–2002*, Ljubljana: Založba ZRC, 119–125.
- Kraus, K., Briese, C., Attwenger, M., Pfeifer, N. (2004). *Quality Measures for Digital Terrain Models*. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXV (B2), 113–118.
- Kraus, K. (2007). *Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans (2nd ed.)*. Berlin, New York: Walter de Gruyter.
- Kraus, K., Pfeifer, N. (1998). *Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Elsevier Science*, 53, 193–203.
- Kvamme, K., Oštir-Sedej, K., Stancič, Z., Šumrada, R., 1997. *Geografski informacijski sistemi*. ZRC SAZU, Ljubljana.
- Leica (2008). http://www.leica-geosystems.com/corporate/en/lgs_57627.htm (10. 10. 2008)
- Maune, D. F. (ur.) (2001). *Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual*. Maryland: ASPRS.
- Miller, C. L., Laflamme, R. A. (1958). *The Digital Terrain Model: Theory and Application*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 24, 433–422.
- NGA (2008). *National Geospatial-Intelligence Agency*, <http://www.nga.mil> (10. 10. 2008).
- Oksanen, J. (2006). *Digital elevation model error in terrain analysis*. *Kirkkonummi: Publications of the Finnish Geodetic Institute*, (134).
- Perko, D. (2007). *Morfometrija površja Slovenije*. Ljubljana: Založba ZRC.
- Pfeifer, N. (2002). *3D Terrain Models on the Basis of a Triangulation*. *Geowissenschaftliche Mitteilungen, Heft 65, (127)*. <http://www.ipf.tuwien.ac.at/np/Publications/geowissmittnp.pdf>

- Podmenik, M. (2008). Primerjava digitalnih modelov reliefa, pridobljenih z zračnim laserskim skeniranjem in digitalno fotogrametrijo na delu Krške doline. Diplomaska naloga. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Podobnikar, T. (2002). Model zemeljskega površja – DMR ali DMV? *Geodetski vestnik*, 46 (4), 347–353.
- Podobnikar, T. (2003). Kronologija izdelave digitalnega modela reliefa Slovenije. *Geodetski vestnik*, 47 (1/2), 47–54.
- Podobnikar, T. (2005a). Izdelava modela reliefa Slovenije. *Elaborat projekta*, 62 str.
- Podobnikar, T. (2005b). Production of integrated digital terrain model from multiple datasets of different quality. *International journal of geographical information science*, 19 (1), 69–89.
- Podobnikar, T. (2008a). Enhancing terrain features for improved cartographic visualisation. V: *Second International Conference on Cartography & GIS*, (1) (str. 245–253). Sofija: University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy.
- Podobnikar, T. (2008b). Methods for visual quality assessment of a digital terrain model. *Surveys and Perspectives Integrating Environment and Society (SAPIENS)* (v tisku).
- Podobnikar, T. (2008c). Simulation and representation of the positional errors of boundary and interior regions in maps. V: A. Moore, I. Drecki (ur.), *Geospatial vision : new dimensions in cartography : Lecture notes in geoinformation and cartography* (str. 141–169) Berlin; Heidelberg: Springer.
- Podobnikar, T., Schöner, M., Jansa, J., Pfeifer, N. (2008). Spatial analysis of anthropogenic impact on karst geomorphology (Slovenia). *Environmental Geology*, Heidelberg: Springer-Verlag (DOI: 10.1007/s00254-008-1607-3), 12 str..
- Podobnikar, T. et al. (2009). Ocena tveganja pred naravnimi nesrečami z analizami zračnega laserskega skeniranja – primera za območje Alp. *Naravne nesreče v Sloveniji, Založba ZRC*, 1, (v pripravi).
- Podobnikar, T., Mlinar, J. (2006). Izdelava in vzdrževanje digitalnega modela reliefa Slovenije z integracijo obstoječih virov. *Geodetski vestnik*, 50 (3), 472–480.
- Riegl (2008). http://www.riegl.com/airborne_scanners/airborne-scanner-packages/pdf_airbone-laser-scanner-packages/lms-q560_datasheet.pdf (10. 10. 2008)
- Rihtaršič, M., Fras, Z. (1991). Digitalni model reliefa. 1 del: teoretične osnove in uporaba DMR. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FAGG – KFK.
- Scop++ (2005). SCOP++ – Program package for Digital Terrain Models. <http://www.ipf.tuwien.ac.at/products>; <http://www.inpho.de> (10. 10. 2008).
- Swisstopo (2008). Federal Office of Topography, swisstopo, DOM/DTM-AV, <http://www.swisstopo.admin.ch> (12. 10. 2008).
- USGS (1998). United States Geodetic Survey, Digital Elevation Model Standards, <http://mmcweb.cr.usgs.gov/public/nmpstds/demstds.html>, <http://rockyweb.cr.usgs.gov/nmpstds/demstds.html> (10. 10. 2008).
- Wagner, W., Ullrich, A., Ducič, V., Melzer, T., Studnicka, N. (2006). Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 60, 100–112.

Prispelo v objavo: 14. oktober 2008

Sprejeto: 30. oktober 2008

dr. Tomaž Podobnikar, mag., univ. dipl. inž. geod.

Znanstvenoraziskovalni center SAZU, Novi trg 2, 1000 Ljubljana

e-pošta: tp@zrc-sazu.si in

Technische Universität Wien, Gußhausstraße 27–29, A-1040 Dunaj, Avstrija

e-pošta: tp@ipf.tuwien.ac.at