

METODE**KONCEPT IZDELAVE NOVEGA DIGITALNEGA
MODELA RELIEFA SLOVENIJE**

AVTOR

Tomaz Podobnikar

Naziv: dr., mag., univerzitetni diplomirani inženir geodezije, znanstveni sodelavec

Naslov: Prostorskoinformacijska enota ZRC SAZU, Novi trg 2, SI – 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: tomaz@zrc-sazu.si

Telefon: 01 470 64 94

Faks: 01 425 77 95

UDK: 528.94:551.4:004(497.4)

COBISS: 1.01

IZVLEČEK

Koncept izdelave novega digitalnega modela reliefa Slovenije

V prispevku je predstavljen inovativen koncept izdelave digitalnega modela reliefa (DMR) iz raznovrstnih geodetskih podatkov različne kakovosti. Podrobnejši opis sloni na osnovi izdelave digitalnega modela višin (DMV) z ločljivostjo 20 m in pričakovano vertikalno natančnostjo okoli 3,3 m za vso Slovenijo. Razvita je bila metoda utežnega seštevanja virov z geomorfološkimi popravki, s katero se da učinkovito upoštevati vire različnega izvora in kakovosti. Trenutno je za približno osmino površine Slovenije izdelan DMV 20, projekt pa se bo predvidoma nadaljeval do pokritja Slovenije in bližnje okolice ter z izboljšavo in nadgradnjo v DMR. Tako izdelan DMR bo vseboval tudi značilne črte in točke zemeljskega površja.

KLJUČNE BESEDE

digitalni model reliefa, DMR, digitalni model višin, DMV, geodetski podatki, Slovenija

ABSTRACT

Concept of new digital terrain model of Slovenia production

In this article an innovative concept of digital terrain model (DTM) from various geodetic data of different quality is presented. More detail description bases on production of digital elevation model (DEM) with resolution of 20 m and expected accuracy around 3.3 m for the whole Slovenia. A method of weighted sum of sources with geomorphologic corrections which can efficiently consider data of different sources and quality have been developed. At the moment for about eighth of Slovenia is produced DEM 20, and project will probably continue until all of Slovenia and its nearest neighbourhood will be modelled. The DEM will be further improved with upgrading to DTM. The produced DTM will include structural lines and points of the Earth's surface.

KEYWORDS

digital terrain model, DTM, digital elevation model, DEM, geodetic data, Slovenia

Uredništvo je prispevek prejelo 28. junija 2002.

1 Uvod

Zamisel o izdelavi digitalnega modela reliefa (DMR) je stara skoraj toliko kot informacijska doba z uveljavljanjem digitalnega računalništva, torej vsaj 50 let. Vendar segajo njegove korenine tudi v analogne predstavitve reliefa, ki so neprimerno starejše, stare nekaj tisoč let. Za potencialne uporabnike DMR-ja lahko štejemo geografe, kartografe, geodete, arheologe in druge. Uporabljamo ga lahko pri prostorskem planiranju, telekomunikacijah, meteorologiji in drugod (Podobnikar 2001). Računalniki so omogočili učinkovite analitične obdelave podatkov ter vzpostavitev zbirke podatkov za izdelavo in praktično uporabo DMR-ja. Možnosti za njegovo izdelavo je pospešilo daljinsko zaznavanje in uveljavitev digitalne fotogrametrije ter pripadajočih metod in tehnik za pridobivanje, obdelavo, interpretacijo in merjenje digitalnih posnetkov. Izraz digitalni model reliefa (angleško *digital terrain model* ali *DTM*) je prvi uporabil Američan Charles Leslie Miller med letoma 1955 in 1960, ko je s skupino sodelavcev izdelal raziskovalno nalogo, katere cilj je bil razvoj računalniško podprtega sistema za učinkovito projektiranje avtocestne infrastrukture (Doyle 1978).

Poglejmo si najprej osnovni definiciji digitalnega modela ploskve Zemlje. Digitalni model reliefa je način opisa oblikovanosti zemeljskega površja, ki vključuje višinske točke, značilne črte in točke reliefa ter druge elemente, ki ga opisujejo, na primer naklone, plastnice, padnice. V nasprotju z DMR-jem vsebuje digitalni model višin (DMV) za opis površja samo višine točk, največkrat zapisane v rastrski strukturi.

V Sloveniji je bilo do sedaj izdelanih več globalnih in lokalnih DMV-jev. V zadnjih tridesetih letih so bili zajeti podatki in vzpostavljene različne digitalne zbirke podatkov, ki vsebujejo poleg drugih tudi podatke, ki opisujejo relief. Nekatere zbirke pokrivajo celotno Slovenijo, druge pa le njena posamezna območja. V prispevku želimo predstaviti inovativen in univerzalen koncept izdelave DMV-ja (in njegovo nadgradnjo v DMR) iz obstoječih podatkov, kakršne dobimo v posameznih zbirkah podatkov.

Osnovni cilj predstavljenega koncepta je izdelava kakovostnega DMR-ja Slovenije in njene okolice ter DMV-ja kot najširše uporabljenega sloja višin, primerne za analize v geografskih informacijskih sistemih. K omenjenim ciljem lahko štejemo tudi izvedene sloje, kot so sence in nakloni površja ter samodejno izdelane plastnice, sprva do merila 1 : 25.000 in kasneje vse do merila 1 : 5000. Stranski cilji izdelave se nanašajo na celovito oceno, vzdrževanje in izboljšanje obstoječih zbirke podatkov. Med izdelavo DMV-ja je treba namreč vse podatke preveriti in prečistiti. Mednje štejemo predvsem vzdrževanje zbirke plastnic in senc reliefa za kartografske potrebe ter drugih geodetskih zbirke podatkov, kot so zbirka geodetskih točk in centralna zbirka podatkov o stavbah. V okviru koncepta je opisana filozofija in metodologija izdelave DMR-ja pri uporabi obstoječih podatkov, ki so hkrati tudi različne kakovosti.

2 DMR v Sloveniji – od začetkov do danes

V Sloveniji ima področje DMR-ja v primerjavi z večino drugih držav dolgoletno tradicijo, ki sega na konec šestdesetih let prejšnjega stoletja, ko je bil izdelan relativni model višin občine Domžale. Že v sedemdesetih letih so začeli na državni ravni izdelovati digitalni model višin DMR 100 (Banovec in Lesar 1973). Dokončno je bil izdelan sredi osemdesetih let, in sicer z ročno digitalizacijo višinskih točk v pravilni kvadratni raster, ločljivosti 100 krat 100 m. Kot osnova za zajem podatkov so služile predvsem topografske karte TTN 5 in TTN 10. DMR 100 v zadnjem desetletju zaradi premajhne natančnosti in ločljivosti (Stančič in sodelavci 1999) za večino potencialnih uporabnikov ni več primeren (Podobnikar 2000).

Sredi devetdesetih let so začeli z zajemom digitalnega modela višin z ločljivostjo 25 krat 25 m, DMR 25. Slednjega izdelujejo s fotogrametričnimi metodami vzporedno z izdelavo ortofoto načrtov (DOF 5). Osnovni vir so posnetki cikličnega aerosnemanja Slovenije (CAS) merila 1 : 17.500. Prednost DMR 25 v primerjavi z drugimi je njegova visoka lokalna višinska natančnost, največja pomanjkljivost pa geomorfološka nehomogenost (Podobnikar 2001) ter dolgotrajna izdelava, ki še ni popolnoma končana.

Leta 2000 je bil izdelan digitalni model višin InSAR DMV 25 (Oštir in sodelavci 2000). Za izdelavo interferometričnega DMV-ja ločljivosti 25 krat 25 m so bili uporabljeni radarski posnetki Evropske vesoljske agencije (ESA). Največje prednosti InSAR DMV 25 glede na DMR 100 in DMR 25 so statistično homogena natančnost ter geomorfološko in vizualno visoka kakovost. Po metodologiji, opisani v tem prispevku, je bil leta 2001 za del Slovenije izdelan DMV 20 (Podobnikar in sodelavci 2001). Na Geodetski upravi Republike Slovenije so za območje vse Slovenije trenutno na razpolago DMR 25, InSAR DMV 25 ter InSAR DMV 100 (izdelan s prevzorčenjem InSAR DMV 25), za osmino površine države pa DMV 20.

Modeli reliefa na slovenskem ozemlju so bili opisani že v marsikateri knjigi in članku. Omeniti velja več knjig iz 17. stoletja z ličnimi kartografskimi prikazi barona Janeza Vajkarda Valvasorja ter opise razvoja kartografije in v njenem okviru prikaza reliefa v Koroščevi (1978) knjigi Naš prostor v času in projekciji. Pomembno delo na področju modelov reliefa pri nas, Digitalni model reliefa (Rihtaršič in Fras 1991), podrobno opisuje metode v povezavi z modeliranjem DMR-ja. Leta 1997 je bila izdana knjiga oziroma učbenik o geografskih informacijskih sistemih (Kvamme in sodelavci 1997). Dva razdelka opisujeta osnovna načela DMR-ja od izdelave do možnosti uporabe in analiz v okviru geografskih informacijskih sistemih. Modeliranje zemeljskega površja je podrobno opisano tudi v doktorski disertaciji avtorja tega prispevka (Podobnikar 2001). V knjigi Analiza površja Slovenije s stometrskim digitalnim modelom reliefa (Perko 2001) pa je avtor opisal značilnosti površja Slovenije na podlagi geografskih analiz DMR-ja.

3 Koncept izdelave digitalnega modela reliefa Slovenije

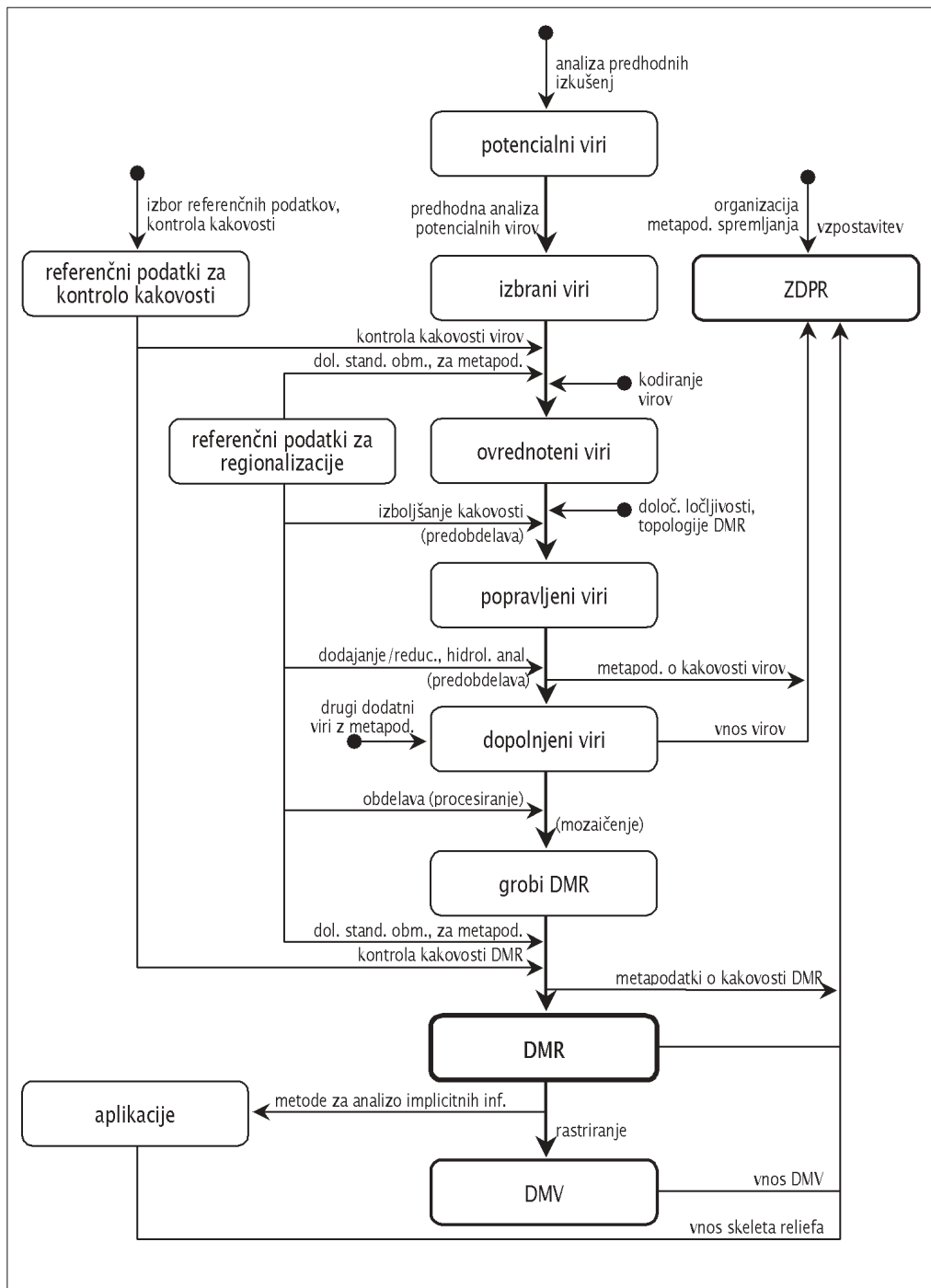
Koncept izdelave DMR-ja Slovenije se naslanja na obstoječe vire raznih geodetskih (in drugih) zbirk podatkov. Največji problem pri morebitni uporabi takih zbirk je njihova različna kakovost (Ecker 1999), še več, večina zbirk vsebuje veliko grobih in celo sistematskih napak (Podobnikar 2001). Dodaten problem so tudi med seboj slabo primerljivi ali nepopolni metapodatki. Poleg tega v metapodatkih ni prav veliko informacij o kakovosti, nujnih za izdelavo statistično in geomorfološko kakovostnega DMR-ja, med katerimi je zelo pomemben prav geomorfološki kriterij. Pomemben dejavnik pri izdelavi je tudi možnost nadgradnje z novimi viri. Koncept izdelave DMR-ja Slovenije vsebuje v grobem naslednje štiri korake, od katerih prve tri podrobneje obravnavamo v nadaljevanju, shematično pa jih prikazuje slika 1:

- priprava za modeliranje,
- postopek predobdelave virov,
- postopek obdelave DMR iz virov in
- upravljanje s podatki o reliefu.

3.1 Priprava za modeliranje DMR

Priprava za modeliranje DMR-ja je zelo obširen korak pri njegovi izdelavi. Nanaša se na pregled stanja modeliranja reliefa, na analize uporabe potencialnih metod ter na analize kakovosti virov (skupaj z obstoječimi metapodatki) in njihov izbor. Za učinkovitejše modeliranje DMR-ja je treba vire tudi primerno kodirati glede na strukturo ploskve površja, ki naj bi predstavljala model, in glede na izbor programske opreme za izdelavo. Izbrati je treba tudi primerne interpolacijske metode za postopka predobdelave in obdelave virov. Sledijo samodejne regionalizacije z namenom iskanja homogenih območij, ki omogočajo pregledno in učinkovito izdelavo DMR-ja iz podatkov z različnimi lastnostmi. Pri tem dobimo natančno ovrednotene parametre, ki omogočajo izdelavo kakovostnega DMR-ja (Podobnikar 2001).

Poglejmo si podrobneje, kateri so bili potencialni viri za izdelavo DMR. V zadnjih treh desetletjih so različne ustanove zbrale zgledno število digitalnih zbirk podatkov, ki dajejo možnosti za izdelavo



Slika 1: Shema koncepta izdelave DMR-ja.

boljšega DMR-ja brez dodatnega zajema. Izhodišče za izdelavo kakovostnega digitalnega modela reliefa Slovenije visoke ločljivosti, vertikalne natančnosti in geomorfološke kakovosti so v našem primeru raznovrstni geodetski podatki. Najpomembnejši so različni DMV-ji, med katerimi so pomembni viri DMR 100, DMR 25, InSAR DMV 25, ki pokrivajo celotno Slovenijo, DMR 10, ki pokriva območje slovenske obale, in nekateri drugi lokalni DMV-ji, s katerimi razpolagajo država in lokalne skupnosti. Upoštevanja vredna možnost so tudi plastnice, vektorizirane s kart velikih meril (GKB-relief, za manjša območja pa TTN 5). Poleg tega je mogoče v modeliranje vključiti tudi zbirke evidenc in registrov, ki poleg drugih podatkov vsebujejo tudi podatke o nadmorskih višinah, merjenih na površju Zemlje. Med točkovnimi viri velja omeniti zbirke geodetskih točk, točk zemljiškega katastra in centralne zbirke podatkov o stavbah. Zelo pomemben vir za izdelavo DMR-ja so tudi podatki iz topografske zbirke večje natančnosti, v katere fotogrametrično zajemajo tudi podatke voda in prometa, ki posredno določajo oblikovanost površja.

3.2 Postopek predobdelave DMR

Med postopki predobdelave ovrednotimo ter izboljšamo vire z izločitvijo grobih in sistematskih napak ter z drugimi postopki. Pomembna elementa predobdelave sta:

- ocena kakovosti izbranih virov ter odstranitvev grobih in sistematskih napak,
- dodajanje/reduciranje podatkov.

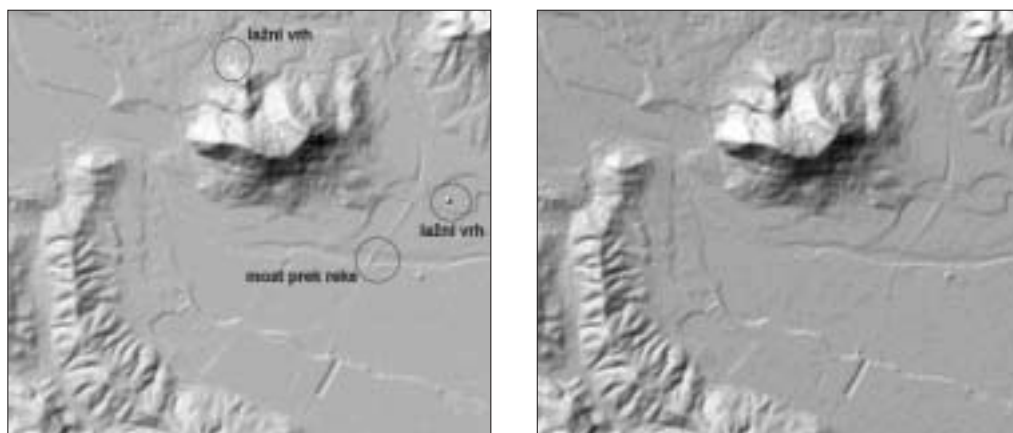
Grobe in sistematske napake morajo biti odstranjene pred postopkom obdelave DMR. V ta namen je treba poznati gradivo o zajemu in lastnostih virov ter s testiranjem podatkov dobiti podrobnejše informacije o možnih napakah. Najpomembnejši koraki ocene kakovosti izbranih virov ter odstranitve grobih in sistematskih napak so:

- vizualna ocena referenčnih podatkov in ročno popravljanje grobih napak,
- statistična ocena referenčnih točk ter samodejna odstranitev grobih napak in
- statistična ocena zveznih slojev ter samodejna odstranitev sistematskih in grobih napak.

Pri vizualni oceni referenčnih podatkov gre za kontrolo in ročno popravljanje grobih napak. Grobe napake vektoriziranih plastnic najenostavneje popravljamo tako, da iz njih interpoliramo DMV, ga senčimo in opazujemo morebitne geomorfološke nepravilnosti, ki se pojavijo predvsem zaradi napačnih atributov višin. Pomagamo si lahko tudi s samodejno izdelanimi plastnicami, medsebojnimi primerjavami podobnih slojev ali ortofotom. Podobno kontroliramo tudi posamezne DMV-je, kot so DMR 100, DMR 25 (slika 2), InSAR DMV 25, DMR 10 in DMR 10 mesta Ljubljane. Ugotovljene grobe napake popravimo ali izločimo.

Med referenčne in druge točke štejemo geodetske točke, točke zemljiškega katastra, centralne zbirke podatkov o stavbah, kóte, torej točke, ki jih uporabljamo za statistično kontrolo drugih virov (zveznih slojev) ter prav na koncu tudi za izdelavo DMR-ja. Načeloma so omenjene točke zelo natančne, vendar vsebujejo nekatere izmed njih tudi grobe napake. Samodejno izločamo tiste, za katere vemo, da niso bile izmerjene na zemeljskem površju, da prikazujejo vrednosti, ki niso verjetne (na primer vrednosti, višje od nadmorske višine Triglava) in podobno. Pomagamo si tudi s tako imenovanim referenčnim DMV-jem kot homogenim in natančnim slojem, s katerim primerjamo višine posameznih točk in izločimo tiste, ki preveč odstopajo (Podobnikar 2001).

S popravljenimi referenčnimi točkami, ki so brez grobih napak, lahko nato natančno statistično ocenimo netočkovne oziroma zvezne sloje. Najpomembnejša pri tem sta parametra srednjega kvadratnega odklona m , ki ga uporabimo za oceno naključne komponente napake oziroma odklona (σ) ter srednjega odklona M kot sistematske komponente (Podobnikar 1999 in 2001). S precej zapletenim postopkom lahko določimo območja potencialnih grobih napak zveznih slojev in jih iz nadaljnega modeliranja odstranimo. Sledi odprava sistematskih napak, ki jih ocenjujemo in odstranjujemo glede na standardna območja za kontrolo kakovosti, določena glede na razgibanost in naklone površja, glede na značilna območja (vrtača, dolina, sedlo, greben, vrh) ter z upoštevanjem poraslosti. Po odstranitvi gro-



Slika 2: Z vizualizacijo senčenja odkrite grobe napake (levo) in s tako imenovano metodo preinterpolacije odstranjene (desno).

bih in sistematskih napak zveznih slojev sledi ponovna ocena kakovosti teh slojev in s tem določitev ustreznih parametrov za postopek obdelave DMR-ja.

Pri dodajanju ali reduciranju podatkov ne gre za odstranjevanje grobih ali sistematskih napak, temveč za popravljanje virov z namenom geomorfoloških izboljšav ali dodatnih priprav za učinkovitejšo obdelavo DMR-ja. Rezultati interpolacije DMR-ja bi bili namreč precej slabši, če ne bi imeli na voljo značilnih točk in črt reliefa ter primerno gostih podatkov na najbolj razgibanem površju. Metode za dodajanje in deloma reduciranje podatkov so:

- samodejno atributiranje z višinami,
- samodejno zgoščevanje,
- ročni zajem dodatnih podatkov in
- samodejno spreminjanje geomorfološko nepravilnih podatkov.

Pri samodejnem atributiranju z višinami gre za dodajanje atributov višin tistim podatkom, ki jih nimajo, na primer rečni mreži ter črtam razvodnic zbirke GKB-hidrografija. V tem primeru so najbolj v pomoč primerljivi viri istega merila, kot so plastnice GKB-reliefa. Metoda temelji na iskanju presečišč med črtami podatkov, ki jih atributiramo, in plastnicami. Izkazalo se je, da so največji problem pomanjkljivo vektorizirane plastnice, ki zaradi upoštevanja kartografskih pravil manjkajo prav na območjih rečne mreže, kjer bi jih najbolj rabili. Pri zbirki razvodnic pa se je izkazalo, da so bile položajno premalo natančno zajete. Metoda samodejnega atributiranja z višinami se torej ni izkazala za učinkovito (Podobnikar in sodelavci 2000; Podobnikar 2001).

Pri samodejnem zgoščevanju virov gre za dodajanje manjkajočih podatkov po analogiji stopnjujočega in selektivnega vzorčenja. Pri stopnjujočem vzorčenju se gostota zajetih točk samodejno prilagaja razgibanosti površja (Makarovič 1973), pri selektivnem pa gre za zajemanje točk vzdolž značilnih črt površja (Rihtaršič in Fras 1991). Metodi, razviti po analogiji stopnjujočega in selektivnega vzorčenja, zgoščujeta le obstoječe podatke (plastnice GKB-relief in TTN 5) z na novo generiranimi podatki. Pri izdelavi DMR-ja Slovenije so bili uporabljeni inovativni pristopi, razviti na osnovi rastrske strukture, ki omogočajo izdelavo geomorfološko pravilnega DMR-ja (Podobnikar 2001). Pri tem velja omeniti še metodo tako imenovane preinterpolacije, s katero interpoliramo območja DMV-ja, na katerih smo »izrezali« grobo napako (slika 2) in ki so hkrati geomorfološko zelo enostavna (Podobnikar in sodelavci 2001).

Kljub temu da gre v našem primeru načeloma za izdelavo DMR-ja iz obstoječih virov, se je izkazalo, da je smiselno nekatere vire ročno dopolniti s tistimi podatki, ki najbolj vplivajo na izboljšavo

obstojećih virov različne kakovosti. Pri tem gre za dela, ki niso časovno zamudna in so relativno poceni. V prvo skupino sodi atributiranje obstoječih virov z višinami, med katere sodi pripis višin stoječim vodam GKB-hidrografije (večinoma gre za jezera). V drugi skupini gre predvsem za ročno dopolnjevanje manjkajočih plastnic GKB-reliefa na območjih gora (kjer ni bila možna polsamodejna metoda zajema) ter na urbanih območjih in presečiščih rek, potokov in komunikacij (kjer so plastnice zaradi kartografskih pravil pretrgane). Dobrodošel dodaten podatek za izdelavo DMR-ja je tudi zajem kot s kartografskega gradiva.

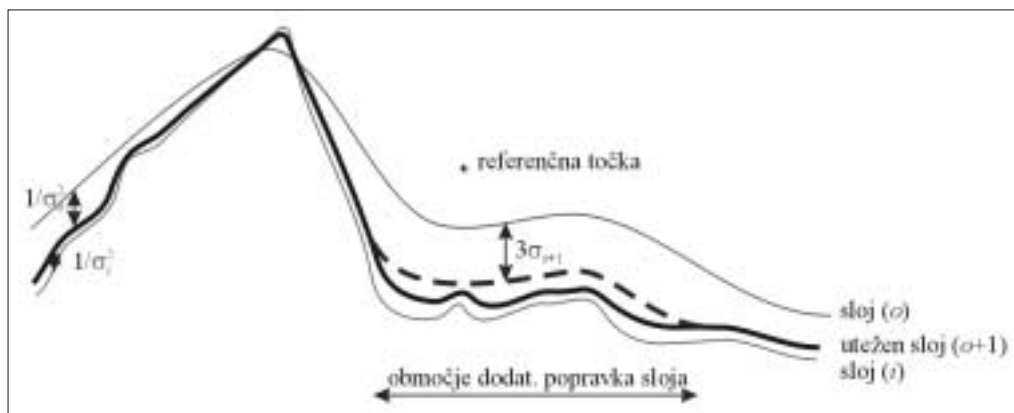
Pri samodejnem spreminjanju geomorfološko nepravilnih podatkov gre za geomorfološke analize reliefa in reduciranje nepravilnih podatkov, v posameznih primerih pa tudi za dodajanje (na primer pri hidroloških analizah). Uporabljene so bile samodejne metode, in sicer za izločanje raztresenih točk v neposredni bližini skeleta reliefa, metoda grobe ocene (angleško *robust estimation*) za statistično izločanje točk, ki preveč odstopajo od ploskve DMR-ja oziroma niso dovolj avtokorelirane. Druge samodejne metode so hidrološke analize, pri katerih se upošteva, da vodotoki vedno tečejo navzdol, pri čemer je treba biti posebej pozoren na kraških območjih, kjer je le malo površinskih vodotokov.

Po uspešno izvedeni pripravi in predobdelavi sledi izbira primernih metod za postopek obdelave ali splošneje, za interpolacijo DMR-ja. Razvili smo metodo utežnega seštevanja virov z geomorfološkimi popravki (Podobnikar 2001). Metoda zagotavlja pridobivanje statistično in geomorfološko zadovoljivih rezultatov in hkrati omogoča tudi enostavno spremljanje kakovosti izdelave DMR-ja ter nadgradnjo z novimi viri. Pri obdelavi so uporabljeni vsi viri (zvezni sloji in točke), pripravljene z opisanim postopkom predobdelave. Postopek obdelave je naslednji (Podobnikar 2001):

- interpolacija posameznih zveznih slojev (v odvisnosti od narave virov) v rastrske ploskve enake ločljivosti in istega koordinatnega izhodišča,
- mozaičenje v osnovni sloj,
- utežno seštevanje slojev predvsem glede na parametre analiz kakovosti,
- geomorfološki popravki s pomočjo ploskev trenda,
- upoštevanje (nekaterih) točk in
- izboljšanje modela na osnovi hidroloških analiz in nadgradnja DMV-ja 20 v DMR.

Med vsemi navedenimi fazami neprestano poteka kontrola kakovosti pridobljenih podatkov.

Na začetku moramo vse zvezne sloje, vključno s plastnicami, interpolirati s primernimi metodami (Jaakkola in Oksanen 2000) ali prevzorčiti v raster enake ločljivosti (Longley in sodelavci 2001). Najpomembnejše sloje z mozaičenjem po vnaprej določeni prioriteti sestavimo v osnovni sloj. Prioriteta je pomembna pri izbiri celotnih lokalnih slojev po načelu uporabe najboljših virov v celoti. Prehodi (pasovi v horizontalnem smislu) med posameznimi viri so spojeni s pasom prekrivanja primerne širine.



Slika 3: Utežno seštevanje virov pri upoštevanju njihove kakovosti.

Sledi utežno seštevanje drugih, sekundarnih slojev (slika 3). Uteži določamo predvsem glede na predhodno pridobljene parametre statističnih analiz kakovosti in deloma geomorfoloških parametrov. Pri tem upoštevamo uteži, modelirane za vsak upoštevanj zvezni sloj posebej. Z vsakim naslednjim slojem dobiva osnovni sloj ($o + 1$) popravek vrednosti uteži glede na vrednosti predhodnega osnovnega sloja (o) in sekundarnega sloja (i). Popravljen sloj uteži upoštevamo pri nadaljnjem dodajanju vira. Na tak način dobiva DMV z vsakim dodatnim slojem statistično boljše lastnosti. Pri utežnem seštevanju upoštevamo tudi vrednosti referenčnih točk, in sicer tako, da v primeru prevelikega odklona utežene ploskve (DMV) od teh točk približamo to ploskev točkam tako, da geomorfološko čim manj kvarimo oblikovanost zemeljskega površja.

Z utežnim seštevanjem dobimo torej statistično visokokakovosten DMV. Kljub vsemu pa pri tem zaradi povprečenja ne dobimo geomorfološko povsem pravilnih ploskev, zato moramo poleg statističnih parametrov kakovosti upoštevati tudi geomorfološke. Geomorfološka rekonstrukcija DMV-ja temelji na filtriranju z nizkorepustnim (Gaušovim) filtrom, s čimer dobimo ploskve trenda. Ploskvi trenda uteženega sloja (DMV) se nato prišteje razlika med vrednostjo boljšega sloja in pripadajočega trenda.

Točkovni viri na žalost večinoma ne vsebujejo informacij o geomorfoloških lastnostih reliefa njihove okolice. Izjema so značilne točke, ki se nanašajo na vrhove, dna vrtač ali sedla. Zato lahko upoštevamo točke le tako, da pri tem geomorfološko ne kvarijo modela. Najbolj jih lahko upoštevamo na najbolj razgibanih območjih in najmanj na ravninah. Pri tem je smiselno upoštevati tudi njihovo ožjo okolico (z interpolacijo). Poudariti velja, da so bile točke pri utežnem seštevanju pri prevelikem odstopanju od referenčnih točk že deloma upoštewane (slika 3).

Nazadnje sledijo še hidrološke analize in izboljšave modela, ki jih lahko za posamezne sloje izvajamo že pri postopkih predobdelave, ponoviti pa jih je treba tudi pri postopku obdelave. Pri nadgradnji DMV-ja 20 v DMR gre za nadaljnje izboljšanje ploskve digitalnega modela reliefa. S tem postopkom pridobimo predvsem značilne in lomne črte ter točke površja, vključene v končno hibridno strukturo DMR-ja, ali pa kot neodvisne podatke. S tem dobimo večločljivostni model reliefa, pri katerem se struktura prilagaja značilnostim površja.

4 Sklep

Pri »klasičnih« metadah izdelave DMR-ja uporabljamo samo vire, ki so bili zajeti posebej za ta namen (Burrough in McDonnell 1998), pri opisanem konceptu pa izkoriščamo prednosti uporabe vseh prostorskih podatkov, ki vsebujejo podatke o višinah zemeljskega površja. Največji problem takega pristopa je večinoma slabo poznana in predvsem zelo raznolika kakovost virov, pri točkovnih virih (z izjemo značilnih točk) še posebej tudi to, da ne vsebujejo prav nikakršne geomorfološke informacije o njihovi okolici. Pomembna prednost opisanega koncepta pa je v tem, da omogoča ekonomično izdelavo digitalnega modela reliefa visoke vizualne in statistične kakovosti, kakršnega si želi večina uporabnikov. Posebej velja poudariti, da je pri ekonomiki pomembna tudi »živost« modela izdelave. Dobljeni model reliefa lahko namreč enostavno nadgrajujemo z novimi, boljšimi podatki. Uporabnik pa ima možnost, da dobi za vsako rastrsko celico informacijo (metapodatek) o njeni potencialni kakovosti ter kateri vir je prevladal pri izdelavi.

V okviru razvoja opisanega koncepta izdelave DMR-ja je bilo razvitih kar nekaj inovativnih in naprednih pristopov, ki so bili pomembni za uresničitev zastavljenega cilja, med katerimi so (Podobnikar 2001):

- tehnike za prepoznavanje grobih in sistematskih napak virov in za ovrednotenje natančnosti/točnosti,
- napredne metode za izdelavo modela reliefa iz plastnic:
 - določanje značilnih točk, črt in območij (skupaj s položajem in podatkom višine),
 - metode, razvite na podlagi selektivnega in stopnjujočega vzorčenja,
- metode za geomorfološko in statistično optimizacijo modeliranja modela reliefa iz raznih podatkov:



Slika 4: DMR Slovenije (DMV 20), prikazan s tehniko bipolarnega diferenciranja (originalno mora biti v barvah) in kombiniran s senčenjem, za območje Šmarne gore (8000 krat 6200 m). Posamezni interval (ekvidistanca) je 20 m.

- metoda utežnega seštevanja virov z geomorfološkimi popravki,
- metoda hkratne interpolacije virov (ki smo jo uporabili za izdelavo referenčnega DMV-ja).

V nasprotju z dosedanjimi modeli reliefov v Sloveniji omogoča koncept opisane izdelave DMR-ja Slovenije enostavno izboljšanje kakovosti z novimi viri. Model reliefa bo možno vzdrževati periodično, na primer letno ali po potrebi. Najpomembnejši povodi za vzdrževanje so pri tem lahko naslednji (Podobnikar 2001):

- med uporabo proizvodov DMR-ja Slovenije smo ugotovili grobe napake,
- na razpolago imamo novejšo in boljše vire od predhodno uporabljenih,
- zemeljsko površje se je spremenilo zaradi naravnih nesreč (potres, zemeljski plaz in podobno) ali antropogenih posegov (kamnolomi, večje ceste, ugrezanje zaradi rudnikov, akumulacijska jezera in podobno),
- razvite ali dostopne so novejšo in boljše tehnike za izdelavo DMR-ja,
- povečale so se potrebe potencialnih uporabnikov.

Novi digitalni model reliefa s svojo vertikalno natančnostjo in geomorfološko kakovostjo presega vse dosedanje modele reliefa Slovenije. Za celotno območje Slovenije je pričakovati povprečno vertikalno natančnost med 3,2 in 3,4 m. Dober rezultat napovedujejo tudi statistične in vizualne analize. Predvsem iz slednjih je razvidno, da je tako izdelan model iz geodetskih podatkov homogen in da so na njem zelo dobro razpoznavne geomorfološke značilnosti reliefa (slika 4). Domnevo potrjuje testna izdelava na desetih območjih v Sloveniji (Podobnikar 2001) ter modeliranje končnega izdelka DMV 20 na približno osmini Slovenije (Podobnikar in sodelavci 2001).

5 Viri in literatura

- Banovec T., Lesar, A. 1975: Prostorskoinformacijski sistem SR Slovenije /PIS SRS/ – II. faza, elaborat št. 2, Digitalni model reliefa. Geodetski zavod SRS, Ljubljana.
- Burrough P. A., McDonnell, R. A. 1998: Principles of Geographical Systems Information Systems. Spatial Information Systems and Geostatistics. Oxford.
- Doyle, F. J. 1978: Digital Terrain Models: An Overview. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 44-12. Falls Church.
- Ecker R. 1999: Homogenisierung digitaler Geländemodelle unterschiedlicher Genauigkeit mittels linearer Prädiktion und robuster Schätzung. Dunaj.
- Jaakkola, O., Oksanen, J. 2000: Creating DEMs from Contour Lines: interpolation techniques which save terrain morphology. GIM international 14-9. Lemmer.
- Korošec, B. 1978: Naš prostor v času in projekciji: Oris razvoja zemljemerstva, kartografije in prostorskega planiranja na osrednjem Slovenskem. Ljubljana.
- Kvamme, K., Oštir-Sedej, K., Stančič, Z., Šumrada, R. 1997: Geografski informacijski sistemi. Ljubljana.
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., Rhind, D. W. 2001: Geographic Information Systems and Science. Chichester.
- Makarovič, B. 1973: Progressive Sampling for Digital Terrain Models. ITC Journal 3. Enschede.
- Oštir, K., Podobnikar, T., Stančič, Z., Mlinar, J. 2000: Digitalni model višin Slovenije InSAR DMV 25. Geodetski vestnik 44-4. Ljubljana.
- Perko, D. 2001: Analiza površja Slovenije s stometrskim digitalnim modelom reliefa. Geografija Slovenije 3. Ljubljana.
- Podobnikar, T. 1999: Termina natančnost in točnost v geodeziji. Geodetski vestnik 43-1. Ljubljana.
- Podobnikar, T. 2000: Analiza poselitve glede na geomorfološke značilnosti z metodo Monte Carlo. Geografski vestnik 72-1. Ljubljana.
- Podobnikar, T., Stančič, Z., Oštir, K. 2000: Data integration for the DTM production. ISPRS, Proceedings of the Workshop: International cooperation and technology transfer XXXII, part 6W8/1. Ljubljana.
- Podobnikar, T. 2001: Digitalni model reliefa iz geodetskih podatkov različne kakovosti. Doktorska disertacija, Oddelek za geodezijo Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Podobnikar, T., Oštir, K., Stančič, Z., Modrijan, D. 2001: Izdelava digitalnega modela reliefa Slovenije. Elaborat, ZRC SAZU. Ljubljana.
- Rihtaršič, M., Fras, Z. 1991: Digitalni model reliefa. 1 del: teoretične osnove in uporaba DMR. Ljubljana.
- Stančič, Z., Oštir, K., Podobnikar, T. 1999: 1. Poročilo o rezultatih testiranja nekaterih podatkov Geodetske uprave RS, 2. Možnost izdelave DMR-ja iz obstoječih podatkov Geodetske uprave RS. Elaborat, ZRC SAZU. Ljubljana.

6 Summary: Concept of new digital terrain model of Slovenia production

(translated by the author)

The main goal of this article is to introduce a concept for integration of existing different quality data sources to produce high quality DTM. The first known concepts of DTM production are connected with development of computer science, which enabled effective analytical data processing. Remote sensing and digital photogrammetry were associated with other methods and techniques for data acquisition, assessment, interpretation and measurement digital images in this development. In general, a study of digital terrain models (DTM) has been introduced to spatial sciences since the mid-fifties in the United States.

In Slovenia, the first research into digital terrain model production dates in the late sixties. The first attempts to acquire height data on a regular grid is considered to be a 'relative terrain model of Domžale commune' at a scale of 1 : 150,000. In 1973 they started to produce a DEM known as »DMR 100« with a grid resolution of 100 m for the whole of Slovenia. »DMR 100« was finished many years later, in 1984. In mid-nineties were started to produce a DEM known as »DMR 25« and in 2000 was produced and interferometric DEM called »InSAR DMV 25«.

Experience of DTM production in Slovenia and experimental achievements elsewhere encouraged the idea that DTM could be achieved from various existing data sources. In the meantime, the quantity of geodetic and other data that includes height above sea level dramatically increased in Slovenia. An appropriate method for the combination of existent data with, or even without heights was developed for the high quality DTM production. The model for DTM production from different data sources has to be open for improvement using newer and better data. Establishing such a system should be economical and must reach basic – satisfying – standards for even with low input. An applied concept for DTM production tested during the work based on data available in Slovenia. The main steps are the following:

- preparation for DTM processing,
- pre-processing of data sources,
- processing DTM from sources, and
- management with terrain data.

Preparation for DTM processing is important for identifying problems which may appear during DTM production. Within preparation, the sources were coded with appropriate parameters with regard to types of source. Automatic regionalisation should also be mentioned along with complex methods which supporting DTM production. Regionalisation derived from regionalisation variables which were divided according to natural and anthropogenic characteristics of surfaces and with regard to sources and DTM quality. Potential data sources for DTM production were also analysed.

Pre-processing of data sources bases on management of input data. Within pre-processing, all potential sources were detail-tested for applicability within DTM processing. Methods were based on various visual and statistical controls or combinations of these techniques. Following steps were followed as statistical methods: elimination of gross errors of reference points using reference DEMs, statistical evaluation of non-point sources with reference points, and systematic error elimination from non-point sources. For elimination of gross errors from reference points, a high quality reference DEM was produced. Also weight coverage was processed as another key data set. Weight coverages were based on prior knowledge of the nature of random deviations of the reference DEM. 'Method of variances' were used to eliminate gross errors from reference points. The method compares absolute difference between reference points and reference DEMs with threshold (permitted distance), relating to the weight coverage. When threshold was exceeded, the relevant point was considered to contain a gross error. The statistical evaluation of the non-point sources was allowed with a corrected reference set. After initial analyses, standard regions for metadata monitoring were used. The most important categorisations were selected in respect to: terrain roughness, slope, terrain skeleton (sinks, valleys, saddles, ridges, and peaks), and vegetation. The most important parameters were the RMS error, which whilst coarse and approximate, determines a random error, and mean error that accords with a systematic error. With very precise parameters for sources quality, systematic errors should be eliminated from non-point sources. For this task, parameters were used for mean error and derived from statistical evaluation. After statistical analyses and some automatic data source correction, manual elimination of gross error is necessary for most non-point sources. The process is based on several visual techniques for error recognition and elimination. Another important pre-processing step is the adding and reduction of data sources. This doesn't mean elimination of gross and systematic errors but correction of sources from geomorphological enhancement or additional preparation for more efficient DTM processing and includes automatic data attribution, automatic data enhancement (densifying), manual acquisition of additional data, auto-

matic reduction (generalisation) of redundant (secondary) data, and automatic modification of geomorphologically incorrect data.

Processing DTM from sources bases on interpolation of final DTM. A developed method of weighted sum of sources is (raster) GIS-orientated. The principal steps to produce a DTM (DEM) with this method are mosaicing to produce a basic DEM, 'parallel' weighted sum of secondary data, geomorphological correction, reference point consideration, and monitoring of result quality following the weighted sum of data. During the process, non-stop quality was applied. Firstly, a basic DEM was first constructed as a mosaic of sources. With 'parallel' weighted sum other, secondary sources were included within DTM production. Higher weights were assigned locally to source with a lower random error and for every combination of sources calculating arithmetic mean with weights. Thresholds (vertical differences) were controlled for every grid cell by a combination of weighted coverages. If the distance was too large, the area was noted. Individual selected areas were tested with reference points (if they were available for these areas). Higher weights were assigned to the areas to which reference points had lower absolute mean distances. If no reference points were available for a selected area, the area was considered to be of insufficient quality. With the 'parallel' weighted sum method, the reference points were included within some portion of the final DEM.

Effective DTM modelling from variable data is an iterative process. The methods described here are based on cognitive procedure for model determination, a process that cannot be achieved intuitively or via a single step. That means that experience from previous steps should be used in each of the following steps. Only data analyses and test methods used in the previous steps will provide a suitable starting-point for understanding data and will enable a better use of parameters for data testing and preparation. This process takes more time, but the procedure can rationally be finished in two steps.

The results indicate statistically, geomorphologically and visually – a high quality and efficient DTM production in Slovenia, better than those currently used and present an expected average vertical precision of 3.3 m for the whole of Slovenia. At the moment for 1/8 of entire Slovenia a DEM 20 is produced. An important product of described concept to DTMs are automatically produced contour lines, terrain skeletons and hill shading. Secondary products include acquisition of quality parameters and reduction of gross and systematic errors in geodetic databases.