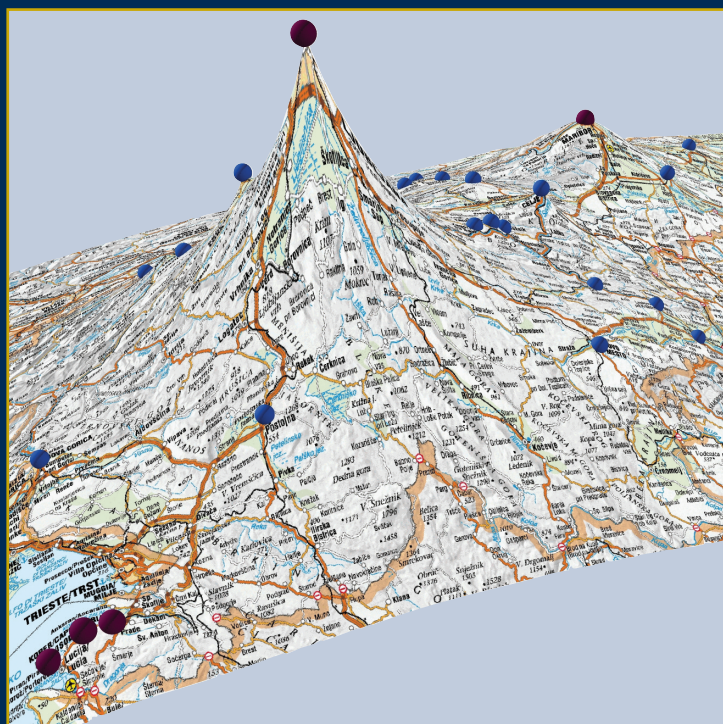


# GIS V SLOVENIJI DIGITALNI PROSTOR

ROK CIGLIČ  
DRAGO PERKO  
MATIJA ZORN



12







GIS V SLOVENIJI 12  
DIGITALNI PROSTOR





GIS V SLOVENIJI 12

# DIGITALNI PROSTOR

*Uredili:*

**Rok Ciglič**  
**Drago Perko**  
**Matija Zorn**

LJUBLJANA 2014

GIS V SLOVENIJI 12  
**DIGITALNI PROSTOR**

**Rok Ciglič, Drago Perko, Matija Zorn**

© 2014, Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU

*Uredniki:* Rok Ciglič, Drago Perko, Matija Zorn

*Uredniški odbor:* Mateja Breg Valjavec, Rok Ciglič, Marjan Čeh, Matjaž Geršič, David Hladnik,  
Marjan Jarnjak, Žiga Kokalj, Marko Krevs, Drago Perko, Tomaž Podobnikar,  
Blaž Repe, Matija Zorn

*Recenzenti:* David Bole, Mateja Breg Valjavec, Rok Ciglič, David Hladnik, Žiga Kokalj, Jani Kozina,  
Drago Perko, Tomaž Podobnikar, Blaž Repe, Jošt Sodnik, Mihaela Triglav Čekada,  
Matija Zorn

*Izdajatelj:* Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU

*Za izdajatelja:* Drago Perko

*Založnik:* Založba ZRC

*Za založnika:* Oto Luthar

*Glavni urednik založbe:* Aleš Pogačnik

*Prelom:* SYNCOMP d. o. o., Ljubljana

*Tisk:* Gorenjski tisk

*Naklada:* 300 izvodov

*Naslovnica:*

Perspektivni prikaz potenčno-eksponentnega padanja jakosti delovne mobilnosti v regionalna središča Slovenije z najkrajšo razdaljo po mreži državnih cest leta 2011 – pogled z jugozahoda. Slika je nekoliko prirejen izsek slike 17 v poglavju *Model vpliva razdalje na delovno mobilnost v regionalna središča Slovenije*, ki sta ga napisala avtorja Samo Drobne in Mitja Lakner.

Digitalna verzija (pdf) je pod pogoji licence <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>  
prosto dostopna: <https://doi.org/10.3986/9789610503590>.

---

CIP – Kataložni zapis o publikaciji

Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

910.1(082)

528(082)

659.2:004:91(082)

DIGITALNI prostor / uredili Rok Ciglič, Drago Perko, Matija Zorn. –  
Ljubljana : Založba ZRC, 2014. – (GIS v Sloveniji, ISSN 1855-4954 ; 12)

ISBN 978-961-254-714-1

1. Ciglič, Rok

274990848

---

---

## VSEBINA

<i>dr. Rok Ciglič, dr. Drago Perko, dr. Matija Zorn</i> Digitalni prostor, digitalna pokrajina, digitalni prostorski podatki in naravnopokrajinska klasifikacija Slovenije .....	9
<i>dr. Rok Ciglič, dr. Drago Perko</i> Modeliranje geografskih tipizacij Slovenije z metodami nadzorovanih klasifikacij .....	23
<i>dr. Dejan Grigillo, dr. Simon Rusjan, Anja Vrečko, dr. Elvira Džebo, dr. Klemen Kozmus, Tilen Urbančič, dr. Dušan Petrovič, dr. Matjaž Mikoš</i> Digitalni model reliefa struge hudournika Kuzlovec in matematično modeliranje toka vode .....	35
<i>Mauro Hrvatin, dr. Matija Zorn, dr. Drago Perko</i> Gavrilovičeva erozijska enačba in GIS .....	43
<i>dr. Žiga Kokalj, dr. Tatjana Veljanovski</i> Izdelava 3R modela iz arhivskih letalskih posnetkov za digitalno retrospektivo porušenega Breginja .....	61
<i>dr. Mateja Breg Valjavec, mag. Daniela Ribeiro</i> Uporabnost zgodovinskih aeroposnetkov pri preučevanju pokrajinskih sprememb na ozemlju Slovenije .....	71
<i>dr. David Bole</i> Kako najbolje določiti prometno rabo? Primerjava uporabnosti klasificiranih aerofoto posnetkov in zemljiškega katastra .....	85
<i>Janez Bergant, dr. Borut Vrščaj</i> Karta potencialnih naravnih rastišč poletne gomoljike .....	95
<i>Nika Mesner, mag. Katja Oven, Saša Vidmar, Dejan Jevšnik</i> Ocena upravičenosti planinskih pašnikov do kmetijskih subvencij z metodo objektne klasifikacije .....	105
<i>dr. Dimitrij Mlekuž, Gašper Rutar</i> Vpliv gostote zračnega laserskega skeniranja na prepoznavnost arheoloških sledov .....	113
<i>mag. Samo Drobne, Andrej Senekovič, dr. Anka Lisec</i> Funkcionalne regije notranjih selitev Slovenije .....	121
<i>mag. Samo Drobne, dr. Mitja Lakner</i> Model vpliva razdalje na delovno mobilnost v regionalna središča Slovenije .....	135
<i>Jernej Tiran, dr. Luka Mladenovič, Simon Koblar</i> Računanje dostopnosti do javnega potniškega prometa v Ljubljani z metodo PTAL .....	155
<i>Dejan Jenko, mag. Samo Drobne</i> Modeliranje prostorskih vzorcev delovne mobilnosti in selitev z vektorskimi polji .....	163
<i>mag. Jerneja Fridl, dr. Marko Juvan, Jaka Ortar</i> Prostorske analize slovenske literarne zgodovine .....	173
<i>Urša Kanjir, Aleš Marsetič, Peter Pehani, dr. Krištof Oštir</i> Samodejno zaznavanje plovil na optičnih satelitskih posnetkih .....	185



<i>Nino Mohorič, dr. Blaž Repe</i> Geoinformacijsko vrednotenje lokacij za postavitve sončnih celic v naselju Lavrica .....	197
<i>dr. Krištof Oštir, Aleš Marsetič, Peter Pehani, dr. Matej Perše, dr. Klemen Zakšek,</i> <i>dr. Janez Zaletelj, dr. Tomaž Rodič</i> Procesna veriga za samodejno obdelavo optičnih satelitskih posnetkov v skoraj realnem času .....	207
<i>dr. Marko Komac, Jasna Šinigoj</i> Spletni sistem zgodnjega opozarjanja na povečano nevarnost proženja zemeljskih plazov – rezultati projekta Masprem .....	219

# DIGITALNI PROSTOR, DIGITALNA POKRAJINA, PROSTORSKI PODATKI IN NARAVNOPOKRAJINSKA KLASIFIKACIJA SLOVENIJE

**dr. Rok Ciglič, dr. Drago Perko, dr. Matija Zorn**

Geografski inštitut Antona Melika, Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti  
rok.ciglic@zrc-sazu.si, drago@zrc-sazu.si, matija.zorn@zrc-sazu.si

UDK: 911.52:004.9(497.4)  
659.2:004:91(497.4)

## IZVLEČEK

**Digitalni prostor, digitalna pokrajina, digitalni prostorski podatki in naravnopokrajinska klasifikacija Slovenije**

Digitalni prostor in digitalno pokrajino sestavljamo iz digitalnih prostorskih podatkov, ki omogočajo uporabo najrazličnejših metod za razvrščanje pokrajin po celem svetu. Tudi v Sloveniji je vloga digitalnih podatkov in orodij vse večja. V poglavju predstavljamo različne vire digitalnih prostorskih podatkov, ki so na voljo za območje Slovenije, in analiziramo njihovo vlogo pri naravnopokrajinski klasifikaciji.

## KLJUČNE BESEDE

geografija, prostor, pokrajina, prostorski podatki, geografski informacijski sistem, naravnopokrajinska klasifikacija, Slovenija

## ABSTRACT

**Digital space, digital landscape, digital spatial data and natural landscape classification of Slovenia**

Digital space and digital landscape consist of digital spatial data. They allow us to use a wide range of natural landscape classification methods all around the world. Also in Slovenia the important role of digital data and tools in this field of research is evident. In the chapter we present different sources of digital spatial data for the area of Slovenia and analyze their importance for natural landscape classification.

## KEY WORDS

geography, space, landscape, spatial data, geographic information system, natural landscape classification, Slovenia

## 1 Uvod

Dvanajsta knjiga iz zbirke **GIS v Sloveniji** nosi naslov Digitalni prostor. To je najširši izraz, ki je povezan s skoraj vsemi vsebinami, objavljenimi v tej zbirki, hkrati pa ga praktično enako razumejo vse stroke, ki pri svojem delu uporabljajo geografske informacijske sisteme. **Digitalni prostor** lahko opredelimo za navidezno resničnost, ker pa se z digitalizacijo vse bolj srečujemo pri številnih vsakdanjih dejavnostih v naših življenjih, digitalni prostor postaja tudi dejanska resničnost in pravimo, da živimo v **digitalnem svetu**.

Posamezne stroke namesto splošnega izraza 'prostor' uporabljajo tudi bolj konkretne, skoraj sopomenske izraze: geografija, na primer, izraz 'pokrajina'.

## 2 Pokrajina v računalniku

Pojem **geografski informacijski sistem** poslovenjeno zemljepisni podatkovni sestav, poenostavljeno povedano ne pomeni nič drugega kot pokrajino, ujeta v računalnik. Takemu trirazsežnostnemu računalniškemu prikazu resnične pokrajine pravimo navidezna pokrajina ali **virtualna regija**. Pokrajina je sestavljena iz pokrajinskih sestavin, kot so na primer kamnine, vode, rastlinstvo, prebivalstvo ali naselja, geografski informacijski sistem pa iz podatkovnih slojev, ki so digitalni, računalniški prikaz pokrajinskih sestavin (Perko in Zorn 2010a).

V širšem pomenu lahko h geografskemu informacijskemu sistemu poleg podatkov prištejemo še računalniške programe, računalniško in drugo opremo ter strokovnjake na tem področju, močno pa je z njim povezana **digitalna kartografija**, saj tudi zemljevidi prikazujejo posamezne pokrajinske sestavine oziroma podatkovne sloje (na primer izoblikovanost površja, vodotoke in naselja).

V Sloveniji se je razcvet geografskih informacijskih sistemov začel v devetdesetih letih 20. stoletja. Najboljši pregled njihovega razvoja podaja prav bialna knjižna zbirka monografij GIS v Sloveniji (Perko in Zorn 2010b).

## 3 Klasifikacije pokrajine

»... V današnji informacijski družbi so GIS-i sami po sebi umevni podobno kot vsesplošna uporaba medmrežja, pred desetletji pa so se le s težavo potem pa zaradi lažje dostopnosti računalnikov vedno hitreje širili na vse več znanstvenih, tehnoloških, upravnih, izobraževalnih in drugih področij...« (Perko in Zorn 2010a, 38). Primerov raziskav z digitalnimi podatki in računalniško tehnologijo je izjemno veliko in so zelo raznoliki ter »... segajo na področja večine geografskih panog, največji delež pa ima geomorfologija, kar je razumljivo, saj je digitalni model višin, s katerim se najpogosteje ukvarjajo geomorfološki prispevki, temeljni sloj v GIS-u...« (Perko in Zorn 2010a, 41). Ravno tako se je uporaba GIS-ov uveljavila tudi na področju pokrajinske klasifikacije (*landscape classification*), saj je zdaj na voljo že precej primerov klasifikacij pokrajin, na primer pokrajinska klasifikacija Belgije (Van Eetvelde in Antrio 2009), pokrajinska tipizacija Češke (Romportl 2009), okoljska členitev Evrope (Metzger s sodelavci 2005), klasifikacija urbanih površin West Midlanda (Owen s sodelavci 2006), ekološka pokrajinska členitev dela Avstralije (Bryan 2000), topoklimatska kategorizacija parka Yellowstone (Burrough s sodelavci 2001), evropska pokrajinska klasifikacija (Mücher s sodelavci 2003; 2006; 2009), klasifikacija Portorika (Soto in Pintó 2010), klasifikacija ekoloških regij oziroma območij v ZDA (Hargrove in Hoffman 2005), klasifikacija območja vulkana La Maliche v Mehiki (Castillo-Rodríguez, López-Blanco in Muñoz-Salinas 2010), klasifikacija ZDA (Wolock, Winter in McMahon 2004), ekološke regije v Nebraski (Zhou s sodelavci 2003), klasifikacija Nove Zelandije (Leathwick s sodelavci 2003), kraške pokrajine notranje Slovenije (Breskvar Žaucer in Maru-

šič 2006) ter klasifikacija Evrope (Renetzeder s sodelavci 2008). Poleg preučevanja pokrajine kot celote (na primer Perko 1998; Kokalj in Oštir 2005; Ferreira 2006; Ciglič 2013) se preučuje tudi njene posamezne sestavine, kot so površje (na primer Breg Valjavec 2010; Gostinčar in Ciglič 2011; Hrvat in Perko 2002; 2005; Kokalj, Zakšek in Oštir 2008; Krevs 1992; Obu 2011; Perko 1991; 2001; 2007; Podobnikar 2008; Podobnikar in Székely 2008), vodovje (na primer Ulaga 2003; Frantar, Rejec Brancelj in Jerovšek 2006; Frantar 2011; Trobec 2008), prst (na primer Repe 2006a; 2006b; 2007; 2010), podnebje (na primer Gabrovec 1996; Dolinar 2004; 2006), rastlinstvo (na primer Ogrin in Krevs 2001; Kutnar, Kobler in Bergant 2009; Ciglič in Oštir 2014). Podobno velja tudi za vsebine s področja humane geografije.

Ob tem je treba izpostaviti, da je eden izmed najpomembnejših in nujnih elementov pri klasifikaciji pokrajine vhodni podatek, saj velja, da so »... informacijski sistem in digitalni zemljevidi, ki za podlago jemljejo modeliranje digitalnih slojev podatkov, ... le tako dobri in zanesljivi, kolikor so dobri, zanesljivi in kvalitetni izvorni digitalni podatki. Slovenija premore sorazmerno zadostno število digitalnih podatkov, s katerimi je mogoče zadovoljivo opredeliti pedogenetske in morfometrične dejavnike za pokrajinske enote prsti ...« (Repe 2010, 108). Glede na izkušnje iz pedogeografije ter dejstvo, da podatkovni sloji kažejo vsako leto velik napredek, »... saj narašča število podatkov in njihova kakovost ...« (Perko in Zorn 2010a, 41), predpostavljamo, da je tudi za tipizacijo Slovenije na tipe naravne pokrajine sorazmerno dovolj kakovostnih digitalnih podatkov, ki ponazarjajo naravne dejavnike. Mücher je s sodelavci (2009) na primer takole zapisal teoretično enačbo za pokrajino:

$$\text{pokrajina} = f(C_{(t)}, G_{(t)}, H_{(t)}, S_{(t)}, V_{(t)}, F_{(t)}, LU_{(t)}, STR_{(t)}).$$

To pomeni, da je pokrajina funkcija podnebja ( $C$ ), kamninske podlage in geomorfoloških značilnosti ( $G$ ), vodovja ( $H$ ), prsti ( $S$ ), rastlinstva ( $V$ ), živalstva ( $F$ ), rabe tal ( $LU$ ), pokrajinske strukture ( $STR$ ) in časa ( $t$ ).

## 4 Podatki

Podatki so nepogrešljiva sestavina vsakega GIS-a in pred uporabo v raziskavah moramo poznati njihove lastnosti. Med njimi lahko izpostavimo na primer način zapisa, prostorski obseg, ločljivost, dostopnost in kakovost meritev. Podatki nam zaradi teh lastnosti določajo izbor metod in omogočajo doseg rezultata v določenem okviru.

Način zapisa podatkov nas omejuje glede rabe orodij. Kakovost podatkov in ločljivost neposredno vplivata na kakovost rezultata. Pri rastrskih podatkih je prostorska ločljivost nedvoumna, saj jo ponazarja velikost celic, pri vektorskih pa je ločljivost težje definirati, zato se v znanosti priporoča raba rastrskih podatkov (Goodchild 2011, 6). Kot pomembno dejstvo pri klasifikaciji so Mücher s sodelavci (2003, 19) ter Bunce s sodelavci (1996, 45) izpostavili tudi dostopnost podatkov, saj je ta navadno omejena.

Z raznimi (pred)obdelavami podatkov lahko spremenimo njihove lastnosti. Tako lahko na primer pred analizo odstranimo nepotrebne podrobnosti in ohranimo bistvo (Goodchild 2011, 5), vendar lahko različni načini združevanja podatkov povzročajo različne rezultate, kar je v angleščini znano kot *modifiable areal unit problem*. Da »... lahko z odločitvijo o tem, za katere prostorske enote zberemo podatke, pomembno ali celo odločilno vplivamo na rezultate analize ...«, je opozoril že Krevs (1998, 186), ki še dodaja, da »... so nekateri pojavi po izbranih prostorskih enotah predstavljeni ustrežnejše kot drugi ...« (Krevs 1998, 188). Sklepanje o značilnostih posameznikov na podlagi agregatnih podatkov imenujemo ekološka napaka (Krevs 1998, 188). Pri pripravi podatkovnih slojev je sicer najbolje interpretirati neobdelane informacije, da se tako poudari tiste značilnosti, ki so pomembne za določanje pokrajin (Swanwick 2002, 21).

## 5 Digitalni podatki za naravno členitev pokrajine

V prispevku pri opisu vsakega dejavnika izpostavljamo, kakšno vlogo ima pri členitvi pokrajin v literaturi, dodajamo pa tudi informacijo, kateri najpomembnejši podatkovni sloji so na voljo za območje Slovenije. Opisujemo naslednje dejavnike ter pripadajoče podatkovne sloje:

- podnebje,
- relief,
- kamnine in prst,
- vodovje in
- rastlinstvo.

Opisani dejavniki se najpogosteje uporabljajo pri izdelavi klasifikacij za posamezne države (Groom 2005). Najpogosteje uporabljena sta bila relief in kamninska podlaga, podnebje pa nekoliko manj (preglednica 1).

*Preglednica 1: Uporaba naravnih dejavnikov pri klasifikacijah evropskih držav (Groom 2005, 39 in 40).*

dejavnik	število primerov nedvoumne uporabe	število primerov nejasne uporabe
relief	43	4
kamninska podlaga	33	3
prst	33	2
rastlinstvo	25	5
vodovje	18	3
podnebje	17	2
pokrovnost tal	10	3

### 5.1 Podnebje

Podnebje je bistveno za ekološke razmere (Mücher s sodelavci 2003, 19). Kot vir energije in vode igra glavno vlogo pri razporeditvi ekosistemov. Prst in živi svet sta funkciji podnebja in izoblikovanosti površja. Zaradi tega se podnebje ponuja kot glavni kriterij, takoj za njim pa izoblikovanost površja (Bailey 1996, 39). Podnebje vpliva tudi na reliefne oblike in erozijo, življenjske (letne) cikle ter produktivnost rastlin. Podnebje je zato osnovni naravni dejavnik za določanje razlik v okolju na kontinentalni ravni (Klijn in Udo de Haes 1994). Podnebni pas je največja enota v klimatogeografskem smislu. Kot posledica oceanskih, celinskih in orografskih vplivov se podnebni pasovi ločijo na podnebna območja (Tarábek 1972; Bailey 1996). Dejavniki, ki vplivajo na podnebje, se na različnih ravneh spreminjajo (Bailey 1996, 157). Na primer na temperaturo zraka vplivajo zemljepisna širina, oddaljenost od morja, nadmorska višina, izoblikovanost, naklon in ekspozicija površja, rastlinstvo, stopnja urbaniziranosti ter značilnosti tal, kot so albedo, toplotna kapaciteta in podobno (Cegnar 1998, 100).

Poleg osnovnih podatkov o temperaturi in količini padavin (na primer letni količini padavin, povprečni temperaturi najhladnejšega meseca, povprečni temperaturi najtoplejšega meseca) lahko za prikaz podnebnih značilnosti uporabimo tudi izpeljane podatke. Bližino oceana, na primer, lahko prikažemo s tako imenovano oceanskostjo, ki so jo uporabili Metzger s sodelavci (2005), in sicer tako, da so od julijske temperature odšteli januarско ter razliko delili s sinusom geografske širine. Izpeljani podatek, kot je podnebni režim, je zelo uporaben tudi v bolj gorskih območjih, saj ta namreč nimajo enakega podnebja kot sosednja nižinska območja, vendar imajo razmeroma podoben podnebni režim (Bailey 1996, 69 in 70).

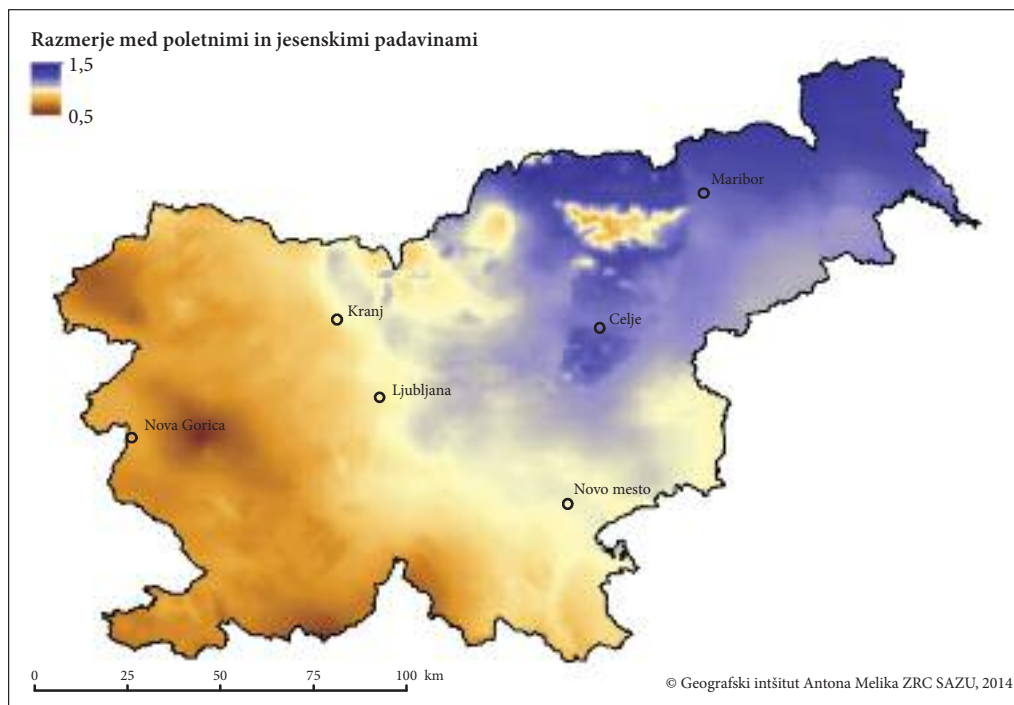
Za podnebje lahko na primer izračunamo razmerje med oktobrskimi in aprilskimi temperaturami ter razliko med julijskimi in januarskimi temperaturami (letna temperaturna razlika). Indeks mediteranskosti padavin omogoča razmejitev glede padavinskega režima (Ogrin 1996). Po Ilešiču (1970 cv:

Ogrin 1996) bi lahko uporabili tudi razmerje med količino padavin v hladni (od oktobra do marca) in topli polovici leta (od aprila do septembra). Padavinski režim lahko računamo tudi iz razmerja med poletnimi in jesenskimi padavinami (Zupančič 1998) ali pa razmerja med poletnimi in zimskimi padavinami (Ogrin 1998).

**Podatki:** Problem pri podnebjju kot kriteriju za klasifikacijo pokrajine je predvsem, da zanj obstajajo večinoma le točkovni podatki (Mücher s sodelavci 2003, 19). Na Agenciji Republike Slovenije za okolje so pripravili podatkovne sloje z ločljivostjo 1 km za podatke o povprečni mesečni in letni temperaturi ter povprečni mesečni in letni količini padavin (Dolinar 2004; Zemljevidi povprečnih mesečnih ... 2010). To omogoča tudi uporabo podnebnih podatkov (osnovnih in izpeljanih) za klasifikacije pokrajine. Tu je treba izpostaviti, da se podnebbe spreminja. Zato je pri vsaki izdelani klasifikaciji treba navesti, v katerem obdobju so bili podnebni podatki izmerjeni. Da so padavinski režimi bolj variabilni kot temperaturni, je opozoril tudi Ogrin (1996, 43).

Glede na to, da je v literaturi omenjenih več načinov ugotavljanja padavinskih režimov, smo za vsakega izdelali rastrski podatkovni sloj in jih primerjali (Ciglič 2013). Izračunali smo indeks mediteranskosti padavin (Koppany in Unger 1992 cv: Ogrin 1996, 42), razmerje med količino padavin v jesenskih mesecih in količino padavin v poletnih mesecih (Zupančič 1998; slika 1), razmerje med količino padavin v zimskih mesecih in količino padavin v poletnih mesecih (Ogrin 1998), razmerje med količino padavin od oktobra do marca in količino padavin od aprila do septembra (Ilešič 1970 cv: Ogrin 1996, 42) ter razmerje med količino padavin v oktobru in novembru ter količino padavin v maju in juniju.

Med različnimi padavinskimi režimi je bila ugotovljena visoka stopnja povezanosti (izračunani Pearsonovi in Spearmanovi koeficienti dosegajo in presegajo vrednosti 0,89 pri  $p = 0,01$ ). Glede na veliko stopnjo povezanosti za analize zadostuje torej zato že en padavinski režim. Preverili smo tudi poveza-



Slika 1: Razmerje med poletnimi in jesenskimi padavinami pokaže prehod iz sredozemskega v bolj celinsko podnebbe.

nost z letno temperaturno amplitudo in razliko v temperaturi med oktobrom ter aprilom. Vsi izračunani Pearsonovi in Spearmanovi koeficienti so bili okoli 0,7 (statistično značilno pri  $p = 0,01$ ).

Poleg tega smo primerjali tudi izračune indeksa mediteranskosti za obdobje 1961–1990 in obdobje 1971–2000 za 31 padavinskih postaj po Sloveniji. Ugotovili smo, da so med obdobjema opazne razlike (indeksi mediteranskosti so za obdobje 1971–2000 z eno izjemo povsod višji), izračunana stopnja povezanosti med obema obdobjema pa je vseeno zelo visoka. To pomeni, da se podnebne značilnosti sicer spreminjajo, razmerja med območji pa med večino postaj ostajajo približno enaka (Ciglič 2013).

Poleg omenjenih podatkov so na voljo tudi razni podatki o snežnih padavinah, snežni odeji, sončnem obsevanju in drugih podnebnih podatkih, ki jih hrani Agencija Republike Slovenije za okolje (Geoport 2014). Na voljo sta tudi podatka povprečna letna energija kvaziglobalnega obsevanja (Gabrovec 1996) oziroma kvaziglobalna osončenost (Zakšek, Podobnikar in Oštir 2005; Kastelec, Rakovec in Zakšek 2007).

## 5.2 Relief

Izoblikovanost površja je pomemben kriterij za določanje manjših enot znotraj makroekosistemov, saj spreminja podnebne režime znotraj makroklimatskih con. Relief, zlasti višina, vpliva na rastlinstvo tako na majhnem območju kot tudi v svetovnem merilu (Bailey 1996). Repe (2010, 108) je opozoril na velik pomen reliefa, saj se le-ta uporablja na primer pri izračunu količine vode v prsteh ter tudi pri interpolaciji podnebnih spremenljivk. Izoblikovanost površja je povezana z ostalimi sestavinami pokrajine; pomembno vpliva na rastlinstvo, ki je najbolj viden pokazatelj naravnih razmer v pokrajini, ter na prebivalstvo. Višina, višinska razgibanost, naklon, naklonska razgibanost, ekspozicija in ekspozicijska razgibanost površja vplivajo na naravne dejavnike v Sloveniji (Perko 2007, 85). Perko (2001, 88–91) je dokazal povezanost nadmorske višine, naklona in ekspozicij z različnimi naravnimi dejavniki za območje Slovenije: razgibanostjo, kamninami in rastlinstvom. Vse povezave so se sicer izkazale za statistično značilne, a niso bile v vseh primerih tudi visoke.

Tudi razne druge analize so nakazale, da ima relief, predvsem nadmorska višina, velik pomen za razlikovanje pokrajinskih enot (na primer Thompson s sodelavci 2005).

Površje lahko opisujemo na različne načine. Perko (2007) je navedel tri temeljne geometrične lastnosti: oddaljenost, nagnjenost in ukrivljenost. Z analizo digitalnega modela višin (DMV) lahko ugotovimo:

- oddaljenost glede na vodoravno ravnino oziroma nadmorsko višino,
- oddaljenost glede na navpično ravnino,
- nagnjenost glede na vodoravno ravnino oziroma naklon,
- nagnjenost glede na navpično ravnino oziroma ekspozicijo,
- ukrivljenost glede na vodoravno ravnino,
- ukrivljenost glede na navpično ravnino.

Z analizo DMV-ja lahko ugotovimo tudi prostorsko spremenljivost navedenih podatkov površja, najbolj pa so uporabni (Perko 2007, 47):

- lokalni in regionalni koeficient višinske razgibanosti površja,
- lokalni in regionalni koeficient naklonske razgibanosti površja,
- lokalni in regionalni koeficient ekspozicijske razgibanosti površja in
- lokalni in regionalni koeficient skupne razgibanosti površja (geometrična sredina koeficienta naklonske in ekspozicijske razgibanosti površja).

Manj uporabni so lokalni in regionalni koeficient vodoravne razgibanosti površja glede na oddaljenost površja ter lokalni in regionalni koeficient vodoravne in navpične razgibanosti površja glede na ukrivljenost (Perko 2007, 47).

Poleg navedenih se pogosto uporabljajo tudi drugi kazalci (Iwahashi in Pike 2007), recimo tekstura površja. Ta se izračuna tako, da se s pomočjo matrike 3 krat 3 celice izračuna mediano za vsako osrednjo celico v matriki. Ta sloj se nato odšteje od izvirnega podatkovnega sloja višin; tako se dobi sloj, v katerem izstopajo slemena in dna dolin. Vsem celicam z izbrano vrednostjo, na primer nad 0,5 m in

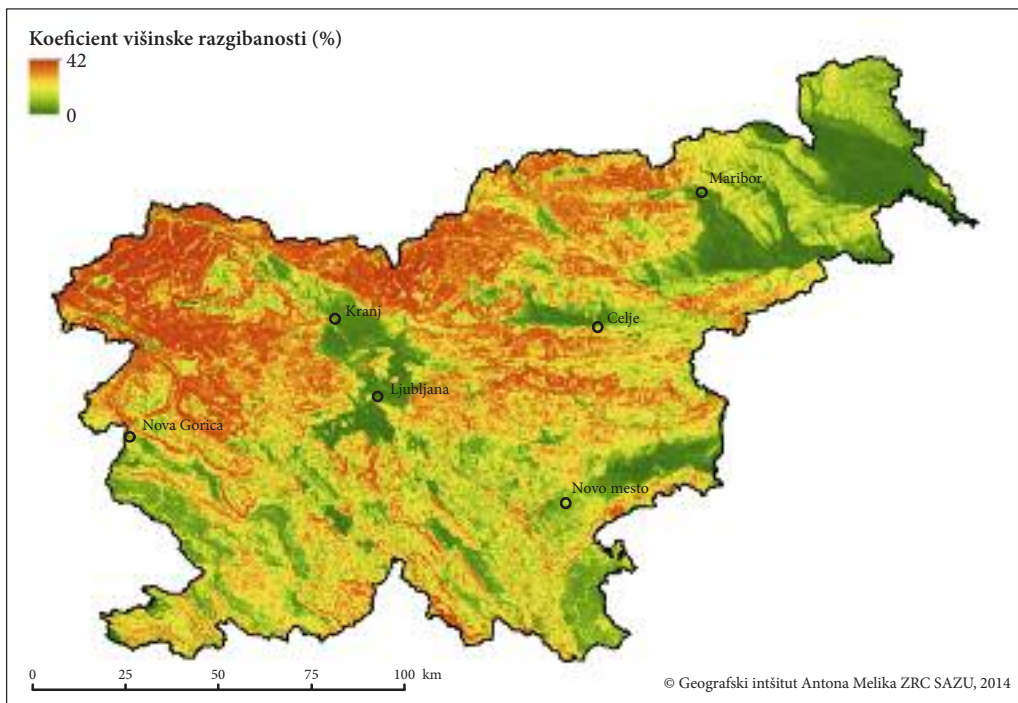
pod  $-0,5$  m, se pripiše vrednost 1, ostalim vrednost 0. Nato s pomičnim krogom z izbranim polmerom izračunamo pogostost pojavljanja teh celic (z vrednostjo 1). Na koncu izračunamo razmerje pojavljanja razčlenjenega površja tako, da vrednost celice (seštevek vseh vrednosti 1 znotraj kroga) delimo s številom vseh celic v krogu (Iwahashi in Pike 2007).

Vpliv reliefa je tako velik, da so pri nekaterih raziskavah osnovno prostorsko enoto določili na podlagi reliefa. Castillo-Rodríguez, López-Blanco in Muñoz-Salinas (2010) argumentirajo, da so rastlinske združbe navezane na mikroklimatske dejavnike, te pa so v veliki meri določene z reliefom; poleg tega so prsti navezane na naklon površja, z reliefom pa so povezane tudi vode. Razgiban relief lahko na manjšem območju povzroči večje kontraste kot pa nerazgiban relief na večjem območju. Relief vpliva tudi na človekovo delovanje, kar je vidno v rabi tal (Castillo-Rodríguez, López-Blanco in Muñoz-Salinas 2010, 630–635). Pri tem je treba opozoriti, da lahko določanje ene vrednosti za celotno reliefno obliko (enoto) povzroči napake, predvsem kadar so enote večje ali pa znotraj zelo raznolike (Castillo-Rodríguez, López-Blanco in Muñoz-Salinas 2010, 636 in 637).

**Podatki**, ki se nanašajo na značilnost površja oziroma topografije, so večinoma najbolj dostopni (Mücher s sodelavci 2003, 20 in 21). To velja tudi za Slovenijo. Glede na velik pomen reliefa bi morali vključiti v analizo predvsem:

- nadmorsko višino,
- naklon,
- ekspozicijo,
- regionalne koeficiente razgibanosti (regionalne predvsem, če obravnavamo celotno območje Slovenije; na primer regionalni koeficient višinske razgibanosti površja, slika 2).

Geodetska uprava Republike Slovenije je izdelala več digitalnih modelov višin z različno ločljivostjo, med njimi se zelo pogosto uporabljajo DMV-ji z resolucijo 25 m, 12,5 m ali 5 m (Digitalni



Slika 2: Regionalni koeficient višinske razgibanosti površja pokaže reliefno raznolikost Slovenije.



model ... 2014). DMV omogoča poleg podatka o nadmorski višini tudi izpeljavo ostalih reliefnih podatkov (naklon, ekspozicija, koeficienti razgibanosti ...). Velik kakovostni preskok bo pomenil zelo natančen digitalni model višin, ki bo narejen na temelju podatkov zajetih s tehnologijo Lidar (*Light Detection and Ranging*) (Triglav Čekada, Bric in Oven 2012).

### 5.3 Kamnine in prst

Geološka zgradba vpliva na reliefno podobo, razvoj prsti, vodne razmere ter tudi na živi svet in človeka (Ogrin 2009, 28). Kamninska podlaga vpliva na fizikalne (vsebnost vode, podzemni vodni tokovi) in kemične lastnosti okolja (vsebnost mineralov). Bolj kot starost in razvoj so pri kamninah pomembni njihova sestava, debelina in podobno (Mücher s sodelavci 2003, 20). Vpliv podlage na prsti in rastlinstvo je najbolj opazen v suhih in hladnih podnebjih (Bailey 1996, 115). Pogosto se pri raziskavah tipi kamnin glede na namen raziskave razvrstijo v bolj pregledne in smiselne skupine. Tako sta na primer Anderson in Ferree (2010) na podlagi geneze, kemijskih značilnosti, značilnosti prepevanja in teksture prsti združila več kot 200 tipov kamnin v 9 litogeokemičnih razredov.

Tudi prst predstavlja pomembno kombinacijo fizikalnih in kemičnih pogojev za rastlinstvo in živalstvo. Zemljevidi prsti lahko služijo tudi kot približek za površinsko kamninsko sestavo (Mücher s sodelavci 2003, 21 in 22; Pedološka karta 2007). Slabost zemljevidov prsti je, da so velikokrat izdelani z vzorčenjem in nato s povezovanjem z ostalimi naravnimi dejavniki (rastlinstvo, reliefna oblika), poleg tega pa ni nujno, da prsti odražajo trenutno podnebje, saj so prsti lahko fosilne (Bailey 1996, 34).

**Podatki:** Glede na nespremenljivost kamnin ter njihov vpliv na druge dejavnike (vode, rastlinstvo, relief) je vključitev podatka o kamninski sestavi nujna. Zato lahko uporabimo Zemljevid tipov kamnin (2012), na voljo pa so tudi nekateri zemljevidi hidrogeoloških, inženirsko-geoloških, geokemičnih, geotermičnih in drugih lastnosti kamnin (Digitalni geološki ... 2014). Za območje celotne Slovenije je dostopna tudi Pedološka karta (2007). Pedološka karta v merilu 1 : 25.000 vsebuje osnovne podatke o prsteh kot naravnem viru. Namenjena je evidenci talnega fonda na ravni države, regij, občin ali drugih prostorskih enot (Pedološka karta v merilu ... 2012).

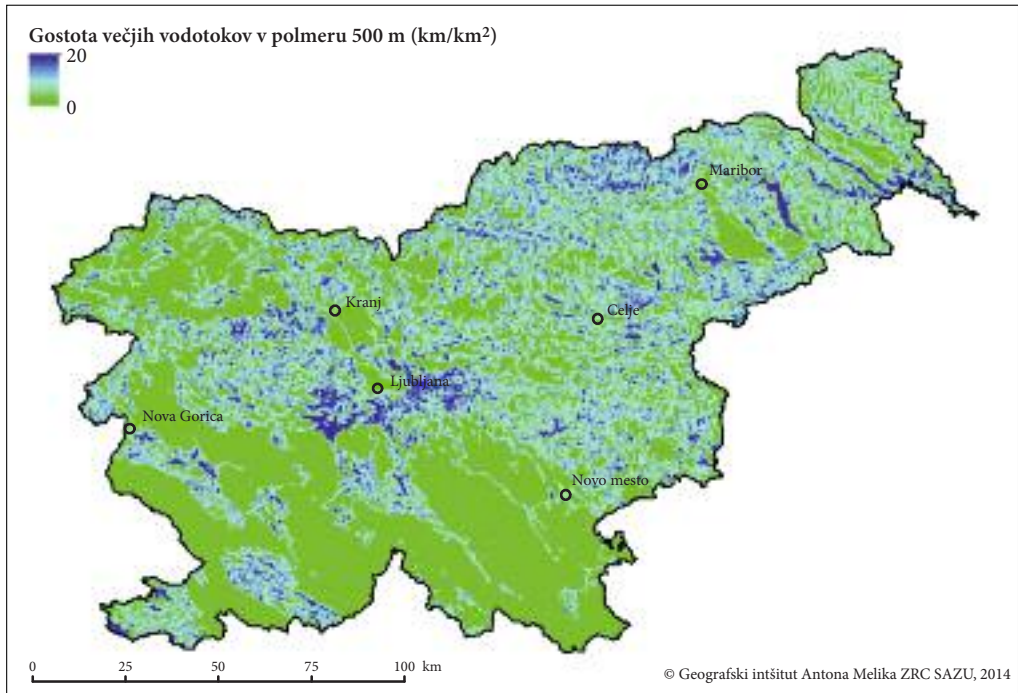
### 5.4 Vode

Najbolj opazna delitev površja Zemlje je delitev na kopno in morje (Godron 1994, 71). Značilnosti voda pri klasifikacijah pokrajin se pogosto uporabljajo v povezavi z določanjem porečij. Težave razmejevanja pa se pojavijo na območjih brez površinske rečne mreže; poleg tega lahko razvodnica glede podzemne vode ne sovпада s površinsko razvodnico, vodni tokovi pa lahko tudi tečejo čez podnebno in reliefno različna območja (Bailey 1996, 35 in 36). Hidrološke razmere se lahko kažejo tudi pri drugih dejavnikih, na primer gostota rečne mreže se kaže v reliefu kot gostota rečnih dolin in intenziteti razčlenjenosti (Demek, Quitt in Raušer 1972). Prevlada površinskega odtoka vode nakazuje na vodorodne kamnine ter rečno-denudacijski relief (Ogrin 2009, 43).

**Podatki:** Na medmrežju (Vodotoki 2006) je bila objavljena površinska rečna mreža, ki je bila narejena na podlagi državnih topografskih kart. Podatek omogoča izračun gostote rečne mreže (slika 3), ki lahko nakaže predvsem na razlike med bolj in manj prepustnim površjem. Poleg tega podatka lahko izračunamo še razne koeficiente in izpeljane podatke tudi na temelju območij vodnih površin, poplav, lokacij izvirov in drugih podatkov (Geoportal 2014; EIONET ... 2014; Prostor ... 2014).

### 5.5 Rastlinstvo

Rastlinstvo kaže biotski odziv na različne abiotske dejavnike (Haggett 2001, 166). Razporeditev rastlinstva je odvisna od mnogih dejavnikov (podnebja, prsti, nadmorske višine in ekspozicije) ter se nenehno spreminja. Zato rastlinstvo odraža številne naravnogeografske dejavnike in biološke značilnosti območ-



Slika 3: Gostota rečne mreže pokaže na bolj in manj prepustna območja.

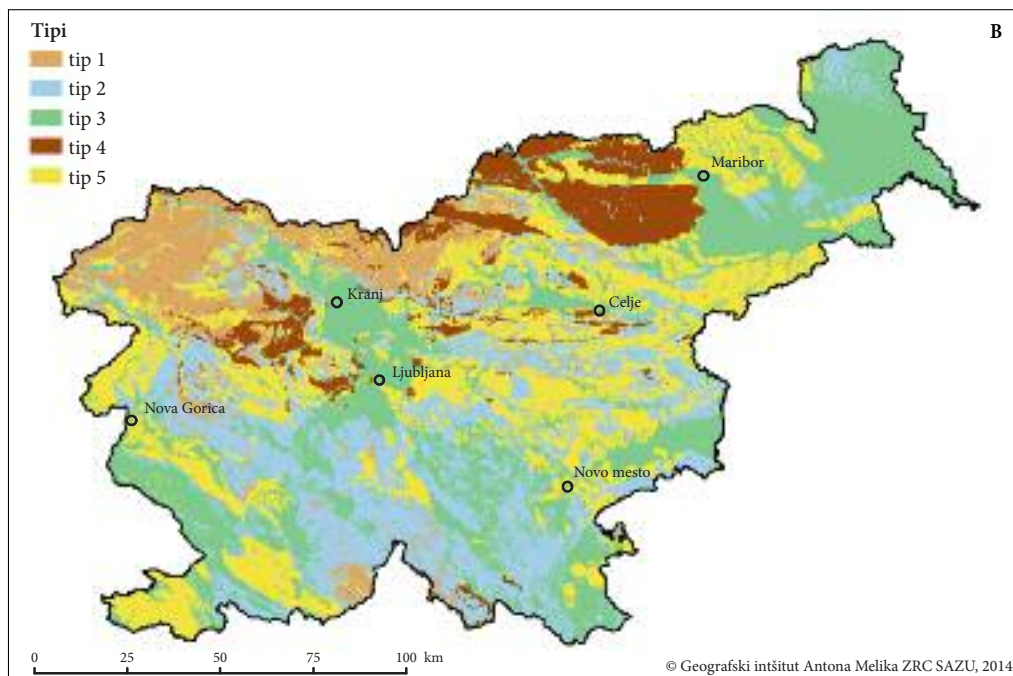
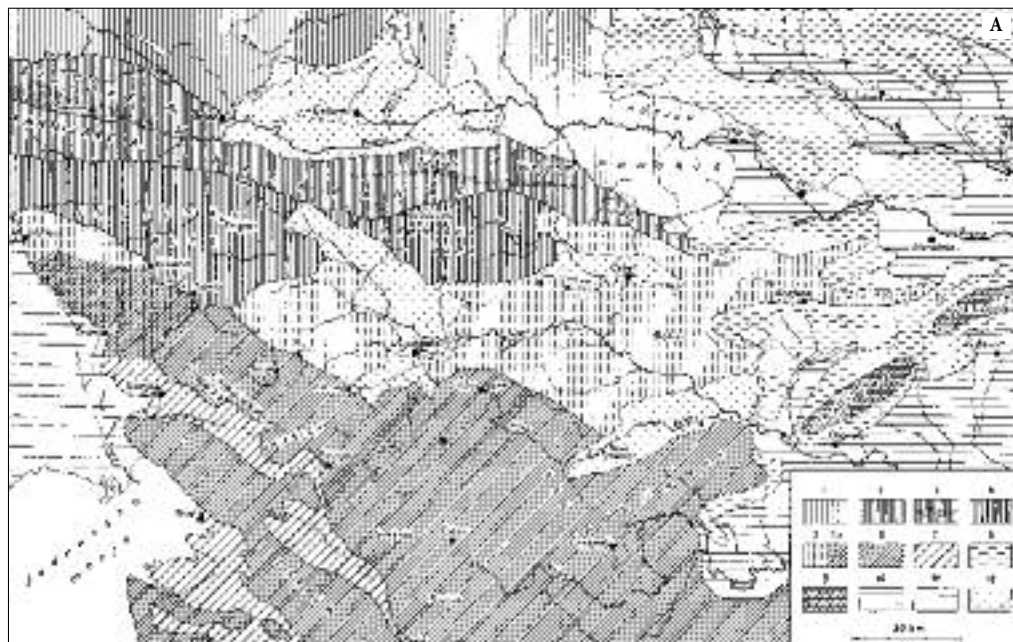
ja ter ga lahko pri naravovarstvenem delu uporabimo kot ponazoritev ekosistema oziroma ekoloških območij in njihovega stanja, manj primeren pa je za razmejevanje (Bailey 1996; Digital map ... 2009).

Ob uporabi rastlinstva kot kriterija za klasifikacijo se predpostavlja, da so vrste v ravnotežju z ostalimi naravnimi dejavniki. Če so se dejavniki pred kratkim spremenili, potem sestava vrst ni več primerna za dokaz ekološkega tipa (Runhaar in Udo de Haes 1994, 151). Razvoj klasifikacije glede na ekološke skupine rastlinstva je zato iterativen proces. Vedno znova se preverja, kakšna je razlika med pričakovanimi vrednostmi na testnih območjih (Runhaar in Udo de Haes 1994).

Pri razmejevanju glede biogeografskih značilnosti je zelo pomembno tudi poznavanje fitogeografije, ki preučuje geografsko razporeditev rastlinstva in prikazuje ter razlaga areale rastlinskih vrst in združb. Območja razmejuje s pomočjo endemičnih vrst, ki predstavljajo pomemben kriterij za delitev v prostoru (Zupančič 1989, 120 in 121).

**Podatki:** Dostopni so podatkovni sloji o dejanski vegetaciji, na primer: Gozdnovegetacijska karta Slovenije (Košir s sodelavci 2007), Vegetacijska karta gozdnih združb v merilu 1 : 400.000 (Čarni s sodelavci 2002), posplošena karta Realna vegetacija, ki je bila v merilu 1 : 750.000 objavljena v Geografskem atlasu Slovenije (Zupančič s sodelavci 1998b) ter podrobna digitalna podatkovna baza Zavoda za gozdove Slovenije o gozdnih sestojih in gozdnih odsekih (Karta odsekov ... 2008). Poleg tega je dostopen tudi zemljevid Potencialna naravna vegetacija (Zupančič s sodelavci 1998a).

Spremenjenost gozdov ter dejstvo, da gozd porašča prek polovice ozemlja Slovenije, sta dva glavna razloga za to, da podatek o dejanski vegetaciji ni pogosto vključen v klasifikacijo pokrajine na ravni držav. Pri biogeografski klasifikaciji je treba upoštevati tudi zaraščanje in pojav sekundarnih združb. Poleg tega je lahko ekološki razpon vrst zelo velik, zato prisotnost neke vrste po mnenju Plesníka (1972, 71) ne pove veliko o krajevnih razmerah. Zaradi tega Bailey (1996, 33) predlaga, da morajo ekološke meje temeljiti na dejavniki, ki oblikujejo oziroma kontrolirajo ekosisteme in ne na trenutni bioti. Podatke



Slika 4: Primer ročne naravnopokrajinske členitve (A) brez uporabe GIS-a (Melik 1935) in poskusne računalniške naravnopokrajinske členitve (B) z uporabo metode voditeljev na temelju podatkov o naklonu, povprečni letni temperaturi in prepustnosti kamnin (Ciglič 2013).

lahko dobimo tudi pri večjih ponudnikih podatkov o naravnih značilnosti Slovenije, kjer lahko najdemo podatke o fenofazah, površinah gozdov in podobnem (Geoportal 2014; EIONET ... 2014).

## 6 Sklep

Prispevek torej na primeru uporabe geografskih informacijskih sistemov za klasifikacijo slovenskih naravnih pokrajin poskuša povezati digitalni prostor, digitalno pokrajino in digitalne prostorske podatke ter opozoriti na nekatere dileme.

Pregled dostopnih podatkovnih slojev za območje Slovenije je pokazal, da je na voljo veliko različnih podatkov, med katerimi je najbolj natančen digitalni model višin. Na voljo je tudi precej drugih podatkov, med njimi so nekateri manj natančni (imajo ločljivost 100 m in več) oziroma je njihova natančnost vprašljiva. Zato je izris naravnopokrajinskih klasifikacij Slovenije v teh primerih izvedljiv, vendar predvsem v manjšem merilu. Vsekakor pa podatki omogočajo prehod iz analognega v digitalno določanje pokrajinskih tipov (slika 4).

## 7 Viri in literatura

- Anderson, M. G., Ferree, C. E. 2010: Conserving the stage: Climate change and the geophysical underpinnings of species diversity. *PLoS one* 5-7. San Francisco.
- Bailey, R. G. 1996: *Ecosystem geography*. New York.
- Breg Valjavec, M. 2010: Digitalni model višin nekdanje pokrajine – primer Logaško polje (leto 1972). GIS v Sloveniji 10. Ljubljana.
- Breskvar Žaucer, L., Marušič, J. 2006: Analiza krajinskih tipov z uporabo umetnih nevronske mreže. *Geodetski vestnik* 50-2. Ljubljana.
- Bunce, R. G. H, Barr, C. J., Clarke, R. T., Howard, D. C., Lane, A. M. J. 1996: Land classification for strategic ecological survey. *Journal of environmental management* 47-1. London, New York.
- Burrough, P. A., Wilson, J. P., van Gaans, P. F. M., Hansen, A. J. 2001: Fuzzy k-means classification of topo-climatic data as an aid to forest mapping in the Greater Yellowstone Area, USA. *Landscape ecology* 16-6. Den Haag.
- Castillo-Rodríguez, M., López-Blanco, J., Muñoz-Salinas, E. 2010: A geomorphologic GIS-multivariate analysis approach to delineate environmental units, a case study of La Malinche volcano (central México). *Applied Geography* 30-4. Sevenoaks.
- Cegnar, T. 1998: *Temperatura zraka*. Geografski atlas Slovenije. Ljubljana.
- Ciglič, R. 2013: *Uporaba geografskih informacijskih sistemov za določanje naravnih pokrajinskih tipov Slovenije*. Doktorsko delo, Oddelek za geografijo Filozofske fakultete Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Ciglič, R., Oštir, K. 2014: Application of MODIS products to analyze forest phenophases in relation to elevation and distance from sea. *Journal of Applied Remote Sensing* 8-1. Bellingham.
- Čarni, A., Marinček, L., Seliškar, A., Zupančič, M. 2002: *Vegetacijska karta gozdnih združb Slovenije* (CD ROM). Ljubljana.
- Demek, J., Quitt, E., Raušer, J. 1972: *Zur Problematik der physisch-geographischen Regionalisation. Theoretische Probleme der physisch-geographischen Raumgliederung*. Bratislava.
- Digital map of European ecological regions. European environmental agency. Medmrežje: <http://dataservice.eea.europa.eu/dataservice/metadetails.asp?id=192> (26. 8. 2009).
- Digitalni geološki podatki. Geološki zavod Slovenije. Ljubljana. Medmrežje: <http://www.geo-zs.si/podrocje.aspx?id=111> (1. 7. 2014).
- Digitalni model višin. Geodetska uprava Republike Slovenije. Ljubljana. Medmrežje: [http://www.e-prostor.gov.si/zbirke\\_prostorskih\\_podatkov/topografski\\_in\\_kartografski\\_podatki/digitalni\\_model\\_visin/](http://www.e-prostor.gov.si/zbirke_prostorskih_podatkov/topografski_in_kartografski_podatki/digitalni_model_visin/) (1. 7. 2014).

- Dolinar, M. 2004: GIS kot orodje pri izdelavi klimatskih kart. GIS v Sloveniji 7. Ljubljana.
- Dolinar, M. 2006: Prostorska porazdelitev trajanja sončnega obsevanja. GIS v Sloveniji 8. Ljubljana.
- EIONET: Karte in podatki. Agencija Republike Slovenije za okolje. Ljubljana. Medmrežje: [http://nfp-si.eionet.europa.eu/Podatki\\_in\\_informacije/F1084793652](http://nfp-si.eionet.europa.eu/Podatki_in_informacije/F1084793652) (1. 7. 2014).
- Ferreira, A. 2006: Pokrajinskoekološka členitev Zgornje Gorenjske. Dela 26. Ljubljana.
- Frantar, P. 2011: Geoinformacijska zasnova preučevanja virov obremenjevanja porečij. Doktorsko delo, Oddelek za geografijo Filozofske fakultete Univerze v Ljubljani, Ljubljana.
- Frantar, P., Rejec Brancelj, I., Jerovšek, J. 2006: Analiza vodomernih postaj ARSO z vidika referenčnih razmer porečja. GIS v Sloveniji 8. Ljubljana.
- Gabrovec, M. 1996: Sončno obsevanje v reliefno razgibani Sloveniji. Geografski zbornik 36. Ljubljana.
- Geoportal. Agencija Republike Slovenije za okolje. Ljubljana. Medmrežje: <http://gis.arso.gov.si/geoportal/catalog/main/home.page> (1. 7. 2014).
- Godron, M. 1994: The natural hierarchy of ecological systems. Ecosystem classification for environmental management. Dordrecht.
- Gostinčar, P., Ciglič, R. 2011: Primerjava rezultatov računalniškega prepoznavanja reliefnih oblik z rezultati geomorfološkega kartiranja. Geografski vestnik 83-1. Ljubljana.
- Goodchild, M. F. 2011: Scale in GIS: An overview. *Geomorphology* 130-1–2. New York.
- Groom, G. 2005: Methodological review of existing classifications. European Landscape Character Areas. Typologies, cartography and indicators for the assessment of sustainable landscapes. Wageningen.
- Haggett, P. 2001: Geography: a global synthesis. Harlow.
- Hargrove, W. W., Hoffman, F. M. 2005: Potential of multivariate quantitative methods for delineation and visualization of ecoregions. Environmental management 34 S1. New York.
- Hrvatini, M., Perko, D. 2002: Ugotavljanje ukrivljenosti površja z digitalnim modelom višin in njena uporabnost v geomorfologiji. GIS v Sloveniji 6. Ljubljana.
- Hrvatini, M., Perko, D. 2005: Razlike med stometrskim in petindvajsetmetrskim digitalnim modelom višin glede na tipe reliefa v Sloveniji. *Acta geographica Slovenica* 45-1. Ljubljana.
- Iwahashi, J., Pike, R. J. 2007: Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. *Geomorphology* 86-3–4. New York.
- Karta odsekov ZGS s šifrantom. Podatkovni sloj, Zavod za gozdove Slovenije. Ljubljana, 2008.
- Kastelec, D., Rakovec, J., Zakšek, K. 2007: Sončna energija v Sloveniji. Ljubljana.
- Klijin, F., Udo de Haes, H. A. 1994: A hierarchical approach to ecosystems and its implications for ecological land classification. *Landscape Ecology* 9-2. Den Haag.
- Kokalj, Ž., Oštir, K. 2005: Ugotavljanje pokrovnosti iz satelitskih posnetkov in vrednotenje pokrajinskoekoloških tipov Slovenije. Geografski obzornik 52-4. Ljubljana.
- Kokalj, Ž., Zakšek, K., Oštir, K. 2008: Uporaba laserskega skeniranja za opazovanje preteklih pokrajin – primer okolice Kobarid. GIS v Sloveniji 9. Ljubljana.
- Košir, Ž., Zorn-Pogorelec, M., Kalan, J., Marinček, L., Smole, I., Čampa, L., Šolar, M., Anko, B., Accetto, M., Robič, D., Toman, V., Žgajnar, L., Torelli, N., Tavčar, I., Kutnar, L., Kralj, A. 2007: Gozdnovegetacijska karta Slovenije (CD ROM). Ljubljana.
- Krevs, M. 1992: Iskanje lokalnih reliefnih ekstremov na DMR. Geografski vestnik 64. Ljubljana.
- Krevs, M. 1998: Vpliv izbora prostorske enote na rezultate geografskih statističnih analiz. Geografski vestnik 70. Ljubljana.
- Kutnar, L., Kobler, A., Bergant, K. 2009: Vpliv podnebnih sprememb na pričakovano prostorsko preporazporeditev tipov gozdne vegetacije. Zbornik gozdarstva in lesarstva 89. Ljubljana.
- Leathwick, J. R., Overton, J. McC., McLeod, M. 2003: An environmental domain classification of New Zealand and its use as a tool for biodiversity management. *Conservation biology* 17-6. Malden.
- Melik, A. 1935. Slovenija: geografski opis. Ljubljana.
- Metzger, M. J., Bunce, R. G. H., Jongman, R. H. G., Múcher, C. A., Watkins, J. W. 2005: A climatic stratification of the environment of Europe. *Global Ecology and Biogeography* 14-6. Oxford.

- Mücher, C. A., Bunce, R. G. H., Jongman, R. H. G., Klijn, J. A., Koomen, A. J. M., Metzger, M. J., Wascher, D. M. 2003: Identification and Characterisation of Environments and Landscapes in Europe. Wageningen.
- Mücher, C. A., Klijn, J. A., Wascher, D. M., Schaminée, J. H. J. 2009: A new European landscape classification (LANMAP): a transparent, flexible and user-oriented methodology to distinguish landscapes. *Ecological Indicators* 10-1. Amsterdam.
- Mücher, C. A., Wascher, D. M., Klijn, J. A., Koomen, A. J. M., Jongman, R. H. G. 2006: A new European landscape map as an integrative framework for landscape character assessment. *Landscape ecology in the Mediterranean, inside and outside approaches*, Proceedings of the European IALE conference. Faro.
- Obu, J. 2011: Prepoznavanje kraških kotanj na podlagi digitalnega modela višin. Diplomsko delo, Oddelek za geografijo Filozofske fakultete Univerze v Ljubljani. Ljubljana
- Ogrin, D. 1996: Podnebni tipi v Sloveniji. *Geografski vestnik* 68. Ljubljana.
- Ogrin, D. 1998: Podnebje. *Geografski atlas Slovenije*. Ljubljana.
- Ogrin, D. 2009: Analiza in funkcijsko vrednotenje fizičnogeografskih sestavin Slovenije. *Aplikatívna fizična geografija Slovenije*. Ljubljana.
- Ogrin, D., Krevs, M. 2001: Study of microclimatic differences based on vertical terminal increments of trees. *Zbornik od vtóriot Kongres na geografíte na Republika Makedonija*. Ohrid.
- Owen, S. M., MacKenzie, A. R., Bunce, R. G. H., Stewart, H. E., Donovan, R. G., Stark, G., Hewitt, C. N. 2006: Urban land classification and its uncertainties using principal component and cluster analyses: a case study for the UK West Midlands. *Landscape and urban planning* 78-4. Amsterdam.
- Pedološka karta. Podatkovni sloj, Ministrstvo za kmetijstvo in okolje. Ljubljana, 2007. Medmrežje: <http://rkg.gov.si/GERK/> (13. 6. 2012)
- Pedološka karta v merilu 1 : 25.000. Medmrežje: [http://stari.bf.uni-lj.si/cpvo/Novo/SF\\_PodatkiTalSlovenije.htm](http://stari.bf.uni-lj.si/cpvo/Novo/SF_PodatkiTalSlovenije.htm) (13. 6. 2012)
- Perko, D. 1991: Uporabnost digitalnega modela reliefa za določanje morfoloških enot. *Geodetski vestnik* 35-2. Ljubljana.
- Perko, D. 1998: The regionalization of Slovenia. *Geografski zbornik* 38. Ljubljana.
- Perko, D. 2001: Analiza površja s stometriškim digitalnim modelom reliefa. *Geografija Slovenije* 3. Ljubljana.
- Perko, D. 2007: Morfometrija površja Slovenije. *Georitem* 3. Ljubljana
- Perko, D., Zorn, M. 2010a: Geografski informacijski sistemi: pokrajina v računalniku. *Geografski vestnik* 82-2. Ljubljana.
- Perko, D., Zorn, M. 2010b: Zgodovina knjižne zbirke GIS v Sloveniji. *GIS v Sloveniji* 10. Ljubljana.
- Plesník, P. 1972: Zur Frage der biogeographischen Regionalisation der Slowakei. *Theoretische Probleme der physisch-geographischen Raumgliederung*. Bratislava.
- Podobnikar, T. 2008: Določitev značilnih gorskih vrhov in analiza njihovih oblik. *Geodetski vestnik* 52-1. Ljubljana.
- Podobnikar, T., Székely, B. 2008: Poskus analize potencialno nevarnih vršajev z DMR-jem. *GIS v Sloveniji* 9. Ljubljana.
- Prostor: Prostorski portal. Geodetska uprava Republike Slovenije. Ljubljana. Medmrežje: <http://www.e-prostor.gov.si/> (1. 7. 2014).
- Repe, B. 2006a: Novi pristopi pri proučevanju prsti v pokrajini. *Dela* 26. Ljubljana.
- Repe, B. 2006b: Pedogeografska karta in njena uporabnost v geografiji. *Doktorsko delo*, Oddelek za geografijo Filozofske Fakultete Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Repe, B. 2007: Voda v prsti in ugotavljanje njenega razporejanja v odvisnosti od reliefa. *Dela* 28. Ljubljana.
- Repe, B. 2010: Značilne kombinacije pedogenetskih dejavnikov v Sloveniji. *GIS v Sloveniji* 10. Ljubljana.
- Renetzeder, C., van Eupen, M., Mücher, C. A., Wrbka, T. 2008: A spatial regional reference framework for sustainability assessment in Europe. *Sustainability impact assessment of land use changes*. Berlin.
- Romportl, D. 2009: Landscape typology of the Czech Republic (*Typologie krajiny České republiky*). *Doktorsko delo*, Naravoslovna fakulteta Karlove univerze v Pragi. Praga.

- Runhaar, H. J., Udo de Haes, H. A. 1994: The use of site factors as classification characteristics for ecotopes. *Ecosystem Classification for Environmental Management*. Dordrecht.
- Soto, S., Pintó, J. 2010: Delineation of natural landscape units for Puerto Rico. *Applied Geography* 30-4. Sevenoaks.
- Swanwick, C. 2002: *Landscape character assessment. Guidance for England and Scotland*. Sheffield.
- Tarábek, K. 1972: Die problem der klimageographischen Regionalisation. *Theoretische Probleme der physisch-geographischen Raumgliederung*. Bratislava.
- Thompson, R. S., Shafer, S. L., Anderson, K. H., Strickland, L. E., Pelltier, R. T., Bartlein, P. J., Kerwin, M. W. 2005: Topographic, bioclimatic, and vegetation characteristics of three ecoregion classification systems in North America: Comparisons along continent-wide transect. *Environmental management* 34-S1. New York.
- Triglav Čekada, M., Bric, V., Oven, K. 2012: Prvo vsestransko lasersko skeniranje Slovenije. GIS v Sloveniji 11. Ljubljana.
- Trobec, T. 2008: Hidrogeografske metode ocenjevanja nemerjenih obdobjnih pretokov v Sloveniji. *Dela* 29. Ljubljana.
- Uлага, F. 2003: Geografski informacijski sistem v hidrogeografskem proučevanju odtočnosti porečij. Magistrsko delo, Oddelek za geografijo Filozofske fakulteta Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Van Eetvelde, V., Antrop, M. 2009: A stepwise multi-scale typology and characterisation for trans-regional integration, applied on the federal state of Belgium. *Landscape and urban planning* 91-3. Amsterdam.
- Vodotoki. Podatkovni sloj, EIONET. Medmrežje: <http://nfp-si.eionet.europa.eu/Dokumenti/GIS/voda/> (2. 12. 2006).
- Wolock, D. M., Winter, T. C., McMahon, G. 2004: Delineation and evaluation of hydrological-landscape regions in the United States using geographic information system tools and multivariate statistical analyses. *Environmental management* 34-S1. New York.
- Zakšek, K., Podobnikar, T., Oštir, K. 2005: Solar radiation modelling. *Computers & Geosciences* 31-2. New York.
- Zemljevid tipov kamnin (različica 9.12.). Podatkovni sloj, Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU. Ljubljana, 2012.
- Zemljevidi povprečnih mesečnih in letnih temperatur in zemljevidi povprečnih mesečnih in letnih padavin 1971–2000. Podatkovni sloj, Agencija Republike Slovenije za okolje. Ljubljana, 2010.
- Zhou, Y., Narumalani, S., Waltman, W. J., Waltman, S. W., Palecki, M. A. 2003: A GIS-based spatial pattern analysis model for eco-region mapping and characterization. *International journal of geographical information science* 17-5. London.
- Zupančič, B. 1998: Padavine. Geografski atlas Slovenije. Ljubljana
- Zupančič, M. 1989: Fitogeografija. Enciklopedija Slovenije 3. Ljubljana.
- Zupančič, M., Marinček, L., Puncer, I., Seliškar, A. 1998a: Potencialno naravna vegetacija (zemljevid). Geografski atlas Slovenije. Ljubljana.
- Zupančič, M., Marinček, L., Puncer, I., Žagar, V., Prešeren, M., Seliškar, A., Accetto, M., Tregubov, V. 1998b: Realna vegetacija (zemljevid). Geografski atlas Slovenije. Ljubljana.

## MODELIRANJE GEOGRAFSKIH TIPIZACIJ SLOVENIJE Z METODAMI NADZOROVANIH KLASIFIKACIJ

**dr. Rok Ciglič, dr. Drago Perko**

Geografski inštitut Antona Melika, Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti  
rok.ciglic@zrc-sazu.si, drago@zrc-sazu.si

UDK: 911.5(497.4)

659.2:004:91(497.4)

### IZVLEČEK

#### **Modeliranje geografskih tipizacij Slovenije z metodami nadzorovanih klasifikacij**

V prispevku soočamo modelirane geografske tipizacije Slovenije z izvorno geografsko tipizacijo Slovenije, ki ima 9 pokrajinskih tipov. Ugotavljamo, na katerih območjih se modeli razlikujejo od izvirnika in predlagamo, kje bi bilo izvorno geografsko tipizacijo smiselno preveriti in morda popraviti. Vsi modeli hkrati so približno tretjino Slovenije uvrstili v enake tipe kot izvirnik in dobro desetino Slovenije v druge tipe.

### KLJUČNE BESEDE

geografija, geografska tipizacija, pokrajinski tip, metoda nadzorovane klasifikacije, geografski informacijski sistem, Slovenija

### ABSTRACT

#### **Modelling of geographical typologies of Slovenia with supervised classification methods**

In the chapter we face the modeled geographic typologies of Slovenia with the original geographic typology of Slovenia, which has 9 landscape types. We determined the areas where the models differ from the original and suggested where the original geographic typology should be checked and possibly fixed. All models have classified about a third of Slovenia in same types as the original and about a tenth of Slovenia in different types.

### KEY WORDS

geography, geographical typology, landscape type, supervised classification method, geographic information system, Slovenia



## 1 Uvod

Geografski informacijski sistemi se čedalje pogosteje uporabljajo tudi za določanje in vrednotenje pokrajinskih tipov (na primer Breskvar Žaucer in Marušič 2006; Oštir in Kokalj 2013). V okviru aplikativnega projekta Določanje naravnih pokrajinskih tipov Slovenije z geografskim informacijskim sistemom, ki ga je financirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, sofinancirala pa Slovenska akademija znanosti in umetnosti, smo GIS-e uporabili na več načinov (Ciglič 2012; Ciglič in Perko 2012; Ciglič in Perko 2013), tudi za modeliranje geografskih tipizacij Slovenije.

Eden od namenov modeliranja tipizacij je primerjava modeliranih tipizacij z obstoječimi, izvirnimi tipizacijami, še posebej pa ugotavljanje območij, ki se pri vseh modeliranih tipizacijah uvrščajo enako ne glede na izbrano metodo in zato predstavljajo osrednji, najbolj značilen prostorski del posameznega tipa.

## 2 Metode dela

V prispevku povzemamo prikaz modeliranja tipizacij z metodami nadzorovane klasifikacije, pri katerih najprej izberemo učne vzorce, na temelju katerih izdelamo model, na koncu pa celotno območje zunaj učnega vzorca uvrstimo v posamezne kategorije (Warner in Campagna 2009).

Klasifikacija je iterativni proces. Po prvih rezultatih pogosto popravljamo izbor učnih celic ali nastavitve, da bi dosegli čim bolj optimalne rezultate (Warner in Campagna 2009).

Prednosti nadzorovanih klasifikacij so (Campbell 1996, 328):

- nadzor nad kategorijami,
- možnost (boljše) primerjave med različnimi klasifikacijami (po obdobjih ali po različnih območjih),
- povezanost spektralnih in informacijskih razredov ni nujna,
- možnost preverjanja uspešnosti klasifikacije s štejetjem pravih uvrstitev celic v učnih vzorcih (a dobro ujemanje še ne pomenijo dobre klasifikacije!).

Slabosti nadzorovanih klasifikacij pa so (Campbell 1996, 328 in 329):

- vnaprej določene kategorije (kar pomeni, da te niso tako »naravne« kot pri metodah nenadzorovane klasifikacije),
- definicija učnih vzorcev na podlagi informacijskih kategorij in ne na podlagi spektralnih kategorij (torej številskih lastnosti podatkovnih slojev),
- možna slaba ponazoritev učnih vzorcev z vidika lastnosti celotnega območja (tudi kategorije, ki niso določene z učnimi vzorci, ne moremo prepoznati).

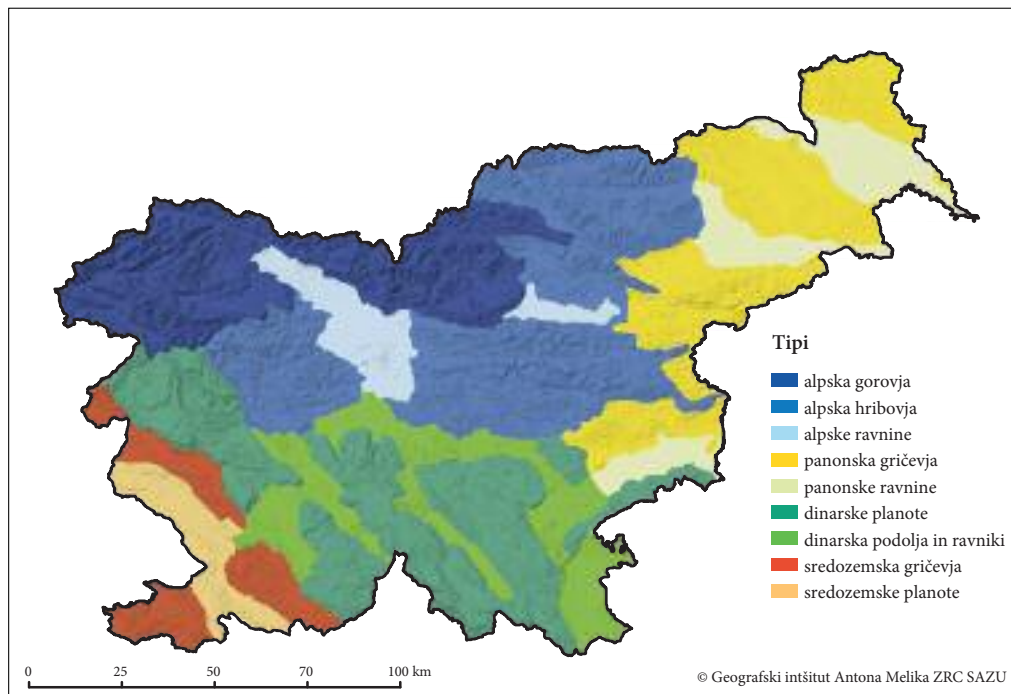
Pri vseh nadzorovanih klasifikacijah je treba določiti učne vzorce, na podlagi katerih izdelamo prava ali določimo spektralni podpis (tipične vrednosti) kategorije. Postopek določanja učnih vzorcev je obvezen prvi korak pri vseh izbranih metodah nadzorovane klasifikacije.

Za uspešno modeliranje z nadzorovanimi klasifikacijami torej rabimo:

- poznane vrednosti posameznih kategorij (v našem primeru izvirne tipe oziroma tipizacijo),
- določeno število podatkovnih slojev,
- geoinformacijsko orodje.

Učne vzorce, iz katerih lahko pridobimo poznane vrednosti za izdelavo klasifikacijskih pravil modeliranja, lahko vzorčimo na različne načine.

V prispevku smo kot **izvirno tipizacijo** izbrali geografsko tipizacijo, ki Slovenijo na prvi ravni deli na 4 pokrajinske tipe in na drugi ravni na 9 pokrajinskih tipov oziroma podtipov (slika 1). Prva raven je povezana z lego Slovenije na stiku štirih velikih evropskih geografskih enot: Alp, Panonske kotline, Dinarskega gorovja in Sredozemlja, na drugi ravni pa so tipi prve ravni razdeljeni predvsem glede na relief in kamnine (Perko 1998; Perko 2007, 33–54).



Slika 1: Geografska tipizacija Slovenije z 9 tipi (Perko 2007, 54).

Shema te geografske tipizacije, ki sloni predvsem na naravnih sestavinah pokrajine in rabi tal, je naslednja:

- prvi tip (alpske pokrajine) ima tri podtipe (alpska gorovja, alpska hribovja in alpske ravnine),
- drugi tip (panonske pokrajine) ima dva podtipa (panonska gričevja in panonske ravnine),
- tretji tip (dinarske pokrajine) ima dva podtipa (dinarske planote ter dinarska podolja in ravniki),
- četrti tip (sredozemske pokrajine) ima prav tako dva podtipa (sredozemska gričevja in sredozemske planote).

Izbrali smo štiri **podatkovne sloje**:

- nadmorsko višino površja,
- naklon površja,
- prepustnost kamnin,
- padavinski režim (razmerje padavin med poletjem in jesenjo).

Izbrali smo še sedem **geoinformacijskih orodij** (preglednica 1). Za izdelavo spektralnih podpisov smo uporabili modul MAKESIG v programu Idrisi.

Nadzorovana klasifikacija je definirana kot proces, pri katerem s pomočjo učnih vzorcev uvrščamo celice z neznano identiteto (Campbell 1996). Ker klasificiramo celice v različne tipe, ki so jih geografi že določili za celotno območje Slovenije, te tipe načeloma že poznamo za vse celice znotraj Slovenije (če izvajamo napake zaradi ročnega risanja meja in podobno). Ker želimo potrditi izvirne tipizacije s pomočjo različnih metod nadzorovane klasifikacije, učne vzorce vseeno rabimo. Zato smo uporabili dva različna **zajema učnih vzorcev**. Za dva nabora (in zato podvojeno analizo) smo se odločili, ker je izbor učnih vzorcev prav tako pomemben kot izbor geoinformacijskega orodja in prav tako vpliva na rezultat (Campbell 1996, 333; Lillesand, Kiefer in Chipman 2008, 557). Tako smo tudi uspešnost modeliranja preverili dvakrat.

*Preglednica 1: Izbrana geoinformacijska orodja za izvedbo metod nadzorovane klasifikacije (Mitchell 1997; Yohannes in Webb 1999; Koononenko 2005; McCoy 2005; Witten in Frank 2005; Lin, Noe in He 2006; Richards in Jia 2006; Eastman 2009; 2012; SPSS ... 2010; Idrisi Selva 2012; McRoberts 2012).*

oznaka orodja	geoinformacijsko orodje	računalniški program	nastavitve
CT	odločitveno drevo, različica CT	SPSS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• algoritem <i>Classification and Regression trees</i>,</li> <li>• mera je Ginijev koeficient,</li> <li>• deset ravni,</li> <li>• 100 enot v notranjih vozliščih,</li> <li>• 50 enot v zunanjih vozliščih,</li> <li>• minimalno izboljšanje Ginijevega koeficienta: 0,0001,</li> <li>• obrezovanje SE = 1</li> </ul>
MDS	metoda najmanjše razdalje	Idrisi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tip razdalje ni dodatno standardiziran,</li> <li>• najdaljša razdalja ni omejena</li> </ul>
MXL	metoda največje verjetnosti	Idrisi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• enake apriorne (prvotne) verjetnosti za vsak tip,</li> <li>• minimalna verjetnost za klasifikacijo je 0</li> </ul>
KNN	metoda $k$ najbližjih sosedov	Idrisi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• število sosedov <math>k</math> je 30,</li> <li>• najvišje dovoljeno število celic iz posameznega tipa je 2000</li> </ul>
CTR	odločitveno drevo, različica CTR	Idrisi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• algoritem CTA,</li> <li>• mera je razmerje informacijskega prispevka,</li> <li>• obrezovanje vozlišč z manj kot 1 % celic v tipu</li> </ul>
CTG	odločitveno drevo, različica CTG	Idrisi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• algoritem CTA,</li> <li>• mera je Ginijev koeficient,</li> <li>• obrezovanje vozlišč z manj kot 1 % celic v tipu</li> </ul>
CTE	odločitveno drevo, različica CTE	Idrisi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• algoritem CTA,</li> <li>• mera je informacijski prispevek,</li> <li>• obrezovanje vozlišč z manj kot 1 % celic v tipu</li> </ul>

**Prve učne vzorce** smo določili na podlagi stratificiranega naključnega vzorčenja znotraj posameznih tipov (razpršeno). Izbrali smo po 2000 celic znotraj vsakega tipa, kar je približno tretjina celic po površini najmanjšega tipa.

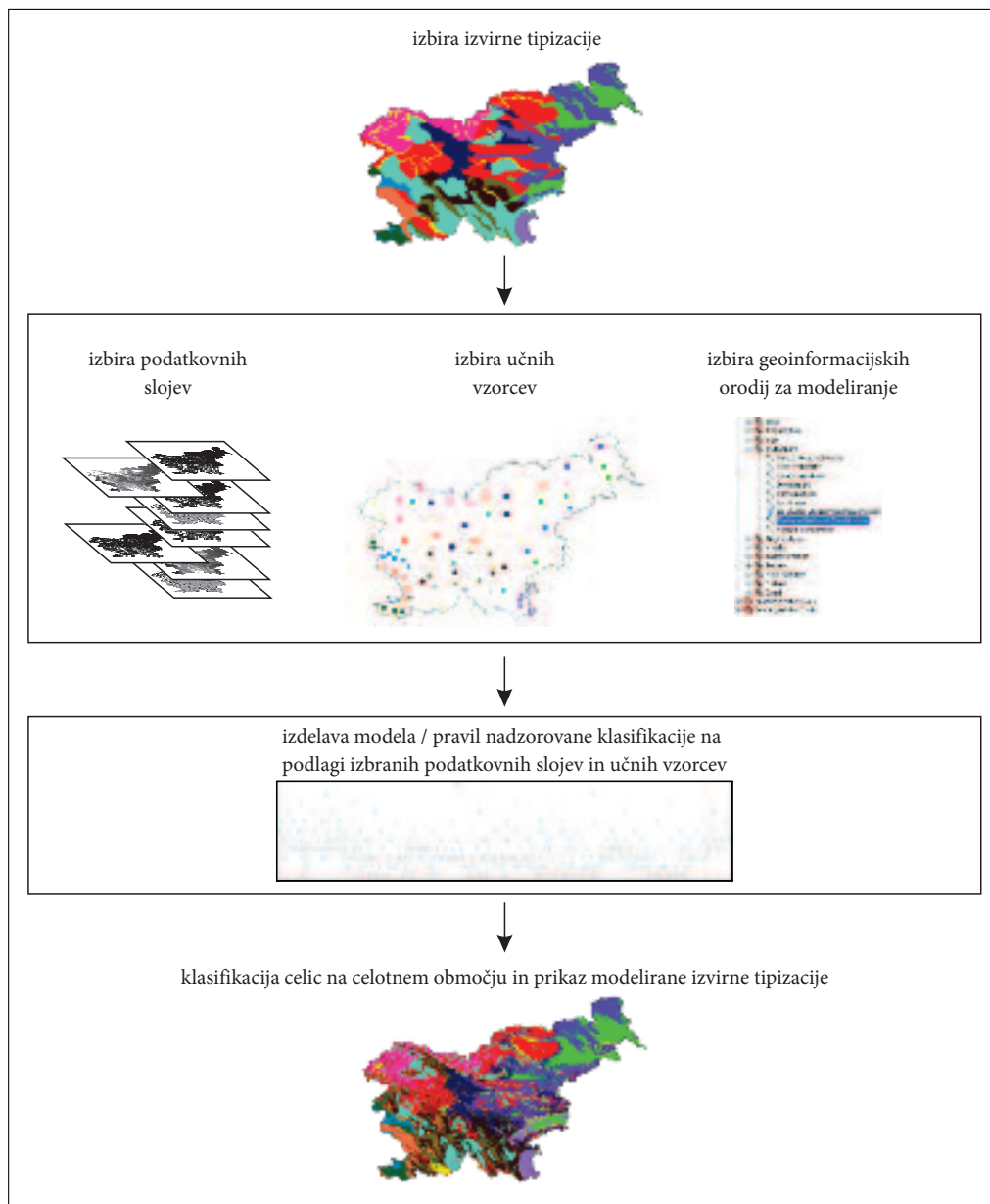
**Druge učne vzorce** smo določili ekspertno, tako da smo za vsak tip izbrali celice znotraj dveh ali več homogenih kvadratnih območij iz osrednjih delov posameznega tipa. Tudi v tem primeru smo izbrali po 2000 celic znotraj vsakega tipa. S tem načinom vzorčenja smo se predvsem želeli izogniti robnim celicam in smo vzorce zajeli v osrednjih območjih tipov.

Za enako število celic po posameznih tipih smo se odločili:

- ker je zaradi ročnega načina določanja tipov lahko prišlo do napak, kar pomeni, da je število celic pri posameznem tipu (in s tem tudi njegov delež v Sloveniji) morda neustrezno,
- ker število celic pri nekaterih metodah vpliva na rezultate klasifikacij (recimo pri gradnji odločitvenega drevesa ali pri metodi  $k$ -najbližjih sosedov).

Način vzorčenja je razmeroma tog in bi lahko ob nekaterih izboljšavah (na primer zajem bolj specifičnih spektralnih vzorcev) predstavljal še boljši temelj modeliranju, a namen analize je bil predvsem ugotoviti, ali je mogoče s trenutno določenimi tipi sploh modelirati. Svpadanje in tudi razhajanje modelov in izvirne tipizacije, ki so prikazana v nadaljevanju, pa vsekakor omogočajo raziskovalcem spoznati,

kje so najbolj tipična območja, kjer lahko vzamemo dobre učne vzorce za ponovno (izboljšano analizo), in kje so območja, kjer bi morali razmisliti o dodatnih, bolj specifičnih učnih vzorcih. V prispevku smo določili dva učna vzorca, s katerimi smo modelirali, ter skušali prikazati tudi, kakšen vpliv ima oziroma kako pomembno je vzorčenje. Rezultati (modeli) predstavljajo prvo poizvedovalno fazo in lahko služijo za izboljšanje vzorčenja novih modelov.



Slika 2: Shematski prikaz modeliranja izvorne pokrajinske tipizacije.

Po izdelavi modeliranih klasifikacij (slika 2) smo primerjali ujemanje vseh modeliranih tipizacij hkrati z izvirno tipizacijo in tako ugotovili, kje so tista območja posameznega tipa, ki smo jih potrdili z vsemi uporabljenimi metodami nadzorovanih klasifikacij oziroma geoinformacijskimi orodji, in kje so tista območja, ki jih nismo uspeli potrditi z nobeno metodo.

### 3 Ujemanje modeliranih tipizacij z izvirno tipizacijo

Pri prekrivanju smo za modelirane tipizacije, izdelane z naključnim učnim vzorcem, in za modelirane tipizacije, izdelane z ekspertnim učnim vzorcem, izdelali po en zemljevid, ki prikazuje celice, ki so bile z vsako metodo (preglednica 1) oziroma modelom klasificirane enako kot pri izvorni tipizaciji (preglednica 2, sliki 3 in 4).

Ugotovili smo, da je izvirna tipizacija bolj potrjena z naključnim učnim vzorcem, saj je 36,6 % vseh celic razvrščenih enako kot v izvorni tipizaciji. Pri ekspertnem vzorčenju je takih celic manj, in sicer 28,1 %. Takšno razmerje je razumljivo, saj smo z naključnim vzorcem zajeli večjo variabilnost tipov kot pa z ekspertnim vzorcem, kjer smo iskali bolj homogena območja. Glede na posamezne tipe je opazno, da se celice tipov, ki zajemajo manjše površine, bolj ujemajo s celicami izvirne tipizacije, vendar to ne velja vedno (na primer dinarska podolja in ravniki so precej manjši po površini kot pa alpska hribovja, a se po modeliranih tipizacijah v naključnem in ekspertnem primeru slabše ujemajo z izvirno tipizacijo).

Pri obeh načinih vzorčenja se pri primerjavi modelov (preglednica 2) z izvirnikom najboljše ujemajo bolj ravninski tipi. Pri naključnem so med prvimi petimi trije (alpske ravnine, panonske ravnine in sredozemske planote), pri ekspertnem vzorčenju pa štirje taki tipi (poleg omenjenih še panonska gričevja).

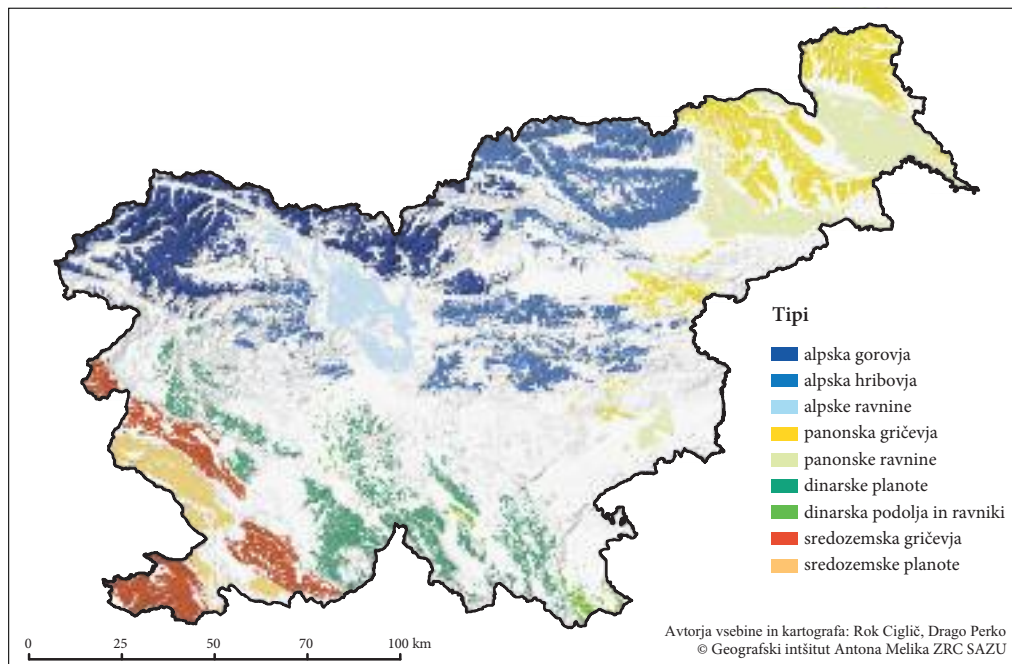
Pri prekrivanju modeliranih tipizacij, ki so narejene z naključnim vzorčenjem, in izvirne tipizacije so vsi modeli potrdili:

- kot **alpsko gorovje** Julijske Alpe, Kamniško-Savinjske Alpe in Karavanke (večjih vmesnih dolin pa niso potrdili vsi modeli);
- kot **alpsko hribovje** Pohorje, Kozjak in Strojne ter večino Posavskega, Škofjeloškega in Polhograjskega hribovja (večjih vmesnih doline pa spet niso potrdili vsi modeli);
- kot **alpsko ravnino** samo Ljubljansko ravan;
- kot **panonsko gričevje** Goričko, Lendavske in Slovenske gorice (vsi modeli hkrati niso potrdili Haloz ter Dravinjskih in Bizeljskih goric);
- kot **panonsko ravnino** Dravsko in Mursko ravan;
- kot **dinarsko planoto** predvsem Trnovski gozd, Hrušico, Nanos, Idrijsko hribovje in Javornike (vsi modeli hkrati pa niso potrdili Gorjancev, Raduljskega hribovja, Suhe krajine in Banjšice);
- kot **dinarsko podolje ali ravnik** le manjša območja Ribniško-Kočevskega podolja in Bele krajine (to je tip z najslabšim ujemanjem modeliranih in izvirnih celic);
- kot **sredozemsko gričevje** predvsem Goriška, Vipavska in Koprška brda;
- kot **sredozemsko planoto** pa Kras (Podgorskega krasa, Podgrajskega podolja in Čičarije niso potrdili vsi modeli v celoti).

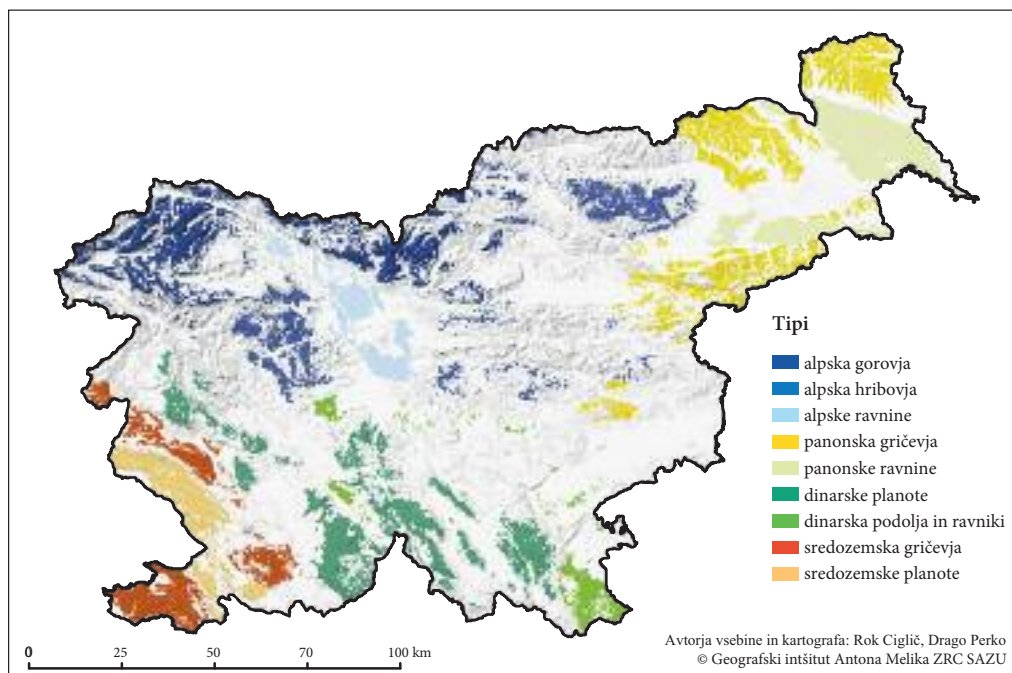
Med vsemi modeliranimi tipi hkrati in izvirnimi tipi ni ujemanja na območju Celjske kotline, srednje Soške doline, med Vrhniko in Idrijo, Pivške kotline, Ljubljanskega barja, Dolenjskega podolja, Suhe krajine, Bizeljskega gričevja, večjega dela Krške kotline, Gorjancev in večjega dela Bele krajine.

Pri prekrivanju modeliranih tipizacij, ki so narejene z ekspertnim vzorčenjem, in izvirne tipizacije, so vsi modeli potrdili:

- kot **alpsko gorovje** Julijske Alpe, Kamniško-Savinjske Alpe in Karavanke (spet so izvzete vmesne doline in planote, kot sta Pokljuka in Jelovica);
- kot **alpsko hribovje** predvsem Pohorje;



Slika 3: Območja, ki se pri naključnem vzorčenju po vseh modeliranih tipizacijah ujemajo z izvirno tipizacijo.



Slika 4: Območja, ki se pri ekspertnem vzorčenju po vseh modeliranih tipizacijah ujemajo z izvirno tipizacijo.

- kot **alpsko ravnino** samo Ljubljansko kotlino;
- kot **panonsko gričevje** Goričko in Haloze (modeli hkrati niso potrdili večjega dela Bizeljskega in Krškega gričevja);
- kot **panonsko ravnino** predvsem Mursko in Dravsko ravan (Krške ravni niso potrdili vsi modeli);
- kot **dinarsko planoto** Trnovski gozd;
- kot **dinarsko podolje ali ravnik** le Belo krajino (tudi pri ekspertnem vzorčenju je to tip z najslabšim ujemanjem modeliranih in izvirnih celic);
- kot **sredozemsko gričevje** Koprška, Vipavska in Goriška brda (večjih vmesnih dolin pa niso potrdili vsi modeli);
- kot **sredozemsko planoto** predvsem Kras.

Med modeliranimi tipi hkrati in izvirnimi tipi ni ujemanja predvsem na območju med Vrhniko in Idrijo, Celske kotline, srednje Soške doline, Pivške kotline, Ljubljanskega barja, Dolenjskega podolja, Suhe krajine, Bizeljskih gor, Krške ravni in Gorjancev.

*Preglednica 2: Delež celic, ki se pri vseh modeliranih tipizacijah ujemajo z izvorno tipizacijo.*

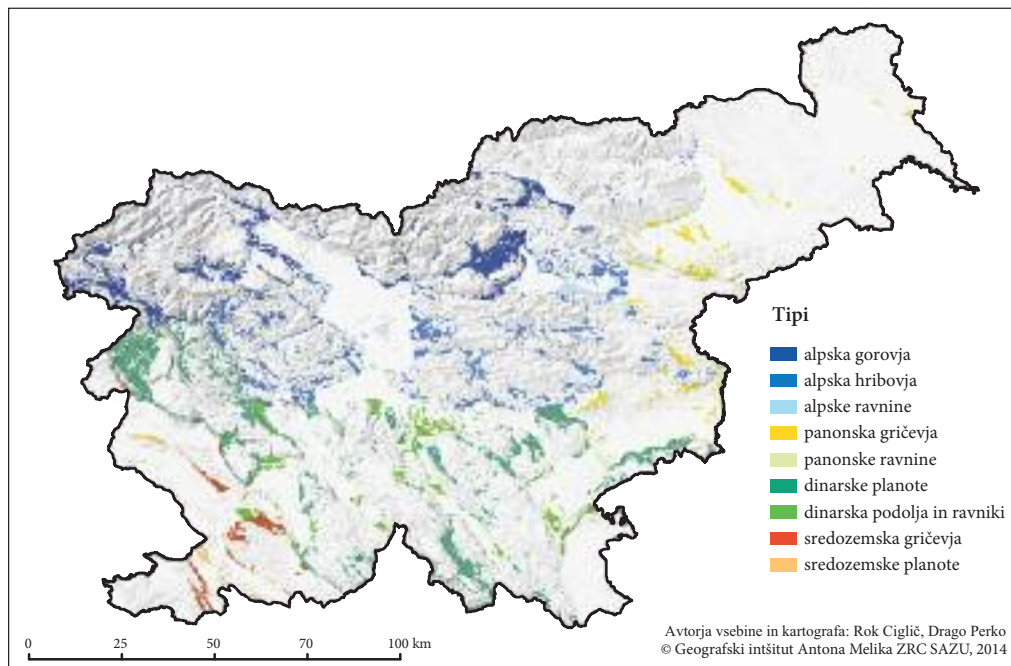
pokrajinski tip	število celic izvorne tipizacije	delež (%) celic, ki so v vseh modeliranih tipizacijah uvrščene enako kot v izvorni tipizaciji (naključno vzorčenje)	delež (%) celic, ki so v vseh modeliranih tipizacijah uvrščene enako kot v izvorni tipizaciji (ekspertno vzorčenje)
alpska gorovja	76.533	45,1	30,4
alpska hribovja	116.478	36,3	13,9
alpske ravnine	20.481	52,8	36,3
panonska gričevja	74.719	32,4	35,3
panonske ravnine	32.336	71,1	54,7
dinarske planote	95.190	23,1	23,5
dinarska podolja in ravniki	47.387	4,2	12,6
sredozemska gričevja	26.490	65,2	50,1
sredozemske planote	16.836	55,0	58,1
skupaj	506.450	36,6	28,1

## 4 Neujemanje modeliranih tipizacij z izvorno tipizacijo

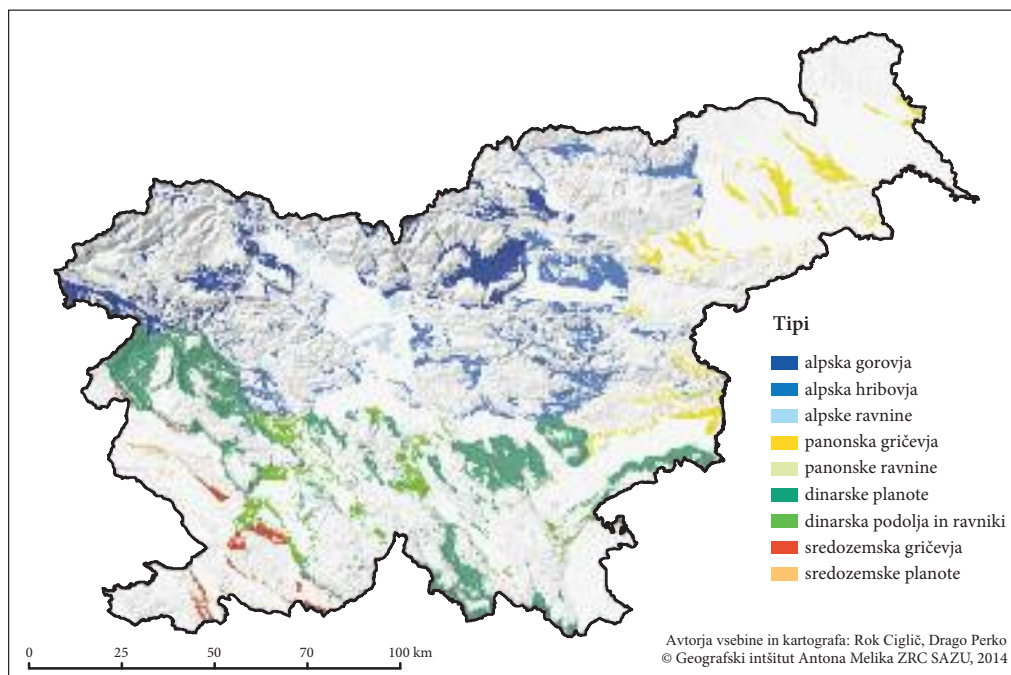
Zanimive so tudi celice, ki jih noben model ni uvrstil enako kot so v izvorniku. Pri ekspertnem učnem vzorcu (preglednica 3, slika 6) je takih celic 19,4 %, pri naključnem učnem vzorcu (preglednica 3, slika 5) pa manj, 11,8 %. Podobno razmerje velja tudi za posamezne tipe, razen za panonske ravnine in sredozemske planote.

Pri naključnem vzorčenju so območja, ki jih noben model ne uvršča enako kot izvornik, predvsem doline, kotline, manjša kraška polja in druge kotanje (na primer Bohinj znotraj alpskega gorovja ali Dobropolje znotraj dinarskih planot) ter območja na stikih tipov, to pa predvsem zato, ker izvornik ni bil izdelan v tako natančnem merilu kot modeli.

Pri ekspertnem vzorčenju je območij, ki jih noben modelu ne uvršča enako kot izvornik, nekoliko več. Največ jih je na stiku tipov, manj pa je dolin, kotlin in drugih kotanj, saj smo pri ekspertnem vzorčenju celic lahko zajeli tudi taka območja sredi gorovij, hribovij, gričevij in planot.



Slika 5: Območja, ki se pri naključnem vzorčenju po nobenem modelu tipizacije ne ujemajo z izvirno tipizacijo.



Slika 6: Območja, ki se pri ekspertnem vzorčenju po nobenem modelu tipizacije ne ujemajo z izvirno tipizacijo.



Preglednica 3: Delež celic, ki se pri nobeni modelirani tipizaciji ne ujemajo z izvirno tipizacijo.

pokrajinski tip	število celic v tipu izvirne tipizacije	delež (%) celic, ki so v vseh modeliranih tipizacijah uvrščene drugače kot v izvirni tipizaciji (naključno vzorčenje)	delež (%) celic, ki so v vseh modeliranih tipizacijah uvrščene drugače kot v izvirni tipizaciji (ekspertno vzorčenje)
alpska gorovja	76.533	15,4	22,9
alpska hribovja	116.478	12,2	19,3
alpske ravnine	20.481	7,5	12,4
panonska gričevja	74.719	6,0	13,9
panonske ravnine	32.336	2,3	1,0
dinarske planote	95.190	19,3	34,8
dinarska podolja in ravniki	47.387	10,7	16,8
sredozemska gričevja	26.490	8,3	10,4
sredozemske planote	16.836	6,7	5,1
skupaj	506.450	11,8	19,4

## 5 Sklep

Modelirane geografske tipizacije Slovenije z metodami nadzorovanih klasifikacij omogočajo njihovo primerjanje z izvirno tipizacijo in pokažejo območja, ki jih vsi modeli uvrščajo enako kot izvirnik in jih zato lahko potrdimo kot pravi tip, in območja, ki jih noben model ne uvršča enako kot izvirnik in so zato sporna.

Pri naključnem vzorčenju so vsi modeli določili enake tipe kot izvirnik na 36,6 % površja Slovenije, pri ekspertnem pa na 28,1 %. Noben model pa ni določil enakega tipa kot izvirnik na 11,8 % površja Slovenije pri naključnem vzorčenju in 19,4 % pri ekspertnem vzorčenju. To pomeni, da približno tretjino Slovenije pokrivajo »stabilni« pokrajinski tipi (največ takih območij imajo panonske ravnine, alpske ravnine, sredozemska gričevja in sredozemske planote), na dobri desetini Slovenije pa bi bilo treba izvirno tipizacijo preveriti in morda tudi ustrezno popraviti.

Prav tako lahko z rezultati dobimo uporabne informacije za ponovno vzorčenje in boljše modeliranje, saj zemljevidi prekrivanj jasno pokažejo, kje lahko zajamemo dober vzorec in kje bi morali bolj natančno vzorčiti (na primer doline znotraj alpskih gorovij bi lahko bile določene kot samostojna kategorija) ter bi s tem zagotovo izdelali boljši model.

To je tudi praktičen primer, kako lahko geoinformacijska orodja pripomorejo k izboljšanju rezultatov znanstvenega dela, v našem primeru k boljši geografski tipizaciji Slovenije, ki se uporablja tudi na strokovnem področju kot podpora odločanju, recimo pri določanju bonitete kmetijskih zemljišč (Berk s sodelavci 2012), subvencioniranju kmetijske proizvodnje na območjih s slabšimi možnostmi za kmetijstvo (Ciglič s sodelavci 2012), varovanju pred naravnimi nesrečami ali prostorskem načrtovanju po posameznih pokrajinskih tipih (Perko 2009).

## 6 Viri in literatura

- Berk, S., Kete, P., Žagar, T., Pegan Žvokelj, B., Košir, J. 2012: Ocena proizvodne sposobnosti zemljišč iz razpoložljivih prostorskih podatkov. Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2011–2012, GIS v Sloveniji 11. Ljubljana.
- Breskvar Žaucer, L., Marušič, J. 2006: Analiza krajinskih tipov z uporabo umetnih nevronske mreže. Geodetski vestnik 50-2. Ljubljana.
- Campbell, J. B. 1996: Introduction to Remote Sensing. London.
- Ciglič, R. 2012: Evaluation of digital data layers for establishing natural landscape types in Slovenia. Geopolitics, History, and International Relations 4-2. New York.
- Ciglič, R., Hrvatin, M., Komac, B., Perko, D. 2012: Karst as a criterion for defining areas less suitable for agriculture. Acta geographica Slovenica 52-1. Ljubljana. DOI: <http://dx.doi.org/10.3986/AGS52103>
- Ciglič, R., Perko, D. 2012: Preverjanje pokrajinskih tipov Slovenije z geografskim informacijskim sistemom. Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2011–2012, GIS v Sloveniji 11. Ljubljana.
- Ciglič, R., Perko, D. 2013: Europe's landscape hotspots. Acta geographica Slovenica 53-1. Ljubljana.
- Eastman, J. R. 2009: IDRISI Taiga. Guide to GIS and Image Processing. Worcester.
- Eastman, J. R. 2012: IDRISI Selva Manual. Worcester.
- Idrisi Selva Help (17.02), 2012.
- Kokalj, Ž., Oštir, K. 2013: Vrednotenje pokrajinskoekoloških tipov Slovenije v luči pokrovnosti, izdelane s klasifikacijo satelitskih posnetkov Landsat. Prostor, kraj, čas 1. Ljubljana.
- Kononenko, I. 2005: Strojno učenje. Ljubljana.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., Chipman, J. W. 2008: Remote sensing and image interpretation. Hoboken.
- Lin, N., Noe, D., He, X. 2006: Tree-based methods and their applications. Springer Handbook of Engineering statistics. London. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-84628-288-1>
- McCoy, R. M. 2005: Field Methods in Remote Sensing. New York.
- McRoberts, R. E. 2012: Estimating forest attribute parameters for small areas using nearest neighbors techniques. Forest Ecology and Management 272. Amsterdam. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2011.06.039>
- Mitchell, T. M. 1997: Lecture slides for textbook Machine learning. Medmrežje: <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs.cmu.edu/project/theo-20/www/mlbook/ch3.pdf> (3. 5. 2010).
- Perko, D. 2007: Landscapes. Slovenia in Focus. Ljubljana.
- Perko, D. 2009: Tipi naravne pokrajine kot dejavnik regionalnega razvoja in regionalnih razlik v Sloveniji. Razvojni izzivi Slovenije, Regionalni razvoj 2. Ljubljana.
- Richards, J., Jia, X. 2006: Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Berlin, Heidelberg. SPSS Statistics 17.0 Algorithms. Medmrežje: <http://support.spss.com/ProductsExt/SPSS/ESD/17/Download/User%20Manuals/English/SPSS%20Statistics%2017.0%20Algorithms.pdf> (6. 12. 2010).
- Warner, T. A., Campagna, D. J. 2009: Remote Sensing with Idrisi® Taiga. A Beginner's Guide. Hong Kong.
- Witten, I. H., Frank, E. 2005: Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques. Amsterdam.
- Yohannes, Y., Webb, P. 1999: Classification and Regression Trees, CARTTM: A User Manual for Identifying Indicators of Vulnerability to Famine and Chronic Food Insecurity. Washington.



# DIGITALNI MODEL RELIEFA STRUGE HUDOURNIKA KUZLOVEC IN MATEMATIČNO MODELIRANJE TOKA VODE

*dr. Dejan Grigillo, dr. Simon Rusjan, Anja Vrečko, dr. Elvira Džebo, dr. Klemen Kozmus, Tilen Urbančič, dr. Dušan Petrovič, dr. Matjaž Mikoš*

*Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani*

*dejan.grigillo@fgg.uni-lj.si, simon.rusjan@fgg.uni-lj.si, anja.vrecko@fgg.uni-lj.si, elvira.dzebo@fgg.uni-lj.si, klemen.kozmus@fgg.uni-lj.si, tilen.urbancic@fgg.uni-lj.si, dusan.petrovic@fgg.uni-lj.si, matjaz.mikos@fgg.uni-lj.si*

UDK: 528.93:004.9:627.13(497.4)

## IZVLEČEK

### **Digitalni model reliefa struge hudournika Kuzlovec in matematično modeliranje toka vode**

V okviru raziskave smo izdelali digitalni model reliefa (DMR) hudournika Kuzlovec v Polhograjskem hribovju. Hudournik leži v gozdu, oblikujejo ga strma pobočja, skale in številne kaskade. Za izdelavo DMR smo območje posneli s terestričnim laserskim skenerjem. Izdelan DMR smo uporabili za matematično modeliranje toka vode z uporabo dveh hidravličnih modelov in za preučitev vpliva velikih drevesnih ostankov (debel) na vodni tok. Članek opisuje izvedbo terenskih del, izdelavo DMR in izvedbo hidravličnih analiz. Kombinirane analize DMR in hidravličnih modelov lahko veliko pripomorejo k opredelitvi hidravličnih razmer v strmih strugah.

## KLJUČNE BESEDE

*digitalni model reliefa, hudourniška hidravlika, metoda SPH, veliki drevesni ostanki, hudourniki, TLS, matematično modeliranje*

## ABSTRACT

### **Digital terrain model of the Kuzlovec torrent and mathematical modelling of the water flow**

In our research the digital terrain model (DTM) of the Kuzlovec torrent in the Polhov Gradec Hills was generated. The torrent is situated in forest covered area, formed by steep slopes, rocks and numerous cascades. Terrestrial laser scanning was used to collect the data for the DTM production, which was used as a model for the mathematical modelling, prepared using two hydraulic models, and to study the influence of the large woody debris on the water flow. This paper describes the field work, the DTM production and hydraulic modelling. The combined analyses of the DTM and the hydraulic models can greatly contribute to the definition of the hydraulic conditions in steep torrents.

## KEY WORDS

*digital terrain model, torrential hydraulics, SPH method, large woody debris, torrents, TLS, mathematical modelling*

## 1 Uvod

Za izvedbo matematičnega modeliranja (v nadaljevanju modeliranja) toka vode s prosto gladino moramo v hidravličnih modelih upoštevati čim bolj točne in pravilne podatke o obliki terena. Eden izmed najpogosteje uporabljenih matematičnih modelov površine Zemlje, ki se uporablja v hidravličnih modelih, je DMR z višinami, organiziranimi v celično mrežo. Njegova uporaba je razširjena, ker omogoča enostavno obravnavanje smeri gibanja vodnih tokov po terenu. DMR lahko izdelamo iz podatkov, pridobljenih iz različnih virov: lasersko skeniranje oziroma lidar, terestrična ali aerofotogrametrija, radarski ali optični satelitski posnetki, GNSS ali terestrična topografska izmera, plastnice na topografskih kartah. Lidar je tehnologija, ki omogoča zajem najnatančnejših podatkov o terenu na večjih območjih in na območjih, prekritih z gozdom. Težave pri izdelovanju DMR-ja v strmem gozdnatem terenu iz podatkov aero laserskega skeniranja (ALS) je opisal Kobler (2011). Za filtriranje oblaka točk na strminah, pokritih s heterogenim gozdom, je predstavil tudi nov algoritem, poimenovan REIN, ki izkorišča več mogočih ocen višine tal na točkah v rastrski ali trikotniški mreži, interpoliranih iz okoliških talnih točk (Kobler s sodelavci 2007). Narava podatkov terestričnega laserskega skeniranja (TLS) se razlikuje od podatkov ALS-ja (večji vpadni koti skeniranja, večja, a nehomogena gostota oblaka točk). Več avtorjev je predstavilo izdelavo DMR-ja na gozdnatih območjih iz podatkov TLS-ja. V večini primerov predstavlja izdelan DMR enega od podatkov za pridobivanje inventarizacijskih podatkov o gozdu (Simonse s sodelavci 2003; Bienert s sodelavci 2006) in za 3D modeliranje stoječih dreves (Thies s sodelavci 2004; Moskal in Zheng 2012).

Modeliranje gibanja vodnih tokov na podlagi DMR smo izvedli s pomočjo dveh hidravličnih modelov. Za 2D hidravlično analizo vodnega toka smo uporabili računalniški program Flo-2D (O'Brien 2009). Flo-2D je dvorazsežnostni model, namenjen izračunu gibanja vode in masnih tokov. Drugi matematični model Tis Isat omogoča modeliranje toka vode s prosto gladino po metodi SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*) tako v dveh kot v treh razsežnostih. Model je bil razvit na Katedri za mehaniko tekočin z laboratorijem kot prvi model SPH, razvit v Sloveniji. Oba načina delovanja modela, 2D (Petkovšek s sodelavci 2010a; Petkovšek s sodelavci 2010b) in 3D (Džebo s sodelavci 2013), sta bila preverjena na številnih laboratorijskih primerih. 3D model, uporabljen v tem članku, je bil preverjen tudi na realnih topografskih podatkih (Džebo s sodelavci 2014). SPH je razmeroma nova Lagrangeova metoda, ki računsko območje razdeli s pomočjo premikajočih se masnih delcev in je zaradi svoje narave zelo primerna za modeliranje hitrih sprememb vodne gladine, značilnih za strme hudourniške struge. Metoda je bila razvita leta 1977 (Gingold in Monaghan 1977; Lucy 1977) in je bila namenjena modeliranju stisljivih plinov v astrofiziki. Sčasoma se je razvijala in dopolnjevala ter postajala zanimiva tudi za uporabo na drugih področjih. Leta 1994 je bila predlagana za modeliranje toka vode s prosto gladino (Monaghan 1994) in v razmeroma kratkem času postala zelo priljubljena za tovrstne namene.

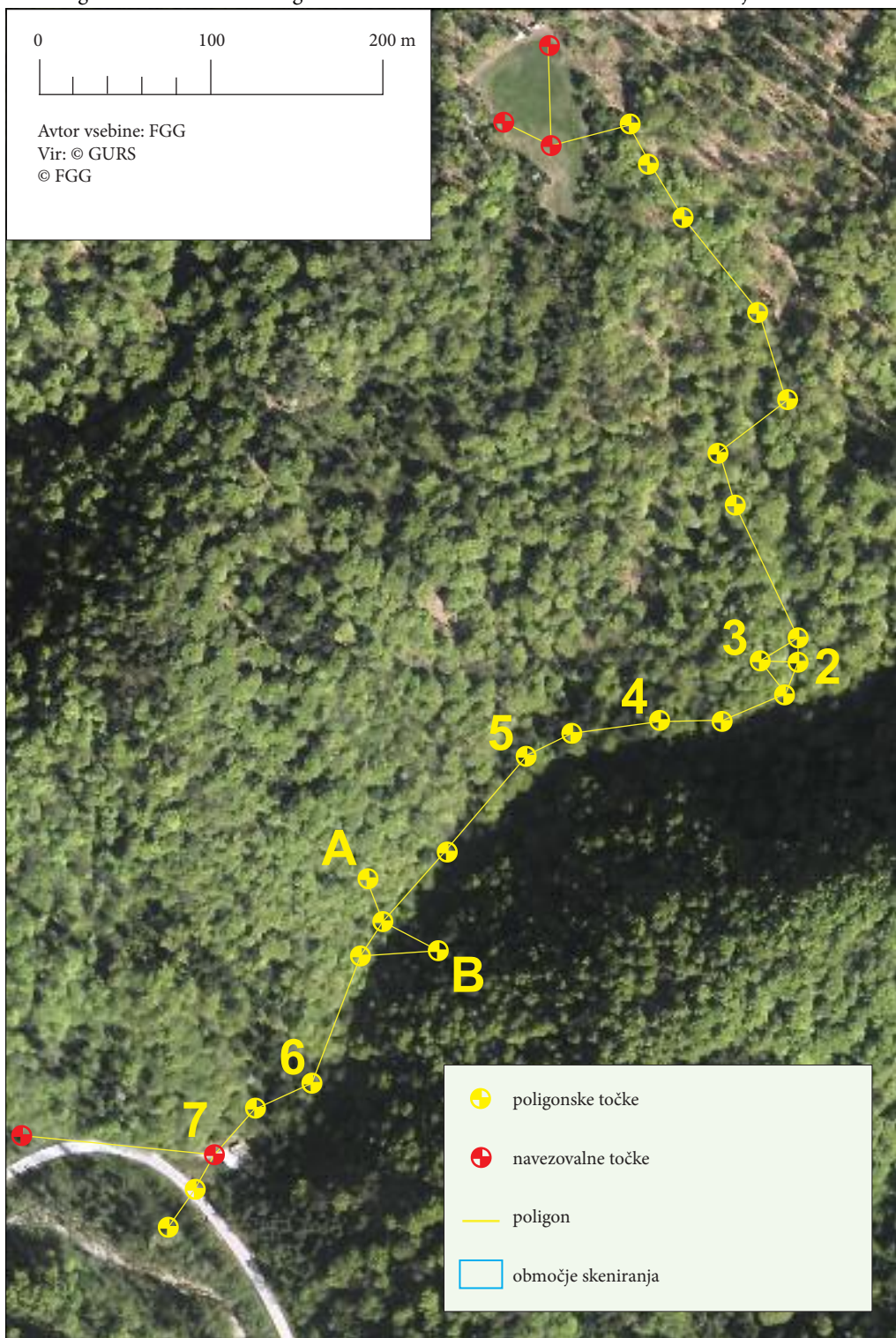
V okviru te raziskave smo želeli prikazati, kakšen je vpliv podrtih drevesnih debel na tok vode v strmih hudourniških strugah. Pri tem smo uporabili zgoraj opisana hidravlična modela, ki se v osnovi močno razlikujeta glede na osnovni način upoštevanja gibanja toka vode. V strugi hudournika Kuzlovec so prisotna številna padla drevesna debla, ki predstavljajo oviro v toku vode, zato smo želeli analizirati vpliv drevesnih debel na hidravlične razmere v strugi. Za hidravlične analize smo izdelali DMR struge. Zaradi terenskih razmer (strm in razgiban teren, gosta poraščenost z gozdom, kaskadna skalnata struga) in zahteve po visoki ločljivosti DMR-ja, smo kot vir za izdelavo uporabili podatke TLS-ja.

## 2 Opis območja in terenske meritve

Hudournik Kuzlovec leži v porečju Gradašnice v Polhograjskem hribovju zahodno od Ljubljane. V Gradaščico se izliva na nadmorski višini 394 m, najvišja točka hudournika je na približno 800 m n. v.

*Slika 1: Terenske meritve na območju hudournika Kuzlovec. ►*

# Digitalni model reliefa struge hudournika Kuzlovec in matematično modeliranje toka vode



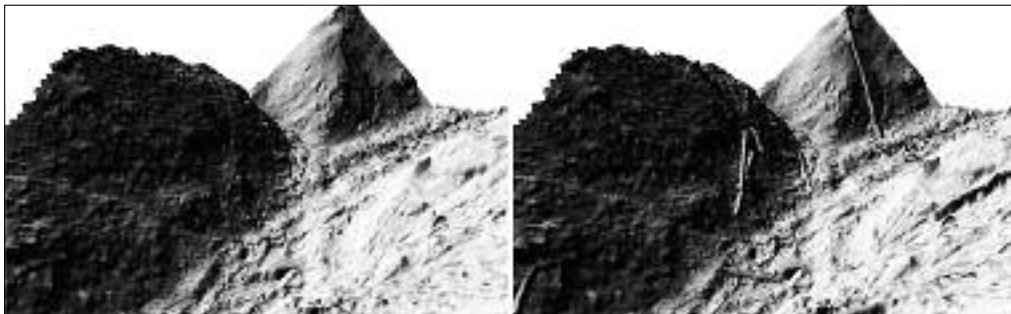
S TLS-jem smo skenirali spodnji del hudournika od 500 m n. v. do izliva (slika 1). Padeč nivelete struge na skeniranem območju je približno  $10^\circ$ , nakloni pobočij, ki gravitirajo neposredno v strugo hudournika, dosega  $30^\circ$ . Strugo potoka oblikujejo skale in skalnate kaskade (pragovi). V strugo padlo drevje dodatno ovira hudourniški tok. Celotno hudourniško območje prekriva (pretežno bukov) gozd.

Skeniranje struge hudournika in okoliških pobočij smo izvedli v treh pomladnih dneh leta 2013 z Rieglovim terestričnim laserskim skenerjem VZ-400, na katerega je bil nameščen fotoaparata Nikon D700. Skenirali smo z 29 stojišč, razporejenih vzdolž struge hudournika. Ločljivost skeniranja je bila 8 cm na oddaljenosti 50 m za pobočja ob strugi in 4 cm na oddaljenosti 50 m za ožje območje struge. Vezne točke, ki so v obdelavi omogočile registracijo oblakov točk s posameznih stojišč v enoten oblak točk, smo signalizirali z Rieglovimi cilindričnimi tarčami iz visokoreflektivnega materiala. Med sosednjimi stojišči smo za določitev transformacijskih parametrov uporabili najmanj štiri vezne točke.

Za georeferenciranje oblaka točk TLS-ja smo vzpostavili geodetsko osnovo. Zaradi neugodnih razmer za izvajanje meritev GNSS-ja v gozdu smo z GNSS-jem določili koordinate dveh točk ob cesti in treh točk na travniku severno od delovišča (slika 1), kar je bila osnova za priklepni poligon. Poleg priklepnega poligona, ki vključuje 22 točk, smo na južnem delu vzpostavili še 2 točki slepega poligona (slika 1). Poligon smo izmerili v 3 girusih s prisilnim centriranjem. Koordinate poligonskih točk smo izračunali z izravnava poligona ločeno v položajnem ter v višinskem smislu. Natančnost določitve koordinat vseh točk je bila znotraj nekaj cm, tudi v višinskem smislu. Na natančnost določitve koordinat točk poligona sta najbolj vplivali natančnost koordinat navezovalnih točk, določenih z GNSS-jem, in strmost vizur. 8 stabiliziranih poligonskih točk smo med skeniranjem signalizirali z Rieglovimi cilindričnimi tarčami (na sliki 1 so označene z 2, 3, 4, 5, 6, 7, A, B). Kakovost določitve koordinat teh točk je bila zaradi zahtevnosti izmer (strme vizure, nestabilne temperature) nehomogena, zato smo za georeferenciranje izbrali pet točk (točke 2, 3, 4, 5, 7). Pri izboru smo upoštevali čim manjši standardni odklon koordinatnih odstopanj po transformaciji in čim boljše prostorsko razporeditev točk po celotnem območju. Relativna natančnost oblaka točk, ocenjena kot standardni odklon popravkov v registraciji oblaka točk, je bila 1,5 cm. Absolutno natančnost oblaka točk smo ocenili na podlagi standardnega odklona popravkov v postopku georeferenciranja in je bila 3,5 cm.

### 3 Izdelava DMR-ja

Zaradi časovno učinkovitejše računalniške obdelave smo georeferenciran oblak točk razdelili na 16 sektorjev. Posamezne sektorje smo iz programa RiSCAN PRO izvozili v zapisu LAS in jih obdelali z orodji programa LAStools. Talne točke smo poiskali z orodjem *lasground* in uporabo naslednjih parametrov: parameter *extra\_fine*, ki je okreplil iskanje začetnih talnih točk, parameter *step* z vrednostjo 0,5 m, parameter *spike* s pragom 0,1 m za izločanje osamelcev in parameter *offset* z vrednostjo 0,1 m, ki določa največjo oddaljenost posamezne točke od trenutno izbranih talnih točk, ki še omogoča klasifikacijo točke kot talno točko. Vrednosti parametrov smo izbrali empirično glede na vizualno oceno rezultatov. Vrednosti zadnjih treh parametrov se sicer za pridobitev optimalnih rezultatov lahko spreminjajo glede na terenske razmere (lokalne spremembe višin terena, naklon, poraščenost), z zgoraj omenjenimi vrednostmi parametrov smo gledano v celoti pridobili najboljše rezultate. Pridobljene talne točke smo ponovno uvozili v RiSCAN PRO in jih vizualno pregledali. Predvsem na robovih sektorjev so se pojavljale tudi točke, ki ne ležijo na tleh. Takšne točke smo odstranili ročno. Talne točke vsakega sektorja smo nadalje razredčili z uporabo filtra *octree* ločljivosti 0,02 m, s čimer smo dosegli enakomerno gostoto točk po celotnem območju. Vse sektorje smo združili v enoten oblak talnih točk. Končni DMR (slika 2 levo) z velikostjo celice 0,05 m, ki je obsegal območje s širino 15 horizontalnih metrov na vsako stran sredine struge, smo interpolirali z linearno interpolacijo znotraj trikotnikov nepravilne trikotniške mreže (TIN). Interpolacijo smo izvedli v LAStools-ovem orodju *las2dem*.



Slika 2: Osenčena izseka DMR-ja (levo) in modela z vključenimi debli (desno).

Za hidravlične analize smo izdelali model, ki je poleg reliefa vključeval tudi debela, ki ležijo v strugi hudournika. Debla smo ročno poiskali v oblaku točk ter jim izmerili premer in dolžino. Oblak točk smo za boljšo vizualno interpretacijo obarvali z vrednostmi RGB iz posnetih fotografij. Na podlagi meritev smo debela modelirali z valji. Iz valjev smo generirali oblake točk in jih vključili v filtriran oblak talnih točk. Iz tako dopolnjenega oblaka točk smo po zgoraj opisanem postopku interpolirali ploskev (slika 2 desno). Ploskev smo zapisali v obliki celične mreže pri čemer gre za t. i. 2,5D strukturo podatkov, ki dovoljuje le eno vrednost višine za posamezen horizontalni položaj. Ta struktura podatkov je bila izbrana, saj kompleksnejše 3D predstavitve geometrije struge uporabljena programa za modeliranje ne podpirata. Ta omejitev je onemogočila modeliranje toka vode pod podrtimi debli.

## 4 Hidravlične analize

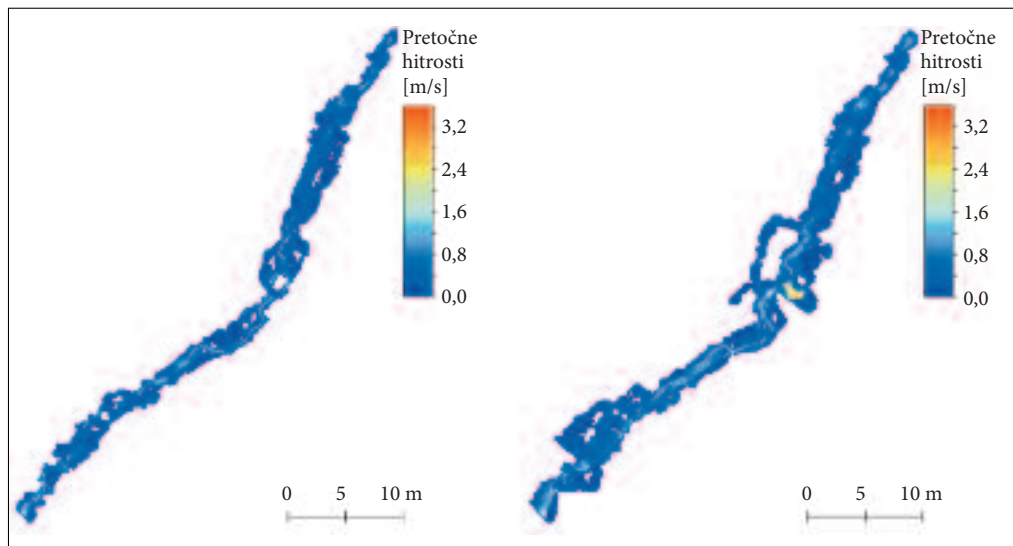
V naši aplikaciji smo s programoma Flo-2D in Tis Isat preučili vpliv velikih drevesnih ostankov (debel) na vodni tok v strmi hudourniški strugi Kuzlovca. Račun gibanja vodnega toka v programu Flo-2D v dveh dimenzijah je izveden z numeričnim reševanjem z upoštevanjem računalniškega algoritma na osnovi aproksimativne metode končnih razlik in se uporabljajo za numerično reševanje Navier-Stokesovih enačb. Model simulira napredovanje poplavnega vala po sistemu kvadratnih mrežnih elementov, s katerimi je predstavljena topografija površja na enak način, kot je to upoštevano v DMR-ju terena. Program upošteva gibanje vodnega toka v 8-ih smereh enako kot je to upoštevano v D8 algoritmu za račun smeri stekanja površinskih vodnih tokov. Pri hidravličnem izračunu je treba upoštevati hrapavost površja z Manningovim koeficientom hrapavosti za plitev površinski tok ter numerične parametre, s katerimi se uravnava odstopanja pri ohranjanju masne bilance vode v modelu.

V 3D matematičnem modelu Tis Isat je bila velikost uporabljenih delcev  $d = 0,05$  m, volumen vode na simuliranem območju  $V = 2,88$  m<sup>3</sup>, parameter viskoznosti med delci in steno pa  $bvis = 0,01$ . Parameter  $bvis$  ima v metodi SPH enako funkcijo, kot jo ima koeficient trenja (na primer: Manningov koeficient trenja  $ng$ ) v konvencionalnih metodah. Dodatne informacije o metodi SPH so dostopne v literaturi (Violeau 2012; Liu in Liu 2003).

## 5 Rezultati

Slika 3 prikazuje rezultate modeliranja pretočnih hitrosti s hidravličnim modelom Flo-2D. Pri modeliranju je bil uporabljen DMR, ki smo ga prevzorčili na velikost celice 10 cm, kar omogoča upoštevanje drevesnih debel kot del geometrije hudourniške struge. Za plitev tok v hudourniški strugi je bila upoštevana vrednost Manningovega koeficienta hrapavosti 0,05. Majhna dimenzija računske celice povzroči

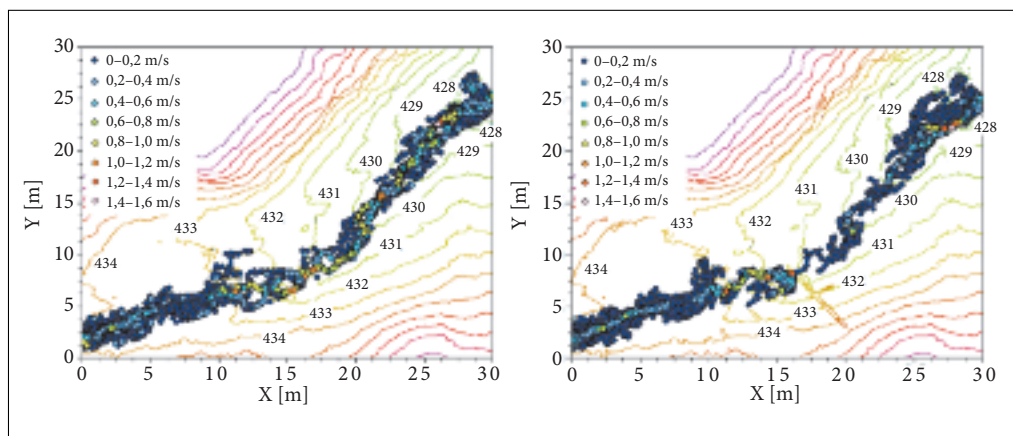




Slika 3: Modelirane pretočne hitrosti hudournika Kuzlovec v programu Flo-2D. Levo: pretočne hitrosti modelirane na DMR brez drevesnih debel; desno: pretočne hitrosti modelirane na modelu, ki upošteva drevesna debela.

zelo veliko podaljšanje računskih časov, v našem primeru smo za modeliranje, ki v realnem času traja 6 ur in v kateri konica pretoka naraste na 100 l/s, rabili 52 ur. Pretočne hitrosti se v obeh modelih (brez in z upoštevanjem drevesnih debel v strugi) gibljejo večinoma pod 2 m/s. Iz rezultatov modeliranja je sicer viden vpliv drevesnih debel na dinamiko pretočnih hitrosti v hudourniški strugi. Drevesna debela povzročijo zajezbo in upočasnitev vodnega toka na gorvodni strani; pri prelivanju čez debela pa se vodni tok ponovno pospeši (pretočne hitrosti v tem primeru presežejo 3 m/s).

Slika 4 prikazuje pretočne hitrosti na odseku hudournika Kuzlovec, modeliranega z modelom Tis Isat. Leva stran slike prikazuje rezultate modeliranja, izvedenega na DMR-ju, desna stran rezultate, pridob-



Slika 4: Modelirane pretočne hitrosti hudournika Kuzlovec. Levo je prikazano modeliranje na DMR brez debel, desno pa na modelu z debli.

ljene na modelu z drevesnimi debli. Kot smo pričakovali, rezultati modeliranja na DMR-ju pokažejo nekoliko višje pretočne hitrosti kot rezultati modeliranja, izvedenega na modelu z debli. Tudi tok vode si zaradi vpliva drevesnih debel izbere nekoliko drugačno pot.

V aprilu 2014 smo opravili ponoven ogled območja snemanja, da bi preverili spremembe zapadlega drevja zaradi žledoloma v februarju 2014. Po pričakovanju je tudi na pobočjih doline hudournika Kuzlovec precej dodatnega podrtega drevja, vendar je zaradi ozke struge večina podrhtih debel nad samo strugo in tako na hidravlične razmere v strugi ne vplivajo. Vpliv se bo verjetno povečal šele z leti, ko bodo zaradi trohnenja deli debel padali neposredno v strugo Kuzlovca.

## 6 Sklep

Precejšen del hudournikov v Sloveniji in v drugih državah s primerljivo gozdnatostjo poteka v gozdu, kjer zapadlo drevje (podrto drevje zaradi različnih abiotičnih pojavov, kot so snegolom, vetrolom ali žledolom, ali pa veliki lesni ostanki, ki ostajajo v gozdu zaradi gozdnega nerada in se ob sečnji ne odstranjujejo) kaj hitro konča v erozijskih jarkih in hudourniških strugah. Tako se pojavi pred vodarsko in hudourniško stroko vprašanje, kako zapadli les kot del hudourniške struge vpliva na pretočne razmere v strugi. Za analizo vpliva zapadlega drevja smo izbrali manjše hudourniško območje Kuzlovec v porečju Gradaščice (jugozahodno od Ljubljane) in izvedli terenske meritve še pred velikim žledolomom februarja 2014, ki je prizadel obsežne dele Slovenije. V primerih strmih strug večina hidravličnih modelov povsem odpove. V prispevku predstavljamo dva delujoča modela, ki ob upoštevanju natančnega DMR-ja omogočata modeliranje vodnega toka tudi v strmih strugah. Najprej smo tok modelirali na topografiji struge, ki je bila predstavljena z DMR-jem brez drevesnih debel, nato pa še na topografiji struge predstavljene z modelom, ki je vključeval drevesna debela. Pokazali smo, da se rezultati modeliranja, izvedeni z enakimi vhodnimi podatki in z uporabo obeh topografij, med seboj razlikujejo. Zato je zelo pomembno, da model, ki predstavlja topografijo struge, vključuje čim več informacij o obravnavanem površju.

Ob zagozditvah velikih drevesnih ostankov v hudourniških strugah se naravno tvorijo odseki s hitrejšim vodnim tokom, ko na primer drevesna debela predstavljajo naravne pragove (stopnje), prek katerih se preliva vodni tok. Za pragovi se vodni tok umiri, pretočne hitrosti so manjše, v odvisnosti od geometrije struge se lahko tvorijo manjši tolmeni. Navkljub veliki dinamiki hidravličnih razmer v strmih hudourniških strugah se v naravnih razmerah vzpostavi sosledje hitrih in počasnih odsekov vodnega toka, k temu pa nedvomno veliko prispeva tudi prisotnost velikih drevesnih ostankov v strugah. Tako se na primer pojavu poplavnega dogodka v strugah ponovno vzpostavijo ravnovesne hidravlične razmere, h katerim nedvomno prispeva tudi prisotnost drevesnih ostankov v strugah. Kombinirane analize DMR-ja in hidravličnih modelov lahko veliko pripomorejo k opredelitvi hidravličnih razmer v strmih strugah. Nadalje načrtujemo umerjanje hidravličnih modelov na podlagi terenskih meritev, ki bo zagotovilo pravilnejšo oceno uporabnosti predlaganih metod za modeliranje v praksi.

## 7 Zahvala

Raziskava je bila izvedena v okviru evropskega projekta SedAlp (program Alpine Space) in jo je delno financirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (program P2-0180 Vodarstvo in geotehnika).

## 8 Viri in literatura

- Džebo, E., Žagar, D., Četina, M., Petkovšek, G. 2013: Reducing the computational time of the SPH method with a coupled 2-D/3-D SPH model. *Journal of Mechanical Engineering* 59-10. Ljubljana. DOI:10.5545/sv-jme.2013.944
- Džebo, E., Žagar, D., Krzyk, M., Četina, M., Petkovšek, G. 2014: Different ways of defining wall shear in SPH simulations of a dam-break wave. *Journal of Hydraulic Research* (sprejeto v objavo). Abingdon. DOI:10.1080/00221686.2013.879611
- Gingold, R. A., Monaghan, J. J. 1977: Smoothed particle hydrodynamics, Theory and application to non-spherical stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 181. London.
- Bienert, A., Scheller, S., Keane E, Mullooly, G, Mohan, F. 2006: Application of terrestrial laser scanners for the determination of forest inventory parameters. *Image engineering and vision metrology*. Dresden.
- Kobler, A., Pfeifer, N., Ogrinc, P., Todorovski, L., Oštir, K., Džeroski, S. 2007: Repetitive interpolation: A robust algorithm for DTM generation from Aerial Laser Scanner Data in forested terrain. *Remote Sensing of Environment* 108. Elsevier.
- Kobler, A. 2011: Nove metode za obdelavo podatkov letalskega laserskega skenerja za monitoring gozdnih ekosistemov. Doktorska disertacija, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Liu, G. R., Liu, M. B. 2003: Smoothed Particle Hydrodynamics, A mesh free particle method. Singapore.
- Lucy, L. B. 1977: A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *The Astronomical Journal* 82. New York. DOI: 10.1086/112164
- Monaghan, J. J. 1994: Simulating Free Surface Flows with SPH. *Journal of Computational Physics* 110-2. Philadelphia. DOI: 10.1006/jcph.1994.1034
- Moskal, M., Zheng, G. 2012: Retrieving forest inventory variables with terrestrial laser scanning (TLS) in urban heterogeneous forest. *Remote Sensing* 4. Basel.
- O'Brien, J. S. 2009: Flo-2D, Reference Manual, Version 2009. Nutrioso.
- Petkovšek, G., Džebo, E., Četina, M., Žagar, D. 2010a: Simulacija laboratorijske porušitve pregrade po metodi SPH z analizo modela trenja. *Zbornik del Kuhljevi dnevi*. Ljubljana.
- Petkovšek, G., Džebo, E., Četina, M., Žagar, D. 2010b: Application of Non-Discrete Boundaries with Friction to Smoothed Particle Hydrodynamics. *Journal of Mechanical Engineering* 56-5. Ljubljana. DOI: <http://dx.doi.org/10.5545/109>
- Simonse, M., Aschoff, T., Spiecker, H. and Thies, M. 2003: Automatic determination of forest inventory parameters using terrestrial laserscanning. *ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests*. Umeå.
- Thies, M., Pfeifer, N., Winterhalder, D., Gorte, B. G. H. 2004: Three-dimensional reconstruction of stems for assessment of taper, sweep and lean based on laser scanning of standing trees. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19-6. London.
- Violeau, D. 2012: *Fluid Mechanics and the SPH Method, Theory and Applications*. Oxford.

## GAVRILOVIČEVA EROZIJSKA ENAČBA IN GIS

**Mauro Hrvatin, dr. Matija Zorn, dr. Drago Perko**

Geografski inštitut Antona Melika, Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti  
mauro@zrc-sazu.si, matija.zorn@zrc-sazu.si, drago@zrc-sazu.si

UDK: 91:551.311.21(497.4)

659.2:004:91(497.4)

### IZVLEČEK

#### **Gavrilovičeva erozijska enačba in GIS**

Preučevanje intenzivnosti erozijskih procesov spada med temeljne in pogosto obravnavane geomorfološke dejavnosti ter običajno vključuje tako terenske meritve, kot tudi računalniško modeliranje. V Sloveniji so terenske meritve redke, zato prevladuje modeliranje erozijskih procesov. Pri slednjem je zaradi svoje preprostosti, kljub pomanjkljivostim, zelo priljubljena Gavrilovičeva enačba z nekaterimi različicami. V prispevku predstavljamo uporabnost geografskih informacijskih sistemov pri izračunu posameznih členov Gavrilovičeve enačbe in na primeru porečja Savinje ocenjujemo ustreznost oziroma natančnost tovrstnega modeliranja.

### KLJUČNE BESEDE

Gavrilovičeva enačba, erozija, GIS, Savinjska dolina, Slovenija

### ABSTRACT

#### **Gavrilovič equation and GIS**

The study of the intensity of erosion processes is one of the fundamental and often treated geomorphological activities. It usually involves both field measurements, as well as computer modelling. In Slovenia, the field measurements are rare, so modelling erosion processes prevail. For the calculations, due to its simplicity and despite its shortcomings, is very popular the Gavrilovič equation with some variations. The paper presents the usefulness of geographic information systems in the calculation of individual terms of Gavrilovič equation and in the case of the Savinja river basin the adequacy and accuracy of this type of modelling is assessed.

### KEY WORDS

Gavrilovič equation, erosion, GIS, Savinja valley, Slovenia

## 1 Uvod

Preučevanje erozijskih procesov običajno poteka na dva načina: z meritvami ali z modeliranjem (Zorn 2008, 65). Pomanjkljivost meritev je, da zanje rabimo določen čas ter po navadi razmeroma visoka materialna sredstva, ne glede na to ali meritve potekajo v laboratoriju ali na terenu. Njihova prednost pa je, da potekajo ob »pravih« pokrajinskih spremenljivkah. Pri modelih, predvsem empiričnih, pa je ravno obratno; njihova prednost je hitrost izračuna, velika pomanjkljivost pa posploševanje ali celo neupoštevanje določenih pokrajinskih spremenljivk.

Pri eroziji moramo ločiti med sproščanjem gradiva po pobočjih (vse preperinsko in kamninsko gradivo, ki se premika po pobočjih) ter odplavljanjem gradiva (vse suspendirano in kamninsko gradivo, ki se premešča v vodotokih). Meritve prvega so bile v Sloveniji redke (Zorn 2008), glede drugega pa obstaja redni monitoring suspendiranega gradiva, ki ga na nekaterih slovenskih vodotokih izvaja Agencija Republike Slovenije za okolje (Ulaga 2006; Bezjak, Šraj in Mikoš 2013). Redke so tudi meritve nesuspendiranega gradiva. Povezane so predvsem z meritvami odloženega gradiva za pregradami na vodotokih (Mikoš 2000, 209). Več je bilo modeliranja erozijskih procesov (Zorn 2008) s popolno prevlado empiričnih modelov, predvsem Gavrilovićeve enačbe (Gavrilović 1962; 1970; 1972) in njenih različic (Lazarevič 1968; 1985; Pintar, Mikoš in Verbovšek 1986), ki jih kljub pomanjkljivostim (Staut 2004, 22–25) v Sloveniji in ostalih državah bivše Jugoslavije uporabljamo že več desetletij za napovedovanje erozijskih procesov. »... Njena »klasična« uporaba zahteva veliko »ročnega« preračunavanja, z razvojem geografskih informacijskih sistemov in vse natančnejšimi digitalnimi modeli višin pa se je njena uporaba močno poenostavila...« (Komac in Zorn 2008, 84). Enačba omogoča izračunavanje tako sproščanja kot odplavljanja gradiva.

Na primeru porečja Savinje predstavljamo uporabnost GIS-ov pri izračunavanju nekaterih koeficientov, potrebnih za uporabo Gavrilovićeve enačbe. Uporabnost GIS-ov za njeno izračunavanje so med drugimi že ugotavljali Globevnikova s sodelavci (2003), Staut (2004) ter Komac in Zorn (2008).

Uporabili smo dve različici Gavrilovićeve enačbe:

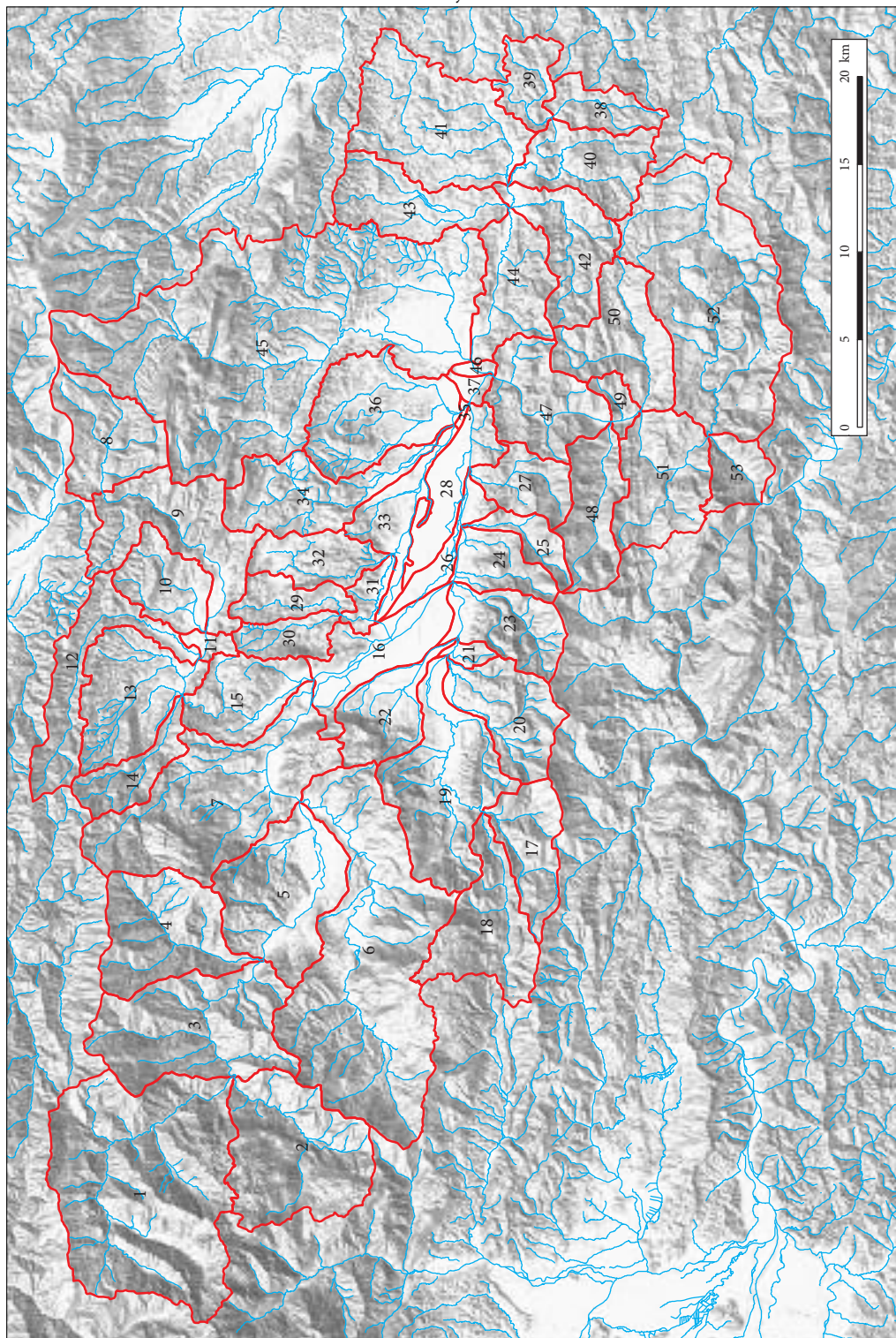
- prirejeno enačbo po Lazareviču (1968; 1985) in
- prirejeno enačbo po Pintarju, Mikošu in Verbovšku (1986).

Rezultate primerjamo tudi z ocenami prodonosnosti (Mikoš 2000) in meritvami suspendiranega gradiva na Savinji (Ulaga 2006).

## 2 Gavrilovićeve enačbe in njene različice

Enačba je nastala na začetku 60-ih let 20. stoletja v Srbiji. Izdelal jo je Slobodan Gavrilović in tako kot drugi empirični modeli temelji na »... povezanosti odvisne z vrsto merjenih ali ocenjenih neodvisnih

*Slika 1: Porečje Savinje pokriva 1852,80 km<sup>2</sup>, kar je 9,14 % Slovenije. Za izračune sproščanja in odplavljanja gradiva smo porečje razdelili na več manjših enot in pri tem uporabili členitev na 53 hidrogeografskih območij (Spletna ... 2014): 1 Solčavska Savinja, 2 Lučnica, 3 Raduška Savinja, 4 Ljubnica, 5 Golteška Savinja, 6 Dretna, 7 Šmihelska Savinja, 8 Paka (Tolsti vrh), 9 Kozjaška Paka, 10 Lepena, 11 Škalska Paka, 12 Velunja, 13 Paka (Topolc), 14 Šentflorjanščica, 15 Gorenjska Paka, 16 Savinja (Šempeter), 17 Čemšeniška Bolska, 18 Motnišnica, 19 Miklavška Bolska, 20 Konjščica, 21 Prebolška Bolska, 22 Trnavca, 23 Šeška Bolska, 24 Žalska Savinja, 25 Artišnica, 26 Petrovska Savinja, 27 Šmohorska Bistrica, 28 Levška Savinja, 29 Sevniška Ložnica, 30 Hotunjščica, 31 Zaloška Ložnica, 32 Trnava, 33 Grušoveljska Ložnica, 34 Pirešica, 35 Medloška Ložnica, 36 Koprivnica, 37 Savinja (Medlog), 38 Drobinski potok, 39 Ločnica, 40 Rakitovška Voglajna, 41 Slomščica, 42 Rifniška Voglajna, 43 Pešnica, 44 Resevniška Voglajna, 45 Hudinja, 46 Celjska Voglajna, 47 Slomniška Savinja, 48 Rečica, 49 Žikovska Savinja, 50 Lahomnica, 51 Govška Savinja, 52 Gračnica in 53 Kopitniška Savinja. Sproščanje in odplavljanje gradiva smo izračunali za vsako hidrogeografsko območje posebej. ►*



Preglednica 1: Parametri izvorne Gavrilovićeve enačbe (Gavrilović 1962; 1970), ki jih je uporabil tudi Lazarević (1968; 1985) ter različica po Pintarju, Mikošu in Verbovšku (1986).

izvirna Gavrilovićeve enačba

različica po Pintarju, Mikošu in Verbovšku

### sproščanje gradiva

$$W_a = T \cdot P_a \cdot \pi \cdot \sqrt{Z^3} \cdot F$$

$$\overline{M\psi} = 20H_{wd\Delta}^{\downarrow} \cdot K_{\psi}^{1,5} \cdot FW$$

Legenda:

$W_a$  = povprečno letno sproščanje gradiva (m<sup>3</sup>/leto)

$T$  = temperaturni koeficient

$P_a$  = povprečna letna količina padavin (mm)

$Z$  = erozijski koeficient območja

$F$  = površina hidrogeografske enote (km<sup>2</sup>)

$$T = \sqrt{\frac{t_0}{10} + 0,1}$$

$$Z = Y \cdot Xa \cdot (\varphi + \sqrt{J_a})$$

$t_0$  = povprečna letna temperatura (°C)

$Y$  = koeficient erodibilnosti

$Xa$  = koeficient vegetacijske zaščitenosti

$\varphi$  = koeficient razvitosti erozijskih pojavov

$J_a$  = povprečni naklon območja (%)

Legenda:

$\overline{M\psi}$  = povprečno letno sproščanje gradiva (m<sup>3</sup>/leto)

$H_{wd\Delta}^{\downarrow}$  = maksimalne dnevne padavine (mm)

$K_{\psi}$  = erozijski koeficient območja

$FW$  = površina hidrogeografske enote (km<sup>2</sup>)

$$K_{\psi} = K_{\psi E} \cdot K_{\psi Z} \cdot (K_{\psi 0} + \sqrt{J_{FW}})$$

$K_{\psi E}$  = koeficient erodibilnosti

$K_{\psi Z}$  = koeficient vegetacijske zaščitenosti

$K_{\psi 0}$  = koeficient razvitosti erozijskih pojavov

$J_{FW}$  = povprečni naklon območja

### odplavljanje gradiva

$$G_a = W_a \cdot R_u$$

$$\overline{MY} = K_{\psi Y} \cdot \overline{M\psi}$$

Legenda:

$G_a$  = povprečno letno odplavljanje gradiva (m<sup>3</sup>/leto)

$R_u$  = koeficient odplavljanja gradiva

$$R_u = \frac{\sqrt{O \cdot D}}{0,2 \cdot (L + 10)}$$

$O$  = obseg hidrogeografske enote (km)

$D$  = povprečna višinska razlika hidrogeografskega območja (km)

$L$  = dolžina hidrogeografske enote (km)

Legenda:

$\overline{MY}$  = povprečno letno odplavljanje gradiva (m<sup>3</sup>/leto)

$K_{\psi Y}$  = koeficient odplavljanja gradiva

$$K_{\psi Y} = \frac{G}{\overline{M\psi}}$$

$G$  = premostitvena zmogljivost voda v hidrografski mreži

*spremenljivk s pomočjo regresijske analize. [...] Prednosti te metode so, da je lahko umljiva, njena aplikacija pa je enostavna, slabost pa, da se končni kvantitativni rezultat jakosti erozije izvaja iz kvalitativnih ocen parametrov (spremenljivk) [koeficientov, opomba avtorjev], zastopanih v enačbi ...» (Staut 2004, 10–11). Kvalitativne ocene enačbenih koeficientov temeljijo na vnaprej pripravljenih preglednicah, na podlagi katerih subjektivno določamo predvidene vrednosti koeficientov. Podrobneje o samih koeficientih in njihovih vrednosti pišejo Gavrilović (1962; 1970), Lazarevič (1968; 1985) in Staut 2004. Uporaba enačbe praviloma poteka po hidrogeografskih območjih oziroma delih porečij. V primeru Savinje smo porečje razdelili na 53 takšnih območij (slika 1).*

Temeljni razliki med izvirno enačbo in njenimi izpeljankami sta naslednji:

- Lazarevič je (1968; 1985) vrednosti koeficienta erodibilnosti ( $Y$ ) zmanjšal na polovico,
- avtorji slovenske različice enačbe (Pintar, Mikoš in Verbovšek 1986) so dva člena izpustili (temperaturni koeficient in  $\pi$ ), enega pa zamenjali oziroma spremenili (maksimalne 24-urne padavine namesto povprečnih letnih padavin) (preglednica 1).

V našem primeru smo zaradi modeliranja v GIS-u izračunavanje nekaterih koeficientov nekoliko priredili. Koeficient razvitosti erozijskih pojavov smo določili s pomočjo indeksa moči vodnih tokov (ang. *relative stream power index*; Lindsay 2005), koeficient odplavljanja gradiva pri slovenski različici enačbe pa smo določili s pomočjo štirih kazalnikov: velikosti zrn gradiva, strmine pobočij, razpotegnenosti hidrogeografskih območij in razvejenosti hidrografske mreže oziroma gostote vodnih tokov.

### 3 Priprava podatkov in uporaba GIS-a

Za izračun posameznih členov prirejenih različic Gavrilovičeve enačbe smo morali predhodno pripraviti in prirediti več podatkovnih slojev. Sloj povprečnih letnih temperatur, iz katerih smo izračunali temperaturne koeficiente, in sloj povprečnih letnih količin korigiranih padavin (mm), ki se uporabljata pri Lazarevičevi različici enačbe, smo povzeli iz geoportala Agencije Republike Slovenije za okolje (Spletna ... 2014).

Sloj maksimalne 24-urne količine padavin (mm), ki se uporablja pri različici enačbe Pintarja, Mikoša in Verbovska, smo izračunali iz arhivskih meteoroloških podatkov Agencije Republike Slovenije za okolje (Arhiv meritev 2014). Na razpolago so bili podatki za postaje Logarska dolina, Solčava, Luče, Gornji Grad, Črnivec, Radegunda, Bele Vode, Zgornji Razbor, Jeronim, Gomilsko, Vitanje, Vojnik, Šentjur pri Celju, Celje in Laško. Iz podatkov smo po Gumbelovi metodi izračunali vrednosti za dveletno povratno dobo ter podatke interpolirali na celotno porečje Savinje.

Koeficient erodibilnosti (slika 2) smo določili s pomočjo vektorskega sloja litološke karte 1 : 250.000 (Zemljevid tipov kamnin ... 2014), in sicer na temelju erozijske odpornosti kamnin (Ribičič, Šinigoj in Komac 2003). Pri tem smo dosledno upoštevali zgolj erozijsko odpornost in ne morebitnih dodatnih dejavnikov. Pri Gavriloviću očitno ni bilo tako, saj so v njegovi preglednici na primer rečne naplavine ter psevdooglejene in oglejene prsti manj erodibilne od karbonatnih, metamorfnih in flišnih kamnin (Staut 2004, 12).

Koeficient vegetacijske zaščitenosti (slika 3) smo določili s pomočjo vektorskega sloja rabe tal (Grafični podatki RABA ... 2014). Pri tem koeficientu smo se skoraj povsem držali kvalitativnih ocen v Gavrilovičevi preglednici, pri vseh ostalih smo opravili manjše ali večje izboljšave.

*Slika 2: Koeficient erodibilnosti v porečju Savinje. ► (str. 48)*

*Slika 3: Koeficient vegetacijske zaščitenosti v porečju Savinje. ► (str. 49)*

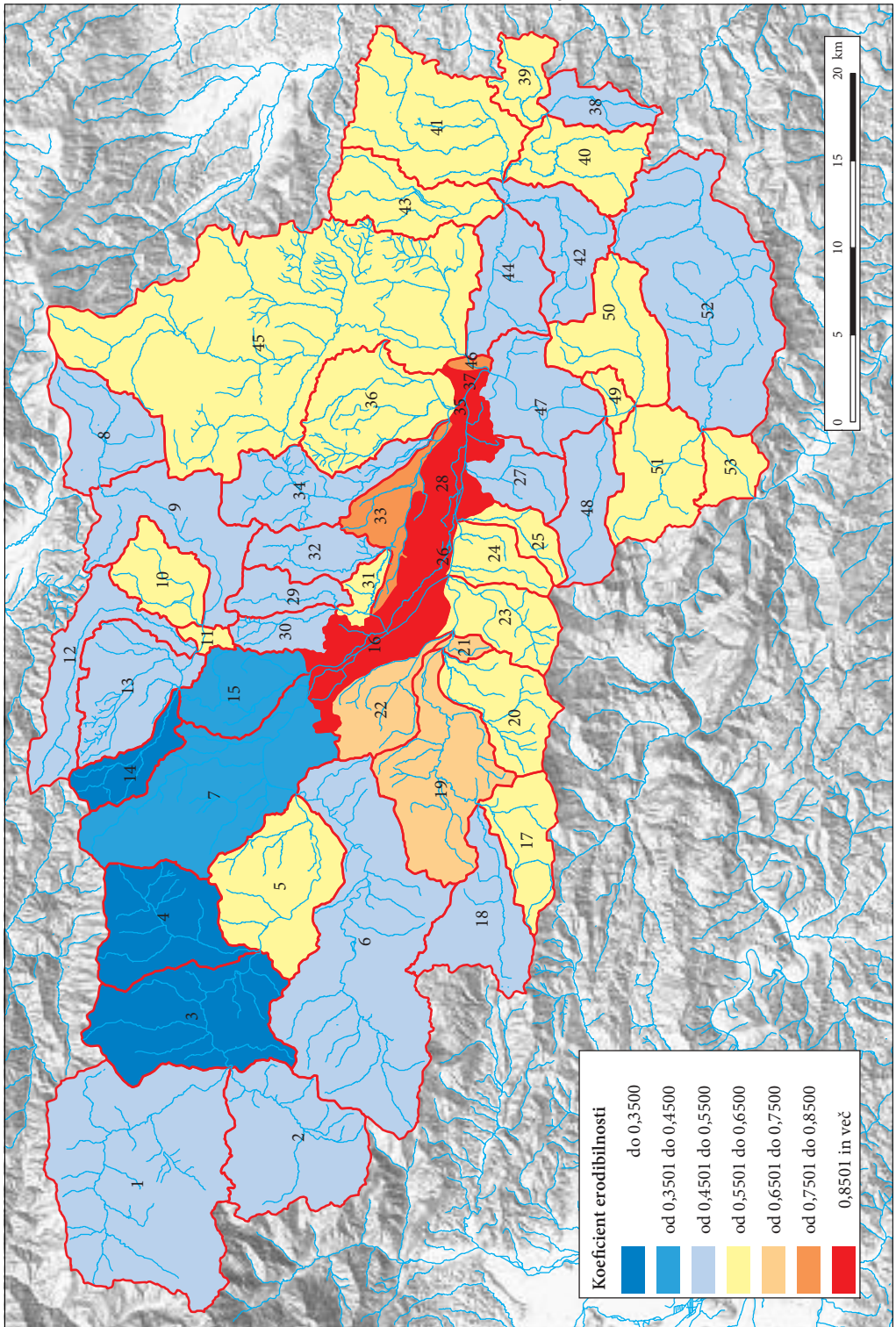
*Slika 4: Koeficient razvitosti erozijskih pojavov v porečju Savinje. ► (str. 50)*

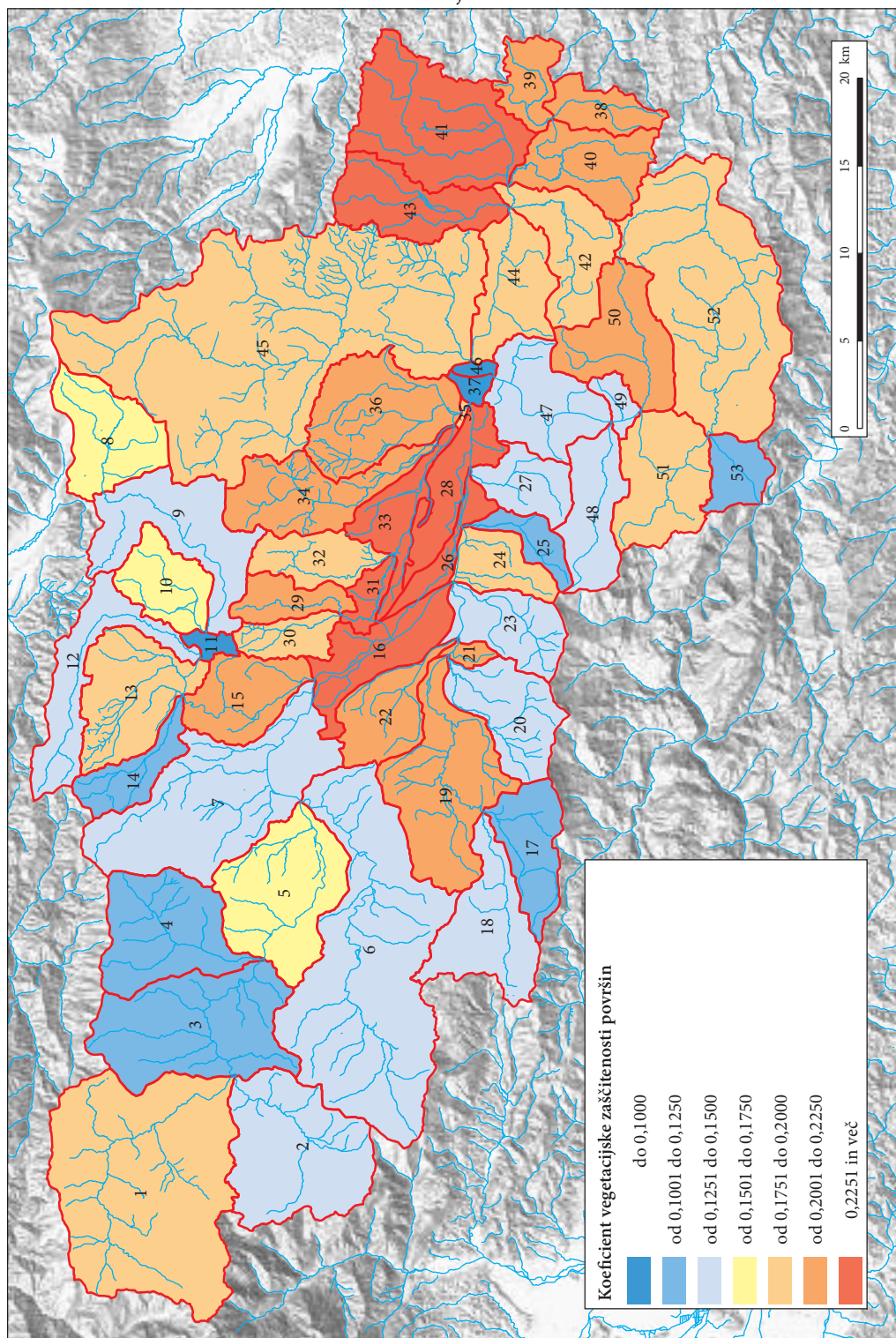
*Slika 5: Erozijski koeficient v porečju Savinje. ► (str. 51)*

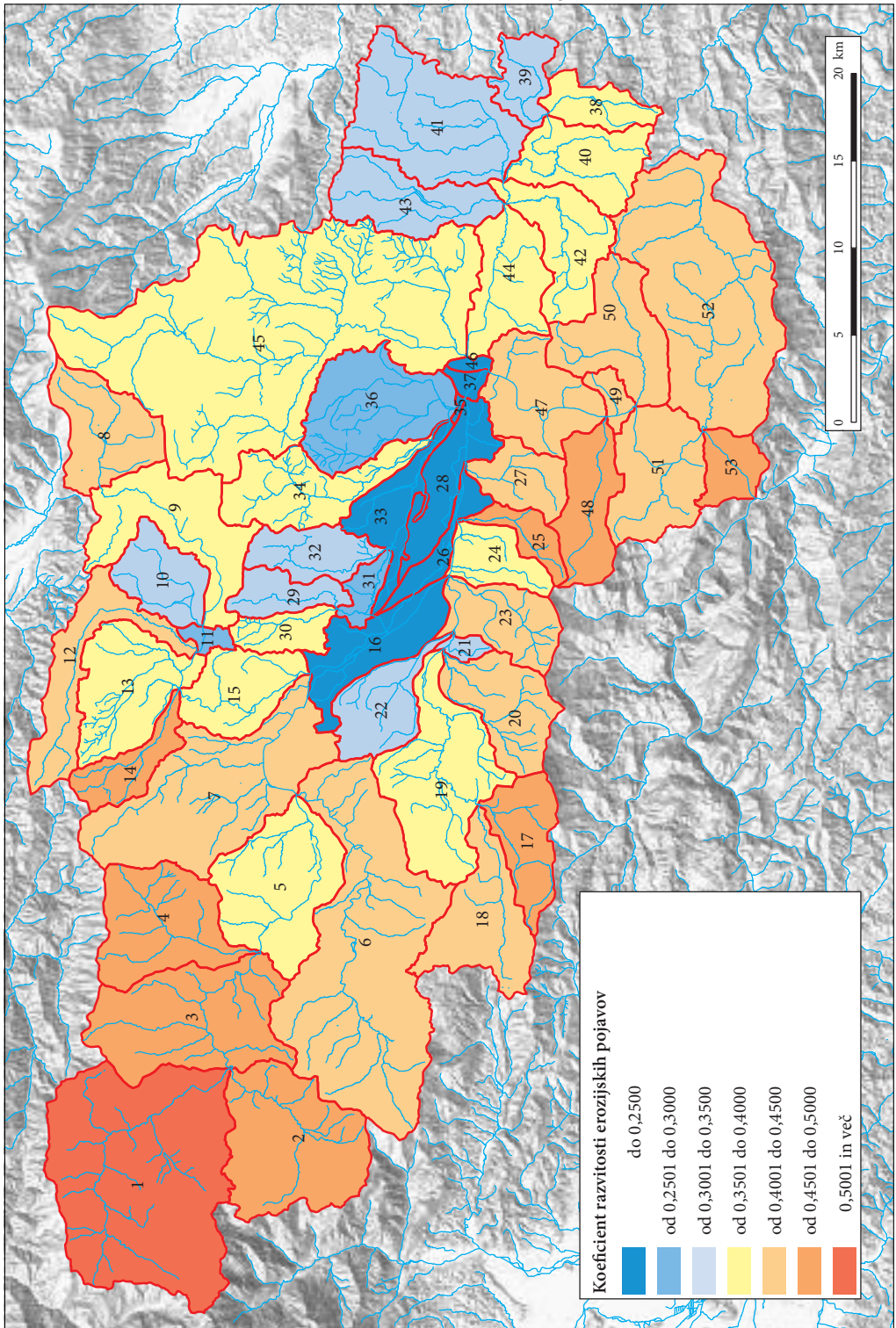
*Slika 6: Koeficient odplavljanja gradiva v porečju Savinje (po Lazareviču). ► (str. 52)*

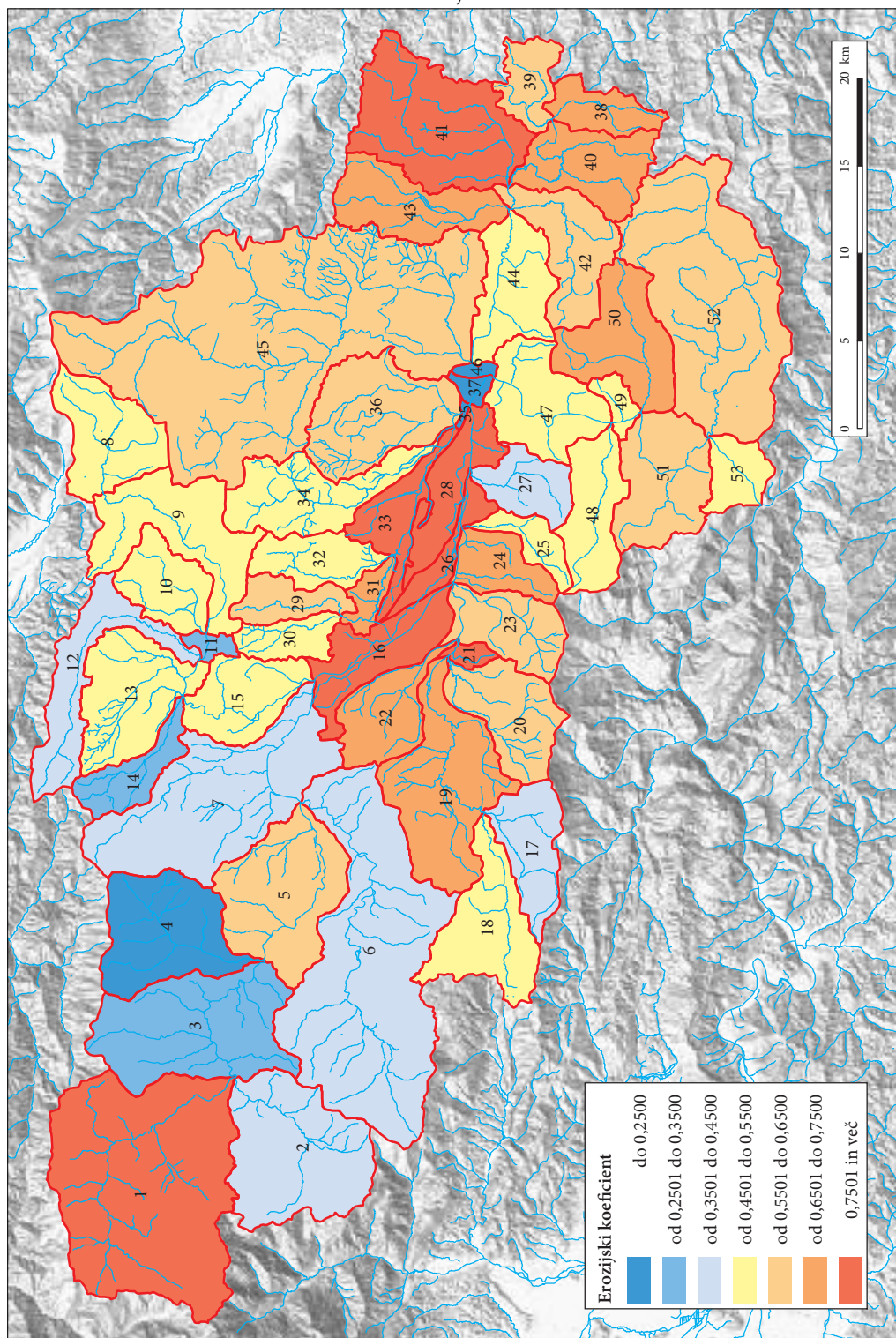
*Slika 7: Koeficient odplavljanja gradiva v porečju Savinje (po Pintarju, Mikošu in Verbovsku). ► (str. 53)*

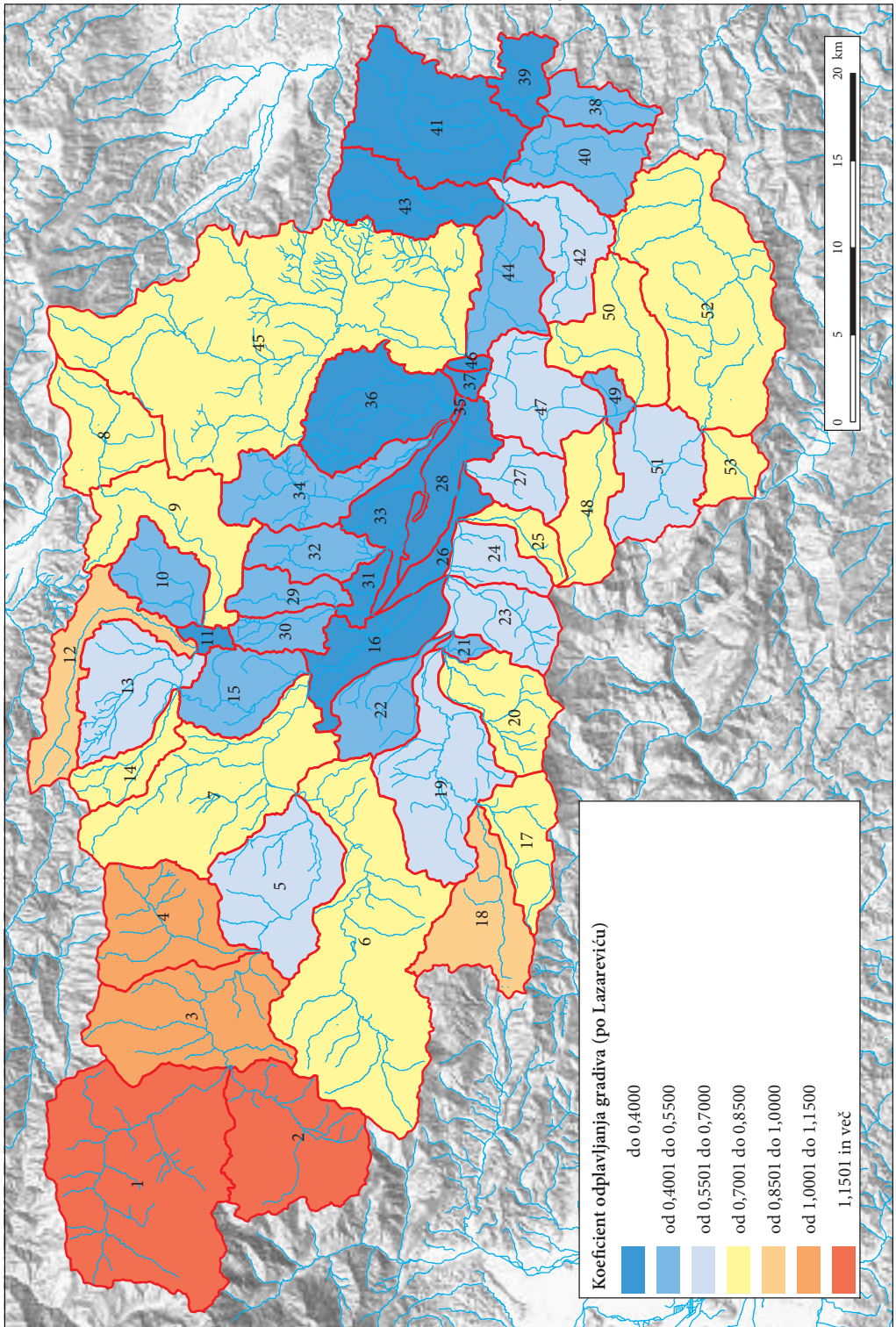


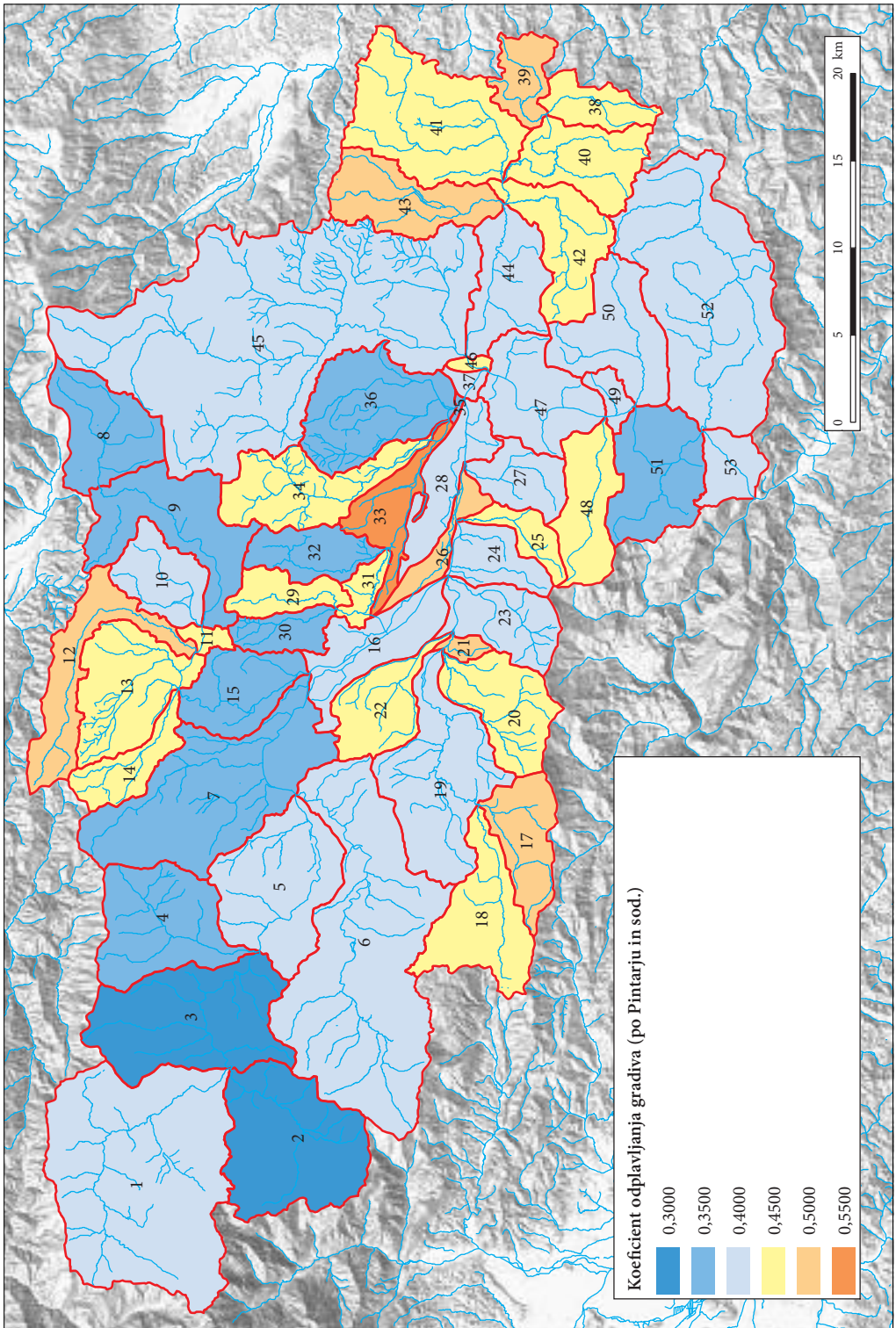












Koeficient razvitosti erozijskih pojavov (slika 4) smo ugotavljali s pomočjo indeksa moči vodnega toka (Komac in Zorn 2005). Slednjega smo iz digitalnega modela višin izračunali s programom *Terrain Analysis System* (Lindsay 2005). Indeks moči vodnega toka je mera denudacijsko-erozijskega potenciala vode, ki temelji na predpostavki, da se vodni pretok in denudacijsko-erozijska sposobnost vode večata sorazmerno z večanjem površine specifičnega izseka porečja (Hrvatin, Perko in Petek 2006). Vrednost koeficienta razvitosti erozijskih pojavov posameznega hidrogeografskega območja prestavlja neposredno povprečna vrednost naravnega logaritma indeksa moči vodnega toka.

Erozijski koeficient (slika 5) smo izračunali z enačbo na temelju koeficienta erodibilnosti, koeficienta vegetacijske zaščitenosti, koeficienta razvitosti erozijskih pojavov in povprečnega naklona, ki smo ga izračunali iz digitalnega modela višin Slovenije z ločljivostjo 25 m.

Koeficient odplavljanja gradiva po Lazarevičevi različici (slika 6) smo določili z enačbo na temelju dolžin razvodnic oziroma obsegov hidrogeografskih območij, povprečnih višinskih razlik hidrogeografskih območij in dolžin hidrogeografskih območij. Vse navedene kazalnike smo izračunali s pomočjo sloja hidrogeografskih območij v porečju Savinje (Spletna ... 2014).

V erozijskih ocenah slovenskih avtorjev je pogosto navedeno, da je količina odplavljenega gradiva odvisna od velikosti zrn gradiva, strmine pobočij, razpotegnjenosti hidrogeografskih območij in od razvejenosti hidrografske mreže oziroma gostote vodnih tokov (Hočko ... 1999; Mikoš s sodelavci 2002). Zato smo koeficient odplavljanja gradiva po različici Pintarja, Mikoša in Verbovska (slika 7) pripravili tako, da smo kot osnovo vzeli povprečno vrednost koeficienta in jo glede na prej omenjene kazalnike ustrezno povečali ali zmanjšali.

## 4 Rezultati

Rezultati ocen sproščanja in odplavljanja gradiva v porečju Savinje, ki smo jih dobili po dveh različicah Gavrilovičeve enačbe, prikazuje preglednica 2. Za primerjavo je v preglednici predstavljena še vsota ocene letne prodonosnosti, ki je bila izračunana z Meyer-Peter-Müllerjevo enačbo za vrednotenje premestitvene zmogljivosti (Mikoš 2000), in povprečne letne količine suspendiranega gradiva (Ulaga 2006).

*Preglednica 2: Ocene sproščanja in odplavljanja gradiva v porečju Savinje po dveh različicah Gavrilovičeve enačbe. Za primerjavo je v preglednici predstavljena še vsota ocene letne prodonosnosti (Mikoš 2000) in povprečne letne količine suspendiranega gradiva (Ulaga 2006)*

	izračun po Lazareviću		izračun po Pintarju in sod.		izračun in meritve
	sproščeno	odplavljeno	sproščeno	odplavljeno	odplavljeno
m <sup>3</sup>	1.828.007,33	1.453.906,82	640.995,20	256.619,42	160.500,00
t	2.924.811,72	2.326.250,91	1.025.592,32	410.591,07	256.800,00
m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup>	986,62	784,71	345,96	138,50	86,63
mm/leto	0,99	0,78	0,35	0,14	0,09
t/ha	15,79	12,56	5,54	2,22	1,39

Sliki 8 in 9 prikazujeta oceno letne količine sproščenega in odplavljenega gradiva v m<sup>3</sup> v porečju Savinje po različici Gavrilovičeve enačbe, ki jo je uporabil Lazarevič. Sproščanje je največje v povirjih Savinje in Hudinje, najmanjše pa v Ložniškem gričevju, na južnem robu Celjske kotline, ter še na nekaterih območjih osrednjega in severnega dela obravnavanega območja (na primer porečji Ljubnice in Šentflorjansčice). Tudi odplavljanje je najnižje na skoraj istih območjih, medtem ko je največje še v porečju Drete in Gračnice.

Sliki 10 in 11 prikazujeta oceno letne količine sproščenega in odplavljenega gradiva v  $m^3$  v porečju Savinje po različici Gavrilovičeve enačbe, ki so jo uporabili Pintar, Mikoš in Verbovšek. Sproščanje je tudi v tem primeru največje v povirju Savinje in Hudinje, sorodna so tudi območja z najmanjšim sproščanjem gradiva. Odplavljanje je tudi po tej metodi največje v Gornji Savinjski dolini, opazno pa je, da je po tej metodi ocena količine odplavljenega gradiva bistveno manjša.

Ocenjene količine odplavljenega gradiva lahko primerjamo z oceno prodonosnosti in prenosa suspendiranega gradiva na vodomerni postaji Veliko Širje pred sotočjem s Savo. Ocena letne prodonosnosti je  $25.800 m^3$  (Mikoš 2000, 210), kar je manj od naših vrednosti. Je pa treba temu podatku prišteti še okrog  $135.000 m^3$  suspendiranega gradiva (Mikoš 2000, 214), ki ga Savinja pri tej vodomerni postaji letno odplavi iz porečja.

## 5 Sklep

Pri uporabi modelov se moramo zavedati, da lahko njihovi rezultati močno odstopajo od dejanskih naravnih razmer (Zorn 2008), še posebej, če modeli niso prilagojeni na krajevne razmere. To velja tudi za Gavrilovičovo enačbo, katere uporaba ni bila nikoli prilagojena slovenskim razmeram. Zato se lahko upravičeno sprašujemo o zanesljivosti izračunanih vrednosti. V Sloveniji se že več desetletij navaja podatek, da je sproščanje gradiva v celotni državi okrog 5 milijonov  $m^3$  na leto (glej navedbe v Zorn 2008, 75). Na podlagi tega podatka je sproščanje, ki smo ga izračunali za porečje Savinje, dokaj visoko in pomeni kar tretjino (po Lazareviću) oziroma osmino (po Pintarju, Mikošu in Verbovšku) sproščanja gradiva v državi, čeprav porečje pokriva le slabo desetino državnega ozemlja. Toda tudi podatek za celo državo je le ocena, ki večinoma izhaja iz Gavrilovičevih predpostavk. Morda je razlika posledica tega, da so v 70-ih letih 20. stoletja računali z veliko bolj grobimi podatki in brez možnosti GIS analiz ter so zato podcenili intenzivnost erozijskih procesov. Morda pa velja ravno obratno in pri Gavrilovičevem robustnem modelu natančnejši podatki precenijo procese.

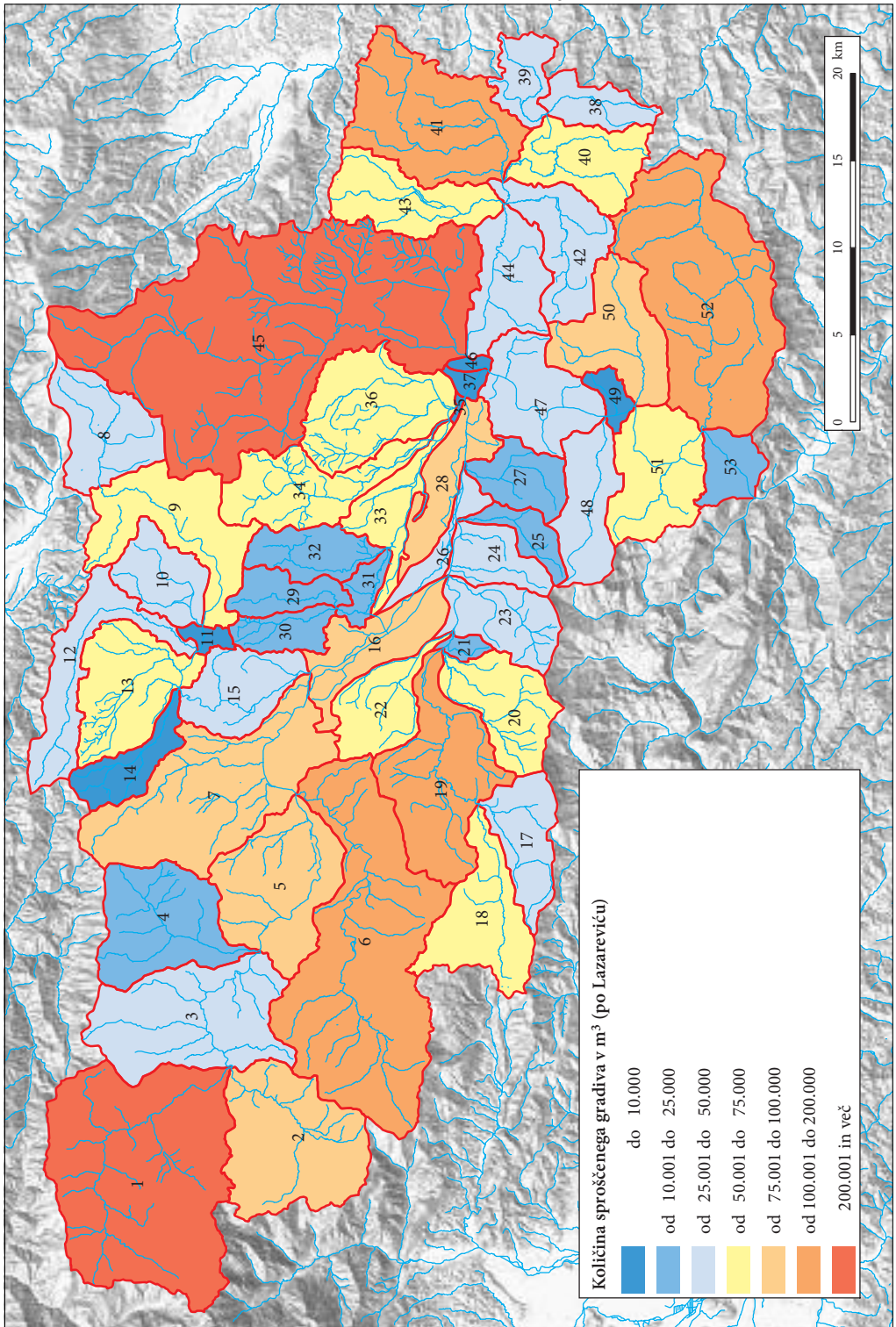
*Slika 8: Letna količina sproščenega gradiva v  $m^3$  v porečju Savinje (po Lazareviću). ► (str. 56)*

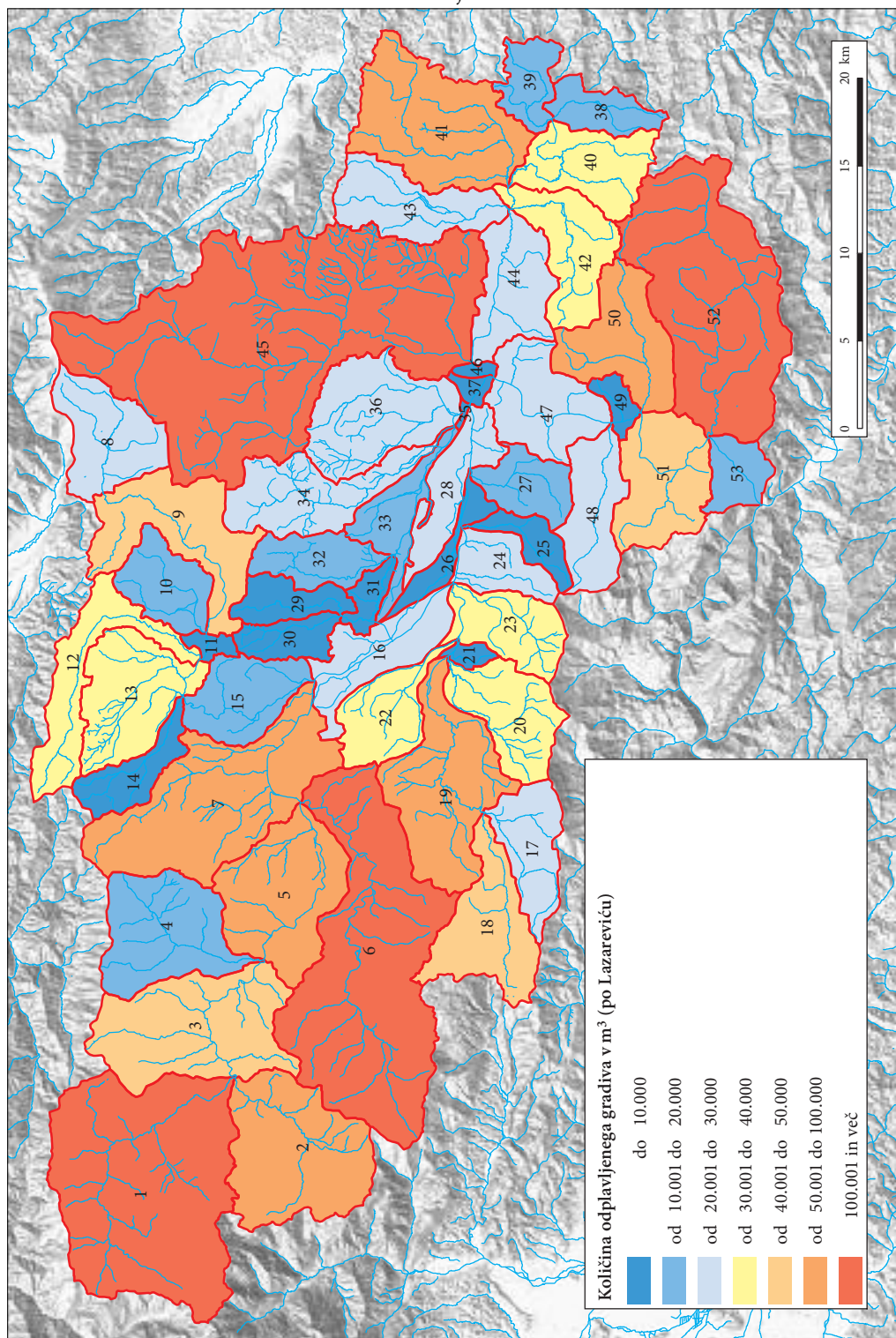
*Slika 9: Letna količina odplavljenega gradiva v  $m^3$  v porečju Savinje (po Lazareviću). ► (str. 57)*

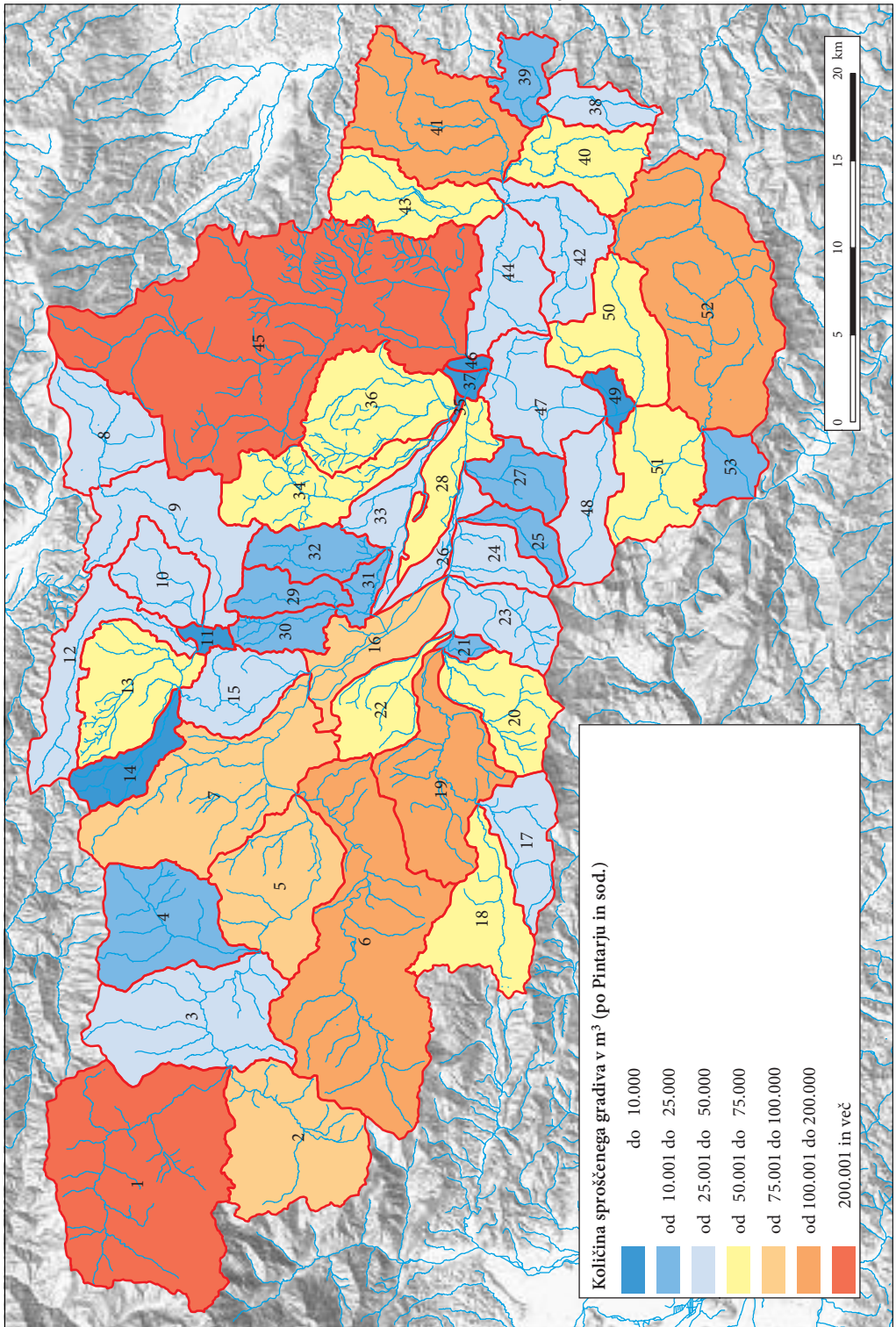
*Slika 10: Letna količina sproščenega gradiva v  $m^3$  v porečju Savinje (po Pintarju, Mikošu in Verbovšku). ► (str. 58)*

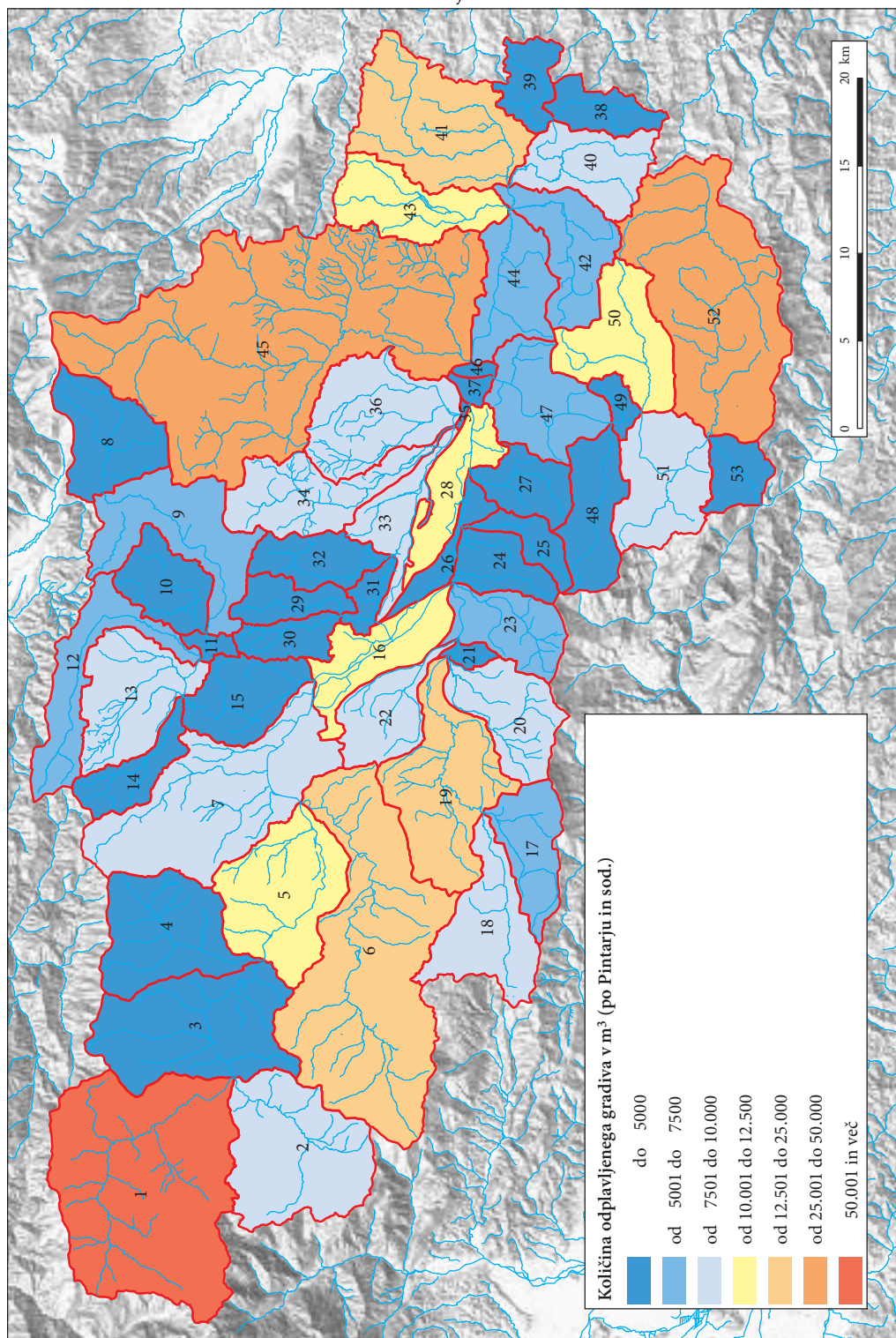
*Slika 11: Letna količina odplavljenega gradiva v  $m^3$  v porečju Savinje (po Pintarju, Mikošu in Verbovšku). ► (str. 59)*











## 6 Viri in literatura

- Arhiv meritev. Agencija Republike Slovenije za okolje. Ljubljana. Medmrežje: <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive/> (1. 6. 2014).
- Bezak, N., Šraj, M., Mikoš, M. 2013: Pregled meritev vsebnosti suspendiranega materiala v Sloveniji in primer analize podatkov. *Gradbeni vestnik* 62-12. Ljubljana.
- Gavrilović, S. 1962: Proračun srednje-godišnje količine nanosa prema potencialu erozije. *Glasnik šumarskog fakulteta* 26. Beograd.
- Gavrilović, S. 1970: Savremeni načini proračunavanja bujičnih nanosa i izrada karata erozije. *Erozija, bujični tokovi i rečni nanos*. Beograd.
- Gavrilović, S. 1972: Inženjering o bujičnim tokovima i eroziji. Beograd.
- Globevnik, L., Holjević, D., Petkovšek, G., Rubinić, J. 2003: Applicability of the Gavrilović method in erosion calculation using spatial data manipulation techniques. *Erosion prediction in ungauged basins: integrating methods and techniques*. IAHS publication 279. Wallingford, Oxfordshire.
- Grafični podatki RABA za celo Slovenijo, različica/stanje 31. 3. 2014. Ministrstvo za kmetijstvo in okolje Republike Slovenije. Ljubljana, 2014.
- Hočko vodno vozlišče – ocena sproščanja in odpavljanja zemljin. Katedra za splošno hidrotehniko. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. Ljubljana, 1999.
- Hrvatin, M., Perko, D., Petek, F. 2006: Raba tal na izbranih erozijsko ogroženih območjih terciarnih gričevij v Sloveniji. *Acta geographica Slovenica* 46-1. Ljubljana.
- Komac, B., Zorn, M. 2005: Erozijski procesi na kmetijskih zemljiščih v Sloveniji – meritve žlebične erozije v dolini Besnice. *Acta geographica Slovenica* 45-1. Ljubljana.
- Komac, B., Zorn, M. 2008: Izračun vpliva sprememb rabe tal na erozijo v Zgornjem Posočju s pomočjo GIS. *GIS v Sloveniji* 9. Ljubljana.
- Lazarević, R. 1968: Erozijski procesi u slivu Gvozdačke reke – prilog metodici za izradu karte erozije. *Glasnik Srpskog geografskog društva* 49-2 Beograd.
- Lazarević, R. 1985: Novi postupak za određivanje koeficijenta erozije (Z). *Erozija – stručno-informativni bilten* 13. Beograd.
- Lindsay, J. B. 2005: *The Terrain Analysis System: a tool for hydro-geomorphic applications*. Hydrological processes 19. Chichester.
- Mikoš, M. 2000: Prodna bilanca reke Save od Jesenic do Mokric. *Gradbeni vestnik* 49-9. Ljubljana.
- Mikoš, M., Petkovšek, G., Šraj, M., Brilly, M. 2002: Analiza erozije tal v porečju Koritnice. *Ujma* 16. Ljubljana.
- Pintar, J., Mikoš, M., Verbovšek, V. 1986: Elementi okolju prilagojenega urejanja vodotokov: alternativa utesnjevanju živih naravnih procesov v toge objekte. *Drugi kongres o vodama Jugoslavije*. Beograd.
- Ribičič, M., Šinigoj, J., Komac, M. 2003: New general engineering geological map of Slovenia. *Geologija* 46-2. Ljubljana.
- Spletna objektna storitev (WFS) za izdajanje okoljskih prostorskih podatkov. Agencija Republike Slovenije za okolje. Ljubljana. Medmrežje: [http://gis.arso.gov.si/wfs\\_web/faces/WFSLayersList.jsp](http://gis.arso.gov.si/wfs_web/faces/WFSLayersList.jsp) (15. 5. 2014).
- Staut, M. 2004: *Recentni erozijski procesi v porečju Dragonje*. Diplomsko delo Filozofska fakulteta Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Uлага, F. 2006: Transport suspendiranega materiala v slovenskih rekah. *Ujma* 20. Ljubljana.
- Zemljevid tipov kamnin. Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU, različica 14. 6. 2014. Ljubljana.
- Zorn, M. 2008: Erozijski procesi v slovenski Istri. *Geografija Slovenije* 18. Ljubljana.

## IZDELAVA 3R MODELA IZ ARHIVSKIH LETALSKIH POSNETKOV ZA DIGITALNO RETROSPEKTIVO PORUŠENEGA BREGINJA

**dr. Žiga Kokalj, dr. Tatjana Veljanovski**

*Inštitut za antropološke in prostorske študije, Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti*

*ziga.kokalj@zrc-sazu.si, tatjanav@zrc-sazu.si*

UDK: 528.7:004.9(497.473Breginj)

### IZVLEČEK

**Izdelava 3R modela iz arhivskih letalskih posnetkov za digitalno retrospektivo porušenega Breginja**  
*Prispevek opisuje izdelavo trirazsežnega modela naselja Breginj iz arhivskih letalskih posnetkov ter analizo pogojev, ki tovrstne rekonstrukcije omogočajo. Za izdelavo modela smo uporabili niz letalskih posnetkov, ki so bili zajeti kmalu po prvem potresu, maja 1976, ter metodo grajenja strukture iz gibanja (angl. Structure-from-Motion – SfM). Ta zahteva razmeroma obsežno prekrivanje istih točk na več posnetkih, kar je bila oteževalna okoliščina zaradi načina preleta letala (niz šestih zaporednih posnetkov). Posebno pozornost namenjamo pomenu in potencialu tovrstnih rekonstrukcij v luči doprinosa k ohranjanju arhitekturne in kulturne dediščine, natančneje, zmožnostim in potencialu za digitalno retrospektivo naselij in pokrajin, ki jih danes več ni.*

### KLJUČNE BESEDE

*arhivski letalski posnetki, 3R model, Breginj, potres 1976, digitalna rekonstrukcija naselja, kulturna dediščina*

### ABSTRACT

**Generation of a 3D model from historic aerial photographs for the digital retrospection of the demolished Breginj**

*The article describes a generation of a three-dimensional model of the village Breginj from archival aerial photographs, and analyses the conditions that allow this type of reconstruction. The model is based on a series of aerial photographs that were captured covered shortly after the first earthquake in May 1976, and a Structure-from-Motion (SfM) method. SfM requires a relatively extensive overlap of several images – a hindering circumstance in our case because the six photographs were acquired consecutively in a single flight line. Particular attention is paid to the importance and potential of such reconstructions in light of the contribution to the conservation of the architectural and cultural heritage, and more specifically to the capacity and potential of digital retrospective of settlements and landscapes that are now gone.*

### KEY WORDS

*historic aerial photographs, 3D model, Breginj, earthquake 1976, digital reconstruction of the settlement, cultural heritage*

## 1 Uvod

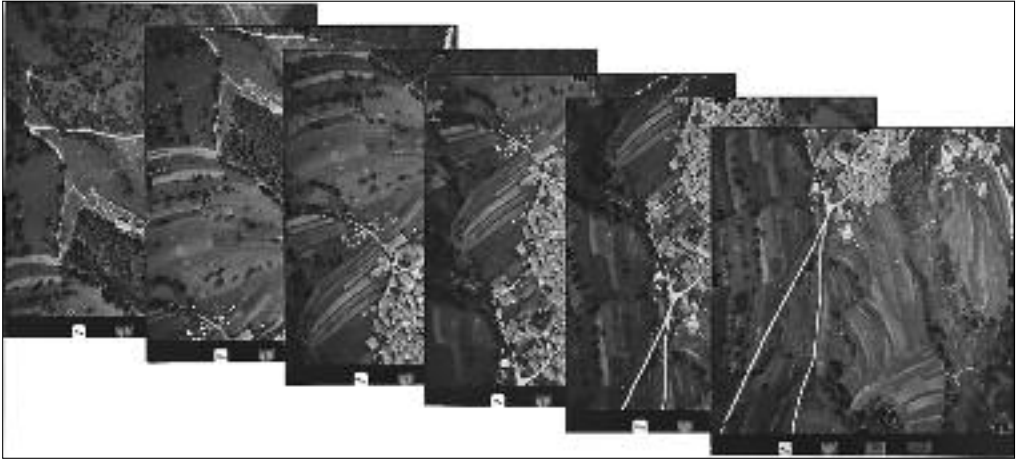
Breginj, odročno hribovsko naselje v bližini meje z Italijo, zahodno od Kobarida, je bil nekdanj samostojna občina s široko avtonomijo. Stoletja samozadostna in izredno organizirana lokalna skupnost je znala izkoristiti tako naravne danosti za kmetijstvo kot obmejno lego (tihotapljenje, obramba, začasno delo čez mejo). Kot druge bližnje kraje je tudi Breginj v 30-tih letih 20. stoletja zajela depopulacija, ki je spremenila prebivalstveno sestavo, število prebivalcev pa do danes že več kot prepolovila (Pipan 2011). Tedenj Breginj je bil eno redkih večjih naselij z dobro ohranjeno arhitekturo stavb 18. in 19. stoletja, ki je pripadala beneškoslovenskemu arhitekturnemu tipu (Lipušček 1995; Celarc in Erjavec 2012). Hiše so bile grajene podolgovato, z zunanjim balkonom iz lesa in položno streho. Zanje so bila značilna majhna okna, zavarovana z železnimi palicami. Zunanje stene nekaterih hiš so krasile preproste slikarije, reliefi ali kamnit grb. Staro vaško jedro je bilo ne glede to, da sta ga deloma prizadeli že obe svetovni vojni, zaradi izjemne ljudske stavbne dediščine, ki se ga stihija modernizacije poslopj ni dotaknila, takoj po 2. svetovni vojni zaščiten kot kulturni spomenik prve kategorije.

Vendar je bil Breginj nujno potreben pomoči, če naj bi se kakovost življenja v vasi ustrezno času izboljšala (Pipan 2011). Tako se je leta 1975 na pobudo lokalnih oblasti oblikoval izjemno sodoben spomeniškovarstveni načrt s celovitim konceptom revitalizacije. V letih 1975 in 1976 je bil Breginj temeljito dokumentiran, stekla so težavna pogajanja s prebivalstvom. Sredi tega pestrega dogajanja se je 6. maja 1976 zgodil prvi potres, ki je prizadel območje Furlanije v Italiji in Zgornjega Posočja v Sloveniji. Žrtev v Zgornjem Posočju ni bilo, poškodovanih pa je bilo kar 12.000 stavb in brez strehe nad glavo je ostalo 13.000 ljudi (Orožen Adamič 1980, 89).

Stavbe v Breginju so bile povsem porušene, ne pa povsem porušene (61 % stavb je bilo predvidenih za rušenje, slika 1). Stekla je individualna obnova, ki pa ni bila usklajena s smernicami začrtane obnove kulturne dediščine. Sprejeta je bila tudi odločitev občine, da se stari Breginj postopoma obnovi, hkrati pa se postavi novo naselje trajnih montažnih hiš na drugi strani reke Bele (Pipan 2011, 75). Vendar je



Slika 1: Takoj po majskem potresu 1976 so ljudi z organizirano akcijo nastanili v improvizirana zasilna bivališča: šotore, avtomobilske prikolice in začasne lesene barake (Orožen Adamič 1980). Prebivalci, civilna zaščita, gasilska društva in delovne organizacije iz vse Slovenije so poleti na poškodovanih stavbah starega vaškega jedra izvajali popravilna dela, občina pa je začela pripravljati načrt popotresne obnove (Pipan 2011, 75) (vir posnetka GURS).



Slika 2: Serija letalskih posnetkov Breginja po prvem potresu maja 1976 (vir GURS).

potek začetih del in načrtov obnove skrenil povsem drugače, ko je sredi septembra območje prizadel drugi potres. Številne že poškodovane zgradbe so bile zdaj popolnoma porušene, mnoge pa so bile zaradi dodatnih poškodb prekategorižirane (88 % stavb ter 94 % gospodarskih poslopij predvidenih za rušenje). Kljub visokim številkam velja izpostaviti, da je bilo naselje resno poškodovano, a ne povsem uničeno. Tokrat je v Breginj na ogled prišla pomembna politična delegacija. V kratkem je bila sprejeta nova odločitev o popotresnih aktivnostih, ki je predvidevala postavitev novega Breginja pred prihodom zime ter rušenje starega dela vasi. O razlogih za takšen obrat ter za hitenje pri popotresni novogradnji ni jasne zgodovinske slike. Rušenje starega dela Breginja se je še istega leta res zgodilo: Breginja ni porušil potres, porušili so ga buldožerji, s tem pa je bil uničen pomemben spomenik kulturne dediščine. Cilj vsesplošne popotresne obnove zgornjega Posočja je bil dosežen, saj je bila večina prebivalcev v potresu najbolj prizadetih naselij že pred koncem leta 1976 nastanjena v novih trajnih bivališčih (Pipan 2011).

Po prvem potresu je bilo opravljeno namensko letalsko snemanje naselij prizadetega območja. Ker gre večinoma za manjše vasi, je običajno zadostoval en prelet; posnetki se zato prekrivajo samo v eni smeri. Ti zgodovinski letalski posnetki so glavni vir podatkov v tej študiji. Skenirane kontaktne kopije šestih posnetkov (slika 2) smo uporabili za izdelavo prvega približka trirazsežnega (3R) modela starega Breginja. 3R modeli se v muzejski dejavnosti in pri varovanju arheološke kulturne dediščine že široko uporabljajo za dokumentiranje, podrobno analizo, rekonstrukcijo in virtualno predstavitev občutljivih in/ali ogroženih predmetov. Medtem ko obstoječe predmete lahko lasersko skeniramo ali natančno fotografiramo ter s sodobnimi programi izdelujemo njihove modele, smo pri rekonstrukciji naselij, ki jih več ni, bistveno bolj omejeni. Za digitalno retrospektivo v stanje izginulega kraja, ki lahko ob primernih slikovnih virih pripelje do prave 3R virtualne rekonstrukcije, namreč potrebujemo stare letalske posnetke in stare fotografije iz tal, iz približno istega obdobja.

V prispevku se osredotočamo na vrednotenje zmožnosti 3R modeliranja z metodo grajenja strukture iz gibanja (angl. *Structure-from-Motion – SfM*) iz šestih letalskih posnetkov s prekrivanjem 60 % v eni sami smeri. Prepoznavamo tako prednosti kot omejitve, ki so posledica netransparentnosti metode in omejenega vpliva na modeliranje ter lastnosti podatkov. Nadalje se ukvarjamo z vlogo pridobljenega 3R modela starega Breginja in možnimi izboljšavami z vidika potencialnega pomena za ohranjanje spomina na naselje, ki je bilo edini celovit primer izjemne beneškoslovenske arhitekturne dediščine v državi.



## 2 Izdelava 3R modela z metodo SfM

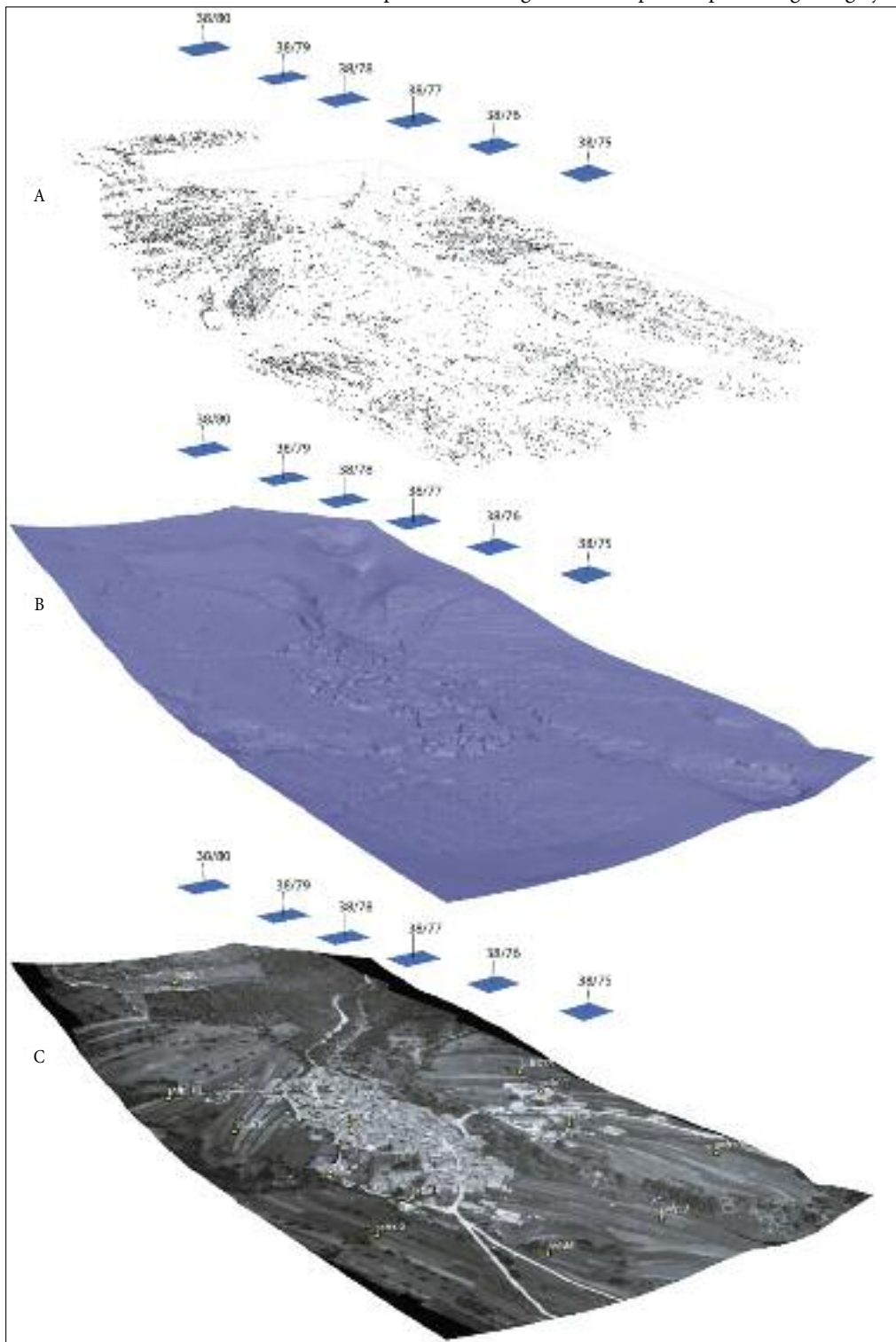
Z razpoložljivostjo raznovrstnih, ne nujno sistematično zajetih, letalskih in terestričnih posnetkov, so se razmahnile tudi želje po tem, da bi iz prekomernih opazovanj lahko izdelali dobre, geometrično relevantne trirazsežne modele. Sledil je tehnološki odgovor, programi, ki iz poljubno zajetih prekrivajočih posnetkov »izluščijo« oziroma rekonstruirajo geometrijo objektov na posnetkih. Samodejna fotogrametrija na podlagi posnetkov iz zraka in tal je v zadnjem desetletju postala močno in razširjeno orodje za izdelavo trirazsežnih topografskih modelov (Remondino in El-Hakim 2006; Matthews 2008) ter je skupaj z računalniško triangulacijo in algoritmi za rekonstrukcijo reliefa iz slik radikalno izboljšala kakovost modelov višin, ki jih lahko pridobimo iz prekrivajočih se stereoparov (Chandler 1999; Lane s sodelavci 2000). Podobno so izboljšave in cenejša dostopnost fotoaparotov, ki niso metrično umerjeni, ter izpopolnjene metode njihove kalibracije (Clarke in Fryer 1998; Chandler s sodelavci 2005; Remondino in El-Hakim 2006) povečale dostopnost fotogrametričnega modeliranja in spodbudile širok razpon uporabe. V Sloveniji na primer so uspešni poskusi pridobivanja metričnih podatkov iz arhivskih, nemerskih fotografij iz tal, uporabljeni za rekonstrukcijo stanja Triglavskega ledenika skozi večletno obdobje, že utečena tradicija (Triglav, Kosmatin Fras in Gvozdanovič 2000; Triglav Čekada s sodelavci 2011). Uspešno kombinacijo uporabe nemerskih fotografij iz zraka in tal ter drugih podatkov za določanje obsega poplav sta prikazala Triglav Čekada in Zorn (2012).

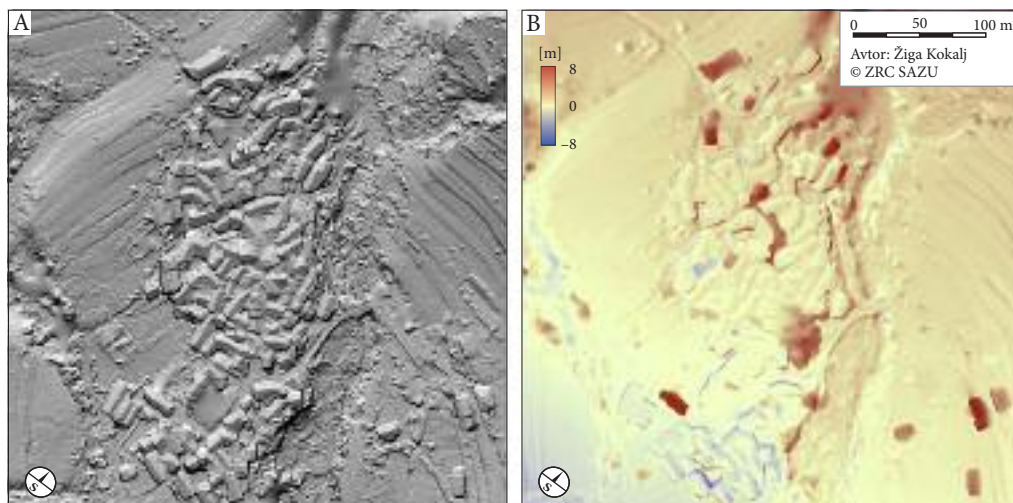
Pravo revolucijo pa je v zadnjih letih povzročila metoda grajenja strukture iz gibanja (angl. *Structure-from-Motion* – SfM), ki sicer temelji na istih osnovnih načelih kot stereoskopska fotogrametrija, vendar se od nje bistveno razlikuje v tem, da so lokacije in orientacije kamere ter geometrija scene razrešene samodejno in sočasno, brez vnaprej posredovane mreže tarč z znanimi trirazsežnimi koordinatami. Samodejno razreševanje poteka z visoko redundantno iterativno izravnavo s snopi, ki temelji na samodejno generirani bazi ujemajočih oblik na več prekrivajočih se posnetkih. Lokacije kamere, ki jih izračuna SfM nimajo merila in orientacije v realnem svetu, zato je treba izračunan oblak točk transformirati v absolutni koordinatni sistem. Uporabimo lahko manjše število kontrolnih točk z znanimi koordinatami. Kontrolne točke lahko pridobimo iz dobro vidnih lokacij v oblaku točk in na terenu, na primer z GPS-om, ali, kar je v praksi pogostejše, z nameščanjem kontrastnih tarč z dobro vidnim središčem že pred samim snemanjem. To poenostavi registracijo slik in zagotovi učinkovito oceno nelinearnih strukturnih napak v rekonstrukciji. Pristop je najbolj primeren za nize fotografij z visokim deležem prekrivanja, ki popolnoma zajamejo trirazsežno strukturo scene iz različnih zornih kotov in lokacij ali, kot namiguje ime, slik, zajetih s premikajočim detektorjem. Velika prednost metode je v tem, da ne rabi nikakršnih vnaprejšnjih informacij o času in lokaciji zajema, kot tudi ne o samem detektorju ali instrumentu. Za zajem posnetkov lahko zato uporabimo običajne digitalne fotoaparate, kot tudi starejše fotografije brez znanih informacij o kameri in parametrih zajema. Metoda je primerna zlasti kot nizkocenovna alternativa visokoločljive trirazsežne rekonstrukcije objektov in površja, še posebej na prostorsko oddaljenih in težko dostopnih območjih (Verhoeven 2011; Westoby et al. 2012).

## 3 Rezultati izdelave 3R modela in razprava

Za izdelavo 3R modela (slika 3) smo uporabili orodje PhotoScan (različica 0.9.1) podjetja Agisoft. Iz posnetkov smo sprva maskirali vse neslikovne dele (to je robove, instrumente), saj negativno vplivajo na iskanje povezav med veznimi točkami. Posnetke smo skenirali z ločljivostjo 1200 pik na palec z običajnim namiznim skenerjem. Izdelali smo dva modela: iz posnetkov v polni in v nižji ločljivosti

*Slika 3: Tehnika grajenja strukture iz gibanja (Structure-from-Motion – SfM) iz serije navpičnih fotografij. Prikazane so izračunane lokacije zajema posnetkov s slike 2 (modro), oblak točk (A) in digitalni model površja (B), ki mu lahko dodamo teksturo in kontrolne točke za vpenjanje v prostor (C). ►*





Slika 4: Senčen model višin Breginja izračunan iz posnetkov zmanjšane ločljivosti (za 55 %) (A) in slika razlik višin med modeloma iz posnetkov v zmanjšani in polni ločljivost (B). Model iz posnetkov zmanjšane ločljivosti bolje definira stavbe, zato so tiste, ki na drugem modelu manjkajo, prikazane rdeče. Opaziti je tudi razmeroma velike razlike v izračunani izoblikovanosti terena.

(prevzorčeni na ločljivost 800 pik na palec). Nastavitve smo prilagodili tipu preučevanega objekta (naselje z okolico) in zmogljivostim strojne opreme (računalnik z dvema procesorjema, vsak po 8 jeder), 32 GB RAM in zmogljivo grafično kartico (GTX570 s 480 računskimi jedri in 1280 MB RAM). Pri poravnavi slik smo izbrali visoko kakovost brez predizbora parov, pri izdelavi geometrije pa arbitraren predmet z zglajenimi robovi in visoko kakovostjo izdelave (količina hitrega spomina (RAM) ni bila dovolj velika za izračun modela z zelo visoko kakovostjo) ter z zmanjšanjem končnega števila ploskev na 10 milijonov in zapolnjevanjem morebitnih lukenj. Kontrolne točke smo pridobili iz ortofoto posnetkov in modela terena s 5-metrsko ločljivostjo.

Izdelana trirazsežna modela se med seboj razlikujeta, kar ponazarjajo višinske razlike med izračunanim modeloma višin na sliki 4B. Zlasti v rekonstrukciji terena je to deloma posledica slabše opredeljenih kontrolnih točk. Ugotavljamo, da metoda ne zagotavlja stabilnih in ponovljivih rezultatov, saj je v veliki meri odvisna od ugotovljenih veznih točk v prvem koraku in rešitve njihovih medsebojnih povezav, ki pa je lahko ob vsakokratni iteraciji drugačna. Presenetljivo je, da so stavbe bolje definirane na modelu, izračunanem iz posnetkov v nižji ločljivosti, na kar nimamo odgovora. Na modelih reliefa ni opaziti razlik v kakovosti med območji z dvo- ali trikratnim prekrivanjem posnetkov.

Na podlagi pridobljenih izkušenj lahko navedemo naslednje temeljne prednosti tehnike:

- preprosta in uporabniku prijazna metoda (ni potrebe po kalibraciji kamere, ne zahteva informacij o lokaciji kamere in uporabimo lahko neurejeno zbirko fotografij);
- polsamodejna metoda prihrani veliko časa;
- uporabimo lahko posnetke brez znanih kontrolnih točk, torej lahko uporabimo tudi stare fotografije;
- program je na voljo brezplačno ali razmeroma poceni (na primer Bundler, VisualSFM, PhotoSynth, PhotoScan);
- metoda je v danih pogojih zelo natančna, saj temelji na preizkušanih fotogrametričnih principih in najsodobnejših metodah računalniškega vida;
- ob kakovostnem zajemu izhodiščnih fotografij je mogoče izdelati prave ortofoto posnetke.

Njene poglavitne slabosti pa so:

- metoda zahteva izjemno zmogljivo strojno opremo;
- poravnava posnetkov se lahko ponesreči zaradi prevelike stopnje šuma na posnetkih, preveč zamegljenih posnetkov, preveč poševnih posnetkov ali preveč različnih posnetkov (na primer zelo različna goriščna razdalja, različni pogoji ali čas zajema);
- kontrolne točke rabimo po opravljenem modeliranju (ročna izbira kontrolnih točk), kar je v primeru zgodovinskih posnetkov nemalokrat zelo težavno;
- zaradi prekomerne triangulacije se lahko pojavijo vizualni artefakti;
- večina implementiranih metod ni zadovoljivo dokumentiranih (tako imenovana črna škatla);
- zaradi zahtevanega prekrivanja je velikokrat potrebno namensko snemanje.

Ne glede na izpostavljene slabosti velja poudariti, da je metoda hitra in v dobrih pogojih (na primer ustrezna količina in kakovost posnetkov zajetih s sodobnimi napravami) daje izvrstne rezultate (3R modele rekonstrukcij) ob razmeroma nezahtevni vpletenosti analitika v samo obdelavo. Izpostavljamo tudi to, da smo v primeru 3R modela Breginja, z izjemno skromnim in zato težavnim slikovnim izhodiščem, uspeli pridobiti dober približek celotnega naselja z okolico.

## 4 Digitalna retrospektiva porušenega Breginja in vloga 3R rekonstrukcij pri ohranjanju kulturne dediščine

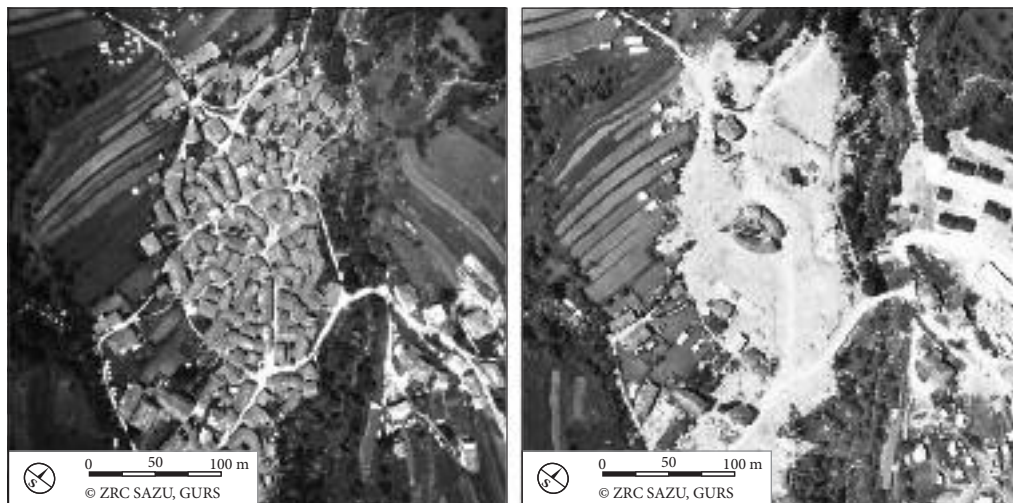
Slovenija ima široko znanje za uporabo fotogrametričnih tehnik na področju ohranjanja in dokumentacije arhitekturne dediščine (Kosmatin Fras 1996). Od leta 1993 naprej se v okviru projekta IZMERE pod okriljem spomeniškovarstvenih služb izvaja nacionalni projekt preventivnega fotogrametričnega snemanja objektov in območij kulturne dediščine (Grobovšek 2002). Glavni namen je snemanje objektov državnega pomena in vseh tistih, ki so ogroženi, ter vzpodbujanje vsestranske uporabe natančnih položajnih in 3R podatkov o objektih. Z vidika splošnega varstva nepremične kulturne dediščine je vrednost dokumentiranja predvsem v zbiranju vsebin iz različnih slikovnih in neslikovnih virov. Številni objekti, dokumentirani na fotografijah, so bili pozneje porušeni ali predelani, zato so fotografije pogosto edini dokaz o njihovem obstoju in razvoju.

Dejstvo, da so staro vaško jedro Breginja, spomenik arhitekturne dediščine, z obliča Zemlje nepovratno izbrisali buldožerji (slika 5), je v kasnejših potresnih situacijah postal jasen primer trajnega opomina neustreznih odločitev. »Breginj se ne sme ponoviti«, je bilo vodilo že pri snovanju popotresne obnove tri leta kasneje, ko je aprila 1979 potres prizadel Črno goro. Ob takšnih dogodkih smo, razumljivo, izpostavljeni odločitvi, do katere mere je objekte smiselno ohranjati pri življenju in kako jih obnoviti. Splošni pogoji in načini ohranjanja kulturne dediščine se praviloma izvajajo v okvirih prilagoditev zahtevam sodobnega časa, družbe in prostora.

V primeru Breginja je situacija posebna. Naselje je povsem spremenilo prvotno lego in podobo, temu se je prilagajal tudi življenski slog prebivalcev, to pa je nazadnje vplivalo na funkcijo in videz pokrajine. Ostalo nam je nekaj zgodovinskih letalskih posnetkov ter izjemen arhiv spomeniškovarstvene dokumentacije, na podlagi katerih lahko danes s sodobnimi tehnologijami izdelamo in na privlačen način prikažemo virtualne približke nekdanjega naselja. Digitalna retrospektiva porušenega Breginja je zlasti pomembna z dveh vidikov:

- omogoča ohranjanje spomina na naselje, ki je bilo pomemben spomenik arhitekturne dediščine in
- omogoča vrednotenje vplivov popotresne obnove na sestavo pokrajine in življenje prebivalstva.

V prvem primeru gre lahko za dopolnitev h konservatorski vlogi in za nadgradnjo turistične in muzejske ponudbe v današnjem Breginju. V drugem primeru lahko spremljamo kompleksen proces zgodovinskega odtisa dogodkov v pokrajini (na primer prek analize sprememb rabe tal; glej tudi primer Breg Valjavec 2010) in bolje usmerjamo prihodnje načrte z naseljem in njegovim zaledjem.



Slika 5: Letalski posnetek starega Breginja takoj po prvem potresu (levo) ter nekaj mesecev kasneje po intervencijskih popotresnih ukrepih (desno) (vir GURS).

Pri izdelavi rekonstrukcije naselja, ki ga ni več, lahko izhajamo le iz arhivskih slikovnih podatkov. Trirazsežni model starega Breginja, opisan v tej študiji, je prvi približek digitalne rekonstrukcije naselja, ki smo ga pridobili iz razpoložljivih letalskih posnetkov. Do prave virtualne rekonstrukcije je še dolga pot, izboljšave in nadgradjo pa vidimo predvsem v naslednjih dveh smereh.

Za izboljšanje položajne in višinske točnosti stavb bi rabili več letalskih posnetkov iz obdobja pred potresom. Te si lahko obetamo iz mednarodnih arhivov letalskih posnetkov, saj je bilo to obmejno območje vojaško dobro nadzorovano vse od 1. svetovne vojne dalje. Z vključitvijo letalskih posnetkov iz različnih preletov bi pridobili boljše možnosti za 3R modeliranje naselja in pokrajine. To pomeni predvsem več presekov iz različnih pogledov, kar zagotavlja boljše ortorektifikacijo, izboljšano višinsko komponento ter celovitejši in položajno točnejši obod posameznih stavb in razločevanje stavb od ulic v strnjem naselju.

Korak na poti izboljšane 3R rekonstrukcije naselja je vpeljava teksture v model stavb. To pomeni pridobivanje podatkov za stranske poglede na stavbe ter druge talne podatke, meritve, načrte. Te informacije je mogoče pridobiti iz fotoarhiva dokumentacije tedanje spomeniškovarstvene službe, namenskih arhivov popotresne obnove, osebnih arhivov, naključnih družinskih fotografiranj in podobno. Trenutno odprto ostaja vprašanje ali jih je mogoče vključiti v model skupaj z letalskimi posnetki ali bi morali izdelati dva ločena modela ter ju nato povezati.

Trirazsežni model starega Breginja, opisan v tem prispevku, je torej prvi približek začrtane digitalne rekonstrukcije naselja. V obstoječi literaturi je mogoče zaslediti virtualne rekonstrukcije naselij ali krajev (na primer potopljenih mest), ki so pridobljene s sodobnimi tehnologijami snemanja in izdelave. Vsem je skupno, da vsaj ostaline ali ruševine najdišča še obstajajo, kar omogoča neposredno zasnovati strukturo najdišča in na njej graditi virtualne prostore. Breginj je v tem kontekstu druga zgodba. Zbrali bomo nove, dopolnilne slikovne vire in skušali čimbolj nadgraditi obstoječi model ter vsaj digitalno in virtualno v življenje priklicati ta nekdanj pomemben kraj in spomenik ljudske stavbne dediščine.

## 5 Sklep

Breginj, odročno obmejno hribovsko naselje, ki je bilo v potresih 1976 precej poškodovano, zato so ga na novo zgradili na drugi lokaciji, je edinstven primer uničenja pomembnega spomenika naše kulturne dediščine. S sodobnimi tehnologijami in programi za obdelavo slikovnih podatkov se odpirajo nove možnosti za obnovitev spomina na ta kraj, kot je nekdaj bil. Z metodo grajenja strukture iz gibanja smo iz šestih letalskih posnetkov s prekrivanjem v eni smeri, izdelali trirazsežni model starega vaškega jedra, prvi približek digitalne rekonstrukcije starega Breginja. V prihodnosti želimo pozornost usmeriti v integracijo različnih virov slikovnih podatkov, predvsem razširiti nabor zgodovinskih letalskih posnetkov ter fotografij iz tal ter jih smiselno vključiti v model. Izboljšave so najbolj pričakovane v vsebinski in geometrični izpopolnjenosti modela površja. V primeru uspešne nadgradnje modela s teksturo pa se bomo že zelo približali pravi 3R rekonstrukciji starega Breginja, ki bi lahko popestrila tudi vsebine muzejev in spomeniškovarstvenih centrov.

## 6 Viri in literatura

- Breg Valjavec, M. 2010: Digitalni model višin nekdanje pokrajine – primer Logaško polje (leto 1972). GIS v Sloveniji 10. Ljubljana.
- Celarc, A., Erjavec, T. 2012. Breginjski kot. Slovenija VI, Vodniki Ljubljanskega geografskega društva. Ljubljana.
- Chandler, J. 1999: Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research. *Earth Surface Processes and Landforms* 24, 1. DOI: [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199901\)24:1<51::AID-ESP948>3.0.CO;2-H](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199901)24:1<51::AID-ESP948>3.0.CO;2-H).
- Chandler, J. H., Fryer, J. G., Jack, A. 2005: Metric capabilities of low-cost digital cameras for close range surface measurement. *The Photogrammetric Record* 20, 109. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1477-9730.2005.00302.x>.
- Clarke, T. A., Fryer, J. G. 1998: The Development of Camera Calibration Methods and Models. *The Photogrammetric Record* 16, 91. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/0031-868X.00113>.
- Grobovšek, J. 2002: Preventivno fotogrametrično snemanje gradu Snežnik v okviru nacionalnega projekta 'IZMERE'. *Geodetski vestnik* 46-4. Ljubljana.
- Kosmatin Fras, M. 1996: Architectural photogrammetry in heritage preservation – a description of methods and products. *Vestnik / Zavod RS za varstvo naravne in kulturne dediščine*.
- Lane, S. N., James, T. D., Crowell, M. D. 2000: Application of Digital Photogrammetry to Complex Topography for Geomorphological Research. *The Photogrammetric Record* 16, 95. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/0031-868X.00152>.
- Lipušček, R. 1995: Breginj. *Krajevni leksikon Slovenije*. Ljubljana.
- Matthews, N. A. 2008: *Aerial and Close-Range Photogrammetric Technology: Providing Resource Documentation, Interpretation, and Preservation*. Denver, Colorado.
- Orožen Adamič, M., 1980: Neposredni učinki potresa v pokrajini. *Potresni zbornik*. Tolmin.
- Pipan, P., 2011: *Primerjava popotresne obnove v Italiji in Sloveniji po potresih v Zgornjem Posočju in Furlaniji*. Doktorska disertacija. Koper.
- Remondino, F., El-Hakim, S. 2006: Image-based 3D Modelling: A Review. *The Photogrammetric Record* 21, 115. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x>.
- Triglav, M., Kosmatin Fras, M., Gvozdanovič, T. 2000: Spremljanje površja ledenikov s fotogrametrijo, študija na primeru triglavskega ledenika / Monitoring of glacier surfaces with photogrammetry, a case study of the Triglav glacier. *Acta geographica* 40.

- Triglav-Čekada, M., Radovan, D., Gabrovec, M., Kosmatin-Fras, M. 2011: Acquisition of the 3D boundary of the Triglav glacier from archived non-metric panoramic images. *The Photogrammetric Record* 26, 133. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1477-9730.2011.00622.x>.
- Verhoeven, G. 2011: Taking computer vision aloft – archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with photoscan. *Archaeological Prospection* 18-1. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/arp.399>.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., Reynolds, J. M. 2012: »Structure-from-Motion« photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179, 0. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>.

# UPORABNOST ZGODOVINSKIH AEROPOSNETKOV PRI PREUČEVANJU POKRAJINSKIH SPREMEMB NA OZEMLJU SLOVENIJE

**dr. Mateja Breg Valjavec, mag. Daniela Ribeiro**

Geografski inštitut Antona Melika, Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti  
mateja.breg@zrc-sazu.si, daniela.ribeiro@zrc-sazu.si

UDK: 911.5:528.7(497.4)

## IZVLEČEK

**Uporabnost zgodovinskih aeroposnetkov pri preučevanju pokrajinskih sprememb na ozemlju Slovenije**  
Med 1. svetovno vojno so avstro-ogrška in italijanska letala snemala kraje ob soški fronti, medtem ko so bili v 2. svetovni vojni iz nemških (Luftwaffe) in britanskih letal (Royal Air Force – RAF) posneti predvsem kraji ob južni železnici, rapalski meji in na slovenski obali. Po 2. svetovni vojni so aerosnemanja postala bolj civilna domena za potrebe kartografije in so postopoma prešla v roke domačih strokovnjakov (1972). Šele leta 1975 je bilo ozemlje Slovenije posneto v celoti. Posledica vojaških in civilnih aerosnemanj je zelo obsežen, a arhivsko zelo razpršen fond zgodovinskih aeroposnetkov slovenskega ozemlja. Aeroposnetke od 1. svetovne vojne naprej in njihovo uporabnost predstavljamo z vidika značilnosti in možnih tehnik obdelave (vizualna fotointerpretacija, analogna ali digitalna stereo analiza). Ob tem so podani primeri uporabe in predlogi za uporabo pri aktualnih geografskih problemih (naravne nesreče, mejni spori, spremembe oblikovanosti zemljišč in rabe tal).

## KLJUČNE BESEDE

zgodovinski aeroposnetki, pokrajinske spremembe, vizualna fotointerpretacija, stereoobdelava, 3-D izmera

## ABSTRACT

### **Applicability of historical aerial photographs in landscape change studies in Slovenia**

During World War I, the Austro-Hungarian and Italian aircrafts recorded locations of the Isonzo Front, while in the World War II the German (Luftwaffe) and British aircrafts (Royal Air Force – RAF) recorded mainly places along the south railway, the Rapallo border and the Slovenian coast. After the World War II, aerial surveys have become more common for civil applications specially for cartographic purposes and gradually went to the hands of local experts (1972). Only in 1975, the entire Slovenian territory was recorded. The results from the military and civilian aerial surveys are vast, however the historical aerial photographs of the Slovenian territory are dispersely stored. This paper presents aerial photographs from the World War I onwards and their applicability from the characteristic point of view and possible processing techniques (visual photo interpretation, analog or digital stereo analysis).

At the same time examples are given of its applications and suggestions for its applicability in current geographical issues (natural disasters, border disputes, land surface and land use changes).

## KEY WORDS

historical aerial photographs, landscape changes, visual photointerpretation, stereo processing, 3-D measurement



## 1 Uvod

Zgodovinski (uporablja se tudi historični, arhivski) aeroposnetki so fotografije nekdanje pokrajine, posnete iz letal oziroma zraka. Zanje je značilno, da prikazujejo pogled na pokrajino iz ptičje perspektive. Razvoj letalske fotografije je povezan z razvojem letalstva, natančneje vojaškega letalstva in potreb po izvidniških fotografijah. Vojske v Evropi in Ameriki so že v začetku 20. stoletja uporabljale letala za izvidniško dejavnost, kar je povzročilo razvoj letalske fotografije in fotogrametrije.

Prvi znani aeroposnetki slovenskega ozemlja so iz obdobja pred 1. svetovno vojno, ko so v posameznih krajih prirejali letalske mitinge in iz balonov in letal fotografirali mesta, na primer Maribor (Sitar 1985). Med 1. svetovno vojno so avstro-ogrski in italijanski letala, vsaka posebej, snemala kraje ob soški fronti, medtem ko so bili v 2. svetovni vojni iz nemških (Luftwaffe) in britanskih letal (Royal Air Force – RAF) posneti predvsem kraji ob južni železnici, rapalski meji in na slovenski obali. Posledica vojaških snemanj je predvidoma zelo obsežen, a arhivsko zelo razpršen in ne povsem raziskan fond zgodovinskih aeroposnetkov slovenskega ozemlja. V prispevku je predstavljena zgodovina letalskih snemanj slovenskega ozemlja iz obdobja obeh svetovnih vojn, kakor tudi iz obdobja po 2. svetovni vojni, ko so aerosnemanja postala bolj civilna domena, ki je postopoma prešla v roke domačih strokovnjakov.

Številne svetovne in tudi nekatere slovenske raziskave so pokazale, da so zgodovinski aeroposnetki pomemben vir za preučevanje pokrajinskih sprememb. Podajajo edinstven vpogled v upodabljanje pokrajine, ki ne more biti pridobljeno iz starih zemljevidov (Cowley in Ferguson 2010). Skladno s tem je glavni namen prispevka predstaviti njihovo uporabnost pri preučevanju pokrajinskih sprememb (poznavanje dinamike naravnih procesov in naravnih nesreč, spremenljivost vegetacije, pogozdovanje, spremembe rabe tal, reševanje naravnih in političnih mej itd.). Uporabnost posnetkov od 1. svetovne vojne naprej predstavljamo z vidika njihovih značilnosti in možnih tehnik obdelave: vizualna analiza, analogna in digitalna stereo analiza.

## 2 Zgodovina aerosnemanj slovenskega ozemlja

### 2.1 Aerosnemanja do leta 1918

Letala so v vojne namene prvič uporabili v italijansko-osmanski vojni v današnji Libiji (1911/1912), vendar je šele 1. svetovna vojna prinesla množično uporabo letalske izvidniške fotografije (Lillesand in Kiefer 1994; Langford 2010). Ob vzpostavitvi soške fronte leta 1915 se je tudi fond aeroposnetkov slovenskega ozemlja povečal. Namen vojaških vodstev v tem obdobju je bil, da z aeroposnetki določijo položaje in premike nasprotnikovih sil. Fotografiranje se je izvajalo v dvosedih opazovalnih letalih, kjer je pilot skrbel za letenje, opazovalec pa za izvajanje fotografiranja. Nagibanje opazovalca prek trupa letala je predstavljalo veliko nevarnost za opazovalca in ker se je povečal tudi pomen letalske fotografije, so v letu 1917 pri vseh v vojno vpletenih straneh uvedli nov način fotografiranja. Letalo je bilo lovski enosed, v njegov trup pa je bil vgrajen fotoaparat in obrnjen proti tlom. Pilot je s pomočjo optičnega kukala videl, nad katerim območjem leti, ter preko sprožilca posnel letalske fotografije (Kambič 1983). Z množičnostjo najsodobnejše uporabe pa je prišel tudi nagel razvoj v smeri manjših aparatov, boljših posnetkov, večje goriščne razdalje. Razvoj v to smer je narekovala tudi protiletalska obramba, zaradi katere so morala letala leteti vse višje in višje, iz višine pa opazovalec ni mogel razločiti detajlov, ki so bili ključni za vojaške stratege (Kennett 1999).

Skladno z razvojem tehnologije letenja in fotografske tehnike v svetu in Evropi so potekala tudi letalska snemanja različnih delov slovenskega ozemlja. Zelo obsežen fond izdelanih letalskih izvidniških posnetkov za območja bojev na današnjem ozemlju Slovenije (soška fronta) iz avstro-ogrskih letal je hranjen v Vojnem arhivu na Dunaju, deloma pa v Pokrajinskem arhivu v Novi Gorici (slika 1). Če temu dodamo še italijanske izvidniške fotografije, je bilo med letoma 1915 in 1917 ob Soči izdelano največ izvidniških fotografij določenega dela slovenskega ozemlja do takrat (Ravbar 2011).

## 2.2 Aerosnemanja med letoma 1918 in 1945

Po 1. svetovni vojni se je tehnologija letalskega snemanja in fotoaparatorov, razvita med vojno, prenesla v civilno uporabo, predvsem na področju kartografije. Razvila so se prva kartografska podjetja v Angliji, Nemčiji in ZDA. Od leta 1930 so v teh državah civilna letalska snemanja postala stalna praksa.

Stopnja tehničnega razvoja in število inovacij je ponovno poraslo med 2. svetovno vojno. V tem obdobju so takratne vojaške velesile (RAF in druga zavezniška letala, Luftwaffe in USAAF) v okviru vojaških poletov snemale ozemlje celotne Evrope, delno pa tudi severne Afrike in Bližnjega vzhoda. Večji del takratnih posnetkov hranijo trije večji mednarodni arhivi. Dva delujeta v Veliki Britaniji, in sicer v okviru Narodne zbirke letalskih fotografij (*The National Collection of Aerial Photography*, bivši *The Aerial Reconnaissance Archive – TARA*) v Edinburghu (<http://aerial.rcahms.gov.uk>) in Kraljevega vojnega muzeja (*Imperial War Museum*) v Londonu. Tretji, Administracija za narodne arhive in podatke (*National Archives and Records Administration, NARA*) je v ZDA (<http://www.archives.gov>). Med zbirko več deset milijonov vojaških aerofotografij, posnetih od leta 1939 naprej, ki jih hrani TARA, so tudi posnetki slovenskega ozemlja med 2. svetovno vojno (slika 3). Posnetki so nastali na zavezniških (RAF) in nemških letalih (Luftwaffe), ki so jih upravljali najboljši piloti tistega časa. Arhivske aerofotografije imajo velik pomen za raziskovanje vojne pokrajine, vojne škode, kakor tudi praktičen pomen v današnjem času, kot je na primer odkrivanje neeksplozivnih bomb na območju današnje Nemčije.

## 2.3 Aerosnemanja po letu 1945

V prvih povojnih letih do leta 1972 je aerosnemanje slovenskega ozemlja potekalo pod vojaškim poveljstvom Vojnogeografskega inštituta iz Beograda (VGI), ki je opravljal posebna letalska snemanja (PAS), večinoma za obrambo, deloma pa tudi za večje civilne infrastrukturne projekte (izgradnja avtocest). Večina aeroposnetkov je merskih, problem pa predstavljajo izgubljena kalibracijska poročila fotoaparatorov, kar je posledica večkratnih fizičnih selitev arhivskega gradiva. V začetku 70-ih so postala letalska snemanja Slovenije bolj civilna domena pod upravo tedanje Geodetske uprave SRS (GUSRS) in s tehnično podporo Geodetskega zavoda SRS, ki je za ta namen pridobil ustrezno letalsko in fotografsko opremo. Sistematično snemanje se v Sloveniji pod okriljem Geodetske uprave Republike Slovenije (GURS) pod naslovom Ciklično aerofoto snemanje (v nadaljevanju CAS) izvaja periodično od leta 1975. V tem letu je bilo prvič posneto celotno območje države v merilu 1 : 17.500 v smeri vzhod–zahod. Prvi posnetki so bili v črno-beli tehniki, ki pa jo v 80-ih letih 20. stoletja nadomesti barvna tehnika (barvni filmi, infrardeči filmi).

Po 2. svetovni vojni je vojaška uporaba upadla, civilni interes se je povečal in interpretacija aeroposnetkov se je razširila na različna področja od kmetijstva do zoologije (Lillesand in Kiefer 1994). Fond povojnih zgodovinskih posnetkov je zelo dobro ohranjen in je v večji meri javnosti dostopen v Arhivu aeroposnetkov (slika 2). Posnetki so v lasti GURS-a, medtem ko Arhiv aeroposnetkov deluje v okviru Geodetskega inštituta Slovenije, ki omogoča vpogled v posnetke in nadaljnjo digitalno obdelavo. Del posnetkov, posnetih do leta 1972, še vedno hrani samo VGI v Beogradu.

## 3 Obdelava in analiza zgodovinskih aeroposnetkov

V svetovni literaturi zasledimo številne študije zgodovinskih aeroposnetkov, ki so bile namenjene:

- ovrednotenju zgodovinske topografije območja plazov (Walstra s sodelavci 2004; Zanutta s sodelavci 2006; Baldi s sodelavci 2008; Prokešová s sodelavci 2010);
- vrednotenju rabe tal in pokrovnosti tal (Sklenička 2002; Käyhkö s sodelavci 2011; Godone s sodelavci 2014);
- zaznavanju pokrajinskih elementov (Bescoby 2006);

- študiju vegetacijskih struktur (Archer 1995; Fensham s sodelavci 2003; Browning s sodelavci 2009);
- odkrivanju in raziskovanju arheoloških območij (Reeves 1936);
- geomorfološkim raziskavam na primer vodnih korit (Schmitz s sodelavci 2009; Pérez Álvarez s sodelavci 2013) ali odmikanje morskih klifov (Conforto Sesto 2004);
- zgodovinskim raziskavam (Ravbar 2011);
- ponovnemu vzpostavljanju ekosistemov (Smith III s sodelavci 2010);
- kulturni dediščini (Bryan in Clowes 2003) ali
- preučevanje rudnikov v odprtih kopih (Pacina in Weiss 2011).

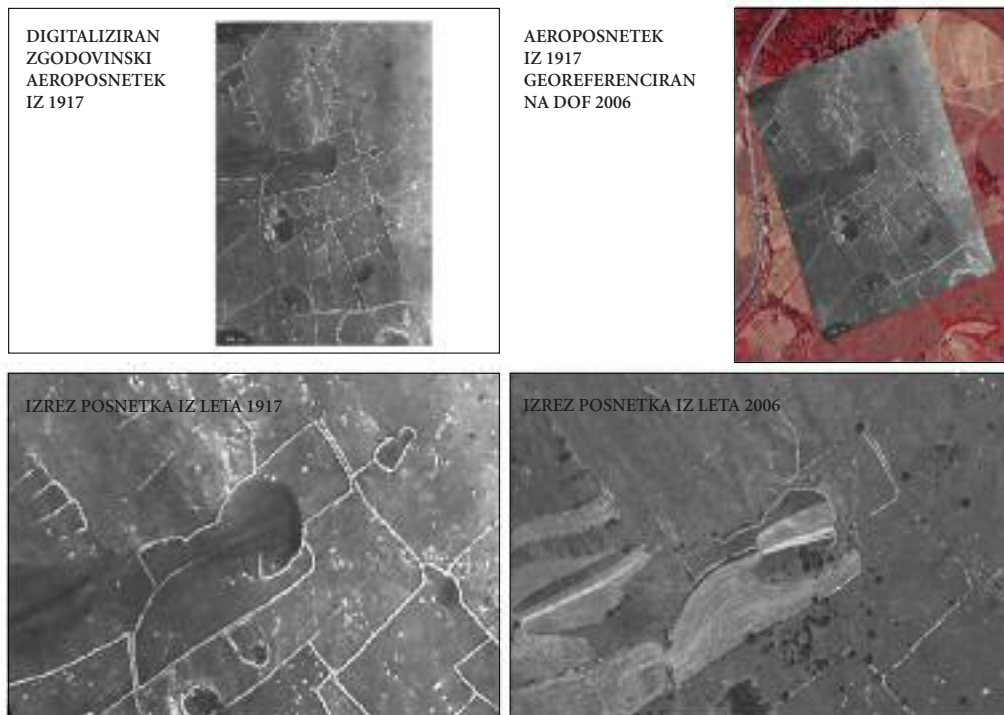
Interpretacija aeroposnetkov je izjemno pomembna metoda tudi za arheologijo (Grosman 1998). V Sloveniji se je uporaba aeroposnetkov za arheološka raziskovanja začela v 80-ih letih 20. stoletja. Pokrajinski muzej Murska Sobota vodi register aerofotografij arheoloških najdišč na območju njihovega delovanja. Obsežna podatkovna baza aeroposnetkov arheoloških najdišč omogoča nove poglede za arheološke in tudi s tem povezane pokrajinske raziskave (Kerman 1999). Podobne raziskave so že v 90-ih letih 20. stoletja opravili tudi na drugih območjih (dolina reke Vipave, Krke, Ledave) (Grosman 1998). Aeroposnetke so uporabili tudi pri arheoloških raziskavah avtocestnega križa ter nekaterih najdišč na soški fronti (Črešnar s sodelavci 2012). Paušič in Čarni (2012) sta preučevala pokrajinske spremembe v rabi tal (zaraščanje) v Beli krajini v zadnjih 220 letih, pri tem sta uporabila med drugimi zgodovinske podatke posebnih in cikličnih aerofotosnemanj od leta 1954 do 2009.

### 3.1 Vizualna fotointerpretacija

Vizualna fotointerpretacija je tehnično najpreprostejša geoinformacijska analiza aeroposnetkov, ki se med geografi uporablja pri preučevanju posameznih pokrajinskih sprememb, najprej in najpogosteje za preučevanje degradacije okolja. Špes s sodelavci (1988), Smrekar s sodelavci (2006), Breg in Urbanc (2005) so določali dinamiko spreminjanja gramoznic; Stritih in Šebenik (1991), Matos (2007) možnost določanja divjih odlagališč; Petek s sodelavci (2002) so primerjali stanje rabe tal kmetijskih površin v Sloveniji iz aeroposnetkov let 1964 in 2000, ter ugotovili dejanske spremembe rabe tal na primeru Podolševe. Aeroposnetke iz 1. svetovne vojne je vizualno analiziralo tudi več zgodovinarjev za lociranja letališč na fronti (Panek in Wielgus 2000; Soré 2008; Ravbar 2011; Ravbar 2012; Jurančič 2013) ter v notranjosti države (Plattner 2011). Sama metoda fotointerpretacije temelji na sposobnosti človeškega vida. Vizualno interpretacijo lahko izvajamo na analognih posnetkih (kontaktne kopije) ali digitalnih posnetkih (skenogramih). Pri slednjih govorimo o zaslonki interpretaciji, ki ji običajno sledi tudi zaslonka digitalizacija iskanih objektov. V primerjavi z analogno interpretacijo lahko pri digitalni interpretaciji posnetke obdelamo in izboljšamo njihovo zmožnost določanja iskanih objektov (povečamo barvne kontraste, prilagodimo svetlobo itd.). Poleg kakovostnih posnetkov zahteva strokovno usposobljenega interpretatorja in strokovno izdelano metodologijo določanja po izbranem interpretacijskem ključu.

Zaradi tehnične preprostosti so jo uporabljali že med 1. svetovno vojno. Številni vojaški strategji so zelo dobro razumeli pomen fotointerpretacije za pridobivanje vojaških informacij. S postopkom fotointerpretacije so vsebino na fotografiji ovrednotili. Fotografija brez ovrednotenja je bila za povečanje vredna manj, kakor fotografija z izrisanimi nasprotnikovimi linijami in njihovimi topniškimi položaji, ki so bili označeni z rdečo barvo. Ovrednotenje je poleg nasprotnikovih položajev zahtevalo med drugim tudi izpis datuma, višine, s katere je bilo izvršeno fotografiranje, letalsko enoto in opazovalca, ki je posnetek naredil. Letalska enota je ovrednoteno fotografijo morala izdelati v dveh primerkih, ki so ju nemudoma poslali na poveljstvo (Ravbar 2011).

Posnetki iz 1. svetovne vojne pokrivajo manjša območja, so večinoma nemerski in zato zahtevnejši za digitalno fotogrametrično obdelavo. Na podlagi študija obstoječe literature ugotavljamo, da so jih doslej v raziskavah uporabljali predvsem zgodovinarji (Ravbar 2011). Posnetke lahko georeferenciramo, če le najdemo ustrezne kontrolne (oslonilne) točke na obeh posnetkih. Posnetka v centralni projekciji ne moremo direktno georeferencirati brez upoštevanja transformacije iz centralne v ortogonalno projek-



Slika 1: Letalski posnetek »golega« Krasa (22. 4. 1917, vir: Pokrajinski arhiv Nova Gorica) in primerjava z novejšim aeroposnetkom iz leta 2006 (CAS 2006).

cijo, v kateri je ortofoto. Če ga ne razpačimo, pa moramo upoštevati, da zraven peljemo še napake zaradi tega, ker ga nismo razpačili, zato samo georeferenciranje brez razpačenja ne daje pravih rezultatov.

Na sliki 1 je primer uporabe posnetka Krasa iz 1. svetovne vojne, ki smo ga georeferencirali s pomočjo kontrolnih točk na bližnje-infrardeči DOF (CAS 2006). Na spodnjih dveh sličicah lahko opazujemo pokrajinske spremembe. Zaradi lažje vizualne primerjave smo posnetek iz leta 2006 prikazali v sivih odtinkih. Čeprav so se na Krasu v zadnjih sto letih zgodile velike spremembe v rabi tal, predvsem zaradi zaraščanja, je prikazano območje (okolica Divače) skoraj nespremenjeno. Glavna sprememba je v suhih zidovih, ki so pomemben element kulturne pokrajine (tudi v letu 1917), ampak zaradi opuščanja kmetijstva počasi izginjajo (razpadajo). Ker gre za nemerske posnetke slabše kakovosti, sta potrebna večje tehnično znanje ali bolj izpopolnjena programska oprema pri uporabi digitalne fotogrametrije za morebitne nadaljnje 3D-analize. Posnetki omogočajo preučevanje pokrajine in njenih sprememb v celem stoletju, kar je izjemen potencial za različne stroke, kakor tudi za načrtovanje rabe prostora na lokalni ravni. Z metodami fotogrametrične obdelave nemerskih posnetkov (Triglav Čekada s sodelavci 2011) bi povečali količino in kakovost pridobljenih informacij o pretekli pokrajini. Zgodovinarji, arheologi, geografi, gozdarji, agronomi in drugi pa bi s strokovno interpretacijo nove informacije postavili v kontekst obstoječega znanja.

**Primer uporabe 1 (vizualna interpretacija): Spreminjanje rečnih tokov z vidika poplav in mejnih sporov:** Spreminjanje poteka vodnih strug je posledica meandriranja vodotokov, kar je značilnost velikih rek in tudi manjših vodotokov. Številne slovenske reke so bile po 2. svetovni vojni regulirane s poglobitvijo in izravnavo struge. Meandri so bili odrezani in počasi jih je prerasla vegetacija. Iz zgodovinskih

posnetkov lahko rekonstruiramo nekdanji tok reke in določimo njeno naravno poplavno ravnico. Če na teh območjih prepovemo gradnjo se zavarujemo pred nepotrebno škodo, ki jo povzroči poplava. Vizualna primerjava struge reke Mure v letih 1959 in 1980 prikazuje velike pokrajinske spremembe v samem toku reke, rabi tal na območju nekdanje struge (leta 1959 prodišče, leta 1980 gozd) in vegetaciji. Zaradi dinamike premikanja rečnih strug reke niso primerne za določanje državnih meja. Gre za dinamične naravne meje, kjer so spremembe tako pogoste, da bistveno vplivajo na izgled in rabo prostora (vodotoki, jezera, močvirja, rastje).

Mejni spor med Slovenijo in Hrvaško je v nekaj primerih povezan z nepravilnim izborom dinamične naravne meje, ki je vezana na tok reke (meja po reki Dragonji, Muri, Kolpi, Sotli). Mura je mejna reka med Slovenijo in Hrvaško od srede 19. stoletja. Mura je odtlej ob poplavih in zaradi bočne erozije večkrat prestavila svoj tok, meja pa danes ne teče več čisto po reki. V zgodovini so politične meje le redko lahko daljši čas sledile glavnemu toku Mure, zato je prihajalo med obmejnimi fevdalci do pogostih spopadov. Dinamiko spreminjanja rečne struge Mure, med Veržejem in Ižakovci, sta s pomočjo zgodovinskih aeroposnetkov za leta 1954, 1987 in 2005 analizirala tudi Globevnik in Mikoš (2009).

**Primer uporabe 2 (vizualna interpretacija): Preučevanje sprememb v rabi tal in obliki zemljišč:** Po 2. svetovni vojni so se na slovenskem podeželju in v kmetijski pokrajini zgodile velike spremembe v parcelaciji kmetijskih zemljišč. Ponekod so bila zasebna zemljišča podržavljena in pri tem združena v večje parcele, kot je to primer pokrajine ob reki Muri (slika 2, primerjaj zgornji desni kot leve in desne slike). Po osamosvojitvi Slovenije pa je Zakon o denacionalizaciji (Uradni list RS 27/91) na nekaterih območjih povzročil ponovno drobljenje kmetijskih zemljišč. Na sliki 3 so kmetijska zemljišča v okolici vodarne Brest na Iškem vršaju, kjer so se velike parcele iz leta 1988 v lasti državnega podjetja Ljubljanske mlekarne do leta 2006 razdrobile na številne manjše parcele v lasti več manjših kmetov. Sočasno je prišlo do sprememb v rabi tal. Za tovrstno preučevanje rabe tal in preoblikovanja kmetijskih zemljišč so zgodovinski aeroposnetki zelo uporabni, ker nosijo veliko podatkov o pokrajini (Petek s sodelavci 2002). Za pridobivanje informacij o rabi tal zadostuje vizualna fotointerpretacija.

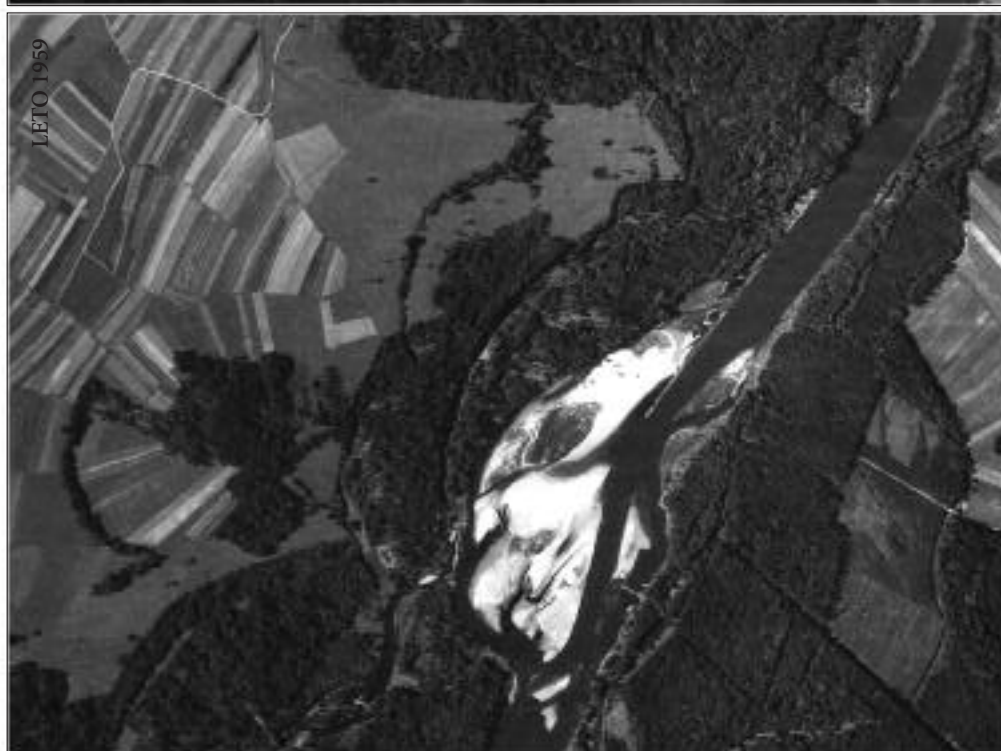
### 3.2 Analogna in digitalna stereoobdelava

Zgodovinske letalske posnetke, ki so bili posneti z merskimi in tudi nemerskimi fotoaparati, lahko obdelamo s pomočjo klasičnih fotogrametričnih metod (Triglav s sodelavci 2000; Walstra s sodelavci 2004). Številne države v zadnjih 50ih letih sistematično zbirajo aeroposnetke svojih ozemelj, ki so danes shranjeni v arhivih in jih lahko s fotogrametričnimi metodami obdelamo relativno poceni in hitro (Prokešová s sodelavci 2010). Obdelava digitaliziranih posnetkov omogoča avtomatsko pridobivanje tridimenzionalnih podatkov (Kraus 2007) in omogoča 3D izmero. V konvencionalnih fotogrametričnih postopkih se za 3D prostorsko rekonstrukcijo upodobljenih objektov običajno uporabljajo stereofotografije. Potreben je stereo-efekt, ki je vzpostavljen, ko se dve fotografiji zadostno prekrivata (običajno 60 do 80 %), optični osi pa ne smeta biti preveč konvergentni (Triglav s sodelavci 2000).

V nasprotju z izvidniškimi posnetki iz 1. svetovne vojne so nam znani posnetki iz 2. svetovne vojne posneti že stereoskopsko (slika 4). Posnetke so takoj po pristanku letala strokovno analizirali zelo usposobljeni fotointerpretatorji, ki so z uporabo stereoskopov določili razmere na fronti.

Povojni posnetki so večinoma merski in z uporabo digitalne fotogrametrije omogočajo pridobitev tridimenzionalnih informacij (DMR) iz dvodimenzionalnih slik, pri čemer morajo biti poznane vse lastnosti povezane s kamero, posnetkom in posnetim površjem, kar vključuje informacije o notranji in zunanji orientaciji senzorja, ki so ponavadi podani v kalibracijskem poročilu kamere. Notranja orientacija podaja vse parametre fotoaparata in njegovih distorzij in je zapisana v kalibracijskem poročilu.

*Slika 2: Prikaz spreminjanja toka reke Mure in obrečne pokrajine (prodišče, poplavni gozd) med letoma 1959 (levo) in 1980 (desno) na zgodovinskih aeroposnetkih © GURS.* ►





Slika 3: Med letom 1988 (levo) in 2006 (desno) so se zgodile velike spremembe v rabi tal in izoblikovanosti zemljišč na Iškem vršaju okrog vodarne Brest (vir posnetkov: GURS).

Zunanja orientacija pove, kje v lokalnem ali globalnem koordinatnem sistemu je fotoaparati v času snemanja. Zunanja orientacija je ponavadi zapisana v poročilu aerotriangulacije. Če je ni, jo lahko na novo izračunamo. 3D meritev lahko izvajamo tudi samo v lokalnem modelnem koordinatnem sistemu. Kadar poznamo relativno lego med posnetkoma v prostoru in notranjo orientacijo posnetka, bi taka posnetka že lahko uporabili za 3D izmero. Vendar pa v večini primerov želimo, da se izmera izvede v globalnem koordinatnem sistemu, za kar rabimo oslonilne točke z znanimi koordinatami v globalnem koordinatnem sistemu.

Kalibracijske podatke kamer iz 2. svetovne vojne lahko deloma razberemo iz samih posnetkov, če so na njih označeni, medtem ko se kalibracijska poročila pogosto niso ohranila. Teoretično lahko iz vseh stereoposnetkov izdelamo DMR. Kakovosten digitalni model nekdanjega površja je primeren za geomorfometrično analizo površja in omogoča primerjavo s površjem sedanje pokrajine, kvalitativno ali kvantitativno. Glavna prednost tridimenzionalne analize pokrajine je, da poleg lege in obsega objekta, določimo tudi globino ali višino objektov.

**Primer uporabe 3 (3D-analiza): Določanje reliefnih sprememb:** Reliefne spremembe določamo z iskanjem razlik med DMR-ji istega območja iz različnih obdobij. S fotogrametrično metodo stereoizvrednotenja arhivskih aerosposnetkov lahko prikažemo relief v nekdanji pokrajini. Na sliki 5 spodaj je primer reliefa nekdanje pokrajine Ljubljanskega polja leta 1959. Relief nekdanje pokrajine primerjamo

Slika 4: Dva zaporedna stereoposnetka – stereopar © TARA, RAF 1944), ki omogočata analogno in digitalno stereo analizo. ►





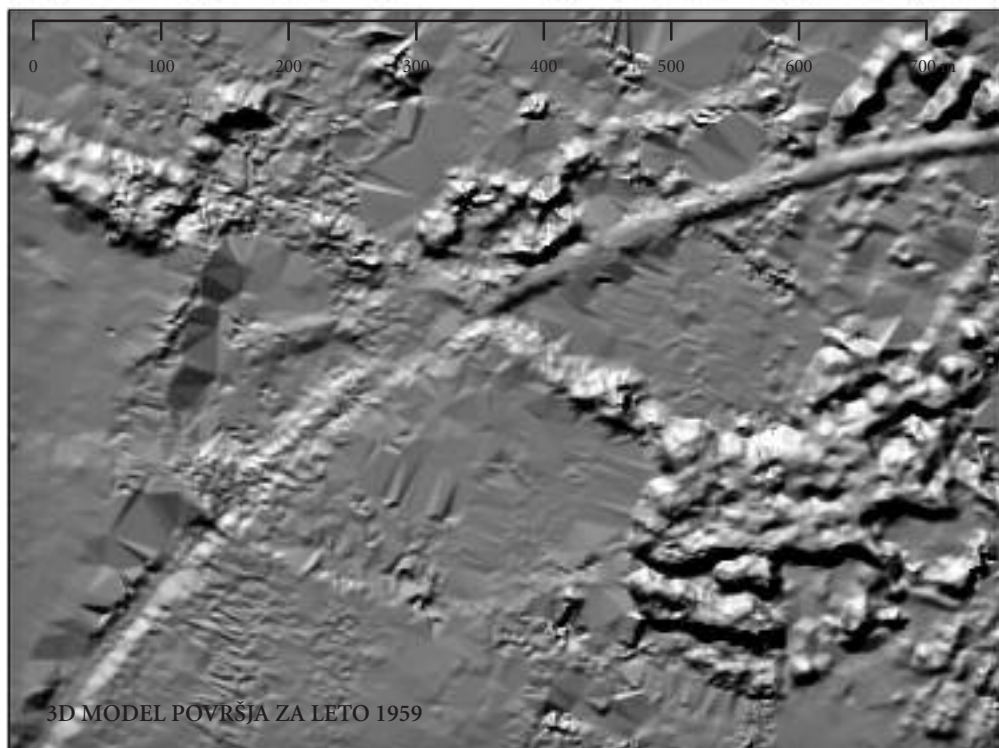
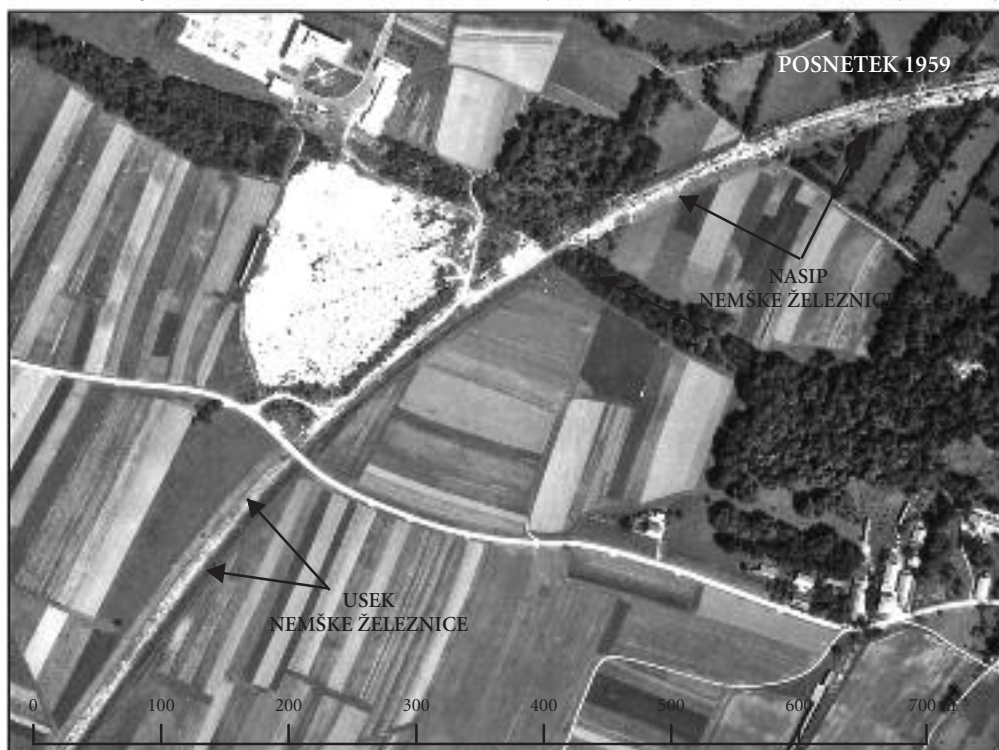
z reliefom današnje pokrajine in na tak način določimo višinske razlike in na primer zasute kotanje (Breg Valjavec 2010). Triglav Čekada s sodelavci (2011) ter Triglav Čekada in Gabrovec (2013) opisujejo uporabo terestičnih arhivskih nemerskih fotografij za 3D rekonstrukcijo Triglavskega ledenika, medtem ko Triglav Čekada in Zorn (2012) opisujeta metode zajema in fotogrametrične obdelave nemerskih aeroposnetkov za potrebe naravnih nesreč. V primeru površinskega kopa rudnika Bilina (Slovaška) so z volumetrično analizo določili količino izkopane rudnine v določenem obdobju (Pacina in Weiss 2011). Podobna fotogrametrična metoda je bila uporabljena za določanje hitrosti odmikanja klifa oziroma stopnje erozije za območje Southern Monterey Bay, California, ZDA (Conforto Sesto 2004). Avtor je na podlagi zgodovinskih aerofotografij iz leta 1984 in metod digitalne fotogrametrije izdelal digitalni model reliefa nekdanje pokrajine. Na podlagi primerjave izdelanega digitalnega modela z bolj ali manj recentnimi predstavitvami površja je lahko določil stopnjo odmika klifa v določenem časovnem intervalu.

**Primer uporabe 4 (vizualna interpretacija in 3D-analiza): Preučevanje kulturne pokrajine:** Poleg neposrednih geomorfoloških ugotovitev lahko s pomočjo 3D rekonstrukcije preučujemo tudi elemente kulturne pokrajine in odkrivamo nove ali nekdanje objekte kulturne dediščine. Na sliki 5 je predstavljena rekonstrukcija nekdanje železniške proge na severnem robu Ljubljane v letu 1959. Na podlagi stereoposnetkov (PAS 1959) smo izdelali DMP (prikazana tudi vegetacija in stavbe) nekdanje pokrajine. Na posnetku in na modelu površja smo evidentirali antropogene pokrajinske elemente. Kombinacija fotointerpretacije in stereo-fotogrametrije omogoča boljše rezultate kot vsaka metoda posebej.

## 4 Sklepi

Izvedba in uspešnost zaznavanja pokrajinskih sprememb je v prvi meri odvisna od razpoložljivih zgodovinskih aeroposnetkov, njihove kakovosti, ohranjenosti ter možnosti za nadaljnje vizualne ali fotogrametrične obdelave in 3D analizo. Slednje omogočajo geometrične analize pokrajinskih sprememb, ki so posledica naravnih geomorfni in hidromorfni procesov (plazovi, poplave) ali antropogenih posegov (površinski kopi, nasutja, vseki prometnic ...). Na podlagi študije zgodovinskih aeroposnetkov in predstavljenih primerov (slika 1) ugotavljamo, da posnetki iz 1. svetovne vojne pokrivajo manjša območja, so večinoma nemerski posnetki, ki so zahtevnejši za digitalno fotogrametrično obdelavo in 3D-izmero, zato so jih v preteklosti večinoma analizirani z vizualno interpretacijo v zgodovinskih, geografskih, bioloških arheoloških in drugih raziskavah. Posnetki iz 2. svetovne vojne so tehnično izpopolnjeni in večinoma že merski (stereo) posnetki, ki omogočajo stereoskopsko in geometrično analizo pokrajinskih sprememb (slika 4). Povojni posnetki so mersko izpopolnjeni, saj so bili v prvi vrsti namenjeni za izdelavo topografskih kart in ortofoto posnetkov za vojaške ali civilne namene. Z izdelavo kakovostnih DMP-jev, DMR-jev in tudi drugih 3D izmer omogočajo analizo naravnih in kulturnopokrajinskih sprememb: geomorfološke analize (slika 5, spodaj), rekonstrukcijo nekdanje naravne in kulturne pokrajine (sliki 3 in 5) ter odkrivanje novih ali nekdanjih objektov kulturne dediščine (slika 5). Na podlagi raziskave lahko sklenemo, da je potencial zgodovinskih aeroposnetkov za preučevanje pokrajinskih sprememb zelo velik in v Sloveniji še precej neizkoriščen.

*Slika 5: Kulturna pokrajina leta 1959 na črno-belih aeroposnetkih (zgoraj) in na iz njih izdelanem digitalnem modelu površja (spodaj). ►*



## 5 Viri in literatura

- Archer, S. 1995: Tree–grass dynamics in a *Prosopis*-thornscrub savanna parkland: reconstructing the past and predicting the future. *Ecoscience* 2-1.
- Baldi, P., Cenni, N., Fabris, M., Zanutta, A. 2008: Kinematics of a landslide derived from archival photogrammetry and GPS data. *Geomorphology* 102: 435–444. DOI: 10.1016/j.geomorph.2008.04.027.
- Bescoby, D. J. 2006: Detecting Roman land boundaries in aerial photographs using Radon transforms. *Journal of Archaeological Science* 33. DOI:10.1016/j.jas.2005.10.012.
- Breg Valjavec, M. 2012: Geoinformatic methods for the detection of former waste disposal sites in karstic and nonkarstic regions (case study of dolines and gravel pits). *Doktorsko delo*. Univerza v Novi Gorici. Nova Gorica.
- Breg, M., Urbanc, M. 2005: Gravel plains in urban areas: gravel pits as an element of degraded landscapes. *Acta Geographica Slovenica* 45-2. Ljubljana.
- Browning, D. M., Archer, S. R., Byrne, A. T. 2009: Field validation of 1930s aerial photography: What are we missing? *Journal of Arid Environments* 37-9. DOI:10.1016/j.jaridenv.2009.04.003.
- Bryan, P. G., Clowes, M. 2003: Surveying Stonehenge by Photogrammetry. *The Photogrammetric Record*. DOI: 10.1111/0031-868X.00082.
- Conforto Sesto, J. R. 2004: *Erosion in south Monterey bay*. Master's thesis. Monterey.
- Cowley, D., Ferguson, L. 2010: Historic aerial photographs for archaeology and heritage management. *Space, Time, Place: Third International Conference on Remote Sensing in Archaeology, 17th–21st August 2009, Tiruchirappalli, Tamil Nadu, India*. BAR International Series 2118.
- Črešnar, M., Košir, U., Rutar, G. 2013: Raziskave bojišč soške fronte v letu 2012. *ARHEOLOGIJA v letu 2012, Zbornik povzetrov*. Ljubljana.
- Fensham, R. J., Choy, S. J. L., Fairfax, R. J., Cavallaro, P. C. 2003: Modelling trends in woody vegetation structure in semi-arid Australia as determined from aerial photography. *Journal of Environmental Management* 68. DOI:10.1016/S0301-4797(03)00111-7.
- Globevnik, L., Mikoš, M., 2009: Boundary conditions of morphodynamic processes in the Mura River in Slovenia. *Catena* 79-3. DOI:10.1016/j.catena.2009.06.008.
- Godone, D., Garbarino, M., Sibona, E., Garnerio, G., Godone, F. 2014: Progressive fragmentation of a traditional Mediterranean landscape by hazelnut plantations: The impact of CAP over time in the Langhe region (NW Italy). *Land Use Policy* 36. DOI: 10.1016/j.landusepol.2013.08.018.
- Grosman, D. 1998: Arheološka aerofotografija. *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 1997–1998*. Ljubljana.
- Hanson, W. S., Oltean, I. A. 2013: *Archaeology from historical aerial and satellite archives*. New York: Springer.
- Jurančič, A. 2013: Sežansko letališče nekdanje in nikoli več. *Samozaložba*.
- Kambič, M. 1938: Iz starih fotografskih albumov. *Kronika* 31.
- Käyhkö, N., Fagerholm, N., Asseid, B. S., Mzee, A. J. 2011: Dynamic land use and land cover changes and their effect on forest resources in a coastal village of Matemwe, Zanzibar, Tanzania. *Land Use Policy* 28-1.
- Kennett, L. 1999: *The First Air War 1914–1918*. New York.
- Kerman, B. 1999: Settlement Structures in Prekmurje from the Air. *Arheološki vestnik* 50.
- Kosmatin Fras, M. 2004: Vpliv kakovosti vhodnih podatkov na kakovost ortofota. *Geodetski vestnik* 48-2.
- Kovačič, B., Balažič, S. 2003: Hidrotehnična študija reke Mure s poudarkom na karakterističnih pretokih in prispevnih območjih. *Mišičev vodarski dan*.
- Kraus, K. 2007: *Photogrammetry: geometry from images and laser scans*. Berlin, New York.
- Langford, M. 2010: *Basic Photography* (9th ed.). Oxford.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W. 1994: *Remote Sensing and Image Interpretation* (third edition). New York.

- Pacina, J., Weiss, L. 2011: Georelief reconstruction and analysis based on historical maps and aerial photographs. Proceedings – Symposium GIS Ostrava 2011. Ostrava.
- Panek, R., Wielgus, K. 2000: Brzesko – Okocim: Lotnicza baza najjaśniejszego pana drukarnia diecezjalna w Sandomierzu. Okocim.
- Paušič, A., Čarni, A. 2012: Landscape transformation in the low karst plain of Bela krajina (SE Slovenia). *Acta Geographica Slovenica* 52-1. DOI: 10.3986/AGS52102.
- Pérez Álvarez, J. A., Mayoral Herrera, V., Martínez del Pozo, J. Á., de Tena, M. T. 2013: Multi-temporal archaeological analyses of alluvial landscapes using the photogrammetric restitution of historical flights: a case study of Medellín (Badajoz, Spain). *Journal of Archaeological Science* 40-1. DOI: 10.1016/j.jas.2012.08.025.
- Petek, F., Bric, V., Rotar, T. 2002: Uporaba starih letalskih posnetkov pri ugotavljanju sprememb rabe tal. *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2003–2004*. Ljubljana.
- Plattner, P. 2011: Die k.u.k. Aeronautische Anstalt Fischamend, Der Aviatische Salon. Wien.
- Prokešová, R., Kardoš, M., Medvedová, A. 2010: Landslide dynamics from high-resolution aerial photographs: A case study from the Western Carpathians, Slovakia. *Geomorphology* 115. DOI:10.1016/j.geomorph.2009.09.033.
- Ravbar, M. 2011: Avstro-Ogrsko letalstvo na soški fronti 1915–1917: Cesarska in kraljeva letališka infrastruktura v zaledju soške fronte. Ljubljana.
- Ravbar, M. 2012: Letališča na soški fronti. *Prispevki za novejšo zgodovino* 2.
- Reeves, D. M. 1936: *Aerial Photography and Archaeology*. Society for American Archaeology 2-2. DOI: 10.2307/275881.
- Schmitz, D., Blank, M., Ammond, S., Patten, D. T. 2009: Using historic aerial photography and paleohydrologic techniques to assess long-term ecological response to two Montana dam removals. *Journal of Environmental Management* 90-3. DOI:10.1016/j.jenvman.2008.07.028.
- Sitar, S. 1985: *Letalstvo in Slovenci 1, pionirsko obdobje in prva svetovna vojna*. Ljubljana.
- Sklenička, P. 2002: Temporal changes in pattern of one agricultural Bohemian landscape during the period 1938–1998. *Ekológia* 21-2
- Smith III, T. J., Tiling-Range, G., Jones, J., Nelson, P., Foster, A., Balentine, K. 2010: The use of historical charts and photographs in ecosystem restoration: examples from the Everglades Historical Air Photo Project. *Landscapes through the lens: aerial photographs and historic environment*. Oxford.
- Soré, P. 2008: *L'Aviazione nel nord – est: storia dei campi di volo del Friuli Venezia Giulia 1910–2007*. Milano.
- Šebenik, I., Stritih, J. 1991: Divja odlagališča odpadkov v Sloveniji, Poročilo za Ministrstvo za okolje in prostor Republike Slovenije. Ljubljana.
- Špes, M., Bricelj, M., Drozg, V., Ravbar, M., Rejec Brancelj, I. 1988: Problematika onesnaževanja okolja v Občini Ptuj. *Raziskovalno poročilo*. Ljubljana.
- Triglav, M., Kosmatin Fras, M., Gvozdanovič, T. 2000: Spremljanje površja ledenikov s fotogrametrijo, študija na primeru triglavskega ledenika / Monitoring of glacier surfaces with photogrammetry, a case study of the Triglav glacier. *Geografski zbornik* 40.
- Triglav Čekada, M., Gabrovec, M. 2013: Documentation of Triglav glacier, Slovenia, using non-metric panoramic images. *Annals of Glaciology* 54-62. Cambridge.
- Triglav Čekada, M., Radovan, D., Gabrovec, M., Kosmatin Fras, M. 2011: Acquisition of the 3D boundary of the Triglav glacier from archived non-metric panoramic images. *Photogrammetrical Record* 26-133. London.
- Trimble, S. W., 2008: The use of historical data and artefacts in geomorphology. *Progress in Physical Geography* 32-1. London.
- Walstra, J., Chandler, J. H., Dixon, N., Dijkstra, T. A. 2004: *Extracting landslide movements from historical aerial photographs. Landslides: Evaluation and Stabilization*. London.

Zakon o denacionalizaciji, 1991. Uradni list RS, št. 27/91-I, 56/92 – odl. US, 13/93 – odl. US, 31/93, 24/95 – odl. US, 20/97 – odl. US, 23/97 – odl. US, 65/98, 76/98 – odl. US, 66/00, 66/00 – ORZDen27, 11/01 – odl. US, 54/04 – ZDoh-1 in 18/05 – odl. US.

Zanutta, A., Baldi, P., Bitelli, G., Cardinali, M. in Carrara, A. 2006: Qualitative and quantitative photogrammetric techniques for multi-temporal landslide analysis. *Annals of geophysics* 49 (4/5).

# KAKO NAJBOLJE DOLOČITI PROMETNO RABO? PRIMERJAVA UPORABNOSTI KLASIFICIRANIH AEROFOTO POSNETKOV IN ZEMLJIŠKEGA KATASTRA

**dr. David Bole**

Geografski inštitut Antona Melika, Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti  
david.bole@zrc-sazu.si

UDK: 911.3:711.7(497.4)

## IZVLEČEK

### **Kako najbolje določiti prometno rabo? Primerjava uporabnosti klasificiranih aerofoto posnetkov in zemljiškega katastra**

V prispevku primerjamo uporabnost dveh najpogosteje uporabljenih virov za določanje prometne rabe: zemljiškega katastra na eni strani in klasificiranega aerofoto posnetka na drugi. Analizo natančnosti smo opravili na območju katastrske občine Gabrovica, kjer smo na terenu natančno kartirali vsa zemljišča s prometno rabo in tako dobili dejansko prometno rabo. Analiza je pokazala, da oba vira precenjujeta površino prometne rabe glede na dejansko stanje, a je aerofoto posnetek kljub vsemu natančnejši in primernejši od zemljiškega katastra. V prispevku nato izpostavljamo glavne prednosti in slabosti obeh virov podatkov in posredujemo mnenje o njihovi uporabnosti v bodoče.

## KLJUČNE BESEDE

prometna raba, pozidana zemljišča, prometna geografija, Slovenija, zemljiški kataster, daljinsko zaznavanje, barvni DOF

## ABSTRACT

### **How to measure transport land use? Comparing the usability of classified aerial photographs and land cadastre**

The article compares the usability of the two most commonly used sources for the determination of transportation land use: the land cadastre on the one hand and the classified aerial photograph on the other. The accuracy analysis was carried out on terrain in the area of the cadastral zone Gabrovica, where all transportation areas were mapped thoroughly, which provided the actual transportation land use. The analysis has shown that both sources overestimated the transportation land use according to mapped terrain analysis; however the aerial photograph is nevertheless more accurate and adequate than the land cadastre. The article focuses on the main advantages and disadvantages of both data sources, and presents the opinion on their use in the future.

## KEY WORDS

transportation land use, built-up areas, transport geography, Slovenia, land cadastre, remote sensing, colour digital orthophoto

## 1 Uvod

Slovenija je nedvomno ena izmed držav, kjer se zaradi povečanih potreb po motorizirani mobilnosti temeljito spreminja tudi prostor oziroma raba zemljišč. Dnevna mobilnost zaposlenih in šolajočih v večji meri temelji na avtomobilskem prometu, zato predvidevamo, da se potrebe po vedno novi in izboljšani cestni infrastrukturi povečujejo (Gabrovec in Bole 2009). Analize kažejo, da so se na nekaterih medregionalnih relacijah v pičlih 10 letih tokovi dnevnih vozačev povečali za več kot 100 % (Bole 2011), hkrati pa postajamo vse bolj tolerantni za daljša dnevna potovanja na delo (Drobne 2012).

Na podlagi omenjenih procesov sklepamo, da tako izrazite spremembe v potovalnih navadah potnikov vplivajo na prostor oziroma na rabo zemljišč. Z geografskega vidika je zato določanje prometne rabe pomembno, saj je posredni kazalnik spreminjanja celotne družbe. Raziskave v slovenskem prostoru, ki bi se ukvarjale s prometno rabo so redke. Preučevanje rabe zemljišč ima sicer dolgo tradicijo, a je bilo večinoma usmerjeno le na kmetijsko rabo (glej Gabrovec in Kladnik 1997). Metode najpogostejše temeljijo na preučevanju podatkov iz zemljiškega katastra, dopolnjenega s kartiranjem terena oziroma posameznih pilotnih območij (Gabrovec 1994; Gabrovec in Kladnik 1997; Kladnik in Ravbar 2003; Petek 2005; Bole in ostali 2007). Poleg analize katastra so se razvile računalniško podprte analize daljinskih posnetkov (Krevs 2004; Veljanovski, Kanjir in Oštir 2011). Uveljavile so se različne geostatistične metode določevanja posameznih tipov rabe zemljišč glede na spektralne, radiometrične, prostorske in druge lastnosti daljinskih posnetkov. Te metode imajo to prednost, da lahko pokažejo dejansko stanje rabe zemljišč, ki se pogosto razlikuje od administrativno-formalnega kot je zemljiški kataster. Kljub vsemu pa je tudi pri teh sodobnih metodah vizualna interpretacija ostala prav toliko pomembna kot digitalna interpretacija (Oštir 2006).

A ne glede na metodologijo ali uporabljen podatkovni vir, študij o prometni rabi zemljišč v Sloveniji ni. Obstaja nekaj izračunov, ki večinoma temeljijo na podatkih daljinskega zaznavanja. Eden redkih sistematičnih virov za Slovenijo je CORINE Land Cover, kjer je na podlagi klasifikacije pokrovnosti površja iz satelitskih posnetkov določena tudi pokrovnost s prometnimi površinami. Vendar je prostorska ločljivost neustrezna, saj je najmanjša prostorska enota 25 ha, kar je za določanje prometnih površin prevelika enota (CORINE Land Cover 2000; Gabrovec in Bole 2013). Statistični urad RS je pripravil analizo pokrovnosti tal Slovenije za določena obdobja, kjer je najmanjša prostorska enota 1 ha, kar zopet ne zajema manjših prometnic, na primer poti, pešpoti, kolovozov, manjših cest (Statistični urad RS 2005). Po tej raziskavi je bila površina cest in železnic v Sloveniji 234 km<sup>2</sup>, kar je le okoli polovica površin, ki jo kažejo podatki zemljiškega katastra, ki upoštevajo vse prometnice in tudi parkirne površine. Med slovenskimi geografi je eden redkih, ki se je ukvarjal z urbano rabo tal, Krevs (2004), ki je preučeval izbrana mestna območja v okviru ciljnega raziskovalnega projekta. Bole (2008) je ugotavljal površine parkirišč v novejših poslovnih, nakupovalnih središčih, kjer se je ta delež v Ljubljani gibal med 30 in 42 % vseh površin. Tuje raziskave prometne rabe tal so prav tako redke. Arnold in Gibbons (1996) sta tako ugotavljala, da 20 do 30 % vseh urbanih površin zavzemajo prometne površine, pri poslovnih conah pa ta delež naraste do 60 %.

V osnovi torej opažamo, da ostajata dva glavna vira za določanje prometne rabe: zemljiški kataster in digitalni (letalski, satelitski) posnetki. Oba vira dajeta zelo različne rezultate, ki se pogosto izključujejo. Zato je namen prispevka ovrednotiti, kateri vir je boljši za določanje prometne rabe oziroma ugotoviti njune prednosti in pomanjkljivosti za bodoča raziskovanja prometne rabe. Namen prispevka je tudi v iskanju najprimernejše metodologije za določanje prometne rabe glede na splošno dostopne podatke. Mnogo raziskav namreč temelji na ugotavljanju kompleksnih metodologij za analizo prostorskih podatkov, a temeljijo na virih, ki niso splošno dostopni, ali so dostopni le za omejen teritorij, na primer na LIDAR posnetkih.

## 2 Metodološka zasnova

Raziskavo smo zasnovali na način, da smo med seboj primerjali rezultate določanja prometne rabe, ki so bili pridobljeni na tri načine:

- z analizo digitalnega zemljiškega katastra;
- z nadzorovano klasifikacijo aerofoto posnetka;
- s kartiranjem na terenu.

Kartiranje ne terenu prikazuje dejansko stanje prometne rabe in je »kontrolni« podatek, s katerim smo ovrednotili primernost ter natančnost obeh drugih virov podatkov. Za določanje prometne rabe smo izbrali katastrsko občino Gabrovica, ki se nahaja na kraškem robu v Občini Koper. Ta katastrska občina je bila izbrana zaradi izjemne raznovrstnosti prometne rabe. Na ozemlju Gabrovice so namreč avtocesta, viadukt (Črni Kal), številne gozdne in industrijske poti. Ima tudi raznovrstno poselitve (staro vaško jedro in novejši suburbaniziran del poselitve) in druge značilnosti (senca viadukta na DOF posnetku, kamnolom), ki so zanimive s stališča določanje prometne rabe.

### 2.1 Izbira in opis virov podatkov

Najprej je treba določiti dva vira za določanje prometne rabe, ki sta dostopna za celotno Slovenijo. Prvi vir je digitalni zemljiški kataster, ki ga vodi in posodablja Geodetska uprava RS (2012) in predstavlja uradno evidenco zemljišč kjer je zemljišče opredeljeno s parcelo. Poleg grafičnih podatkov (parcel) so med drugim zapisani tudi atributni podatki o vrsti rabe zemljišč. Podatki so bili pridobljeni leta 2012, veljavni pa so za leto 2011. Drugi vir podatkov, ki smo ga primerjali z zemljiškim katastrom, je aerofoto posnetek ali ortofoto, iz katerega je razvidna dejanska raba v času snemanja. Za ozemlje celotne Slovenije je najbolj primeren posnetek DOF050, ki je izdelan na osnovi barvnih aerofoto posnetkov s prostorsko ločljivostjo 0,5 metra (Geodetska uprava RS 2011). Snemanje DOF050 je bilo opravljeno med letoma 2009 in 2011, kar omogoča tudi časovno primerjavo z digitalnim zemljiškim katastrom, kjer je raba zemljišč opredeljena za leto 2011. Obstajajo tudi natančnejši digitalni posnetki, ki pa niso dosegljivi za celotno Slovenijo, na primer DOF025 ali LIDAR, zato jih zaradi nepopolnega pokritja prostora Slovenije nismo želeli uporabiti v raziskavi.

### 2.2 Uporabljene metode dela

Prva naloga je opredelitev, kaj natančno prometna raba sploh obsega. Zemljiški kataster prometna zemljišča ne uvršča v samostojno kategorijo, temveč med pozidana zemljišča z začetno šifro 2. Znotraj pozidanih zemljišč so natančneje opredeljene še podkategorije, ki predstavljajo prometna zemljišča: ceste, poti, železnice in parkirišča (Gabrovec in Bole 2013). Izločanje prometne rabe v digitalnem katastru ni bilo problematično, saj ima vsaka parcela zapisan tudi atributni podatek o njeni rabi.

Bolj zahtevno je bilo opredeljevanje prometne rabe iz DOF050 posnetkov. Najmanjša enota prometne površine je bila 0,5 m krat 0,5 m, kar določa prostorska ločljivost posnetkov. Za določanje prometne rabe (ceste, poti, železnice in parkirišča) smo uporabili pikselno klasifikacijo, katere glavni namen je razpoznavanje in prepoznavanje elementov z iskanjem zaključenih skupin pikslov (Veljanovski, Kanjir in Oštir 2011). Ker je glavni namen raziskave v tem, da se na najbolj enostaven in praktičen način pokaže uporabnost dveh virov podatkov, smo izbrali nadzorovano klasifikacijo, ki poteka na podlagi učnih vzorcev in referenčnih podatkov ter statističnega razvrščanja v naprej določene razrede (Oštir 2006). To metodo smo izbrali zato, ker smo želeli uporabiti že znano in v obstoječi GIS programski opremi dosegljivo metodo. Program nam je omogočil klasifikacijo barvnega spektra (RGB) aerofoto posnetkov, medtem ko infrardeč spekter za prometne površine ni primeren, saj praviloma ne ločuje med prometnimi in ostalimi pozidanimi površinami (na primer strehami, dvorišči hiš, kamnolomi). Izbrali smo metodo največje verjetnosti (ang. *maximum likelihood classification*). Za določanje rabe je bilo ugotovljeno, da



ima omenjena metoda, običajno oceno natančnost določanja pozidanih površin okoli 80 % (Lu s sodelavci 2012; Al-Ahmadi in Hames 2008). Ker gre za nadzorovano klasifikacijo, smo izbrali 14 učnih vzorcev za različne vrste prometne rabe v različnih situacijah, na primer cestne površina v senci ali v gozdu. Za klasifikacijo posnetkov smo uporabili programsko opremo ArcGIS 10.1.

Za preverjanje smo morali ugotoviti dejansko prometno rabo v KO Gabrovica s kartiranjem na terenu in deloma z vizualno interpretacijo aerofoto posnetkov. Kartiranje se je izkazalo za zahtevno nalogo, saj je bilo potrebno kartirati vsako pot širšo od 0,5 m na območju velikem 2,58 km<sup>2</sup>. Največji problem pri določanju so bile ravno poti, saj so bile nekatere opuščene (veliko je ostankov poti nastalih pri gradnji avtoceste), zarasle ali težje prehodne, zato smo se zanašali na subjektivno oceno o tem ali je določena pot še vedno služi prometu ali ne. Problem je bil tudi pri ločevanju parkirišč od dvorišč. Kot parkirišča smo zato označili le zemljišča, ki so nedvoumno namenjena mirujočemu prometu, na primer z talnimi oznakami, nadstreški, garažami, prometnim znakom in podobno. Kartiranje je bilo opravljeno poleti 2013.

### 3 Rezultati

#### 3.1 Analiza digitalnega zemljiškega katastra

Iz digitalnega zemljiškega katastra smo izločili parcele, ki imajo kot rabo zapisane naslednje prometne kategorije: ceste, poti, železnice ali parkirišča. Na sliki 1 so vidne obsežne površine prometne rabe, ki predstavljajo avtocesto Koper-Ljubljana. V katastru za omenjeno območje ni parkirišč ali železnic, temveč samo ceste in poti.

Rezultati analize kažejo, da po digitalnem katastru na prometno rabo zemljišč odpade 29,6 ha površin, kar predstavlja 11,5 % vseh površin oziroma 85,7 % pozidanih površin v katastrski občini Gabrovica.

#### 3.2 Analiza klasificiranega DOF050 posnetka

S 14 učnimi vzorci klasificiran DOF050 posnetek Gabrovice pokaže nekoliko drugačne rezultate. Vizualno se še vedno opazi potek avtoceste in tudi manjših lokalnih cest, pojavijo pa se tudi nekoliko obsežnejše pozidane površine (slika 2). Opazen je tudi pojav posameznih nestrjenih pikslov prometne rabe. Vidno je tudi, da na nekaterih območjih nadzorovana klasifikacija težje loči med prometnimi in ostalimi pozidanimi površinami.

Rezultati analize kažejo, da prometna raba po klasifikaciji DOF050 posnetka obsega 18,5 ha, kar predstavlja 7,2 % vseh površin oziroma 62,6 % vseh pozidanih površin.

#### 3.3 Dejanska raba (kartiranje)

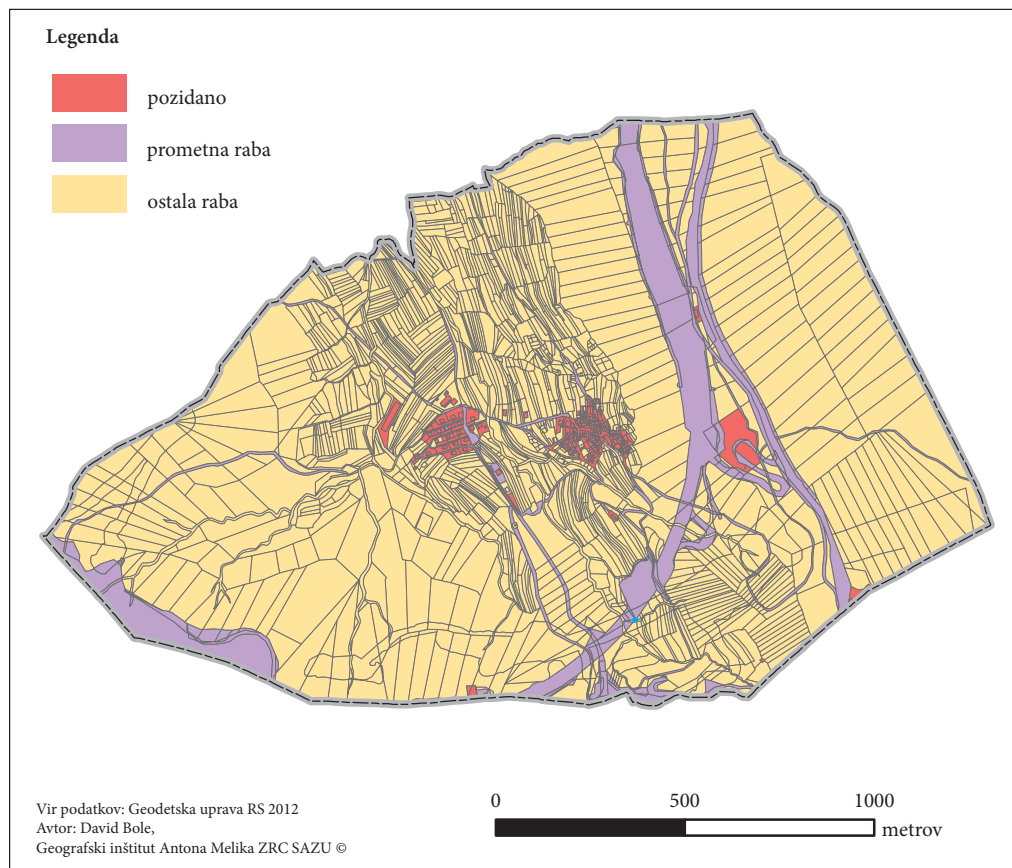
Pri kartiranju dejanske rabe zemljišč smo našli številne poti, ki niso vrisane v kataster in niso vidne iz aerofoto posnetkov. Zlasti so to poti namenjene obdelavi kmetijskih zemljišč in gozdne poti. Veliko je tudi opuščanih poti, ki jih nismo vrisali, saj so sedaj praktično nedostopna vsem oblikam prometa. To so zlasti poti, ki so nekoč vodile do gradbišč za avtocesto, zdaj pa so neprevozne oziroma so postavljene ovire, ki onemogočajo dostop tudi pešcem.

Rezultati analize kažejo, da dejanska prometna raba obsega 14,8 ha zemljišč, kar je 5,7 % vseh površin oziroma 63,5 % vseh pozidanih površin.

### 4 Razprava: prednosti in slabosti virov za določanje prometne rabe

Preglednica 1 razkriva, da oba vira podatkov precenjujeta dejansko prometno rabo. Zlasti podatki zemljiškega katastra so nenatančni, saj so jo precenili za 100 %. Natančnejša primerjava kaže, da je

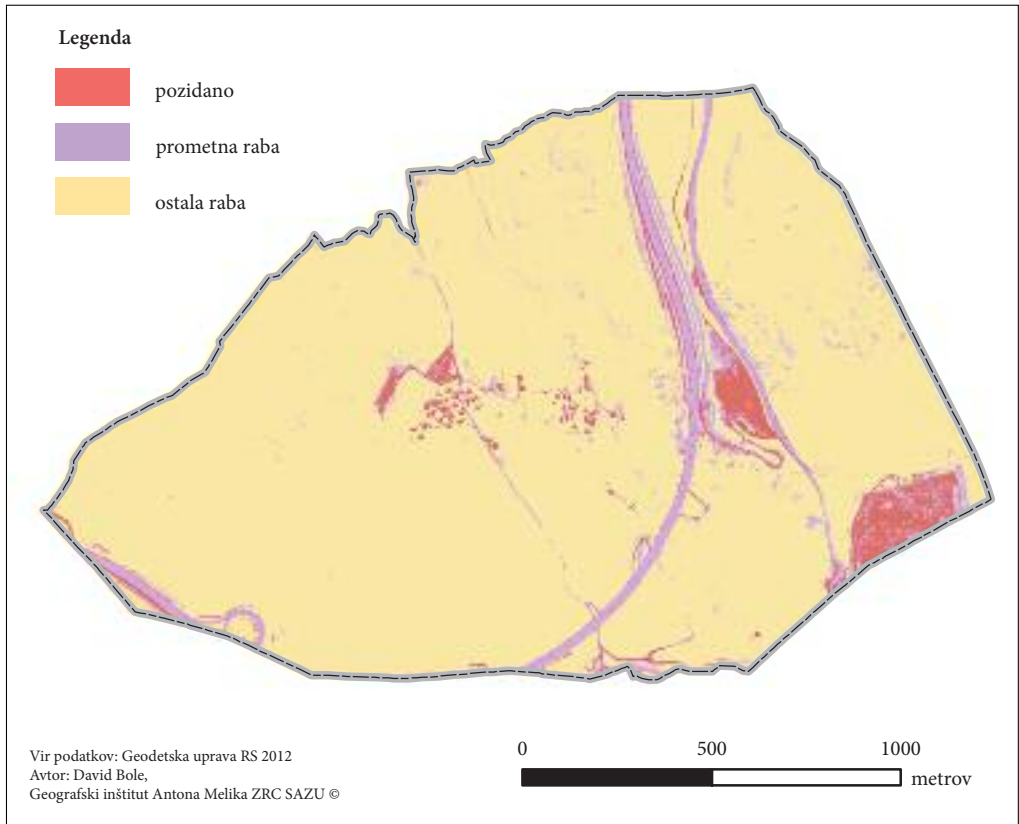
zemljiški kataster izrazito nenatančen pri določanju pomembnejših prometnic, saj kot prometno rabo določa zelenice pri avtocestnih priključkih in širši zelen varovalni pas okoli avtocest. Slabost zemljiškega katastra je tudi ažuriranost prometnih poti. Zlasti gozdne poti so še vedno vrisane, čeprav dejansko



Slika 1: Prometna raba zemljišč v katastrski občini Gabrovica po digitalnem zemljiškem katastru.

Preglednica 1: Primerjava natančnosti določanja prometne rabe zemljišč v katastrski občini Gabrovica.

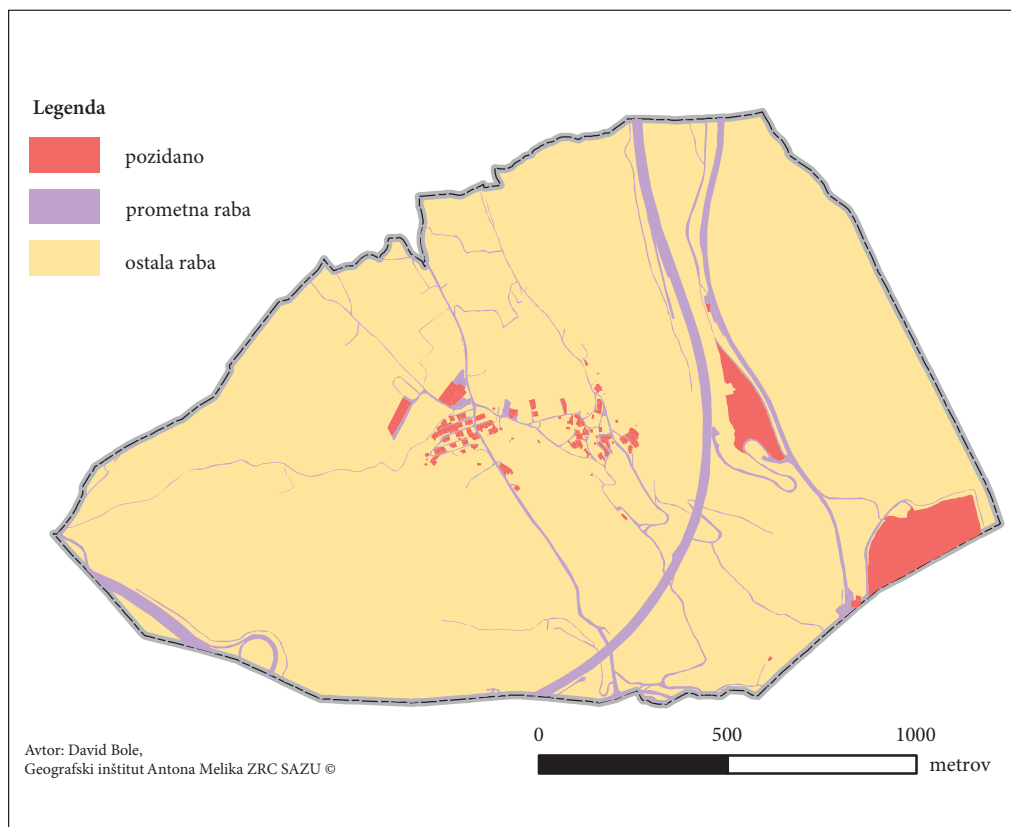
	prometna zemljišča (ha)	pozidana zemljišča (ha)	delež prometnih od vseh zemljišč	delež prometnih od vseh pozidanih zemljišč
zemljiški kataster	29,6	34,6	11,5 %	85,7 %
klasificirani DOF050	18,5	29,5	7,2 %	62,6 %
<b>dejansko stanje</b>	<b>14,8</b>	<b>23,4</b>	<b>5,7 %</b>	<b>63,5 %</b>



Slika 2: Prometna raba zemljišč v katastrski občini Gabrovica po klasificiranem DOF050 posnetku.

na terenu ne obstajajo več oziroma so prekinjene z večjimi prometnicami. Slabost se pokaže tudi na pozidanih območjih. Zemljiški kataster v starem vaškem jedru namreč vse ceste označuje kot »dvorišča« ali celo »stavbišča« in tako tam podceni dejansko prometno rabo. Nenatančnost je vidna tudi pri pozidanih zemljiščih, saj zemljiški kataster obsežen kamnolom uvršča večinoma v kategorijo kmetijske rabe zemljišč. Gotova prednost zemljiškega katastra je, da gre za široko dostopen in trajen podatek in nam omogoča spremljanje tudi zgodovinskih sprememb rabe zemljišč (Gabrovec in Bole 2013).

Precej bolj natančen je enostavno klasificiran DOF050 posnetek. Kljub temu, da nismo opravili nobenih *post-hoc* izboljšav rezultata nadzorovane klasifikacije, je prometna raba precej manjša, kar kaže na to, da so gozdne poti večinoma skrite pod rastjem in zato niso pravilno razvrščene. Zaradi podobnega barvnega spektra je problematično ločevanje med prometnimi in ostalimi pozidanimi zemljišči. Najbolj je to opazno pri napačni klasifikaciji parkirišč (nepravilno razvrščeni v kamnolom ali objekte), dvorišč in tudi nekaterih objektov, ki so razvrščeni kot ceste. Do največjih odstopanj prihaja v gostejše pozidanih območjih, kjer sta oba vira precej nenatančna (slika 4). Prednost klasificiranega DOF posnetka je torej večja natančnost od zemljiškega katastra in tudi večji potencial za nadaljnje študije. Naknadne izboljšave in popravki klasificiranih posnetkov, razvoj novih metod ter vse večja dosegljivost natančnejših posnetkov so prednosti za nadaljnje določanje prometne rabe zemljišč. Slabost tega vira podatkov pa je enotna časovna in prostorska dostopnost, saj posnetki pogosto niso dostopni za vsa območja in se časovno raziskujejo.



Slika 3: Dejanska prometna raba zemljišč v katastrski občini Gabrovica, pridobljena s terenskim kartiranjem.

## 5 Sklep

Na podlagi analize lahko ugotovimo, da je interpretacija prometne rabe iz zemljiškega katastra neprijemna, kar so za pozidana zemljišča ugotovili tudi drugi avtorji (Lisec, Pišek in Drobne 2013). Tudi za zgodovinske analize spreminjanja prometne rabe je potrebna velika previdnost. Večjo zmožljivost za določanje prometne rabe tal imajo klasificirani DOF posnetki, ki se bolj približajo dejanskemu stanju. V našem primeru smo uporabili enostavno metodo nadzorovane klasifikacije barvnega spektra splošno dosegljivega (DOF050) aerofoto posnetka in dobili zadovoljive rezultate. Ob uporabi posnetkov z večjo resolucijo, *post-hoc* obdelavo posnetkov in kombiniranje z drugimi viri ter metodami (na primer z objektno klasifikacijo ali tako imenovano *random forest* učno metodo klasifikacij) se bo natančnost določanja prometne rabe zemljišč najbrž še povečala (Veljanovski, Kanjir in Oštir 2011; Ghosh, Sharma in Joshi 2014).

Raziskovalcem prometnih in drugih pozidanih zemljišč priporočamo nadaljnji razvoj metod klasifikacij splošno dostopnih posnetkov daljinskega zaznavanja, ki bi odpravljale ugotovljene pomanjkljivosti. Hkrati uporabo zemljiškega katastra za določanje pozidane in prometne rabe zemljišč zaradi nezanesljivosti odsvetujemo.

Slika 4: Primerjava natančnosti določanja prometne rabe zemljišč v gosteje pozidanem območju (1: DOF050 posnetek, 2: zemljiški kataster, 3: klasificiran DOF050 posnetek, 4: dejanska raba zemljišč). ► (str. 92)



## 6 Literatura in viri

- Al-Ahmadi, F. S., Hames, A. S., 2008: Comparison of Four Classification Methods to Extract Land Use and Land Cover from Raw Satellite Images for Some Remote Arid Areas, Kingdom of Saudi Arabia. JKAU – Earth Science 20/1. Jeddah.
- Arnold, C., Gibbons, J. 1996: Impervious Surface Coverage: The Emergence of a Key Environmental Indicator. American Planning Association Journal, 62-2, Spring.
- Bole, D. 2011: Changes in Employee Commuting: A Comparative Analysis of Employee Commuting to Major Slovenian Employment Centers from 2000 to 2009. Acta geographica Slovenica 51-1. Ljubljana.
- Bole, D., 2008: Ekonomska preobrazba slovenskih mest. Geografija Slovenije 19. Ljubljana.
- Bole, D., Gabrovec, M., 2009: Dnevna mobilnost v Sloveniji. Georitem 11. Ljubljana.
- Bole, D., Petek, F., Ravbar, M., Repolusk, P., Topole, M. 2007: Spremembe pozidanih zemljišč v slovenskih podeželskih naseljih. Georitem 5. Ljubljana.
- CORINE Land Cover, 2000. Medmrežje: <http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover> (13. 3. 2013).
- Drobne, S. 2012: Vpliv razdalje na tokove delavcev vozačev v Sloveniji. GIS v Sloveniji 11. Ljubljana.
- Gabrovec, M., Bole, D. 2013: Rast prometnih površin na Gorenjskem v zadnjih 200 letih. Zborovanje slovenskih geografov 2013. Ljubljana.
- Gabrovec, M., Kladnik, D. 1997: Some new aspects of land use in Slovenia. Geografski zbornik 37. Ljubljana.
- Ghosh, A., Sharma, R., Joshi, P. K. 2014: Random forest classification of urban landscape using Landsat archive and ancillary data: Combining seasonal maps with decision level fusion. Applied Geography 48. Amsterdam.
- Geodetska uprava RS 2011: Digitalni ortofoto DOF050. Elektronski vir.
- Geodetska uprava RS 2012: Digitalni zemljiški kataster. Elektronski vir.
- Kladnik, D., Ravbar, M. 2003: Členitev slovenskega podeželja. Geografija Slovenije 8. Ljubljana.
- Krevs, M., 2004: Spreminjanje urbane rabe tal v Ljubljani. Dela 22. Ljubljana.
- Lisec, A., Pišek, J., Drobne, S. 2013: Analiza primernosti evidence rabe kmetijskih in gozdnih zemljišč za določanje sprememb rabe zemljišč na primeru Pomurske statistične regije. Acta geographica Slovenica 53-1. Ljubljana.
- Lu, D., Li, G., Moran, E., Freitas C. C., Dutra, L., Sidnei, J., Sant'Anna, S. 2012: A comparison of maximum likelihood classifier and object-based method based on multiple sensor datasets for land-use/cover classification in the Brazilian Amazon. Proceedings of the 4<sup>th</sup> GEOBIA. Rio de Janeiro.
- Oštir, K., 2006: Daljinsko zaznavanje. Ljubljana.
- Petek, F. 2005: Spremembe rabe tal v slovenskem alpskem svetu. Geografija Slovenije 11. Ljubljana.
- Veljanovski T., Kanjir U., Oštir K. 2011: Objektno usmerjena analiza podatkov daljinskega zaznavanja. Geodetski vestnik 55-4. Ljubljana.



## KARTA POTENCIALNIH NARAVNIH RASTIŠČ POLETNE GOMOLJIKE

**Janez Bergant, dr. Borut Vrščaj**

Kmetijski inštitut Slovenije

jani.bergant@kis.si, borut.vrscaj@kis.si

UDK: 582.282.163:581.526(497.4)  
659.2:004:91(497.4)

### IZVLEČEK

#### **Karta potencialnih naravnih rastišč poletne gomoljike**

V prispevku predstavljamo karto potencialnih naravnih rastišč poletne gomoljike, ki smo jo izdelali z uporabo večkriterijskega vrednotenja pedoloških in ostalih okoljskih vplivnih dejavnikov v GIS.

Ugotavljamo, da neprimerna območja obsegajo 73 % površin Slovenije, ostalih 27 % je potencialno primernih. Med potencialno primernimi območji je 44 % površin takšnih, ki imajo po oceni izjemno velik potencial. V grobem ugotovimo, da so rastišča najbolj razširjena na območju submediteranskih pokrajin s karbonatno matično podlago in območja Dinarskokraških podolij in ravnin. Sicer pa so rastišča gomoljik navadno manjšega obsega, zato se lahko pojavljajo zelo lokalno širom celotne Slovenije, kjer so rastiščni pogoji ugodni.

### KLJUČNE BESEDE

poletna gomoljika, *Tuber aestivum*, gomoljkarstvo, GIS, večkriterijsko vrednotenje, napovedovalni model

### ABSTRACT

#### **Map of potential natural habitats for summer truffles**

In this article we present the algorithms of GIS model for determination of potencial natural sites for summer truffle in Slovenia. The final result is the map which was made using the multi-criteria evaluation of pedological and other environmental factors in GIS.

According to the map 73% of Slovenia is inappropriate for natural sites of summer truffle. On the other hand 27% of Slovenia is potentially suitable. Among suitable areas there are 44% with very good natural conditions/potential. Potential natural sites are most concentrated in the Submediteranian region with carbonate parent material and on the Dinaric-karstic plains. Summer truffles can be found almost across the whole Slovenia where local conditions are sufficiently favourable.

### KEY WORDS

summer truffle, *Tuber aestivum*, trufficulture, GIS, multi-criteria evaluation, GIS modelling



## 1 Uvod

Podzemne glive so organizmi, ki celotno življenjsko obdobje preživijo v tleh. Med njimi so najbolj zanimive užitne vrste iz rodu gomoljik (Tuber), ki jim pogovorno pravimo tudi tartufi, kar je poslovenjeno italijansko ime za gomoljike (Piltaver in Vrščaj 2013). V gastronomskem smislu so užitne gomoljike specialiteta in dejstvo je, da so ena od najbolj tržno cenjenih živil.

Iskanje gomoljik zahteva veliko znanja, izkušenj in časa. Učinkovito jih iščemo le z izurjenimi živalmi, navadno s psi. Zaradi skromnega števila naključnih najdb gomoljike zmotno veljajo za redke (Breitenbach in Kränzlin 1984), sicer pa so njihova naravna rastišča razširjena prek celotnega območja zmernega podnebnege pasu, njihova pogostost in pestrost pa je večja v predelih s toplejšim podnebjem (Piltaver in Ratoša 2006).

V okviru projekta CRP smo se osredotočili na poletno gomoljiko (Tuber aestivum), ki je ena od tržnih vrst gomoljik z najširšo ekološko nišo. Rastišča te gomoljike v Sloveniji niso omejena le na obsredozemske pokrajine, pač pa jih najdemo povsod po Sloveniji, kjer so lokalni rastiščne razmere ustrezne. Ob tem dejstvu se odpirajo možnosti razvoja gomoljkarstva (pomeni vzpostavitev nasadov in gojenje gomoljik) kot nove dopolnilne dejavnosti na kmetijah.

## 2 Zasnova modela

Za izdelavo karte potencialnih naravnih rastišč poletne gomoljike smo izbrali metodo večkriterijskega vrednotenja dejavnikov (multikriterijsko odločanje). S to metodo dobimo informacijo, katera območja so bolj in katera manj primerna z vidika več dejavnikov (Ciglič 2008). Ključni koraki za analizo podpore odločanju so (Eastman 1997; Eastman 2006): izbira cilja; določitev spremenljivk/kriterijev; standardizacija spremenljivk; izvedba podpore odločanju; vrednotenje rezultatov.

Za obdelavo prostorskih podatkov smo uporabljali programski paket ArcGIS ArcInfo 9.3. Večino rastrskega procesiranja smo zapisali v programskem jeziku AML (Arc Macro Language), ki ga izvedemo v modulu ArcInfo Workstation. Analize atributnih podatkov smo opravili s programom MS Excel 2007. Algoritmi izdelanega podatkovnega modela za poizvedovanje po atributnih podatkih parametrov tal so potekali v bazi ORACLE. Do baz podatkov smo dostopali z uporabo vmesnika Toad for Oracle 10.1.1.8. Pri standardizaciji podatkov smo za izdelavo funkcij uporabljali program Geogebra 4.2.6.

## 3 Izbor kriterijev

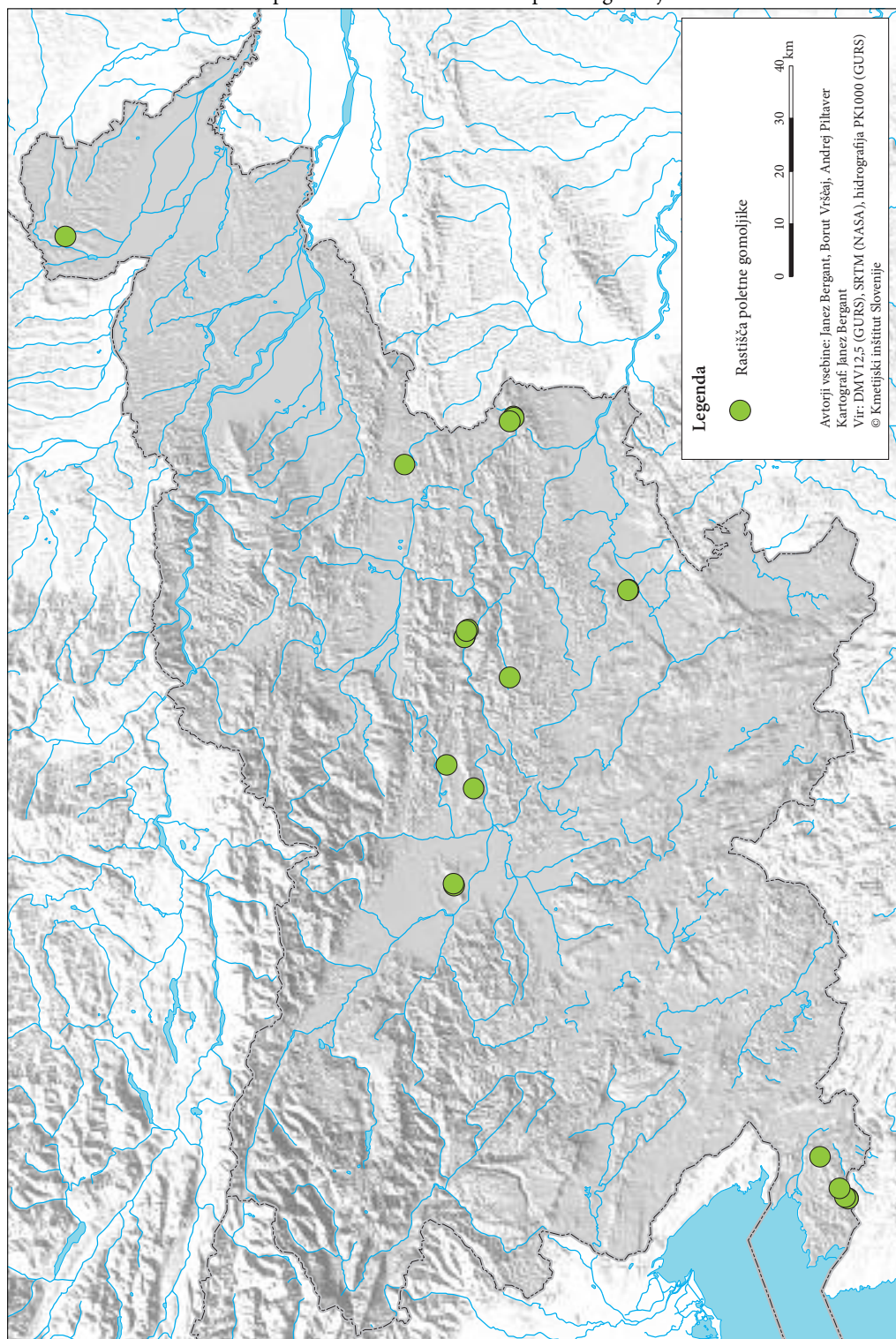
Pri izgradnji prostorskega modela je podlaga za odločanje kriterij, ki ga lahko izmerimo in ovrednotimo. Kriterije glede na vrsto vpliva ločimo na dejavnike in na omejitve (Eastman 1997). Posamezen dejavnik poveča ali zmanjša stopnjo celotne primernosti za določen cilj. Na drugi strani omejitve uporabimo za omejitev obravnavanih alternativ (Krevs 2006). V našem primeru vhodni sloji predstavljajo kriterije, ki opredeljujejo rastišča poletne gomoljike.

Med oktobrom 2012 in februarjem 2013 smo v sodelovanju z Inštitutom za sistematiko višjih gliv (ISVG), opravili terenski popis reprezentativnih rastišč gomoljik. Poletno gomoljiko smo locirali na 21 rastiščih po Sloveniji. Lokacije smo popisali, vzorčili in opravili analize tal. Na podlagi rezultatov analiz in podatkov iz literature smo oblikovali nabor ključnih kriterijev ter opredelili njihove mejne vrednosti. Te smo nato uporabili pri izgradnji modela.

V skupino pedoloških kriterijev smo uvrstili pH tal, vsebnost organske snovi v tleh (%), C/N razmerje, vsebnost kalcijevega karbonata v tleh, vsebnost peska, melja in gline (vsi %) ter globino tal (cm).

*Slika 1: Lokacije rastišč poletne gomoljike. ► (str. 56)*

## Karta potencialnih naravnih rastišč poletne gomoljike



Uporabili smo podatke laboratorijskih analiz in terenskih opisov vzorcev tal iz ORACLE baze eTLA. Obdelali smo podatke 1644 pedoloških profilov, izkopanih v obdobju izdelave Pedološke karte 1 : 25.000 (PK25) (MKGP in CPVO 2001). Ker primernost tal za rast gomoljik opredeljuje zgornji sloj tal, smo analizirali podatke horizontov do globine 30 cm. Rezultat algoritmov podatkovnega modela v SQL je poizvedovalna tabela z vsemi pedološkimi podatki. Za prostorski prikaz teh podatkov smo uporabili sloj talnih kartografskih enot Pedološke karte Slovenije 1 : 25.000 (MKGP in CPVO 2001), ki jo grafično in atributno dopolnjujemo na Kmetijskem inštitutu Slovenije (KIS 2006).

Med reliefne kriterije smo uvrstili naklon in ukrivljenost površja, ki smo ju izvedli iz digitalnega modela višin (GURS 2005) ter kriterija količine prejete sončne energije. Za slednjo podatkov nismo imeli, zato smo njen vpliv ocenili relativno iz sloja ekspozicij in naklonov. Med klimatske kriterije smo uvrstili povprečno letno temperaturo zraka (ARSO 2011a) in povprečno letno višino padavin za obdobje 1971–2000 (ARSO 2011b). Podatke smo prejeli kot rastrske sloje v resoluciji 1 krat 1 km. V skupino biotskih in antropogenih dejavnikov smo uvrstili prisotnost mikoriznih drevesnih vrst, ki smo jo ocenili iz deležev drevesnih vrst v zbirki podatkov o lesnih zalogah (Gozdarski inštitut Slovenije 2010), bližina dreves in grmičevja ter vrsto rabe tal. Slednja dva kriterija smo pridobili iz sloja dejanske rabe tal (MKO 2012).

Iz že omenjenih podatkovnih slojev smo izdelali sloje območij nad 1000 m nadmorske višine, območja tal brez vsebnosti kalcijevega karbonata, vlažna rastišča, kislila rastišča, območja, kjer ni tal (na primer visokogorje) ter območja, kjer ni mikoriznih rastlin. Vse smo uporabili kot omejitve. Kot dodatne omejitve smo v naslednji stopnji uporabili tudi območja pogostih in redkih poplav (ARSO 2012a; ARSO 2012b; ARSO 2012c) ter območja z gorskim podnebjem (Ogrin 1996).

Za vsak kriterij smo izdelali rastrski sloj ločljivosti 12,5 m. Vsak vhodni sloj predstavlja enega ali več kriterijev, zato je lahko v procesu odločanja uporabljen tudi večkrat.

## 4 Standardizacija

Izvedli smo standardizacijo podatkov, da smo kriterijem vzpostavili medsebojno primerljivost. Dejavnike tipa številskih spremenljivk smo standardizirali zvezno z uporabo matematičnih izrazov. Za vsako spremenljivko smo določili nekaj referenčnih točk, skozi katere smo izrisali funkcijo in za njo dobili matematični izraz. Funkcija omogoča zvezno določanje primernosti od najmanj do najbolj ustrezne. Kategorične spremenljivke smo standardizirali na podlagi ekspertne ocene in pripisa kazalca primernosti posamezni kategoriji.

Omejitve so Boolove podobe, ki prikazujejo primerna območja ter območja, ki so absolutno neprimerna (Dular 2007). Vsa območja, ki so bila z vidika omejitev neprimerna, smo opredelili z vrednostjo 0.

## 5 Obteženo prekrivanje

Kriterije smo po standardizaciji med seboj združili z metodo obteženega prekrivanja. Na rezultat na posamezni celici vplivajo standardizirane vrednosti dejavnikov, njihove uteži ter vrednosti omejitev. Na vsaki celici se izvede postopek, ki ga lahko zapišemo z enačbo (Eastman 1997):  $KP = \sum WiXi \times \Pi Cj$ ,

kjer je KP = kazalec primernosti, Wi = utež za dejavnik i, Xi = standardizirana vrednost za dejavnik i, Cj = standardizirana vrednost omejitve j.

Za določanje uteži za dejavnike smo uporabili postopek medsebojne primerjave, tako imenovani AHP (*analytical hierarchical process*). Gre za primerjanje vsakega dejavnika z vsakim posebej in določanje relativnega pomena posameznega dejavnika znotraj teh parov dejavnikov (Ciglič 2008). Relativni pomen smo določali na podlagi stopenjske lestvice, ki zavzema razmerja med 1 : 9 (ekstremno manj pomemben) in 9 : 1 (ekstremno bolj pomemben) (Eastman 2006). Najprej smo združili v enoten sloj vse abiotične dejavnike, ki smo jim pripisali naslednje uteži (preglednica 1).

*Preglednica 1: Uteži za sloje, ki predstavljajo abiotske dejavnike rastišč poletne gomoljike določene s postopkom medsebojne primerjave.*

sloji abiotskih DEJAVNIKOV	utež (%)
delež gline (%)	5,5
delež melja (%)	7,5
delež peska (%)	7,0
ekspozicija (° azimuta)	15,9
globina (cm)*	6,8
karbonatnost opis	16,9
koeficient ukrivljenosti površja (skupni)	6,1
naklon (°)	3,3
organska snov (%)	3,3
pH	5,3
povprečna letna temperatura (1971–2000) (°C)	13,7
razmerje C/N	0,9
povprečna letna količina padavin (1971–2000) (°C)	7,7

Konsistenčno razmerje za uteži je 8,7 kar pomeni, da smo uteži določili konsistentno ( $CR < 10\%$ ). Nato smo izveden sloj abiotskih in biotskih dejavnikov med seboj prekrili z uporabo razmerja uteži 60 : 40 v korist abiotskih dejavnikov. Za takšno razmerje smo se odločili zaradi dejstva, da so abiotski dejavniki prvi in najpomembnejši pogoj, da sploh lahko govorimo o potencialu za rast poletne gomoljike. Drugi pogoj je seveda ustrezna rastlinska vrsta, ki se na neki lokaciji lahko pojavi ali pa ne. Z uporabo omenjenega razmerja smo tako tudi območjem, za katera smo ocenili, da so z vidika biotskih dejavnikov neprimerni in hkrati izkazujejo velik potencial z vidika abiotskih dejavnikov, pripisali nek potencial. Podatki slojev, ki sestavljajo biotske dejavnike, so namreč premalo natančni oziroma bi bilo tveganje preveliko, da bi jih povsod uporabili kot izločitveni pogoj. Poleg tega je takšno razmerje dalo dovolj dobre rezultate pri preverjanju modela. Tako je nastal sloj, ki združuje primernosti z vidika vseh dejavnikov. Za končno karto smo slednjega prekrili še s slojem omejitev.

## 6 Rezultati in razprava

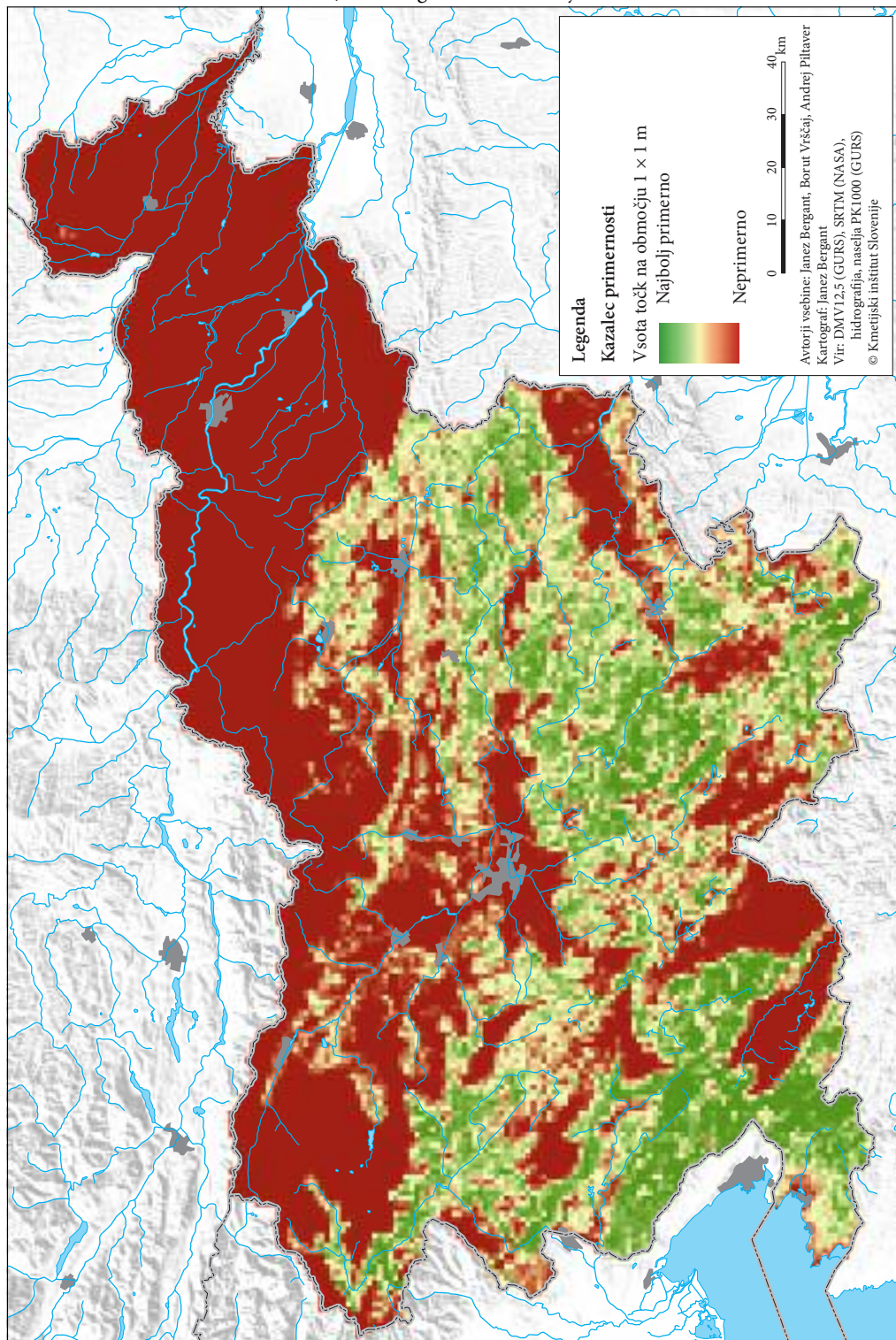
Rezultat je karta, ki ocenjuje primernost prostora za rastišče poletne gomoljike, izraženo s kazalcem primernosti (izražen v točkah), kjer 0 pomeni v celoti neprimerno, 100 pa najbolj primerno. Večja kot je vrednost kazalca, večji potencial ima prostor za naravno rastišče gomoljik oziroma večja je verjetnost, da tam raste obravnavana vrsta gomoljike. V prispevku prikazujemo karto primernosti območij na ravni celotne Slovenije v resoluciji 1 krat 1 km (generalizirana verzija). Karto smo izdelali tako, da smo v območju 1 km<sup>2</sup> sešteli vse vrednosti celic sloja primernosti v resoluciji 12,5 m. Večja vsota predstavlja večjo primernost.

Na podlagi te ocene je v Sloveniji 73 % ozemlja (14.763 km<sup>2</sup>) absolutno neprimernih in 27 % ozemlja (5500 km<sup>2</sup>) potencialno primernih za naravna rastišča poletne gomoljike. Od tega je na kar 44 % (2400 km<sup>2</sup>) kazalec primernosti ocenjen na več kot 80.

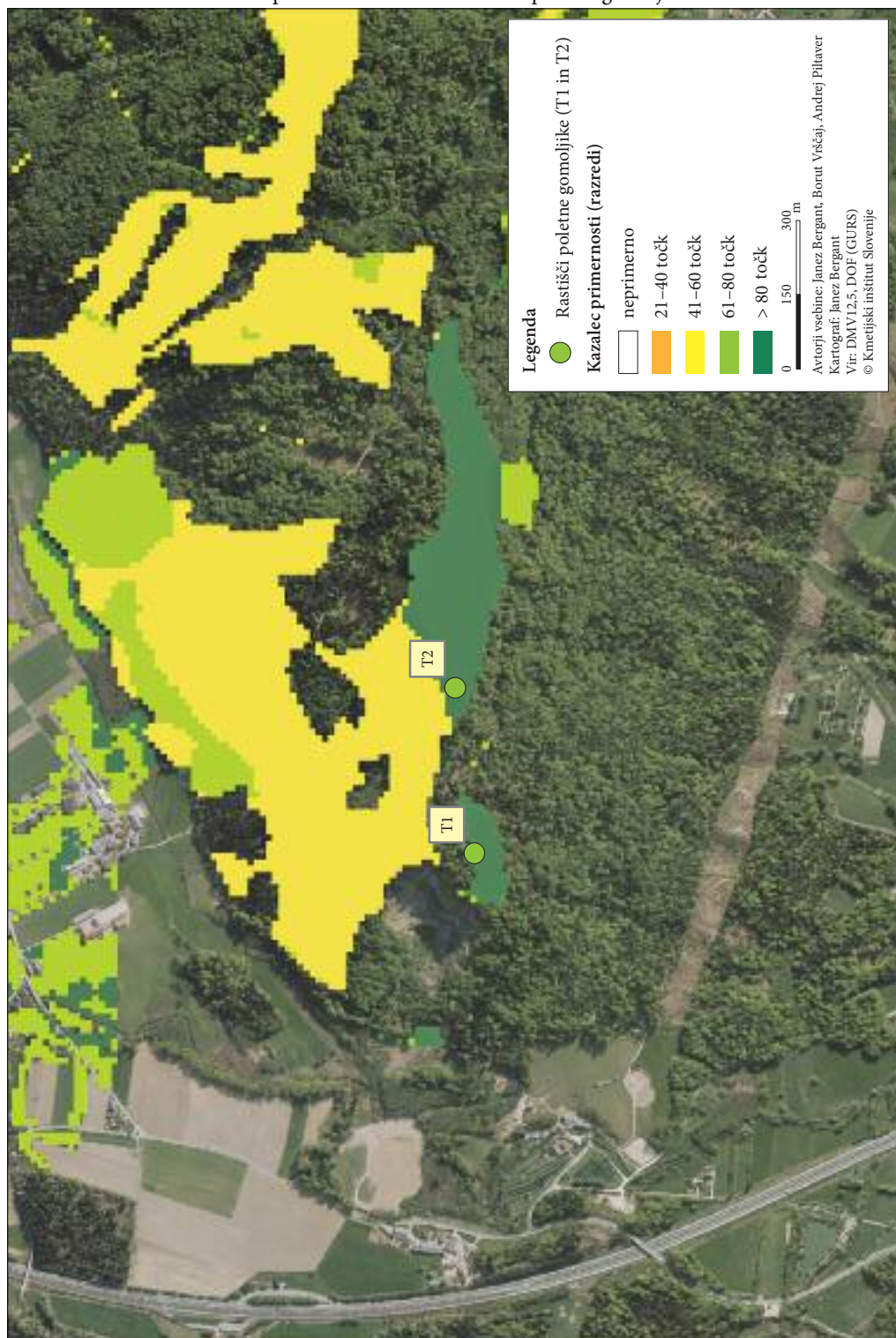
*Slika 2: Karta primernosti prostora za naravna rastišča poletne gomoljike. ► (str. 100)*

*Slika 3: Prikaz rezultatov modela in dveh dejanskih rastišč poletne gomoljike v okolici Ljubljane, primer dobre napovedne moči modela. ► (str. 101)*

# Janez Bergant, Borut Vrščaj



# Karta potencialnih naravnih rastišč poletne gomoljike



Kazalec primernosti smo razdelili v 6 razredov. Porazdelitev površin kaže, da med vrednostjo 1 do 20 ni nobene površine, v razredu 21 do 40 je 0,1 % površin (21 km<sup>2</sup>), v razredu 41 do 60 6,4 % (1299 km<sup>2</sup>), v razredu 61 do 80 8,8 % (1780 km<sup>2</sup>) in v razredu 81 do 100 11,8 % (2400 km<sup>2</sup>). Ostalih 73 % ozemlja Slovenije je ocenjenih kot neprimernih.

Preverjanje rezultatov prostorskega modela potencialnih rastišč je potekalo tako, da smo v GIS-u za vseh 21 lokacij rastišč poletne gomoljike vzeli vrednosti končnega sloja primernosti in izračunali opisne statistike. Povprečna vrednost kazalca primernosti na lokacijah rastišč, dobljena iz končne karte, je 68 točk. Od 21 lokacij, 4 lokacije po modelu napačno spadajo v območje, kjer so razmere za rast poletne gomoljike absolutno neprimerni. Če odstranimo te 4 lokacije, znaša povprečna vrednost na ostalih 17 lokacijah visokih 84 točk, koeficient variacije pa se zniža iz 53 na 16 %. Če vrednosti kazalca primernosti iz karte na lokacijah rastišč kategoriziramo v razrede ugotovimo, da se 14 rastišč od 21 (67 %) uvršča v razred najbolj primerno (KP > 80). Ugotavljamo, da je napovedna moč prostorskega modela dobra.

Poleg tega smo rezultate modela testno preverili tudi s terenskimi raziskavami. Z rezultati smo lahko zadovoljni, saj smo s pomočjo karte našli in potrdili nekaj novih rastišč poletne gomoljike v okolici Ljubljane.

Trenutno ne razpolagamo z zadostnim številom podatkov, ki bi omogočali natančnejšo opredelitev rastiščnih pogojev tako specifičnega organizma, kot so gomoljike. Opraviti bi bilo treba še dodatne terenske raziskave in analize vzorcev tal, za kar pa sredstva v okviru projekta niso zadoščala. Prav tako bi za izdelavo kart v večji prostorski ločljivosti rabili natančnejše prostorske podatke, ki pa trenutno za marsikateri izbrani kriterij ne obstajajo ali pa nam niso dostopni.

## 7 Sklep

Ugotavljamo, da je 27 % površin Slovenije potencialno primernih za rast poletne gomoljike. Od tega je na 44 % površin kazalec primernosti ocenjen na več kot 80 točk. V Sloveniji poletno gomoljiko najdemo v njenem širšem delu, kjer so ustrezne naravne razmere. To dokazujejo tudi dejanska najdišča. V grobem lahko ugotovimo, da so neprimerna za rast poletne gomoljike območja subpanonskih pokrajin, alpskih pokrajin, dinarskokraških planot in hribovij ter območja večjih kotlin Slovenije. Na drugi strani so najprimernejša območja submediteranskih pokrajin s karbonatno matično podlago in območja dinarskokraških podolij in ravnikov.

Model prikazuje veliko razširjenost zelo primernih območij za rast poletne gomoljike. Takšna razprostranjenost je po vsej verjetnosti celo pretirana. Kljub temu so rezultati validacije rezultatov prostorskega modela dobri, saj je na 14 rastiščih (67 %) kazalec primernosti glede na karto večji kot 80 točk (KP > 80). Prostorski model tako ocenjujemo kot primerne za podporo odločanju pri iskanju potencialnih naravnih rastišč poletne gomoljike. Kakovost prostorskega modela je možno izboljšati z nadaljnjimi raziskavami rastiščnih pogojev in izdelavo natančnejših in zanesljivih prostorskih podatkov.

## 8 Zahvala

Prispevek prikazuje enega od rezultatov raziskave CRP projekta Možnosti in omejitve pri nabiranju gob v gozdovih in razvoj gomoljkarstva v Sloveniji. Avtorja se zahvaljujeta vsem sodelujočim v projektu, še posebej pa gospodu Andreju Piltaverju iz Inštituta za sistematiko višjih gliv za pomoč pri terenskem delu in interpretaciji podatkov. Posebna zahvala gre tudi vodji projekta dr. Dušanu Jurci in dr. Nikici Ogrisu za pripravo nekaterih podatkov.

## 9 Viri in literatura

- Agencija RS za okolje (ARSO) 2011a: Povprečna letna temperatura zraka za obdobje 1971–2000. Podatkovna zbirka ARSO.
- Agencija RS za okolje (ARSO) 2011b: Povprečna letna količina padavin – korigirana za obdobje 1971–2000. Podatkovna zbirka ARSO.
- Agencija RS za okolje (ARSO) 2012a: Opozorilna karta poplav (katastrofalna območja poplavljanja). Podatkovna zbirka Geoportal ARSO.
- Agencija RS za okolje (ARSO) 2012b: Opozorilna karta poplav (redka območja poplavljanja). Podatkovna zbirka Geoportal ARSO.
- Agencija RS za okolje (ARSO) 2012c: Opozorilna karta poplav (pogosta območja poplavljanja). Podatkovna zbirka Geoportal ARSO.
- Breitenbach J., Kränzlin F. 1984: Pilze der Schweiz, Band 1. Mykologia. Luzern.
- Ciglič, R. 2008: Večkriterijsko vrednotenje v prostorskem načrtovanju. Geografski vestnik 80-1.
- Geodetska uprava Republike Slovenije (GURS) 2005: DMV 12,5. Javne informacije Slovenije. Ljubljana.
- Dular, J. 2007: Uporaba metod večkriterijskega vrednotenja v geografskem informacijskem sistemu. Diplomsko delo, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, Ljubljana.
- Eastman, J. 1997: Idrisi for Windows, User's Guide, Version 2.0. 2. izd. Worcester.
- Eastman, J. 2006: Idrisi Andes Tutorial, 15. izd. Worcester.
- Gozdarski inštitut Slovenije 2010: Podatki lesnih zalog posameznih drevesnih vrst – prostorski sloj 1 : 5000.
- Kmetijski inštitut Slovenije (KIS) 2006: Dopolnjena digitalna pedološka karta Slovenije 1 : 25.000 (PK25) in relacijska zbirka podatkov tal Slovenije.
- Krevs, M. 2006: Podpora odločanju: študijsko gradivo pri predmetu Kvantitativne metode za geografe 2. Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo. Ljubljana.
- Ministrstvo za kmetijstvo gozdarstvo in prehrano (MKGP) in Center za pedologijo in varstvo okolja (CPVO), Oddelek za agronomijo, Biotehniška fakulteta 2001: Digitalna pedološka karta Slovenije 1 : 25.000 (PK25) in pedološki profili.
- Ministrstvo za kmetijstvo in okolje (MKO) 2012: Podatki dejanske rabe zemljišč 1 : 5.000 (10. 9. 2012).
- Ogrin, D. 1996: Podnebni tipi v Sloveniji, prostorski sloj. Geografski vestnik 68. Ljubljana.
- Piltaver, A., Ratoša, I. 2006: Prispevek k poznavanju podzemnih gliv v Sloveniji. Gozdarski vestnik 64.
- Piltaver, A., Vrščaj, B. 2013: O gomoljicah – Možnosti gomoljikarstva v Sloveniji. Kmečki glas 70-42, 16. 10. 2013.





# OCENA UPRAVIČENOSTI PLANINSKIH PAŠNIKOV DO KMETIJSKIH SUBVENCIJ Z METODO OBJEKTNE KLASIFIKACIJE

**Nika Mesner, mag. Katja Oven**

Geodetski inštitut Slovenije

nika.mesner@gis.si, katja.oven@gis.si

**Saša Vidmar**

Geodetska družba

sasa.vidmar@gdl.si

**Dejan Jevšnik**

Geodetski zavod Celje

dejan.jevsnik@gz-ce.si

UDK: 528.7:633.2.033

## IZVLEČEK

**Ocena upravičenosti planinskih pašnikov do kmetijskih subvencij z metodo objektne klasifikacije**  
Planinski pašnik poleg travnatih površin zajema tudi delež peščenih, skalnatih, vodnih in zaraščenih površin, kar zmanjšuje njegovo koristno površino za pašo. Za pridobitev kmetijskih subvencij je treba natančno določiti zunanjo mejo ter upravičeno površino pašnika, ki je odvisna od pokrovnosti tal in zaraščenosti. Planinski pašniki običajno obsegajo zelo velika območja, od nekaj 10 ha pa tudi do več 10 km<sup>2</sup>, zato je uporaba samodejnih postopkov ocene upravičenosti praktično edina smotrna metoda zajema podatkov. V prispevku je predstavljena metodologija določitve upravičenosti pašnika do kmetijskih subvencij z metodo objektne klasifikacije. Na podlagi rezultatov objektne klasifikacije je izračunana upravičena površina 66 planinskih pašnikov v Makedoniji.

## KLJUČNE BESEDE

planinski pašniki, objektna klasifikacija, fotointerpretacija, pokrovnost tal, zaraščenost

## ABSTRACT

**Eligibility assessment of highland pastures to agricultural subsidies using object-based classification**  
Highland pastures in addition to grassland also include some barren, water, overgrowth and other surfaces, which reduces its useful area for grazing. For agricultural subsidies the highland pastures must have defined boundary and eligible area based on land cover and overgrown land data determined. Highland pastures usually cover a very large area (from 10 ha to some 10 km<sup>2</sup>) where use of automated processes for assessment of eligible area is practically the only reasonable method of data collection. This paper presents a method of assessment the highland pasture eligibility by using object-based classification. The developed methodology was used to assess the eligibility of 66 highland pastures in Macedonia, with a total area of 1642 km<sup>2</sup>.

## KEYWORDS

highland pastures, object-based classification, fotointerpretation, land cover, overgrown terrain

## 1 Uvod

Skupna kmetijska politika je ena od najpomembnejših politik Evropske skupnosti, saj je temu segmentu namenjenega kar 40 % evropskega proračuna za obdobje 2013–2020 (Področja politik Evropske unije 2014). Mehanizmi skupne kmetijske politike vključujejo med drugim tudi neposredna plačila (tako imenovane kmetijske subvencije), ki predstavljajo stalen dohodek za kmetovalce in imajo pozitiven vpliv na ohranjanje kmetijske pridelave v Evropski skupnosti. Med upravičene kmetijske površine za pridobitev kmetijskih subvencij se uvrščajo tudi planinski pašniki.

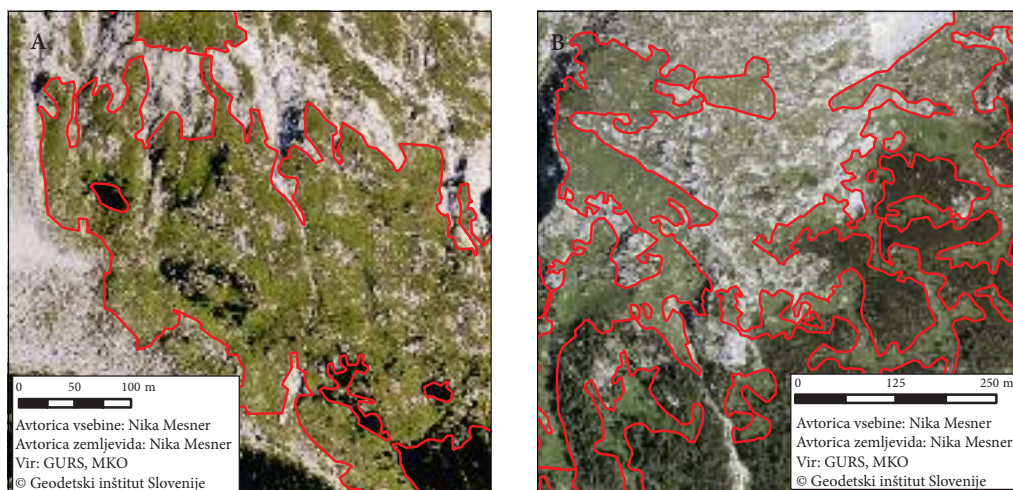
Planinski pašniki so gorska območja, ki jih Evropska direktiva o gorskem in hribovskem kmetovanju (1975) opredeljuje kot območja z omejenimi možnostmi kmetijske pridelave. Planinski pašnik poleg travnatih površin obsega tudi površine, ki so popolnoma ali delno neprimerne za pašo (skalnate, vodne, peščene ter zaraščene površine). Kmetijske subvencije so dodeljene samo za upravičeno površino pašnika, to je za površino pašnika, ki je primerna za pašo. Zato je treba planinski pašnik evidentirati tako, da omogoča določitev upravičene površine. Ločimo dva načina (Beaufoy s sodelavci 2011):

- meja pašnika obsega samo upravičene površine,
- meja pašnika obsega vse površine (upravičene in neupravičene), ki se v celoti ali delno uporabljajo za pašo.

Planinski pašniki v Sloveniji se raztezajo na nadmorski višini od 750 do 2500 m oziroma do nadmorske višine, ki še omogoča pašo (Zakon o kmetijstvu 2008). Za evidentiranje pašnikov se uporablja prvi način, kjer meja pašnikov predstavlja območje 100 % upravičene površine do pridobitve kmetijskih subvencij. Ta način evidentiranja pašnikov ima dve pomanjkljivosti:

- natančna in enolična določitev meje med 10 0 % upravičeno in 100 % neupravičeno površino je v visokogorju nemogoča,
- zaradi tesnega prepletanja različnih razredov pokrovnosti tal na planinskem pašniku (na primer travnate površine, površine v zaraščanju, odprto zemljišče ...) je zelo težko opredeliti jasne kriterije za izločanje neupravičenih površin.

Posledica teh pomanjkljivosti je nepravilna dodelitev kmetijskih subvencij. V nekaterih primerih iz območja pašnika niso izločene vse neupravičene površine (slika 1 a), zaradi česar je evidentirana upravi-



Slika 1: Evidentirana površina pašnika na pobočju Rombona (a) je prevelika, saj pašnik obsega tudi površine, ki so neprimerne za pašo (skale). Nasprotno je evidentirana površina pašnika na pobočju Grintovca (b) premajhna, saj so posamezne površine, ki se delno uporabljajo za pašo, izločene.

čena površina za pridobitev kmetijske subvencije prevelika. V drugih primerih so iz območja pašnika izločene površine, ki se uporabljajo za pašo (slika 1 b), upravičena površina pašnika je premajhna.

Drugi način evidentiranja pašnikov rešuje ti pomanjkljivosti tako, da pašnik obsega vse površine, ki se delno ali v celoti uporabljajo za pašo. Na podlagi podatkov pokrovnosti tal in zaraščenosti se določi delež pašnika, ki je primeren za pašo (upravičenost v %). Upravičena površina je izračunana kot zmnožek upravičenosti in površine pašnika. V prispevku je predstavljena metodologija določitve meje pašnika ter njegove upravičene površine z objektno klasifikacijo ortofotov. Razvita metodologija je bila uporabljena v evropskem projektu *Further upgrade of the land parcel identification system within the integrated administration and control system* za določitev upravičenosti 66-ih pašnikov v Makedoniji.

## 2 Podatki in obravnavano območje

Pašniki s skupno površino 1642 km<sup>2</sup> ležijo na nadmorski višini med 1200 in 2200 m in se razprostirajo na 1642,2 km<sup>2</sup> oziroma 6 % državnega ozemlja (slika 2). Večinoma gre za območja, ki poleg travnatih površin različne kakovosti obsegajo tudi delež skalnatih površin in območij z nizko do gosto zaraščenostjo.

Za določitev meje in oceno upravičenosti pašnikov do kmetijskih subvencij so bili uporabljeni naslednji podatki:

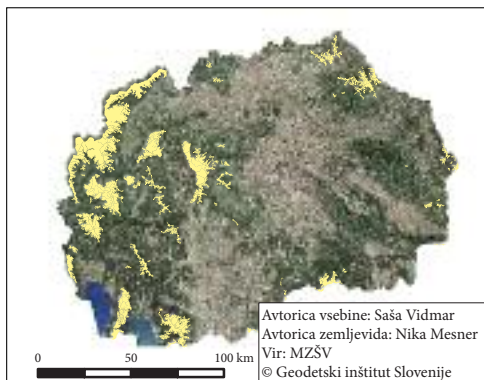
- barvni in bližnji infrardeči ortofoti (2009),
- vektorske državne topografske karte merila 1 : 25.000 (2004),
- skenogrami približnih mej pašnikov,
- vektorski podatki o gozdni meji,
- digitalni model reliefa in
- državna meja.

Barvni in bližnji infrardeči ortofoto je bil glavni podatkovni vir tako za določitev meje kot tudi za oceno upravičenosti z metodo objektne klasifikacije.

## 3 Metodologija

### 3.1 Določitev meje

Planinski pašniki najpogosteje mejijo na gozd, strma skalna pobočja, obdelovalne površine ter obrobja manjših zaselkov. Glavni vir za določitev meje pašnika so bili barvni ortofoti in vektorski sloj pokrovnosti



Slika 2: Prikaz obravnavanega območja in prostorski položaj planinskih pašnikov v Makedoniji.

tal državne topografske karte. Dodatni viri so bili vektorski podatki o gozdni meji, digitalni model reliefa, državna meja ter približne meje pašnikov po podatkih Agencije za pašnike.

Skenograme približnih mej pašnikov, sloj pokrovnosti tal in digitalni model reliefa smo uporabili za določitev prvega približka meje pašnikov. Mejo pašnika smo določili tako, da smo iz sloja pokrovnosti tal izločili območja travinj, grmičevja ter skalovja na nadmorski višini 1200 metrov in več. Tako določena meja je ustrezala prikazu v merilu 1 : 25.000 in stanju v letu 2004. S fotointerpretacijo smo mejo pašnika uskladili s stanjem na novejših ortofotih (2009) in jo določili z natančnostjo, ki je ustrezala merilu 1 : 5000. Nato smo iz območja pašnika izločili vse večje neupravičene površine: gozdne otoke, območja nekmetijske dejavnosti (parkirišča, degradirana območja), stavbe ter utrjene ceste. Pašniki v Makedoniji so navadno v uporabi različnih pašnih skupnosti, zato je bilo treba območje pašnika razdeliti tako, da posamezen del pašnika obsega območje, ki jo upravlja ena pašna skupnost. Končni rezultat določitve meje je topološko urejen vektorski sloj meje pašnika in njegovih delov (slika 3 a).

### 3.2 Ocena upravičenosti

Viri podatkov za oceno upravičenosti do kmetijskih subvencij posameznega pašnika so: meja pašnika ter barvni in bližnji infrardeči ortofoto. Upravičenosti je odvisna od pokrovnosti tal in zaraščenosti.

Za oceno upravičenosti pašnika smo uporabili metodo objektne klasifikacije z večstopenjskim pristopom (Veljanovski, Kanjir in Krištof 2011) tako, da smo na prvi stopnji razpoznali območje pašnika, na drugi pokrovnost tal in na tretji zaraščenost.

Na razlikovanje med različnimi razredi pokrovnosti tal imajo največji vpliv vrednosti slikovnih elementov, zato smo za segmentacijo uporabili algoritem *Multiresolution* (Baatz in Schäpe 2000). Nastavitve algoritma smo izbrali tako, da je imel parameter barva maksimalni vpliv in oblika minimalni vpliv pri tvorbi segmentov. Nato smo na podlagi rezultatov terenskega ogleda določili nabor razredov za klasifikacijo travnatih površin. Sledil je zajem učnih vzorcev za šest razredov travnatih površin (glede na stopnjo zelenosti trave) ter šest razredov preostalih površin (sence, sneg, skale, vodne površine, gola tla in degradirane površine zaradi požara). Rezultat klasifikacije z uporabo učnih vzorcev (kot klasifikator je uporabljena metoda najbližjega sosedu) je karta pokrovnosti tal, ki smo jo uporabili za izračun začetne oceno upravičenosti. Travnate površine smo klasificirali v pripadajoče razrede upravičenosti do kmetijskih subvencij (10 %, 40 %, 50 %, 75 %, 90 % in 100 %), kjer so bile meje razredov upravičenosti določene na podlagi terenskega ogleda. Segmentom, ki pripadajo razredom sence, sneg, gola tla in degradirane površine, smo določili razred upravičenosti tako, da smo jim pripisali najbolj pogoste vrednosti sosednjih segmentov. Segmente, ki so po pokrovnosti tal razpoznani kot skale in vodne površine, smo klasificirali v razred neupravičeno.

Nato smo določili še zaraščenost pašnika. Ortofoto na območju pašnika smo segmentirali z algoritmom *Multiresolution*. Zanimala nas je samo zaraščenost na območju vegetacije, zato smo najprej izvedli klasifikacijo v dva razreda: rastle in ostalo. Klasifikacija je bila izvedena z uporabo pravila o minimalni vrednosti normiranega diferencialnega vegetacijskega indeksa (NDVI), ki je  $-0,1$ . Glede na teksturne lastnosti segmentov razreda rastle smo izvedli klasifikacijo v štiri razrede zaraščenosti: delna, srednja in gosta zaraščenost ter nezaraščenost. Klasifikacija je bila izvedena z uporabo pravil o mejnih vrednostih homogenosti matrike vezanih verjetnosti sivih tonov (GLCM) (Hall-Beyer 2007). Segmente razreda ostalo smo klasificirali v razred nezaraščenost. Rezultat objektne klasifikacije sta dva vektorska sloja podatkov: upravičenost do pridobitve kmetijskih subvencij in zaraščenost pašnika.

Končna ocena upravičenosti posameznega segmenta je bila izračunana na podlagi podatka o pokrovnosti tal ter podatka o zaraščenosti. Na območju nezaraščenosti je končna ocena upravičenosti ostala enaka oceni upravičenosti na podlagi pokrovnosti tal, medtem ko je na zaraščenih območjih zmanjšana sorazmerno glede na stopnjo zaraščenosti. Na podlagi končne ocene upravičenosti smo za vsak segment izračunali njegovo upravičeno površino. Z metodami prostorskih analiz smo iz sloja segmentov in mej pašnikov izračunali upravičeno površino posameznih delov pašnika do pridobitve kmetijskih subvencij.

## 4 Rezultati določitve upravičenosti in razprava

### 4.1 Določitev meje pašnika

Z opisano metodo fotointerpretacije je bila določena meja 66-ih pašnikov s skupno površino 1642 km<sup>2</sup>. Največji problem določitve meja pašnikov so predstavljale sence ob gozdni meji ter nejasna meja med gozdom, zaraščenimi površinami in površinami, namenjenimi za pašo. Napake določitve meje smo v teh primerih zmanjšali z izkušenimi fotointerpretatorji. Območja pašnikov so bila določena z 2235 poligoni, ki smo jim nato določili upravičeno površino do kmetijskih subvencij z objektno klasifikacijo.

### 4.2 Ocena upravičenosti do kmetijskih subvencij

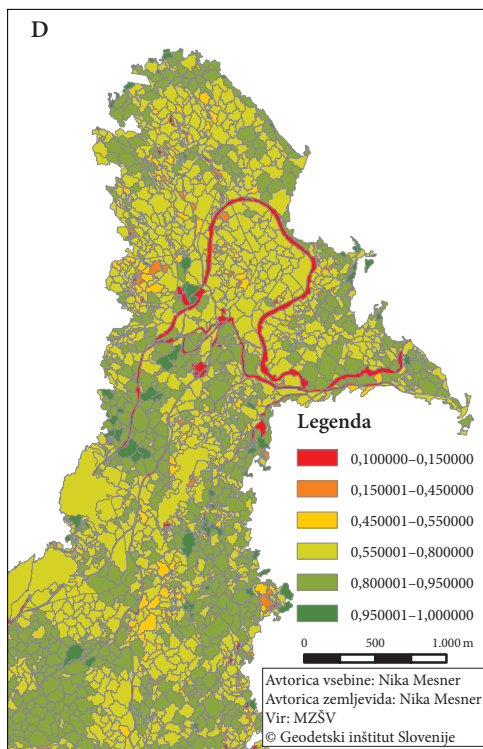
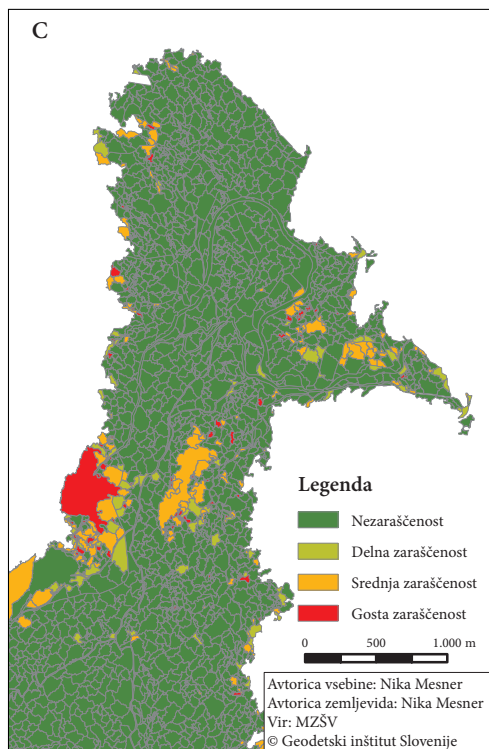
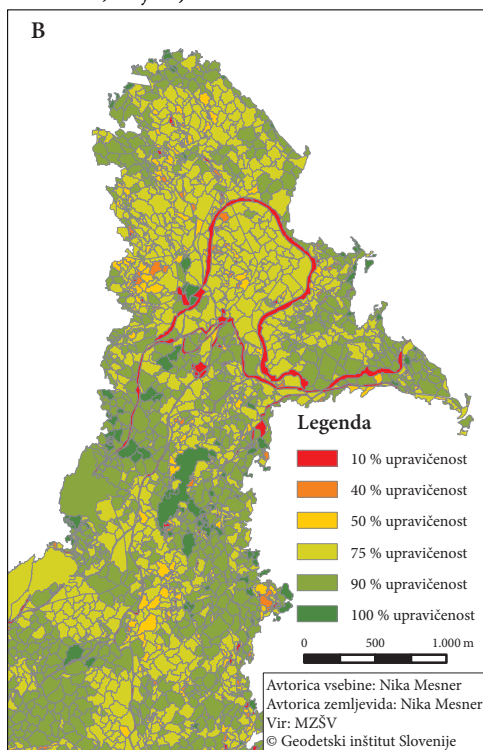
Obravnavano območje je zelo obsežno, saj so pašniki razporejeni po celotni Makedoniji. Hkratna obdelava vseh pašnikov na ortofotih s prostorsko ločljivostjo 50 cm je zato praktično neizvedljiva. Obdelavo smo izvedli v 37-ih sklopih, in sicer tako, da je en sklop vseboval en pašnik ali več sosednjih (manjših) pašnikov. Segmentacijo in klasifikacijo smo izvedli za vsak sklop posebej, z enakimi nastavitvami algoritma segmentacije. Na vseh sklopih je bila uporabljena enotna metodologija razpoznavanja pokrovnosti tal in zaraščenosti. Kljub razdelitvi območja na sklope je bila obdelava ortofotov z izvirno, 50 cm prostorsko ločljivostjo, računsko prezahtevna. Največji pašnik obsega 210 km<sup>2</sup>, kar pomeni hkratno obdelavo 40 GB podatkov. Za rešitev tega problema imamo na voljo dve možnosti (Veljanovski in Kokalj 2012): razrez sklopa obdelave ali zmanjšanje prostorske ločljivosti ortofota. Odločili smo se za zmanjšanje prostorske ločljivosti na 2,5 m in tako zmanjšali količino podatkov za 25-krat.

Natančnost klasifikacije smo ocenili na petih pašnikih z matriko napak. Skupna natančnost klasifikacije pokrovnosti tal je bila med 0,79 in 0,90. Napake pri klasifikaciji smo odpravili z dodatnimi učnimi vzorci, analizo sosednjih segmentov in ročno poklasifikacijo.

Pri razpoznavanju šestih razredov travnatih površin, glede na stopnjo zelenosti trave, smo se soočili s problemom klasifikacije v napačni razred (en razred višje oziroma nižje). Poleg tega so določeni objekti, ki pripadajo istemu razredu, imeli na različnih območjih (na istem pašniku) različne spektralne lastnosti. Težavo smo rešili z zajemom dodatnih učnih vzorcev ali z uvedbo dodatnega razreda pokrovnosti. Napake klasifikacije so se kazale tudi v posameznih (manjših) segmentih, ki so ostali neklasificirani. Šlo je predvsem za dolge in ozke segmente na robu pašnika (na primer ob cesti), manjše segmente v delni senci ipd. Neklasificirane segmente smo klasificirali v najpogostejši razred sosednjih segmentov. Ročno poklasifikacijo smo uporabili le za pravilno klasifikacijo razreda sneg, saj so bile te napake zelo redke. Za reševanje vseh ostalih problemov smo se temu postopku izogibali, saj bi bil zaradi obsežnosti območja preveč zamuden.

Rezultati razpoznavanja zaraščenosti z metodo objektne klasifikacije so slabše natančnosti. Skupna natančnost klasifikacije ocenjena z matriko napak na petih pašnikih je od 0,59 in 0,68. Največji problem je bila klasifikacija v napačen razred zaraščenosti (razred višje oziroma nižje). Razvita metodologija se je izkazala kot uspešna na pretežno homogenih travnatih površinah, poraslih z drevesi in večjim grmičevjem. Razpoznavanje zaraščenosti z gostim in nižjim rastjem je bilo manj uspešno. Prav tako je bilo neuspešno razpoznavanje zaraščenosti z intenzivno zelenim grmičevjem na zelenih travnatih površinah. Lažno zaraščena območja so bila razpoznanana na območju skalnatih površin s posameznimi otočki travnatih površin. Te napake smo skušali odpraviti z izbiro najugodnejše minimalne vrednosti NDVI. Previsoka vrednost se je kazala v nerazpoznavni zaraščenosti površin s travo slabše kakovosti, prenizka pa v velikem številu lažno razpoznanih skalnatih površinah. Vrednost NDVI smo izbrali tako, da

*Slika3: Določitev meje pašnika (a), ocena upravičenosti na podlagi pokrovnosti (b), ocena zaraščenost (c) in končna ocena upravičenosti (d). ► (str. 110)*



je bila nerazpoznavna zaraščenosti čim manjša, lažno razpoznane zaraščene površine pa smo odpravili v fazi poklasifikacije.

Končna ocena upravičenosti posameznega pašnika je bila ocenjena z vizualno kontrolo. Ugotovljeno je bilo, da je na večjih pašnikih ustrežna, medtem ko je bila na nekaterih manjših enotah pašnika (na primer posameznimi otočki med cestami) prenizka. Primer dela pašnika Kozuf (slika 3 a), ocene upravičenosti na podlagi pokrovnosti (slika 3 b), zaraščenost (slika 3 c) in končna ocena upravičenosti (slika 3 d).

## 5 Sklep

Članice Evropske skupnosti lahko za določitev upravičene površine pašnikov uporablja faktor redukcije oziroma upravičenosti, ki je določen na podlagi ocenjenega deleža neupravičenih površin in zaraščenosti pašnika (WikiCAP 2014). Navadno se za določitev faktorja upravičenosti uporablja fotointerpretacija. V prispevku predstavljena ocena upravičenosti z metodo objektne klasifikacije pomeni še korak dlje, saj praktično v največji možni meri izloči pristranskost pri določanju upravičenosti posameznega pašnika, kar je tudi najbolj sprejemljivo za revizijske organe, ki nadzirajo izplačila v kmetijstvu.

Rezultati kažejo, da je ocena upravičenosti na podlagi pokrovnosti tal uspešna, medtem ko ima razvita metodologija razpoznavanja zaraščenosti določene pomanjkljivosti, ki bi jih bilo treba v prihodnje nadgraditi. Rezultati določitve upravičenosti 66-ih pašnikov v Makedoniji kažejo, da bi lahko razvito metodologijo uporabili tudi v Sloveniji pri posodabljanju podatkov o planinskih pašnikih. Za določanje upravičenosti nižinskih in kraških pašnikov, kjer neupravičene površine večinoma predstavljajo visoko in srednje visoko rastle, bi bilo potrebno obstoječo metodologijo nadgraditi v smeri izboljšanja razpoznavanja zaraščenosti.

## 6 Viri in literatura

Baatz, M., Schäpe A. 2000: Multiresolution Segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000*. Karlsruhe.

Beaufoy, G., Jones, G., Kazakova, Y., McGurn, P., Poux, X., Stefanova, V. 2011: Permanent Pastures and Meadows under the CAP: the situation in 6 countries. *European Forum on Nature Conservation and Pastoralism*.

Bližnji IR in barvni DOF050. Ministrarstvo za Zemljedelstvo, Šumarstvo in Vodostopanstvo Republike Makedonije (MZŠV), 2009.

Definiens Developer 7 Reference Book 2007: Definiens AG, Germany.

Digitalni ortofoto DOF050. Geodetska uprava Republike Slovenije, 2010.

Direktiva o gorskem in hribovskem kmetovanju na območjih z omejenimi možnostmi (75/268/EEC). Medmrežje: <http://eur-lex.europa.eu> (19. 5. 2014).

Grafične enote rabe zemljišč kmetijskega gospodarstva GERK. Ministrstvo za kmetijstvo in okolje (MKO), 2014.

Hall-Beyer, M. 2007: The GLCM Tutorial Home Page. Medmrežje: <http://www.fp.ualgary.ca/mhall-bey/tutorial.htm> (25. 3. 2014).

Jevšnik, D., Rowlands, A. 2013. Development of methodology and technical specifications for digitisation and integration of spatial data layers in LPIS, Hihgland pasture.

Področja politik Evropske unije. Medmrežje: [http://europa.eu/pol/index\\_en.htm](http://europa.eu/pol/index_en.htm) (10. 2. 2014)

Veljanovski, T., Kanjir, U., Oštir, K. 2011: Objektno usmerjena analiza podatkov daljinskega zaznavanja. *Geodetski vestnik* 55-4. Ljubljana.



Veljanovski, T., Kokalj, Ž. 2012: Objektno usmerjeno kartiranje poplav in njihova vloga v poselitvi osrednjega dela Ljubljanskega barja. GIS v Sloveniji 11. Ljubljana.

Vidmar, S., Jevšnik, D. 2013. Digitisation and determination of eligibility for highland pastures in Macedonia. Tehnično poročilo, Geodetska družba. Ljubljana.

WikiCAP – European Comission. Medmrežje: [http://marswiki.jrc.ec.europa.eu/wikicap/index.php/Main\\_Page](http://marswiki.jrc.ec.europa.eu/wikicap/index.php/Main_Page) (19. 5. 2014)

Zakon o kmetijstvu. Uradni list RS 45/2008. Ljubljana.

# VPLIV GOSTOTE ZRAČNEGA LASERSKEGA SKENIRANJA NA PREPOZNAVANJE ARHEOLOŠKIH SLEDOV

**dr. Dimitrij Mlekuz**

Oddelek za arheologijo, Filozofska fakulteta, Univerza v Ljubljani  
dmlekuz@gmail.com

**Gašper Rutar**

Center za preventivno arheologijo, Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije  
gasper.rutar@zvkd.si

UDK: 902.2:528.8.044.6(497.4)

## IZVLEČEK

### **Vpliv gostote zračnega laserskega skeniranja na prepoznavnost arheoloških sledov**

V prispevku ugotavljamo vpliv gostote zračnega laserskega skeniranja na kakovost digitalnega modela terena in prepoznavnost arheoloških značilnosti. V njej analiziramo podatke zračnega laserskega snemanja na študijskem območju v bližini Dan pri Divači, simuliramo nižje gostote pulzov in opazujemo vpliv gostote na prepoznavanje arheoloških značilnosti.

## KLJUČNE BESEDE

zračno lasersko skeniranje, gostota točk, arheološka interpretacija

## ABSTRACT

### **The effect of airborne laser scanning sampling density on the visibility of archaeological traces**

The article addresses the influence of airborne laser scanning sampling density on the quality of digital surface model for the interpretation of archaeological features. We analyzed a study area in the vicinity of Dane near Divača, and simulated lower pulse densities to determine the role of the pulse density on the quality of digital terrain model and interpretation of archaeological features.

## KEYWORDS

Airborne laser scanning, point density, archaeological interpretation

## 1 Uvod

Tradicionalne metode daljinskega zaznavanja v arheologiji, predvsem aerofotografija, v Sloveniji ni nikoli imela velikega vpliva na arheološko prakso in varovanje dediščine. Glavni razlog je, poleg zemljiške razdrobljenosti, je da je večina Slovenije (okoli 60 %) prekrita z gozdom.

Zato se je v Sloveniji kot zelo izpovedna pokazala metoda zračnega laserskega skeniranja (ZLS) ali lidar (glej Mlekuž 2009, 2012). S pomočjo ZLS lahko opazujemo tudi tla pod rastjem. Obsežna območja, zaprta za tradicionalna opazovanja, so pokazala množico zelo dobro ohranjenih sledov. Gozd je prekril starejše pokrajine in jih tako obvaroval pred uničenjem zaradi oranja in drugih aktivnosti, hkrati pa so v njem potekale specifične aktivnosti, ki so puščale nove sledove.

Čeprav na kakovost ZLS vpliva množica dejavnikov (prim. Heidemann 2012; Risbøl s sodelavci 2013), je gostota snemanja oziroma število meritev na enoto površine pomemben parameter. Ob začetku projekta Geodetske uprave Slovenije »Lasersko snemanje in aerofotografiranje«, ki je predvideval sistematično pokritje Slovenije z relativno nizko gostoto točk (1–10 točk/m<sup>2</sup>, glej Triglav Čekada s sodelavci 2012), smo menili, da je gostota snemanja prenizka za prepoznavanje arheoloških sledov in varovanje kulturne dediščine.

Tako v prispevku na primeru študijskega območja v bližini Dan pri Divači simuliramo nižje gostote točk in opazujemo vpliv gostote snemanja na vidnost arheoloških značilnosti.

## 2 Gostota skeniranja

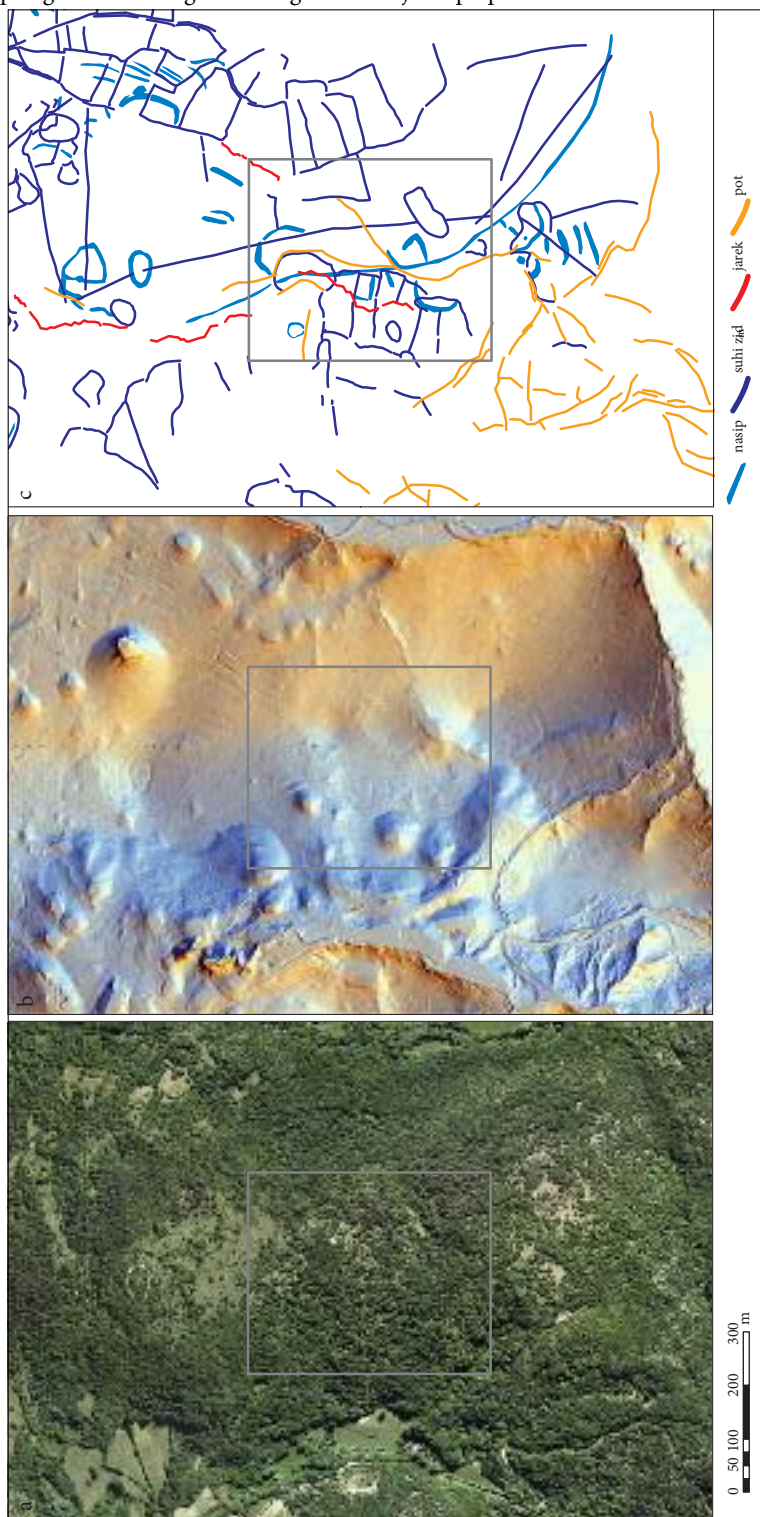
Pri navajanju gostote laserskega skeniranja se srečujemo z terminološko zmedo, saj imamo za merjenje gostote vsaj tri različne metode (Evans s sodelavci 2009). Prva je gostota točk (odbojev) (ang. *point density*), ki meri število vseh točk v oblaku točk na enoto površine. Gostota točk lahko znotraj oblaka točk zelo variira, v odvisnosti od vegetacijskega pokrova, geometrije in frekvence snemanja. Pri lidar-skkih sistemih diskretnih odbojev, ki beležijo na primer štiri odboje vsakega laserskega pulza, je gostota točk teoretično do štirikrat višja od števila laserskih pulzov. Pri lidar-skkih sistemih, ki dokumentirajo polno valovno obliko (ang. *full-waveform*), pa gostota točk nima pravega smisla. Gostota pulzov (ang. *pulse density*) je število laserskih pulzov oziroma žarkov na enoto površine, ki jih naprava odda. Gostota pulzov ni odvisna od vegetacije, temveč le od geometrije skeniranja, frekvence in kota skeniranja, višine in hitrosti leta in prekrivanja pasov (Evans s sodelavci 2009). Gostota pulzov znotraj podatkovnega niza običajno ne variira bistveno (vsaj ne v primerjavi z gostoto točk). Tretja je gostota talnih točk (ang. *ground point density*), ki meri le število točk, klasificiranih kot tla (razred 2 v zapisu LAS) na enoto površine. Poleg povečanja gostote pulzov lahko število talnih točk najlažje zagotovimo s snemanjem ob »idealnih« razmerah, brez listnega pokrova in po snegu, ki stisne podrast in odpadlo listje.

Za prepoznavanje arheoloških sledov iz talnih točk izdelamo digitalni model terena (DMT). Kakovost DMT-ja je funkcija (predvsem) natančnosti snemanja, kakovosti klasifikacijskega algoritma, njegovih nastavitvev in primernosti za obravnavani tip površja, interpolacijskega algoritma in gostote talnih točk, ta pa je funkcija gostote snemanja in gostote rastja. Ključen parameter za prepoznavanje arheoloških sledov je tako gostota talnih točk. Pri tem seveda ni dovolj zagotoviti dovolj visoko povprečno gostoto točk, temveč tudi dovolj enakomerno gostoto po vsem študijskem območju.

Velikost topografskih arheoloških sledov je od nekaj metrov do nekaj deset metrov; ob upoštevanju pravila, da morajo za uspešno prepoznavanje značilnosti te biti velike vsaj tri slikovne elemente, je minimalna teoretična gostota vzorčenja za prepoznavanje arheoloških značilnosti približno ena talna točka na kvadratni meter (prim. Triglav Čekada s sodelavci 2010). Običajna praksa je, da za prepoznavanje izdelamo digitalni model terena ločljivosti 1 ali 0,5 m (Opitz 2012).

*Slika 1: Študijsko območje v bližini Dan pri Divači (a – digitalni ortofoto, b – iz treh smeri senčen digitalni model terena, prikazan kot RGB sestavljena slika in c – transkripcija arheoloških sledov). ►*

Vpliv gostote zračnega laserskega skeniranja na prepoznavnost arheoloških sledov



### 3 Parametri skeniranja

Lasersko skeniranje je obsegalo okoli 40 km<sup>2</sup> veliko območje v okolici Škocjana. Skeniranje je potekalo 27. in 28. decembra 2012. Razmere so bili odlične, saj je v začetku decembra (8. decembra) zapadel sneg, ki mu je sledila močna burja (Cegnar 2012). Snežna odeja, ki je do začetka skeniranja skopnela, in burja sta povzročili, da je odpadla večina listja, sneg pa je stisnil odpadlo listje in podrast. Višina leta je bila 550 m nad površjem, hitrost leta je bila 51,4 m/s, frekvenca skenerja 125 kHz in kot skeniranja (ang. *scanning angle*)  $\pm 25$  stopinj. Izvajalec je uporabil senzor Optech ALTM Gemini167 (Optech 2008), ki je diskretni lidarski sistem, ki zapisuje do štiri odboje vsakega laserskega pulza.

### 4 Analiza

Da bi raziskali razmerje med gostoto točk in potencialom za arheološko interpretacijo (oziroma informativnostjo izdelanega digitalnega modela terena), smo z redčenjem pulzov poskusili ugotoviti vpliv gostote pulzov na vidnost in prepoznavnost arheoloških sledov. Za študijsko območje smo izbrali 0,17 km<sup>2</sup> veliko študijsko območje v bližini Dan pri Divači. Območje prekriva mešan gozd in pašniki v zaraščanju (slika 1).

Za ugotavljanje gostote rastja smo izdelali karto indeksa gostote rastja za celice velikosti 1 krat 1 m (slika 2). Indeks smo izračunali z orodjem *lascanopy* (Isenbug 2013), kjer je indeks rastja definiran kot razmerje med številom točk, klasificiranih kot rastje (razredi 3, 4 in 5), višjih od 1,37 m od tal, in vsemi točkami znotraj celice. Povprečni indeks gostote rastja na študijskem območju je okoli 60 (s precej visoko standardno deviacijo, kar 37,5). Točke smo z orodjem *lasground* (Isenbug 2013) najprej razdelili v talne točke in ostale (uporabili smo parameter *extra\_fine* in korak 1,5 m), z orodjem *lasgrid* pa smo izračunali gostote pulzov, vseh točk in talnih točk (preglednica 1).

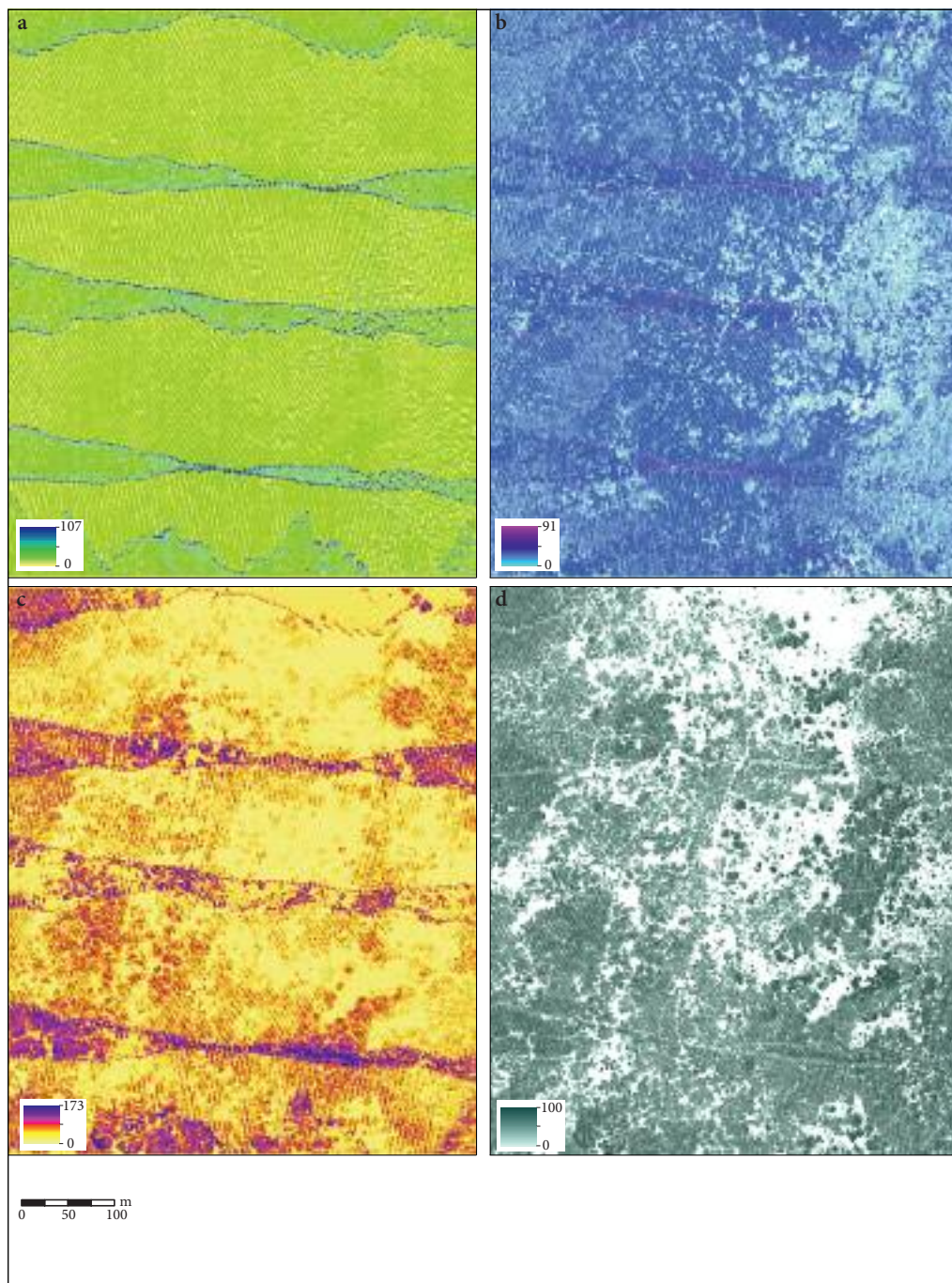
Primerjava med indeksom gostote rastja in distribucijo gostote vseh točk in gostote talnih točk kaže, da igra rastje ključno vlogo pri vplivu na gostoto talnih točk. Na območjih brez rastja je gostota talnih točk enaka gostoti pulzov (oziroma zadnjih odbojev), medtem ko je na območjih z visokim indeksom vegetacije število talnih točk za več kot tri četrtine manjše od števila pulzov.

Iz talnih točk smo izdelali digitalni model terena ločljivosti 0,5 m (slika 3). Za izdelavo DMT-ja z ločljivostjo 0,5 m so potrebne vsaj štiri talne točke na kvadratni meter (oziroma želimo, da bo horizontalna razdalja med talnimi točkami 0,5 m ali manjša), za DMR ločljivosti 1 m pa eno. Želimo, da je ta gostota čim bolj enakomerna (torej, da je celic, ki bi imele manjšo gostoto od ciljne, čim manj). Zato mora biti ciljna povprečna gostota talnih točk večja od ene oziroma štirih točk na kvadratni meter.

Digitalni model smo prikazali s pomočjo analitičnega senčenja in določili arheološke sledove (slika 1). Najočitnejša sled je nizek linearen nasip, ki teče po grebenu približno v smeri S–J. Na nasip se vežejo krajši nasipi, dva se pravokotno prelomita. Na obeh straneh nasipa lahko prepoznamo dva polkrožna linearna nasipa in manjšo okroglo ogrado. Dolg linearni nasip lahko na podlagi analogij interpretiramo kot prazgodovinski mejni nasip (oziroma mejo teritorija; McOmish 2011). Območje prekrivajo tudi nizki kamniti zidovi, ki ustrezajo moderni zemljiški razdelitvi in jih lahko razumemo kot historične mejne zidove, rezultat čiščenja pašnikov; prepoznamo lahko tudi več poti. Najmlajši značilnosti so strelski jarki, značilne cik-cak oblike, ki sekajo ostale značilnosti (linearne nasipe in suhe zidove).

Na študijskem območju tako prepoznamo več zelo nekontrastnih, nizkih pozitivnih sledov, kot so linearni nasipi, širine okoli 5 m, zelo ozke in kontrastne pozitivne linearne značilnosti, kot so suhi zidovi, širine do 2 m, manj kontrastne in plitve negativne značilnosti, kot so poti, in kontrastne, strelske jarke, globoke negativne značilnosti širine do 2 m.

Nižjo gostoto snemanja smo simulirali tako, da smo redčili število pulzov. Dobili smo več nizov podatkov, prvega, ki vsebuje vse pulze (originalni podatki), drugega, ki vsebuje le vsak drugi pulz (prepolo-



Slika 2: Gostote točk in rastja na študijske območju (a – gostota oddanih pulzov, b – gostota vseh zabeleženih odbojev, c – gostota klasificiranih talnih odbojev in d – indeks rastja).

vili smo število pulzov in tako simulirali za polovico manjšo gostoto snemanja), vsak četrti, osmi, šestnajsti in dvaintrideseti pulz. Vsak od dobljenih nizov podatkov je rezultat polovice manjše gostote snemanja. Če je originalna povprečna gostota okoli 18 pulzov na  $m^2$ , to pomeni, da simuliramo gostoto snemanja s povprečno gostoto okoli 9 pulzov na  $m^2$  (za niz podatkov z vsakim drugim pulzom), okoli 4 pulzov na  $m^2$  (za niz podatkov, kjer upoštevamo vsak četrti pulz), 2 pulza na  $m^2$ , 1 pulz na  $m^2$  in manj kot 1 pulz na  $m^2$  (za niz podatkov z vsakim 32 pulzom). Dobljene oblake točk smo klasificirali v talne točke in vegetacijo, izračunali gostoto pulzov in talnih točk, izdelali opisno statistiko gostote točk in iz klasificiranega oblaka točk izdelali digitalni model terena. Ugotavljali smo tudi pokritost študijskega območja s točkami. Tako smo izračunali število celic (velikosti 0,5 krat 0,5 m), ki so brez talnih točk. Digitalne modele terena, izdelane iz zredčenih točk, smo odšteli od DMT-ja, izdelanega iz originalnih podatkov, in tako ugotavljali pravilnost klasifikacije talnih točk in kvaliteto DMT-ja (preglednica 1). Senčeni digitalni model terena smo primerjali z senčenim digitalnim modelom terena, izdelanim iz originalnih, nerazredčenih podatkov in kvalitativno ugotavljali razlike in izgubo izpovednosti (slika 3).

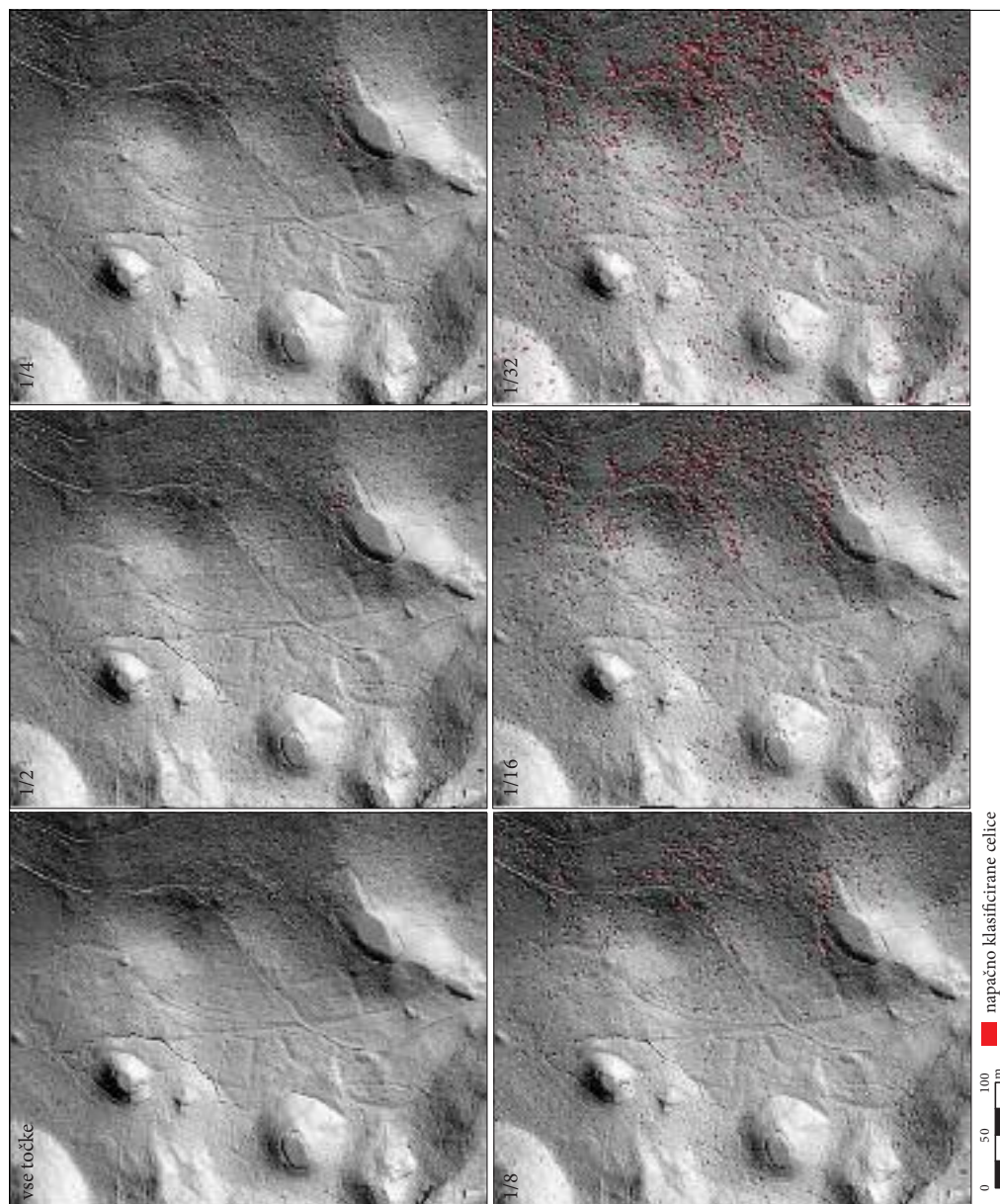
*Preglednica 1: Gostote vseh točk, pulzov in talnih točk; pokritost DMT-ja ločljivosti 0,5 m s točkami in delež napačno klasificiranih oziroma interpoliranih celic v DMT-ju.*

podatkovni niz	gostota vseh točk na $m^2$	gostota pulzov na $m^2$	gostota talnih točk na $m^2$	pokritost s točkami (%)	delež napačno klasificiranih celic (%)
vsi pulzi	30,33	18,28	12,11	97,9	0,0
vsak drugi pulz	15,17	9,14	6,44	96,3	3,2
vsak četrti pulz	7,58	4,57	3,22	91,0	3,7
vsak osmi pulz	3,8	2,29	2,20	77,8	5,7
vsak šestnajsti pulz	1,91	1,15	0,86	58,8	11,3
vsak dvaintrideseti pulz	0,99	0,6	0,48	38,9	16,9

Primerjava med nizi zredčenih podatkov jasno kaže, da se z redčenjem gostote pulzov hitro poslabša klasifikacija talnih točk, predvsem na zaplatah gostega rastja (slika 3). Že v polovično zredčenem podatkovnem nizu lahko opazimo kar nekaj nepravilno klasificiranih točk, ko algoritem točke podraستی zamenjuje za tla. To postane še očitneje z nadaljnjim redčenjem. Pri faktorju redčenja 32 so napačno klasificirane točke na vseh območjih prekritih z vegetacijo. Razmeroma hitro se zmanjša tudi pokritost celic s točkami, pri faktorju redčenja 8 pokritost pade pod 80 %

Primerjava med originalnim DMT-jem in DMT-jem iz redčenih podatkov kaže na izgubo detajlov arheoloških sledov že pri faktorju redčenja 2. Robovi linearnih nasipov v gozdu so manj izraziti, podobno velja za poti. Pri faktorju redčenja 4 lahko opazimo mnogo manj detajlov v strelskem jarku; na območju z gosto vegetacijo napačno klasificirane točke tal zakrivajo vse površinske detajle. Pri faktorju redčenja 8 jarek že težko prepoznamo, nizke linearne strukture v gozdu so komaj opazne. Pri faktorju redčenja 16 pa skoraj izginejo. Jarka ob faktorju redčenja 32 ne prepoznamo več, prepoznavne so le še strukture na odprtem. Detajlov je tudi na odprtem manj, v gozdu pa ni moč prepoznati ničesar več. Seveda je primerjava subjektivna; prepoznavanje arheoloških sledov je spretnost, ki temelji tako na kvaliteti DTM-ja, uporabljenih metodah vizualizacije kot na izkušnjah in predhodnem znanju o arheologiji študijskega območja.

Manjšanje gostote skeniranja povzroči predvsem zelo hitro izgubo talnih točk na območjih z gosto vegetacijo. To povzroči napačno klasifikacijo točk, kjer algoritem za klasifikacijo točke podraستی zamenjuje za tla, kar povzroči izgubo detajlov površja. Ob gostoti 7,6 pulzov/ $m^2$ , ki je teoretično dovolj za izdelavo DMT-ja z ločljivostjo 0,5 na odprtih površinah, na območjih z gosto vegetacijo talnih točk



Slika 3: Primerjava med digitalnim modelom terena, izdelanim iz originalnih podatkov, in digitalnimi modeli terena, izdelanimi iz redčenih pulzov. Na analitično senčen DMT so napete razlike med originalnim DMT-jem in DMT-jem, izdelanim iz redčenih pulzov.



skorajda ni več. Manjša pokritost povzroči zmanjševanje detajlov značilnosti, saj so celice brez točk interpolirane. Tako izgubljamone le detajle, temveč tudi oblike značilnosti.

## 5 Sklep

Površinski arheološki sledovi so pogosto šibki, neizraziti in fragmentirani. Pogosto so bolj ohranjeni le na območjih, poraslih z gozdom, kjer pa za njihovo prepoznavanje rabimo dovolj visoko gostoto snemanja. Le z dovolj veliko gostoto odbojev laserskega pulza od tal lahko namreč klasifikacijski algoritmi razločijo talne točke od ostalih. Za arheološko rabo je velika gostota snemanja namenjena predvsem pridobivanju talnih točk na območjih z gosto vegetacijo, in ne izdelavi zelo natančnih DMT na območjih brez vegetacije, saj je cilj snemanja zajemanje čimveč detajlov šibkih arheoloških sledov, ki bi omogočali njihovo prepoznavanje. Na študijskem območju že originalna gostota snemanja 18 pulzov/m<sup>2</sup> ne zagotavlja kontinuirane pokritosti s talnimi točkami, z redčenjem gostote snemanja pa gostota talnih točk in z njo prepoznavnost sledov hitro upada.

## 6 Viri in literatura

- Cegnar, T. 2012: Podnebne spremembe v decembru 2012. Naše okolje, bilten agencije RS za okolje, December 2012, 12. Ljubljana
- Evans, J. S., Hudak, A. T, Faux, R., Smith, A. M. S 2009: Discrete Return Lidar in Natural Resources: Recommendations for Project Planning, Data Processing, and Deliverables. Remote sensing 1-4. Basel.
- Heidemann, H. K. 2012: Lidar base specification version 1.0: U. S. Geological Survey Techniques and Methods, book 11. Reston.
- Isenburg M. 2013: LAStools – efficient tools for LiDAR processing, version 111216. Medmrežje: <http://www.lastools.com> (27. 3. 2013)
- McOmish, D. 2011. Field systems. Introduction to heritage assets. London.
- Mlekuž, D. 2009: Poplavne ravnice v novi luči: LiDAR in tafonomija aluvialnih krajin. Arheo 26. Ljubljana.
- Mlekuž, D. 2012: Messy landscapes: lidar and practices of landscaping. Interpreting Archaeological Topography: Lasers, 3D Data, Observation, Visualisation and Applications. Oxford.
- Opitz, R. 2012: An overview of airborne and terrestrial laser scanning in archaeology. Interpreting Archaeological Topography: Lasers, 3D Data, Observation, Visualisation and Applications. Oxford.
- Risbøl, O., Bollandås, O. M., Nesbakken, A., Ørka, H. O., Næsset, E., Gobakken, T. 2013: Interpreting cultural remains in airborne laser scanning generated digital terrain models: effects of size and shape on detection success rates. Journal of Archaeological Science 40-12. doi: 10.1016/j.jas.2013.07.002.
- Triglav Čekada, M., Bric, K, Oven, K. 2012: Prvo vsedrjavno lasersko skeniranje Slovenije. GIS v Sloveniji 11. Ljubljana.
- Triglav Čekada, M., Crosilla, F., Kosmatin Fras, M. 2010: Theoretical lidar point density for topographic mapping in largest scales. Geodetski vestnik 54-3. Ljubljana.

## FUNKCIONALNE REGIJE NOTRANJNH SELITEV SLOVENIJE

**mag. Samo Drobne**

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani  
samo.drobne@fgg.uni-lj.si

**Andrej Senekovič**

andsenekovic@gmail.com

**dr. Anka Lisec**

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani  
anka.lisec@fgg.uni-lj.si

UDK: 913:331.556(497.4)

### IZVLEČEK

#### **Funkcionalne regije notranjih selitev Slovenije**

V prispevku analiziramo funkcionalne regije notranjih selitev Slovenije. Analizo smo izvedli za členitev države na dve do petnajst regij za vsako leto v obdobju 2000–2010. Funkcionalne regije smo modelirali po pristopu hierarhičnega razvrščanja v skupine po metodi Intramax z analizo medobčinskih tokov notranjih selitev. V analiziranem obdobju enajstih let so se izkazali kot najmanj spremenljivi trije vzorci členitve države na funkcionalne regije notranjih selitev: vzorec dveh regij Ljubljane in Maribora ter vzorca desetih in enajstih regij. V primeru enajstih funkcionalnih regij so se le-te oblikovale okoli Murske Sobote, Maribora, Slovenj Gradca, Celja, Novega mesta, Trbovelj, Ljubljane, Domžal, Kranja, Nove Gorice in Kopra, v primeru desetih funkcionalnih regij pa se regija Domžal pripoji k funkcionalni regiji Ljubljane.

### KLJUČNE BESEDE

selitve, notranje selitve, selivci, regije, funkcionalne regije, Intramax, Slovenija

### ABSTRACT

#### **Functional regions of internal migrations in Slovenia**

In the paper, functional regions of internal migrations are analysed for Slovenia. The analysis was performed for delimitation of the state into two to fifteen regions for every year in the period 2000–2010. Functional regions were modelled by hierarchical clustering approach using the Intramax method and the inter-municipal flows of migrants. In the analysed period of eleven years, three samples of delimitation of the state into functional regions have not changed or have changed just a little; those are delimitation into two regions (of Ljubljana and of Maribor), delimitations into ten and eleven regions. In the case of eleven functional regions, those have been delineated around regional centres of Murska Sobota, Maribor, Slovenj Gradec, Celje, Novo mesto, Trbovlje, Ljubljana, Domžale, Kranj, Nova Gorica and Koper, but in the case of ten functional regions the region of Domžale has been joined to region of Ljubljana.

### KEY WORDS

migrations, internal migrations, migrants, regions, functional regions, Intramax, Slovenia

## 1 Uvod

Selitev je premik posameznika ali skupine ljudi v geografskem prostoru, ki pogosto pripelje do trajne spremembe kraja bivanja (Bevc s sodelavci 2004; Malačič 2006). Ljudje se praviloma selimo na tista območja, kjer pričakujemo izboljšanje ekonomske, materialne in splošne življenjske ravni. Usmerjamo se torej v regije z boljšimi ekonomskimi možnostmi, možnostmi zaposlovanja, višjimi plačami, k boljšim delovnim razmeram, priložnostim za podjetništvo in drugim ugodnostim novega okolja. Selitve (migracije) lahko delimo na stalne in začasne (v primeru spremembe naslova stalnega prebivališča je selitev stalna, sicer je začasna), na primarne (iz kraja rojstva), sekundarne (vse ostale selitve) in povratne (nazaj v rojstni kraj), na podeželske (selitev na podeželje) in mestne (selitev v mesto); najbolj pogosta pa je delitev na zunanje in notranje selitve. Notranje selitve potekajo na območju države, zunanje pa izven nje (Malačič 2006).

Notranje selitve v Sloveniji so preučevali številni različni avtorji, na primer Bevc (2000), Bevc s sodelavci (2004) ter Bevc in Uršič (2013). Ti avtorji ugotavljajo, da so imele pomemben vpliv na notranje selitve po drugi svetovni vojni: deagrarizacija, industrializacija in urbanizacija, ki so povzročile močne selitvene procese s podeželja v mesta. V 50. in 60. letih prejšnjega stoletja so najhitreje rasla največja urbana središča, predvsem zaradi deagrarizacije podeželja. Skladen regionalni razvoj, ki se je začel uveljavljati v 70. letih prejšnjega stoletja, je znižal obseg med regionalnih selitev. Prebivalstvo se je zgoščevalo predvsem v regionalnih središčih, prav tako pa tudi v takratnih občinskih središčih. Ob osamosvojitvi Slovenije leta 1991 so se notranje selitve nekoliko umirile (Bevc sodelavci 2004). Sprememba upravno-teritorialne ureditve leta 1995, ko je iz 64 velikih občin nastalo 147 manjših, je prinesla spremembo strukture notranjih selitev: zaradi večjega števila manjših občin se je število medobčinskih selitev navidežno povečalo, bistveno pa se je zmanjšalo število selitev med naselji iste občine, ki so v večji meri prešle v medobčinske selitve (Apohal Vučkovič s sodelavci 2009). V zadnjem desetletju prihaja predvsem do dveh vrst preseljevanja. Večina selitev na krajše razdalje se opravi predvsem zaradi izseljevanja iz večjih mestnih središč na podeželje, gre za pojav suburbanizacije (Ravbar 2005), najpomembnejši vzrok za selitve na daljše razdalje v Sloveniji pa je sprememba zaposlitve (Bevc s sodelavci 2004).

Regija pomeni pokrajino, ozemlje, predel, območje oziroma bolj ali manj homogen del zemeljskega površja (Vrišer 1978; Tavzes 2002). Regijo, za katero je značilen sistem močno povezanih prostorskih enot, ki jih zaznamuje visoka frekvenca notranjih interakcij, imenujemo funkcionalna regija. Funkcionalne regije praviloma opredeljujejo notranje gospodarske interakcije, kot so trgovina dobrin in storitev, delovna mobilnost ter nakupovanje, veliko dejavnosti in dobro razvita notranja regionalna prometna infrastruktura, ki omogoča velik pretok blaga in storitev (Johansson 1998). V primerjavi z ostalimi tipi regij nas torej pri funkcionalnih regijah zanima predvsem funkcionalna povezanost (Vanhove in Klaasen 1987). Primere študij funkcionalnih regij za Slovenijo najdemo v delih Bajta (2010), Drobneti in Bogatajeve (2012a; 2012b; 2013), Drobneti in Konjarja (2011), Drobneti in Lavričeve (2012), Drobneti, Konjarja in Lisceve (2009), Drobneti s sodelavci (2009; 2010), Konjara (2009), Konjarja s sodelavci (2010), Zavodnik Lamovškove s sodelavci (2011), v katerih avtorji modelirajo in vrednotijo funkcionalne regije s pomočjo podatkov o delovni mobilnosti. V Sloveniji sta delovno mobilnost izčrpno obravnavala Bole (2004; 2011) ter Bole in Gabrovec (2012; Gabrovec in Bole 2009).

Evers in Van der Veen (1985) ugotavljata, da lahko razumemo delovno mobilnost kot nadomestek za selitev, v primeru ko sta lokaciji dela in bivanja prostorsko ločeni, lahko pa ju razumemo tudi kot dopolnilo, v primeru ko se posameznik odloči, da se preseli dlje od lokacije dela, nato pa se dnevno vozi na delo.

V prispevku analiziramo funkcionalne regije notranjih stalnih in začasnih selitev med občinami Slovenije. Le-te smo modelirali po pristopu območij interakcij. Analizo dveh do petnajstih funkcionalnih regij notranjih selitev smo izvedli po letih za obdobje 2000–2010. Zanimalo nas je predvsem (ne)spreminjanje funkcionalnih regij notranjih selitev. Pri tem smo želeli izpostaviti regije, ki so se v analiziranem obdobju najmanj spreminjale. Hkrati smo pri vrednotenju rezultatov podrobno predstavili tudi hierarhično združevanje občin oziroma regij na nižjih ravneh v funkcionalne regije na višjih ravneh.

## 2 Metodologija

Funkcionalne regije modeliramo na več načinov (glej Karlsson in Olsson 2006). V tem delu smo modelirali regije po pristopu območij interakcij. Pri tem pristopu korakoma združujemo pare osnovnih prostorskih enot (v našem primeru občine) v funkcionalne regije brez predhodno opredeljenih središčnih občin. Pri tem smo uporabili metodo *Intramax* (Masser in Brown 1975; 1977). Po tej metodi opredelimo funkcionalne regije korakoma, z maksimiranjem deleža obojestranskih tokov ob upoštevanju variabilnosti v vsotah tokov notranjih selitev po izvoru in po ponoru. To pomeni, da korakoma združujemo po dve območji, katerih interakcija  $S$  ima maksimum:

$$S = \frac{S_{ij}}{SI_i SP_j} + \frac{S_{ji}}{SI_j SP_i}, \quad (1)$$

kjer je  $S_{ij}$  število notranjih selivcev iz območja  $i$  v območje  $j$ ,  $S_{ji}$  je število notranjih selivcev iz območja  $j$  v območje  $i$ ,  $SI_i = \sum_j S_{ij}$  je skupno število notranjih selivcev, ki so se odselili iz območja izvora  $i$ ,  $SP_j = \sum_i S_{ij}$  je skupno število selivcev, ki so se preselili v območje ponora  $j$ ,  $SI_j = \sum_i S_{ji}$  je skupno število selivcev, ki so se odselili iz območja izvora  $j$ ,  $SP_i = \sum_j S_{ji}$  pa je skupno število selivcev, ki so se preselili v območje ponora  $i$ . V postopku združevanja območij upoštevamo pogoje  $SI_i, SI_j, SP_i, SP_j > 0$ , s čimer iz obravnave izključimo vsa območja, iz katerih oziroma v katere ni nobene interakcije (v našem primeru selitve). Funkcionalne regije notranjih selitev smo modelirali v programskem orodju *FlowMap* (Breukelman s sodelavci 2009).

Funkcionalne regije notranjih selitev smo primerjali med seboj in po obravnavanih letih. Regije so opredeljene z nosilno občino v regiji – to je občina, v katero se je v regiji preselilo največ selivce ( $\max \sum_j S_{ij}$ ). Kljub enakemu ali vsaj podobnemu območju regije se lahko zgodi, da je nosilna občina iste funkcionalne regije v različnih časovnih obdobjih različna.

Členitve enakega števila funkcionalnih regij smo primerjali po letih, s čimer smo izpostavili prevladujoče vzorce členitev, hkrati pa smo jih analizirali glede na postopek združevanja občin v regije. Zaradi prostorske omejitve podajamo v nadaljevanju le pomembnejše, značilne rezultate primerjalne analize. Podrobni rezultati, tudi za druge primere členitve, so v (Senekovič 2012).

Podatke o notranjih selitvah med občinami Slovenije smo pridobili na Statističnem uradu Republike Slovenije (SURS 2011a). Te podatke ureja SURS na podlagi Centralnega registra prebivalstva (CRP). Prostorske podatke o občinah smo pridobili iz Registra prostorskih enot (GURS 2011).

## 3 Rezultati

Na slikah 1 do 14 so prikazane prevladujoče členitve Slovenije na dve do petnajst funkcionalnih regij glede na notranje selitve v obdobju 2000–2010. Zaradi lažje primerjave prikazujemo rezultate v vrstnem redu hierarhičnega postopka združevanja manjših v večje funkcionalne regije. Regije na slikah 1 do 14 so opredeljene z nosilno občino, to je občino v regiji v katero se je v obravnavanem letu priselilo največ ljudi. Šifrant občin na slikah je javno dostopen na Statističnem uradu Republike Slovenije (SURS 2011b).

V preglednici 1 povzemamo prevladujoče členitve Slovenije na funkcionalne regije notranjih selitev v obdobju 2000–2010. Pri tem primerjamo členitev v posameznem letu s prevladujočo členitvijo v tem istem letu (glej slike 1 do 14). V preglednici 2 podajamo kratke opise posameznih členitev.

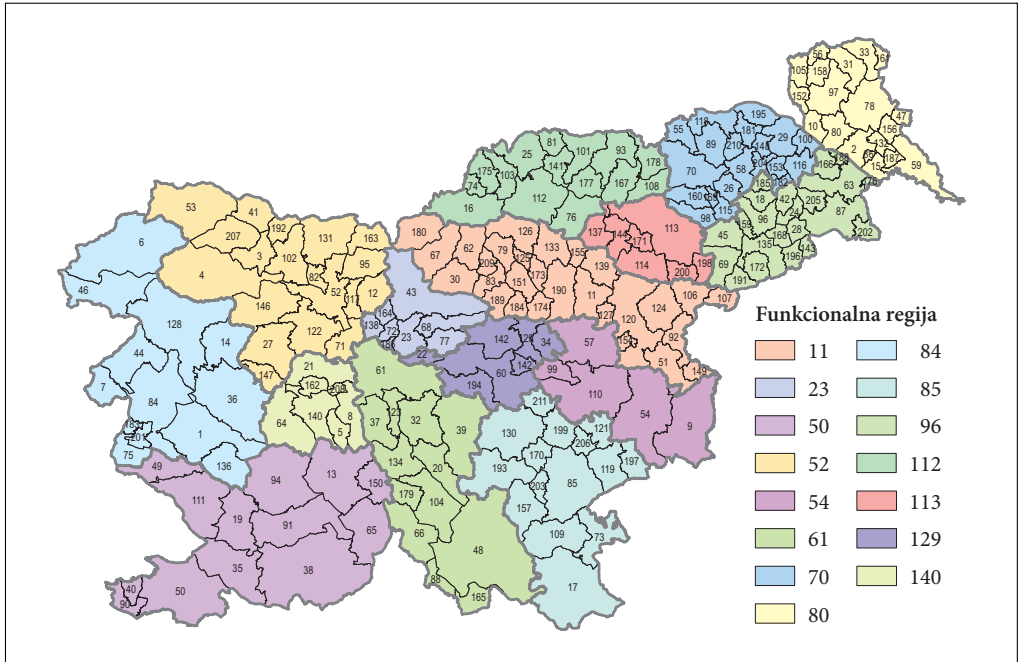
*Preglednica 1: Primerjava členitev Slovenije na funkcionalne regije (FR) s prevladujočimi členitvami v obdobju 2000–2010 (opomba: ☑ pomeni prevladujočo oziroma enako členitev; (☑) pomeni spremembo nosilne občine v prevladujoči oziroma enaki členitvi; ✓ pomeni podobno členitev).*

število FR	leto										
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
2	☑	☑	☑	☑	☑	(☑)	☑	☑	☑	☑	☑
3			☑			☑			☑	☑	☑
4						☑				☑	☑
5									☑	☑	☑
6				✓	✓				✓	☑	
7	✓	✓		✓	✓		☑				
8	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	☑		
9	✓	✓		✓						✓	☑
10	✓	✓	✓				✓	✓		☑	☑
11		☑	✓	✓	✓	☑			☑	☑	☑
12	✓	✓		✓		✓				☑	
13				✓		✓	☑				
14									✓	✓	☑
15									✓	✓	☑

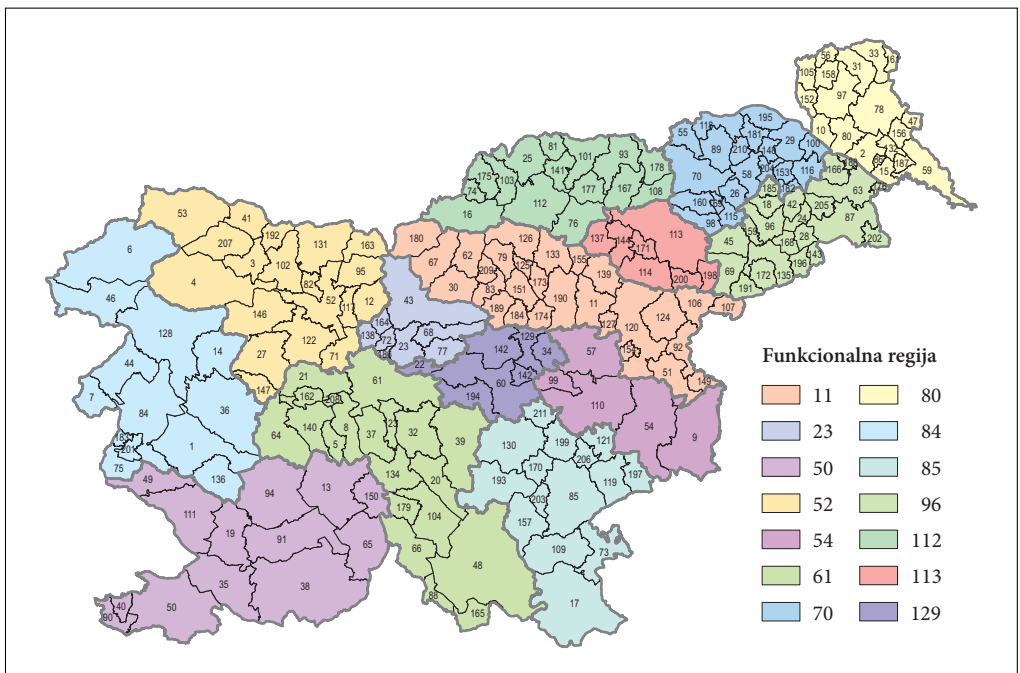
*Preglednica 2: Kratek opis prevladujočih členitev funkcionalnih regij v obdobju 2000–2010.*

funkcionalne regije	opis
<b>FR15</b> (slika 1)	Členitev Slovenije na petnajst regij notranjih selitev pokaže podoben vzorec regij v zadnjih treh analiziranih letih (2008–2010). V teh letih so bile najbolj značilne notranje selitve v funkcionalnih regijah Murska Sobota (80), Maribor (70), Ptuj (96), Slovenska Bistrica (113), Slovenj Gradec (112), Celje (11), Krško (54), Novo mesto (85), Trbovlje (129), Domžale (23), Ljubljana (61), Vrhnika (140), Kranj (52), Nova Gorica (84) in Koper (50).
<b>FR14</b> (slika 2)	Najbolj pogost vzorec členitve na štirinajst regij izhaja neposredno iz členitve FR15. V letih 2008–2010 je med regijama Vrhnika in Ljubljana izvedlo največ selitev, zato se regija Vrhnika priključi regiji Ljubljana. Členitve po letih 2000–2007 so raznolike, zato težko določimo enotni vzorec. Omeniti velja, da se spreminja predvsem obseg regij, v nekaterih primerih pa tudi nosilne občine. Takšen primer so občine, ki so za kratek čas postale nosilne občine v regiji; te so Postojna (94) leta 2000, Grosuplje (32) leta 2001 in 2003, Slovenske Konjice (114) leta 2001, Cerknica (13) leta 2002, Kočevje (48) leta 2003, 2005 in 2006, Gornja Radgona (29) leta 2004 ter leta 2007 Kamnik (43), Radovljica (102) in Ribnica (104).
<b>FR13</b> (slika 3)	Členitev države na trinajst regij pokaže raznolike rezultate. Najpogosteje (trikrat, v letih 2003, 2005 in 2006) se pojavi vzorec regij Celje (leta 2005 je nosilna občina Velenje, 133), Domžale, Kočevje, Koper, Kranj, Ljubljana, Maribor, Murska Sobota (leta 2005 je nosilna občina Lenart, 58), Nova Gorica, Novo Mesto, Ptuj, Slovenj Gradec in Trbovlje. Členitev v letih 2009 in 2010 izhaja iz členitve na štirinajst funkcionalnih regij, ko se regiji Maribor pridruži funkcionalna regija Slovenska Bistrica.

<b>FR12</b> (slika 4)	Prevladujoč vzorec dvanajstih regij notranjih selitev je iz let 2000, 2001, 2003, 2005 in 2009. Dvanajst funkcionalnih regij nastane s pripojitvijo regije Kočevje k regiji Ljubljana.
<b>FR11</b> (slika 5)	Vzorec enajstih regij nastane s pripojitvijo regije Ptuj k funkcionalni regiji Maribor. Takšna členitev Slovenije se je izkazala za eno bolj pogostih, saj se je z manjšimi teritorialnimi spremembami pojavila kar v osmih letih (2001–2005 in 2008–2010), od tega nespremenjeno v letih 2001, 2005 in 2008–2010.
<b>FR10</b> (slika 6)	Tudi vzorec desetih regij je eden bolj stabilnih vzorcev funkcionalnih regij notranjih selitev v enajstletnem obdobju. Ta vzorec nastane po pripojitvi regije Domžale k regiji Ljubljana. Podoben vzorec regij, z manjšimi spremembami v obsegu, se pojavi kar v sedmih letih (2000–2002, 2006, 2007, 2009 in 2010). Posebnost členitve na deset funkcionalnih regij sta regiji Maribor in Celje, pri katerihčasno vlogo nosilne občine prevzame leta 2005 Lenart in Velenje.
<b>FR9</b> (slika 7)	Prevladujoč vzorec devetih regij nastane s pripojitvijo regije Trbovlje k regiji Ljubljana. Členitev države na devet funkcionalnih regij se je glede na območja regij precej spreminjala. Kot primer navedimo leto 2004, ko se je večina regije Nova Gorica vezala na regijo Vrhnika, medtem ko so funkcionalno regijo Koper tvorile le tri obalne občine.
<b>FR8</b> (slika 8)	S pripojitvijo regije Nova Gorica k regiji Koper se pojavi vzorec osmih funkcionalnih regij. Podoben vzorec se pojavi v letih 2000, 2001, 2003, 2009 in 2010. Po obsegu se najmanj spreminjata regiji Kranj in Murska Sobota. Leta 2005 se časno pojavi samostojna funkcionalna regija Trbovlje (regija Murska Sobota se priključi regiji Maribor), sicer pa se regija Trbovlje izmenično pojavlja v funkcionalnih regijah Celje in Ljubljana.
<b>FR7</b> (slika 9)	Najbolj pogost vzorec sedmih funkcionalnih regij se pojavi v petih letih (2000, 2001, 2003, 2004 in 2006). Le-ta nastane iz vzorca osmih regij s pripojitvijo regije Novo mesto k regiji Ljubljana.
<b>FR6</b> (slika 10)	S pripojitvijo funkcionalne regije Murske Sobotice k regiji Maribora nastane sistem šestih funkcionalnih regij. Po obsegu sta najbolj nespremenljivi regiji Celje in Kranja, ostalim regijam pa se skozi analizirana leta spreminja teritorialni obseg.
<b>FR5</b> (slika 11)	S pripojitvijo regije Slovenj Gradec k regiji Maribor nastane v letih 2008–2010 sistem petih funkcionalnih regij notranjih selitev. Členitev na pet regij: Maribor, Celje, Ljubljana, Kranj in Koper, nastopa v devetih letih, medtem ko leta 2004 kot samostojna nastopa regija Ravne na Koroškem, leta 2006 pa regija Slovenj Gradec (v teh dveh letih se regija Kranj pripoji regiji Ljubljana).
<b>FR4</b> (slika 12)	Med regijama Kranj in Ljubljana so tudi sicer potekale intenzivne selitve. Zato se v naslednjem koraku ti dve regiji združita in nastane sistem štirih funkcionalnih regij: Maribor, Celje, Ljubljana in Koper. Izjeme v sistemu štirih funkcionalnih regij so tri: leta 2005 prevzame nosilno vlogo v regiji Celje občina Velenje, leta 2004 se pojavi samostojna regija Murska Sobota, leta 2008 pa regija Kranj (v obeh slednjih primerih se regija Koper pripoji k regiji Ljubljana).
<b>FR3</b> (slika 13)	Prevladujoč vzorec členitve Slovenije na tri funkcionalne regije notranjih selitev nastane s pripojitvijo regije Koper k regiji Ljubljana. Poseben primer členitve na tri regije je nastal leta 2005, ko postane namesto občine Celje nosilna občina Velenje.
<b>FR2</b> (slika 14)	Z nadaljnjo pripojitvijo regije Celje k regiji Maribor nastaneta dve funkcionalni regiji notranjih selitev. Le-ti se v analiziranem obdobju nista spreminjali, razen leta 2005, ko je bila občina Vrnsko (189) v regiji Ljubljana; sicer pa je v funkcionalni regiji Maribor.

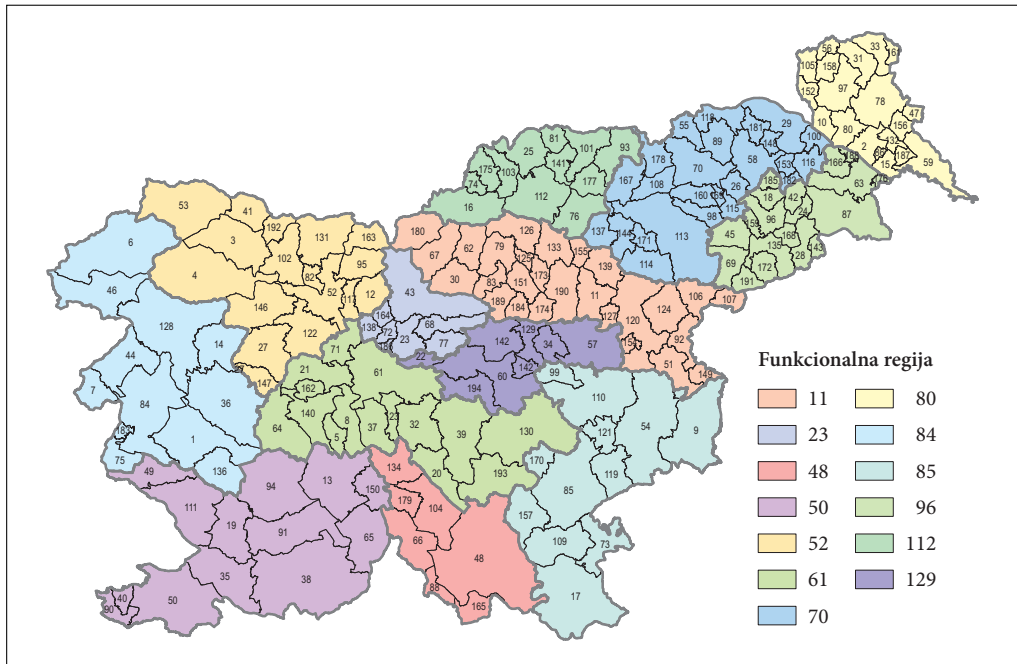


Slika 1: Petnajst funkcionalnih regij notranjih selitev Slovenije (leto 2010, podobno v letih 2008 in 2009).

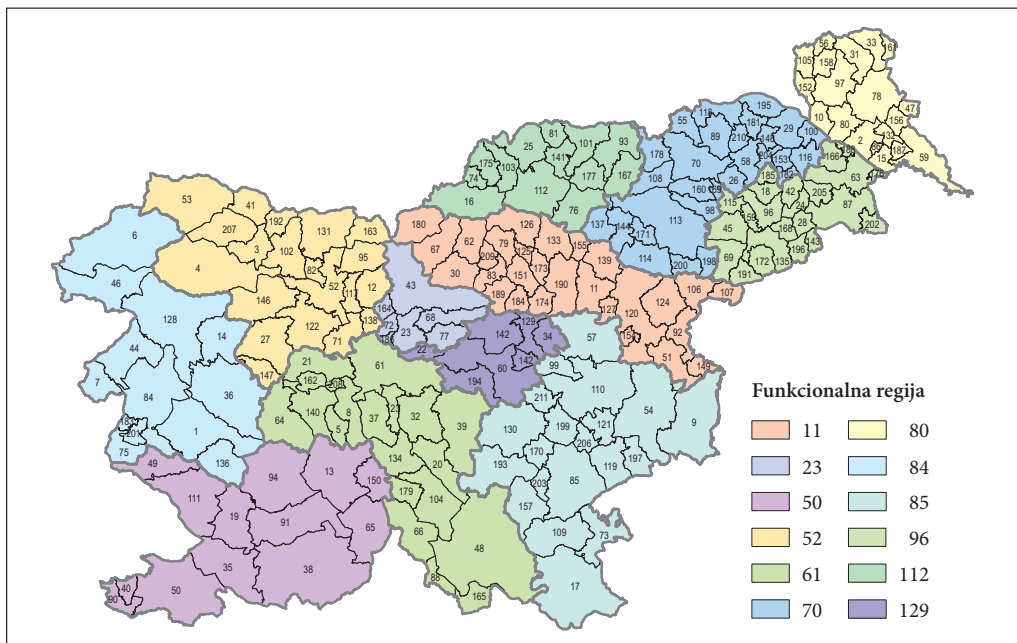


Slika 2: Štirinajst funkcionalnih regij notranjih selitev Slovenije (leto 2010, podobno v letih 2008 in 2009).

## Funkcionalne regije notranjih selitev Slovenije

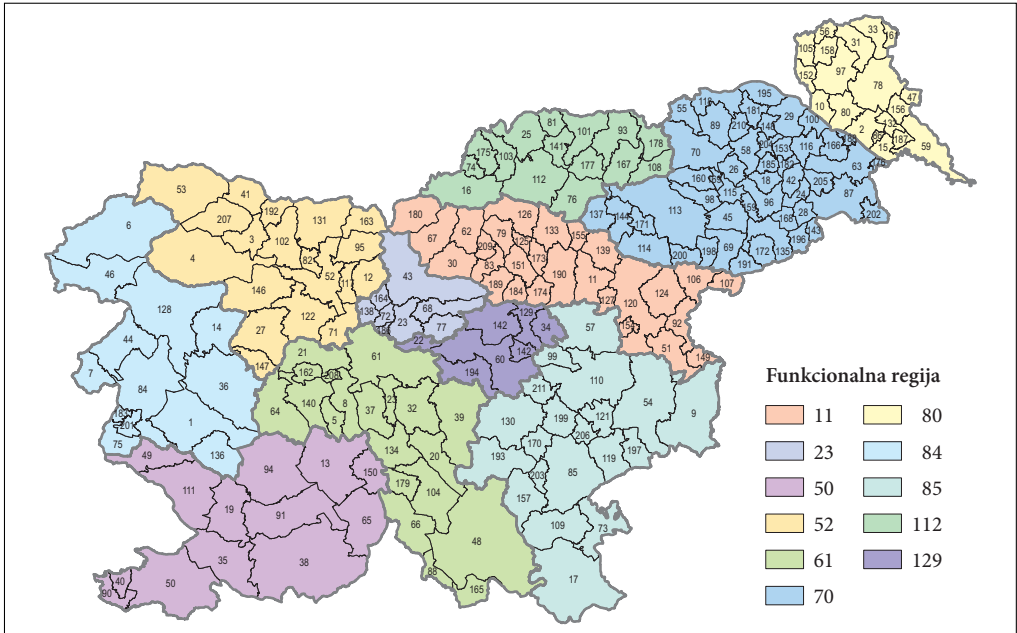


Slika 3: Trinajst funkcionalnih regij notranjih selitev Slovenije (leto 2006, podobno v letih 2003 in 2005).

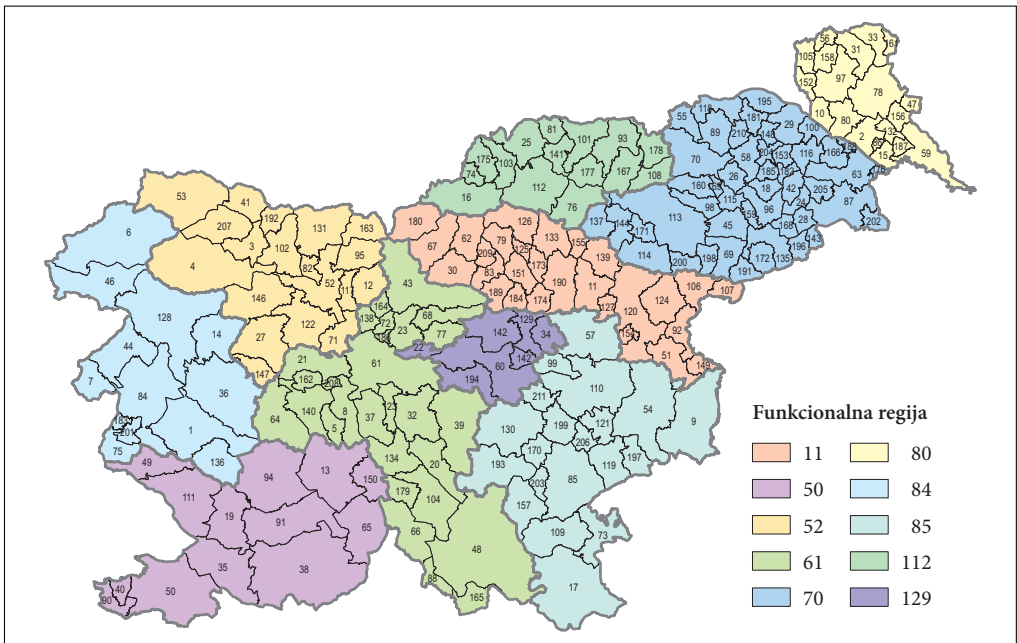


Slika 4: Dvanajst funkcionalnih regij notranjih selitev Slovenije (leto 2009, podobno v letih 2000, 2001, 2003 in 2005).



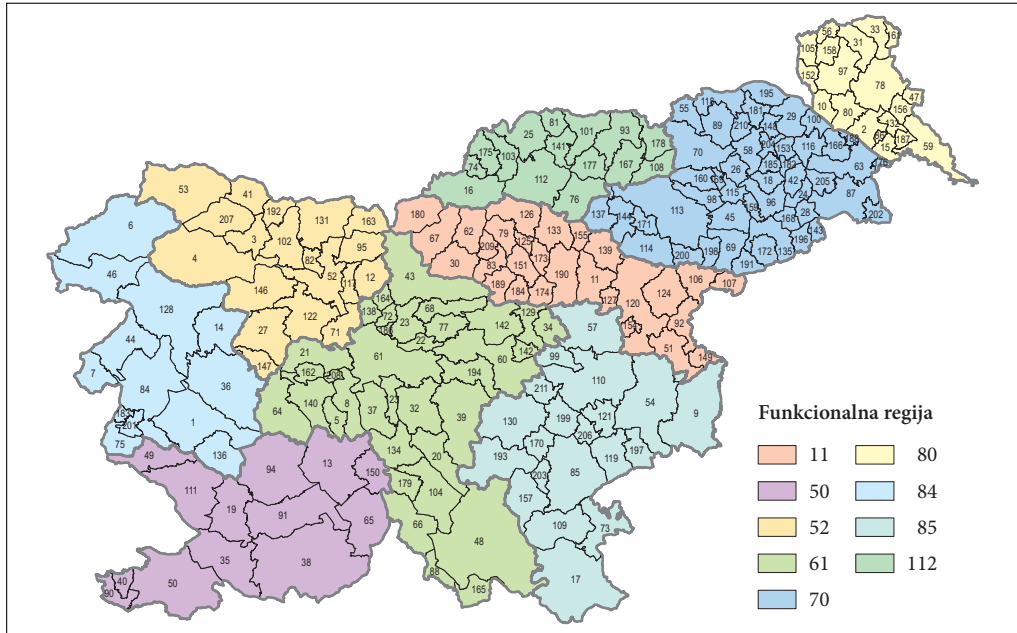


Slika 5: Enajst funkcionalnih regij notranjih selitev Slovenije (leto 2010, podobno v letih 2001–2005, 2008 in 2009).

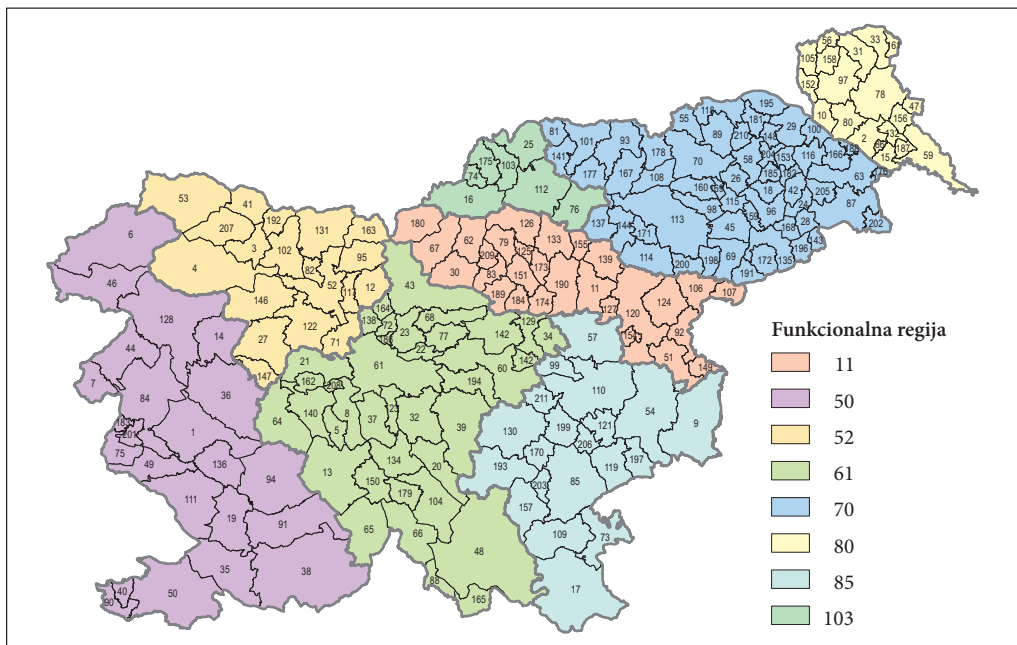


Slika 6: Deset funkcionalnih regij notranjih selitev Slovenije (leto 2010, podobno v letih 2000–2002, 2006, 2007 in 2009).

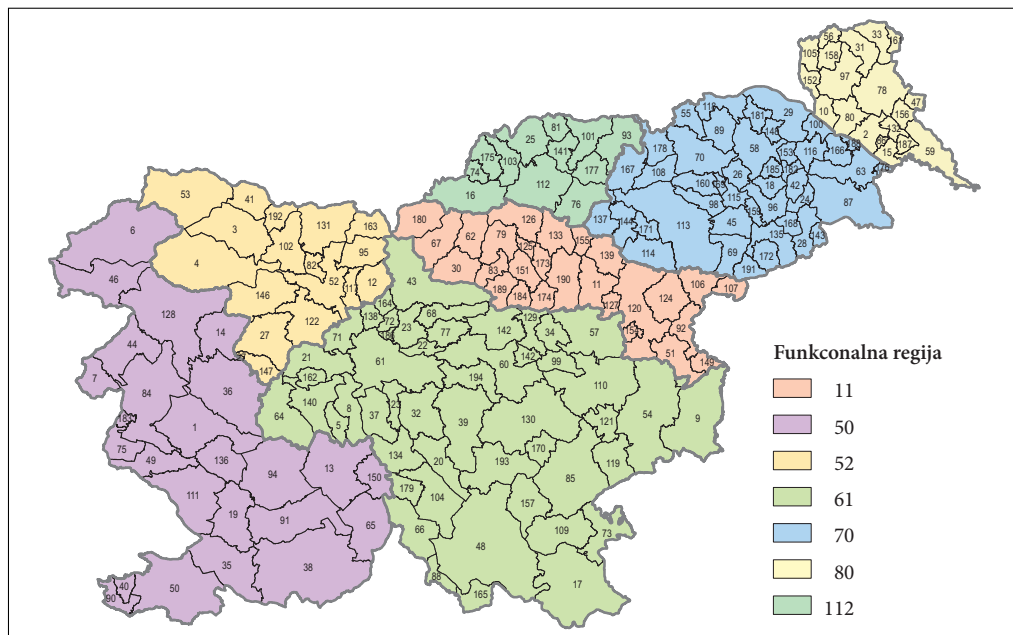
## Funkcionalne regije notranjih selitev Slovenije



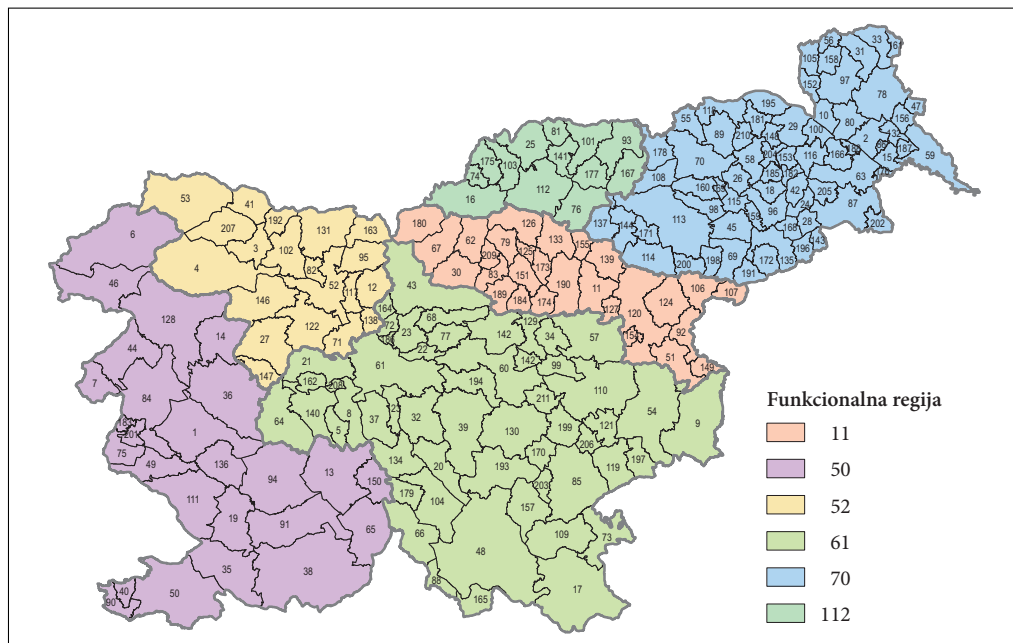
Slika 7: Devet funkcionalnih regij notranjih selitev Slovenije (leto 2010, podobno v letih 2000, 2001, 2003 in 2009).



Slika 8: Osem funkcionalnih regij notranjih selitev Slovenije (leto 2008, podobno v letih 2000–2004, 2006 in 2007).

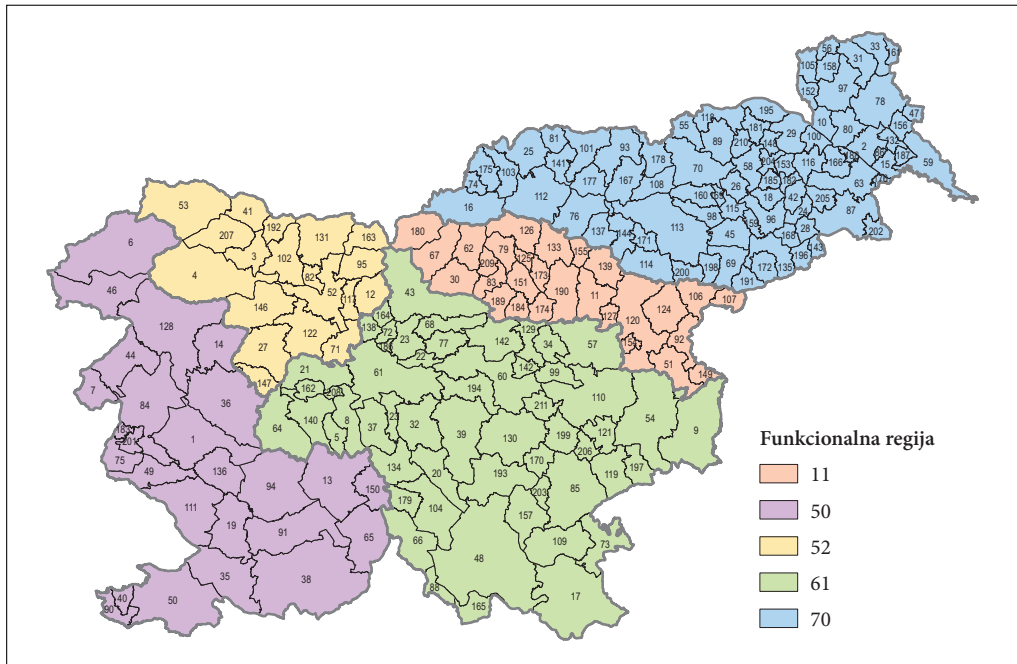


Slika 9: Sedem funkcionalnih regij notranjih selitev Slovenije (leto 2006, podobno v letih 2000, 2001, 2003 in 2004).

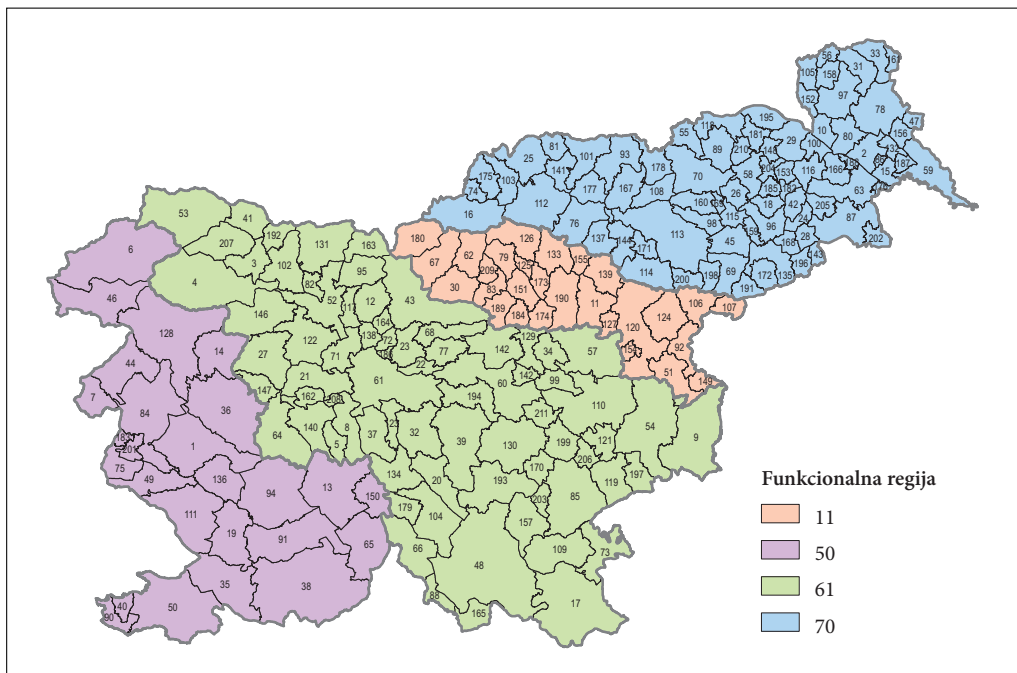


Slika 10: Šest funkcionalnih regij notranjih selitev Slovenije (leto 2009, podobno v letih 2003, 2004 in 2008).

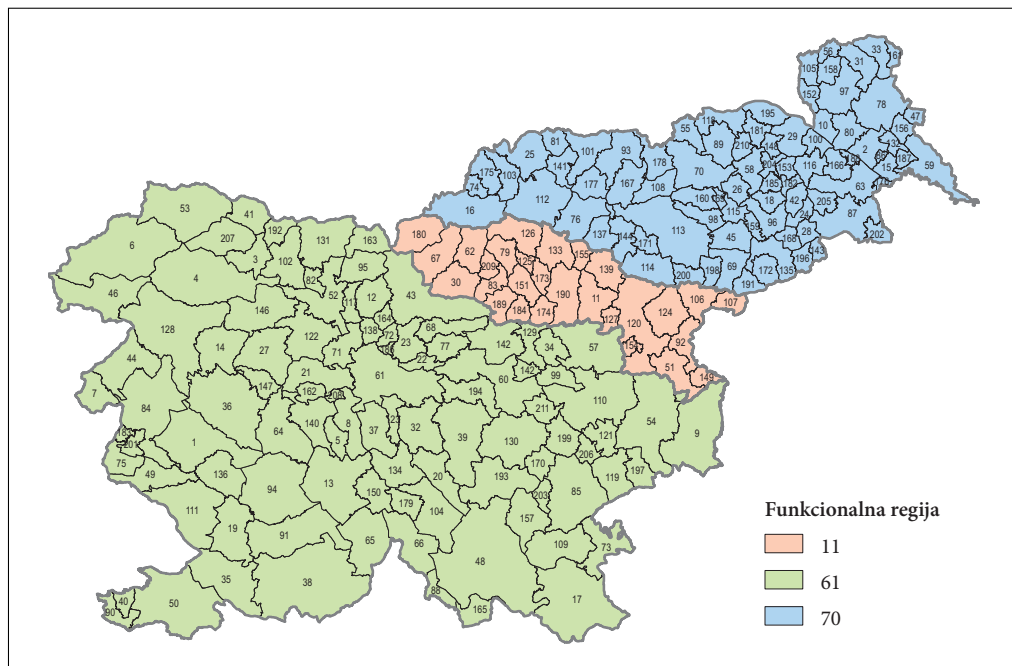
## Funkcionalne regije notranjih selitev Slovenije



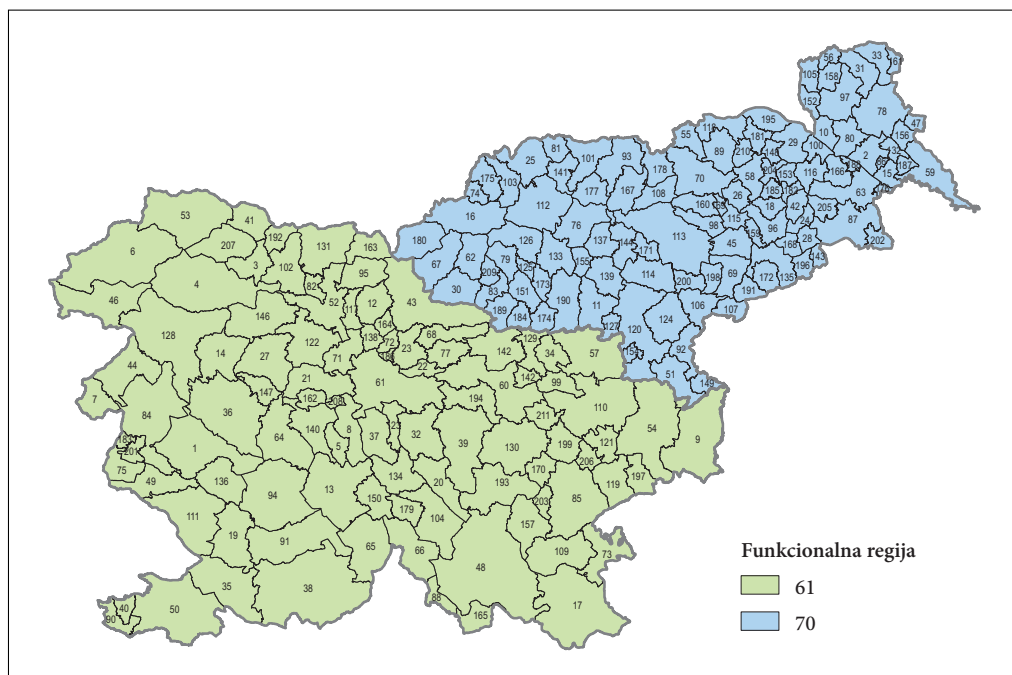
Slika 11: Pet funkcionalne regije notranjih selitev Slovenije (v letih 2008–2010).



Slika 12: Štiri funkcionalne regije notranjih selitev Slovenije (v letih 2005, 2009 in 2010).



Slika 13: Tri funkcionalne regije notranjih selitev Slovenije (v letih 2002, 2005 in 2008–2010).



Slika 14: Dve funkcionalni regiji notranjih selitev Slovenije (v letih 2000–2010).

## 4 Sklep

Tomaney in Ward (2000) ugotavljata, da so funkcionalno opredeljene regije pogosto ogrode za izvajanje številnih državnih politik, razvoj državne uprave, spremljanje prostorskega razvoja ali za ugotavljanje razlik v prostoru. Velike ter stalne spremembe v prostoru narekujejo oblikovanje zapletenih ter dinamičnih regij, ki niso več nujno vezane na točno določeno zaključeno območje in ki povezujejo prostor tokov na smiselne, funkcionalno povezane celote.

V prispevku smo analizirali funkcionalne regije notranjih selitev na makro in mezo ravni Slovenije. Rezultati analize sprememb regij v obdobju 2000–2010 so pokazali, da sta, poleg vzorca členitve države na dve funkcionalni regiji (Ljubljana in Maribor; slika 14), najbolj stabilna vzorca členitve na enajst in deset regij notranjih selitev. V primeru členitve na enajst funkcionalnih regij (slika 5), se le-te oblikujejo okoli Murske Sobote, Maribora, Slovenj Gradca, Celja, Novega mesta, Trbovelj, Ljubljane, Domžal, Kranja, Nove Gorice in Kopra, v primeru desetih regij pa se funkcionalna regija Domžale pripoji k regiji Ljubljana (slika 6).

V prispevku smo modelirali funkcionalne regije po letih po občinah. V prihodnje bi bilo smiselno raziskati še vpliv sprememb občin na oblikovanje funkcionalnih regij. Poskus takšne raziskave je opravil Grdič (2013). V primeru nadaljnjega iskanja »stabilnih« oziroma malo spremenljivih funkcionalnih regij notranjih selitev pa bi bilo treba raziskati tudi modele regij opredeljene s po letih združenimi tokovi notranjih selitev.

## 5 Viri in literatura

- Aphal Vučkovič, L., Bole, D., Čelebič, T., Ferk, B., Jakoš, A., Gabrovec, M., Hanžek, M., Kajzer, A., Kersnik, M., Kmet Zupančič, R., Korošec, V., Kovačič, S., Kraigher, T., Malnar, B., Mandič, S., Pečar, J., Primožič, S., Ravbar, M., Stropnik, N., Šircelj, M., Zver, E. 2009: Socialni razgledi 2008. Ljubljana.
- Bajt, L. 2010: Primer informacijskega sistema za modeliranje funkcionalnih regij v Sloveniji. Magistrsko delo, Ekonomska fakulteta Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Bevc, M. 2000: Notranje in zunanje selitve v Sloveniji v devetdesetih letih po regijah. Teorija in praksa 37-6. Ljubljana.
- Bevc, M., Uršič, S. 2013: Selitve kot razvojni dejavnik Slovenije in njenih regij. Ljubljana.
- Bevc, M., Zupančič, J., Lukšič-Hacin, M. 2004: Migracijska politika in problem bega možganov. Raziskovalna naloga, Inštitut za ekonomska raziskovanja, Inštitut za narodnostna vprašanja. Ljubljana. Medmrežje: <http://www.slovenijajutri.gov.si/fileadmin/urednik/dokumenti/MBevc.pdf> (1. 12. 2012).
- Bole, D. 2004: Dnevna mobilnost delavcev v Sloveniji. Acta geographica Slovenica 44-1. Ljubljana.
- Bole, D. 2011: Changes in employee commuting: A comparative analysis of employee commuting to major slovenian employment centers from 2000 to 2009. Acta geographica Slovenica 51-1. Ljubljana.
- Bole, D., Gabrovec, M. 2012: Daily commuters in Slovenia. Geografski vestnik 84-1. Ljubljana.
- Breukelman, J., Brink, G., de Jong, T., Floor, H. 2009: Manual Flowmap 7.3. Faculty of Geographical Sciences, Utrecht University. Utrecht. Medmrežje: <http://flowmap.geo.uu.nl> (15. 8. 2011).
- Drobne, S., Bogataj, M. 2012a: Metoda opredelitve števila funkcionalnih regij: aplikacija na ravneh NUTS 2 in NUTS 3 v Sloveniji. Geodetski vestnik 56-1. Ljubljana.
- Drobne, S., Bogataj, M. 2012b: Evaluating functional regions. 14th International Conference on Operational Research. Trogir.
- Drobne, S., Bogataj, M. 2013: Evaluating functional regions for servicing the elderly. 12th International Symposium on Operational Research in Slovenia. Ljubljana.
- Drobne, S., Konjar, M. 2011: Modeliranje funkcionalnih regij Slovenije s tokovi delavcev vozačev. Funkcionalne regije – Izzivi prihodnjega razvoja Slovenije. Ljubljana.

- Drobne, S., Konjar, M., Lisec, A. 2009: Delimitation of functional regions using labour market approach. 10th International Symposium on Operational Research in Slovenia. Ljubljana.
- Drobne, S., Konjar, M., Lisec, A., Pichler Milanović, N., Zavodnik Lamovšek, A. 2010: Functional regions defined by urban centres of (inter)national importance: Case of Slovenia. 15th International Conference on Urban Planning, Regional Development and Information Society. Dunaj.
- Drobne, S., Lavrič, M. M. 2012: Spremembe funkcionalnih regij Slovenije med letoma 2000 in 2009. GIS v Sloveniji 11. Ljubljana.
- Drobne, S., Lisec, A., Konjar, M., Zavodnik Lamovšek, A., Pogačnik, A. 2009: Functional vs. administrative regions: Case of Slovenia. Thematic Conference Proceedings 1. Beograd.
- Evers, G. H. M., Van der Veen, A. 1985: A Simultaneous non-linear model for labour Migration and Commuting. Regional Studies 19-3. Cambridge.
- Gabrovec, M., Bole, D. 2009: Dnevna mobilnost v Sloveniji. Georitem 11. Ljubljana.
- Grdič, M. 2013: Vpliv teritorialnih sprememb občin na oblikovanje funkcionalnih regij Slovenije v obdobju 1991–2010. Diplomsko delo. Fakulteta za gradbeništvo in geodezija Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- GURS 2011: Prostorski portal. Geodetska uprava Republike Slovenije. Ljubljana. Medmrežje: <http://www.e-prostor.gov.si/dostop-do-podatkov/dostop-do-podatkov/> (15. 8. 2011).
- Johansson, B. 1998: Infrastructure, Market Potential and Endogenous Growth. Jönköping.
- Karlsson, C., Olsson, M. 2006: The identification of functional regions: Theory, methods, and applications. The Annals of Regional Science 40-1. Heidelberg.
- Konjar, M. 2009: Modeliranje zaposlitvenih sistemov Slovenije na osnovi dnevne mobilnosti. Diplomsko delo. Fakulteta za gradbeništvo in geodezija Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Konjar, M., Lisec, A., Drobne, S. 2010: Methods for delineation of functional regions using data on commuters. Geospatial Thinking: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Berlin.
- Malačič, J. 2006: Demografija. Teorija, analiza, metode in modeli. Ljubljana.
- Masser, I., Brown, P. J. B. 1975: Hierarchical aggregation procedures for interaction data. Environment and Planning A 7-5. London.
- Masser, I., Brown, P. J. B. 1977: Spatial representation and spatial interaction. Papers of the Regional Science Association 38-1. Philadelphia.
- OECD 2002: Redefining territories – The functional regions. Pariz.
- Ravbar, M. 2005: »Urban sprawl«: Popačena slika (sub)urbanizacije v Sloveniji? Geografski vestnik 77-1. Ljubljana.
- Senekovič, A. 2012: Funkcionalne regije stalnih selitev v Sloveniji v letih 2000–2010. Diplomsko delo. Fakulteta za gradbeništvo in geodezija Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- SURS 2011a: Notranje selitve med občinami Slovenije. Statistični urad Republike Slovenije. Ljubljana.
- SURS 2011b: Karte in šifranti osnovnih prostorskih enot. Statistični urad Republike Slovenije. Ljubljana. Medmrežje: [http://www.stat.si/tema\\_splosno\\_upravno\\_karte.asp](http://www.stat.si/tema_splosno_upravno_karte.asp) (11. 1. 2011).
- Tavzes, M. 2002: Veliki slovar tujk. Ljubljana.
- Tomaney, J., Ward, N. 2000: England and the »New Regionalism«. Regional Studies 34-5. Cambridge.
- Vanhove, N., Klaassen, L. H. 1987: Regional Policy: A European Approach. Avebury.
- Vrišer, I. 1978: Regionalno planiranje. Ljubljana.
- Zavodnik Lamovšek, A., Pogačnik, A., Drobne, S., Kobal, J., Pichler Milanović, N., Peterlin, M., Sitar, M., Lavrač, I., Miklavčič, T. 2011: Funkcionalne regije – Izzivi prihodnjega razvoja Slovenije. Ljubljana.

## MODEL VPLIVA RAZDALJE NA DELOVNO MOBILNOST V REGIONALNA SREDIŠČA SLOVENIJE

**mag. Samo Drobne, dr. Mitja Lakner**

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani

samo.drobne@fgg.uni-lj.si, mitja.lakner@fgg.uni-lj.si

UDK: 52-323.3:331.55(497.4)

### IZVLEČEK

#### **Model vpliva razdalje na delovno mobilnost v regionalna središča Slovenije**

V prispevku modeliramo vpliv razdalje na delovno mobilnost v regionalna središča Slovenije. Pri tem obravnavamo sedem modelov padanja jakosti delovne mobilnosti z razdaljo: potenčnega, eksponentnega, normalnega, korensko-eksponentnega, hiperboličnega, potenčno-eksponentnega in normirano potenčno-eksponentnega. Analizo smo izvedli za delovno mobilnost med občinami za leto 2011. Opazovanjem se najboljše prilega (normiran) potenčno-eksponentni model.

### KLJUČNE BESEDE

delovna mobilnost, prometna dostopnost, razdalja, funkcije padanja z razdaljo, jakost interakcije, regionalno središče, Slovenija

### ABSTRACT

#### **Distance-decay model for commuting to regional centres of Slovenia**

In the paper, the impact of distance on commuting to regional centres of Slovenia is modelled. The analysis was performed for seven distance-decay models, namely: power, exponential, normal, square root exponential, hyperbolic, power-exponential and normalized power-exponential. The analyses were performed for inter-municipal commuting in 2011. The best fit to the data was obtained using (normalized) power-exponential model.

### KEY WORDS

commuting, transport accessibility, distance, distance-decay functions, intensity of interaction, regional centre, Slovenia

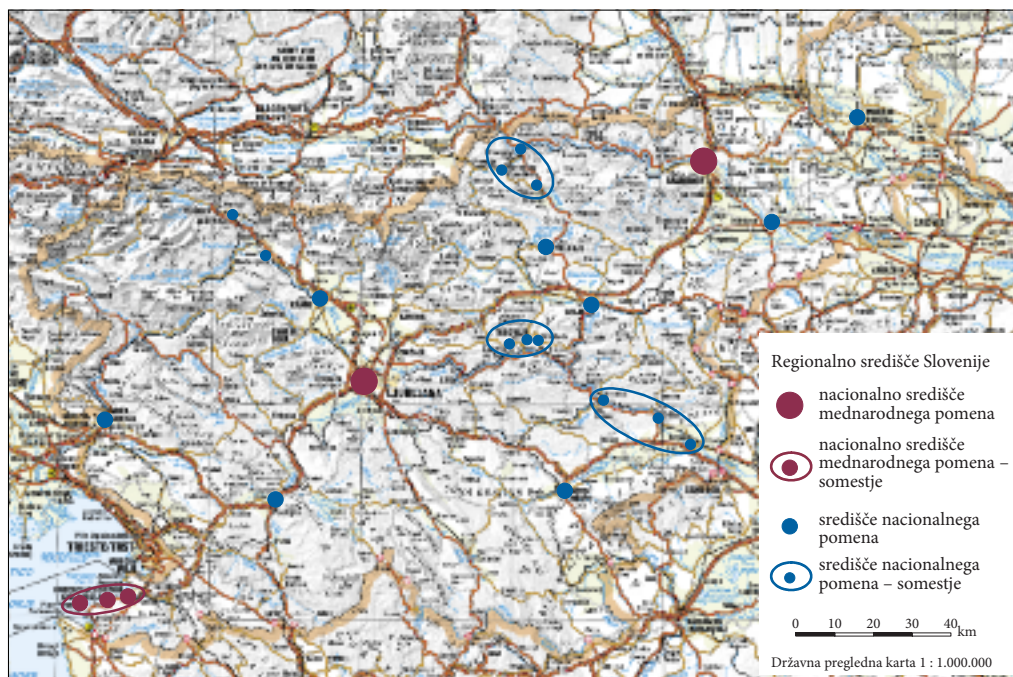


## 1 Uvod

Številni raziskovalci prostorskih interakcijskih sistemov (angl. *spatial interaction systems* – SIM), na primer Ravenstein (1985), Stewart (1941; 1948), Taylor (1971; 1975), Haynes in Fotheringham (1984), Fotheringham in O'Kelly (1989) so dokazali, da je obseg interakcije med dvema točkama v prostoru odvisen predvsem od razdalje med njima. Vlogo razdalje pri interakcijah je strnil Waldo Tobler v »prvi zakon geografije«, ki pravi, da »... so vse stvari v prostoru povezane, toda bližnje so bolj povezane kot tiste bolj oddaljene ...« (Tobler 1970, 236). Tako se je v angleško govorečih deželah razvil koncept »padanja z razdaljo« (angl. *distance-decay concept*); pri tem je mišljeno »padanje jakosti interakcije z razdaljo«.

Delovna mobilnost, to je dnevna ali tedenska vožnja na delo in nazaj, je močno pogojena s stopnjo družbeno-gospodarske razvitosti, načina oziroma gostote poselitve, razporejenosti zaposlitvenih središč in tudi od prometne povezanosti med posameznimi kraji. Hiter tehnološki napredek in razvoj v preteklosti sta omogočila lažje in hitreje premagovanje večjih razdalj. Z izboljšano infrastrukturo in z boljšimi prometnimi povezavami se je znatno povečala dostopnost (de Vries s sodelavci 2009). Toda, kot so dokazali Hočevar in sodelavci (2004), se s tem ni bistveno skrajšal čas potovanja do dela, temveč se je predvsem povečal prostorski domet dnevne delovne mobilnosti.

Po podatkih iz Statističnega registra delovno aktivnega prebivalstva (SRDAP) je bilo leta 2011 malo več kot polovica (51,8 %) delovnih mest v Sloveniji zgoščenih v širših urbanih območjih Ljubljane, Maribora, obalnega somestja Koper-Izola-Piran, Celja; sledili so Kranj, Novo mesto, somestje Sevnica-Krško-Brežice in Velenje (SURS 2013). Slika 1 prikazuje petnajst regionalnih središč Slovenije, ki jih Strategija prostorskega razvoja Slovenije (SPRS 2004) obravnava kot nacionalna središča mednarodnega pomena (Ljubljana, Maribor in somestje Koper-Izola-Piran) in središča nacionalnega pomena (tri nacionalna središča mednarodnega pomena in osem mest: Murska Sobota, Ptuj, Celje, Velenje, Kranj, Novo mesto, Postojna, Nova Gorica, in štiri somestja: Jesenice-Radovljica, Zagorje ob Savi-Trbov-



Slika 1: Regionalna središča Slovenije po Strategiji prostorskega razvoja Slovenije (SPRS 2004).

lje-Hrastnik, Slovenj Gradec-Ravne na Koroškem-Dravograd in Brežice-Krško-Sevnica). Po statističnih podatkih (SUR5 2013) je bilo leta 2011 v regionalnih središčih 487.961 (62,5 %) od skupno 781.049 delovnih mest v Sloveniji.

Z delovno mobilnostjo so se v Sloveniji ukvarjali številni avtorji. Primere raziskav, v katerih so avtorji obravnavali tudi dostopnost do delovnih mest, najdemo v delih: Bogatajeve in Drobneti (2005), Boleta (2004; 2011), Boleta in Gabrovca (2012), Dolenc (2000), Drobneti (2013), Drobneti in Bogatajeve (2005; 2011), Drobneti in sodelavcev (2012; 2013), Gabrovca in Boleta (2009), Pavlina in Sluge (2000), ter Pelca (1998), splošne primere študij prometne dostopnosti do izbranih središč pa najdemo v delih: Drobneti (2003; 2005; 2012a), Drobne in sodelavcev (2004; 2005; 2008), Gabrovca in Boleta (2006), Kozine (2010a; 2010), ter Zavodnik Lamovškove in sodelavcev (2009).

Iz številnih raziskav prostorskih interakcijskih modelov (Haynes in Fotheringham 1984; Fotheringham in O'Kelly 1989) sledi, da so prostorske interakcije funkcija razdalje in ostalih spremenljivk:

$$I_{ij} = q(d_{ij}, O_i, P_j), \quad (1)$$

pri čemer je  $I_{ij}$  interakcija iz izvora  $i$  v ponor  $j$ ,  $d_{ij}$  je razdalja iz  $i$  v  $j$ ,  $O_i$  je oddajanje v izvoru  $i$ ,  $P_j$  privlačnost v ponoru  $j$ ,  $q$  pa funkcija treh spremenljivk. Fotheringham (1980; 1981; 1984) je dokazal, da lahko funkcijo razdalje,  $f(d_{ij})$ , obravnavamo ločeno:

$$I_{ij} = f(d_{ij}) \quad (2)$$

vendar je treba pri tem jakost interakcije izraziti relativno glede na izvor (Taylor 1971; 1975).

V prispevku modeliramo vpliv razdalje na delovno mobilnost v petnajst regionalnih središč Slovenije. Pri tem obravnavamo šest vrst funkcij: potenčno, eksponentno, normalno, korensko-eksponentno, hiperbolo in potenčno-eksponentno. Podobno raziskavo je opravil Drobne (2012b), vendar je analizo izvedel le za potenčni gravitacijski model in za vse interakcije delovne mobilnosti v Sloveniji hkrati.

V nadaljevanju najprej opišemo metodologijo, sledi predstavitev rezultatov modeliranja, prispevek pa sklenemo s predlogi za nadaljnje delo.

## 2 Metodologija

Za vsako regionalno središče Slovenije,  $k$  ( $k = 1, 2, \dots, m$ ) pri čemer je  $m$  število regionalnih središč, lahko izračunamo:

$$DM_k^{\%} = \{ (d_{ik}, DM_{ik}^{\%}); i = 1, 2, \dots, n \}, \quad (3)$$

pri čemer je  $d_{ik}$  razdalja iz občinskega središča  $i$  v regionalno središče  $k$ ,  $n$  je število občin oziroma občinskih središč,  $DM_k^{\%}$  pa (relativna) jakost delovne mobilnosti iz občine  $i$  v regionalno središče  $k$ , izračunana kot količnik med delovno mobilnostjo na interakciji iz  $i$  v  $k$ ,  $DM_{ik}$ , in vsoto medobčinskih tokov iz občine

izvora  $i$  v vse ostale občine ponora  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ),  $\sum_{j=1, i \neq j}^n DM_{ij}$  :

$$DM_{ik}^{\%} = \frac{DM_{ik}}{\sum_{j=1, i \neq j}^n DM_{ij}}. \quad (4)$$

Podatkom  $DM_k^{\%}$  smo poiskali sedem modelov oziroma funkcij padanja jakosti delovne mobilnosti z razdaljo. Nabor funkcij smo sestavili iz primerov, ki smo jih povzeli po Taylorju (1971; 1975); to so funkcije

(5–8), katerim smo dodali hiperbolo, potenčno-eksponentno funkcijo in njeno normirano različico; glej (9–11):

• potenčna funkcija  $f_k(d) = ad^b$  (5)

• eksponentna funkcija  $f_k(d) = ae^{-bd}$  (6)

• normalna funkcija  $f_k(d) = ae^{-bd^2}$  (7)

• korensko-eksponentna funkcija  $f_k(d) = ae^{-bd^{0.5}}$  (8)

• hiperbola  $f_k(d) = a + \frac{b}{d}$  (9)

• potenčno-eksponentna funkcija  $f_k(d) = ce^{-ad^b}$  (10)

• normirana potenčno-eksponentna funkcija  $f_k(d) = e^{-ad^b}$  (11)

Postopek ocenjevanja parametrov  $a$ ,  $b$  in  $c$  smo izvajali v programskem orodju za simbolno računanje *Mathematica* po metodi najmanjših kvadratov:

$$\sum_{i=1}^n (DM_{ik}^{\%} - f_k(d_{ik}))^2 = \min, \quad (12)$$

kar pomeni, da se je graf funkcije  $f_k(d_{ik})$  podatkom  $DM_{ik}^{\%}$  prilagal čim bolje.

Za vsako funkcijo smo izračunali standardno napako ocene (SNO) in determinacijski koeficient ( $R^2$ ):

$$SNO = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (DM_{ik}^{\%} - f_k(d_{ik}))^2}, \quad (13)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{ost}}{SS_{skup}}, \quad (14)$$

pri čemer je

$$SS_{ost} = \sum_{i=1}^n (DM_{ik}^{\%} - f_k(d_{ik}))^2, \quad (15)$$

$$SS_{skup} = \sum_{i=1}^n (DM_{ik}^{\%} - \overline{DM_{ik}^{\%}})^2, \quad (16)$$

$\overline{DM_{ik}^{\%}}$  pa je srednja vrednost relativne jakosti delovne mobilnosti,  $DM_{ik}^{\%}$ :

$$\overline{DM_{ik}^{\%}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DM_{ik}^{\%}. \quad (17)$$

Modele vpliva razdalje na jakost delovne mobilnosti v posamezno regionalno središče smo, ob predpostavki enakega vpliva v vseh smereh, z uteženim kombiniranjem sestavili v enotni model za celotno Slovenijo.

Večina zaposlenih (85 %) se vozi na delo z osebnim vozilom (Gabrovec in Bole 2009). Razdalje med občinskimi središči ( $n = 210$ ) za leto 2011 smo zato izračunali v okolju GIS s pomočjo mreže državnih cest. Posebej smo analizirali vpliv najkrajše ( $d_{ik}$ ) in najhitrejši poti, ( $t_{ik}$ ) po mreži državnih cest na delovno mobilnost v petnajst regionalnih središč Slovenije ( $m = 15$ ). V prispevku ne obravnavamo delovne mobilnosti znotraj občin ( $DM_{i=j}$ ). Podatke o delovni mobilnosti za leto 2011 smo pridobili iz Statističnega registra delovno aktivnega prebivalstva (SRDAP), kjer sta na voljo kraj bivanja in kraj dela zaposlenega (SURs 2013), podatke o občinah in občinskih središčih na Geodetski upravi Republike Slovenije (GURS 2013), podatke o državnih cestah pa na Direkciji Republike Slovenije za ceste (DRSC 2013).

Gabrovec in Bole (2009) sta opozorila na problema, ki izhajata iz metodologije zajema podatkov v bazo SRDAP in ki se tičeta tudi naše raziskave; to sta napačna navedba kraja bivanja ali kraja dela ter pomanjkanje podatkov o dejanskih potovanjih zaposlenih oseb. Rezultate naše raziskave je zato treba kritično obravnavati.

### 3 Rezultati

V preglednici 1 so za leto 2011 predstavljeni determinacijski koeficienti funkcij upadanja jakosti delovne mobilnosti v regionalna središča z najkrajšo razdaljo, v preglednici 2 pa z najhitrejšo potjo po mreži državnih cest. Primerjava koeficientov pokaže, da se podatkom bolje prilagajajo funkcije  $f_k(d)$  kot  $f_k(t)$  – kar pomeni, da z najkrajšo razdaljo ( $d_{ij}$ ) bolje modeliramo funkcijo padanja jakosti delovne mobilnosti v regionalna središča kot z najhitrejšo potjo ( $t_{ij}$ ). Koeficienti v preglednici 1 so v večini primerov nekoliko višji kot v preglednici 2. Izjemi sta somestji Slovenj Gradec-Dravograd-Ravne na Koroškem in Trbovlje-Hrastnik-Zagorje ob Savi. To sta somestji, ki še nista neposredno povezani na slovenski avtocestni križ, zato je čas dostopa do teh dveh regionalnih središč še posebej pomemben.

Primerjava determinacijskih koeficientov med funkcijami (5–11) pokaže, da se opazovanjem v vseh primerih najbolje prilaga potenčno-eksponentna funkcija (10), razen v primeru najhitrejše poti do Postojne in do somestja Jesenice-Radovljica – v teh primerih je najboljši potenčni model (4). V vseh drugih primerih se je potenčni model (4), poleg hiperbole (9), izkazal za najslabšega.

Sklenemo lahko, da je za modeliranje vpliva razdalje na jakost delovne mobilnosti v regionalna središča smiselno uporabljati najkrajšo pot in normirano potenčno-eksponentno funkcijo (11), ki jo opisujeta le dva parametra. Preglednica 3 prikazuje ocenjene parametre normirane potenčno-regresijske funkcije (11) za petnajst regionalnih središč.

Z modelom (11) najbolje opišemo delovno mobilnost v središča nacionalnega pomena, kjer ni mogoče zaznati neposrednega vpliva bližnjih, večjih središč mednarodnega pomena; to so na primer Novo mesto ( $R^2 = 0,946$ ) in somestja Slovenj Gradec-Dravograd-Ravne na Koroškem ( $R^2 = 0,922$ ), Trbovlje-Hrastnik-Zagorje ob Savi ( $R^2 = 0,939$ ), Nova Gorica ( $R^2 = 0,911$ ), Celje ( $R^2 = 0,895$ ), Velenje ( $R^2 = 0,878$ ). Najmanj se model (11) prilaga interakcijam v središča, kjer je mogoče v bližini zaznati vpliv večjih regionalnih središč, na primer Kranj ( $R^2 = 0,648$ ), kjer je mogoče zaznati izjemno močan vpliv Ljubljane in Ptuj ( $R^2 = 0,695$ ), na katerega vpliva Maribor. Vpliv razdalje na delovno mobilnost v urbana središča mednarodnega pomena opišemo zelo dobro z modelom (11) za interakcije v Maribor ( $R^2 = 0,939$ ) in v somestje Koper-Izola-Piran ( $R^2 = 0,932$ ), medtem ko je determinacijski koeficient za Ljubljano nekoliko nižji ( $R^2 = 0,777$ ).

Ocenjene potenčno-regresijske funkcije imajo različne oblike in domet. V primeru, da predpostavimo enak vpliv v vseh smereh, lahko zarišemo ploskev padanja vpliva središča z razdaljo. Na slikah 2 do 16 so prikazane normirane potenčno-eksponentne ploskve vpliva razdalje na jakost delovne mobilnosti v regionalna središča leta 2011 (oddaljenost od urbanega središča je v kilometrih). Slike 2–4 kažejo podobno obliko padanja jakosti delovne mobilnosti z razdaljo do Ljubljane in somestja Koper-Izola-Piran, vendar je domet prestolnice precej večji, medtem ko vpliv oddaljenosti od Maribora pada bolj počasi. Primerjava ploskev za ostala regionalna središča (slike 5–16) izpostavi naslednje skupine središč nacionalnega pomena: vpliv razdalje na jakost delovne mobilnosti je izjemno velik za interakcije v Ptuj, Kranj in v somestje Trbovlje-Hrastnik-Zagorje ob Savi; vpliv je nekoliko manjši za interakcije v Mursko Soboto, Celje, Velenje, Postojno in v Jesenice-Radovljico; najmanjši pa je za Novo Gorico, somestji Slovenj Gradec-Dravograd-Ravne na Koroškem in Sevnico-Krško-Brežice, še posebej počasi pa pada jakost delovne mobilnosti z razdaljo v regionalna središča, ki je precej oddaljeno od ostalih središč, to je v Novo mesto.

Z uteženo kombinacijo normiranih potenčno-eksponentnih modelov smo izdelali skupni model padanja jakosti delovne mobilnosti v regionalna središča Slovenije z razdaljo. Slika 17 prikazuje perspektivni

Preglednica 1: Determinacijski koeficienti ( $R^2$ ) funkcij padanja jakosti delovne mobilnosti v regionalna središča Slovenije z najkrajšo razdaljo ( $f_k(d)$ ), po mreži državnih cest leta 2011.

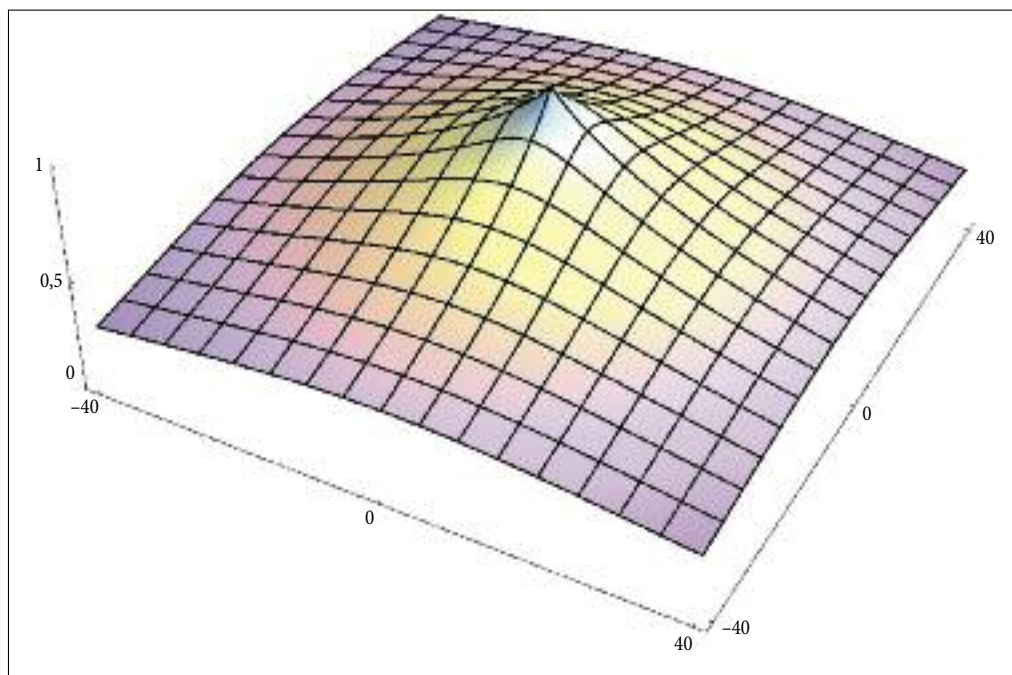
regionalno središče	potenčna funkcija (5)	eksponentna funkcija (6)	normalna funkcija (7)	korensko-eksponentna funkcija (8)	hiperbola (9)	potenčno-eksponentna funkcija (10)	normirana potenčno-eksponentna funkcija (11)
Ljubljana	0,743	0,769	0,688	0,784	0,707	0,784	0,777
Maribor	0,818	0,925	0,947	0,888	0,851	0,947	0,939
Koper-Izola-Piran	0,847	0,934	0,942	0,908	0,872	0,943	0,932
Murska Sobota	0,696	0,787	0,802	0,760	0,726	0,803	0,786
Ptuj	0,593	0,715	0,737	0,677	0,623	0,739	0,695
Celje	0,774	0,897	0,881	0,870	0,821	0,899	0,895
Velenje	0,860	0,887	0,861	0,887	0,803	0,889	0,878
Kranj	0,580	0,651	0,632	0,641	0,606	0,651	0,648
Novo mesto	0,795	0,929	0,955	0,886	0,839	0,955	0,946
Postojna	0,730	0,734	0,713	0,737	0,504	0,737	0,733
Nova Gorica	0,675	0,927	0,953	0,856	0,686	0,953	0,911
Slovenj Gradec-							
Dravograd-	0,833	0,911	0,938	0,881	0,819	0,946	0,922
Ravne na Koroškem							
Jesenice-Radovljica	0,730	0,737	0,708	0,744	0,708	0,744	0,739
Trbovlje-Hrastnik-							
Zagorje ob Savi	0,837	0,918	0,946	0,889	0,742	0,954	0,912
Sevnica-Krško-Brežice	0,723	0,796	0,824	0,769	0,633	0,834	0,807

Preglednica 2: Determinacijski koeficienti ( $R^2$ ) funkcij padanja jakosti delovne mobilnosti v regionalna središča Slovenije z najhitrejšo potjo ( $f_k(t)$ ), po mreži državnih cest leta 2011.

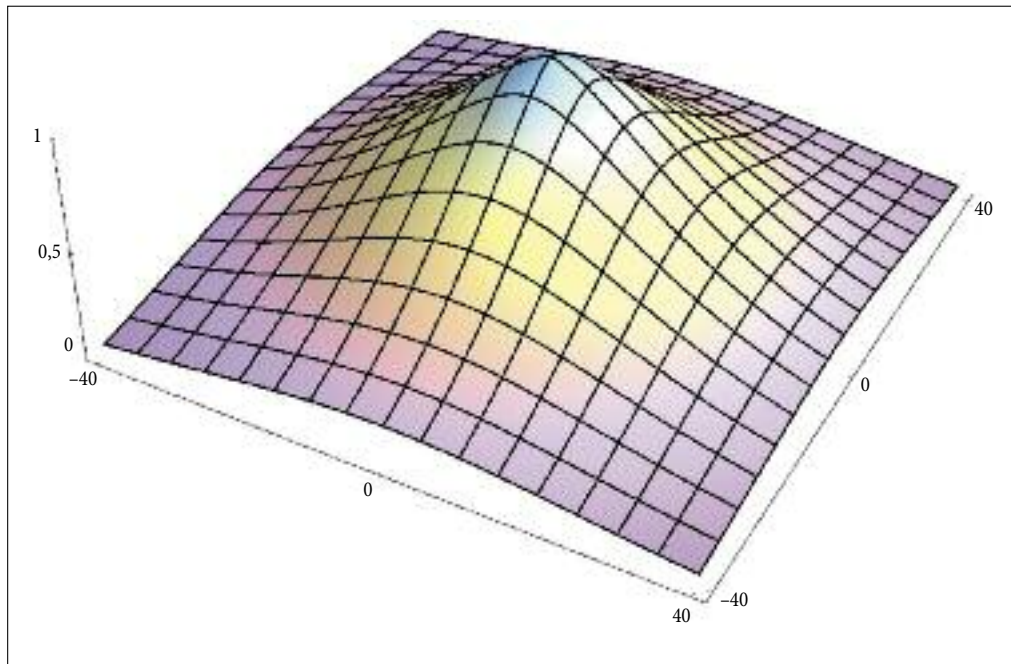
regionalno središče	potenčna funkcija (5)	eksponentna funkcija (6)	normalna funkcija (7)	korensko-eksponentna funkcija (8)	hiperbola (9)	potenčno-eksponentna funkcija (10)	normirana potenčno-eksponentna funkcija (11)
Ljubljana	0,726	0,736	0,675	0,747	0,730	0,747	0,733
Maribor	0,816	0,902	0,916	0,873	0,844	0,916	0,915
Koper-Izola-Piran	0,844	0,924	0,930	0,901	0,862	0,931	0,928
Murska Sobota	0,627	0,678	0,675	0,665	0,652	0,680	0,679
Ptuj	0,557	0,671	0,699	0,631	0,602	0,703	0,658
Celje	0,723	0,832	0,809	0,810	0,779	0,833	0,832
Velenje	0,837	0,884	0,875	0,875	0,762	0,884	0,879
Kranj	0,513	0,602	0,593	0,584	0,549	0,603	0,597
Novo mesto	0,768	0,864	0,880	0,833	0,774	0,880	0,879
Postojna	0,653	0,639	0,636	0,645	0,330	0,649	0,636
Nova Gorica	0,599	0,887	0,933	0,792	0,637	0,936	0,882
Slovenj Gradec							
Dravograd	0,845	0,919	0,939	0,893	0,849	0,942	0,929
Ravne na Koroškem							
Jesenice-Radovljica	0,651	0,631	0,606	0,646	0,569	0,651	0,624
Tribovlje-Hrastnik	0,855	0,922	0,941	0,899	0,743	0,945	0,921
Zagorje ob Savi							
Sevnica-Krško-Brežice	0,603	0,659	0,677	0,639	0,551	0,682	0,664

Preglednica 3: Parametri normirane potenčno-regresijske funkcije (11) padanja jakosti delovne mobilnosti v regionalna središča Slovenije z najkrajšo razdaljo po mreži državnih cest leta 2011.

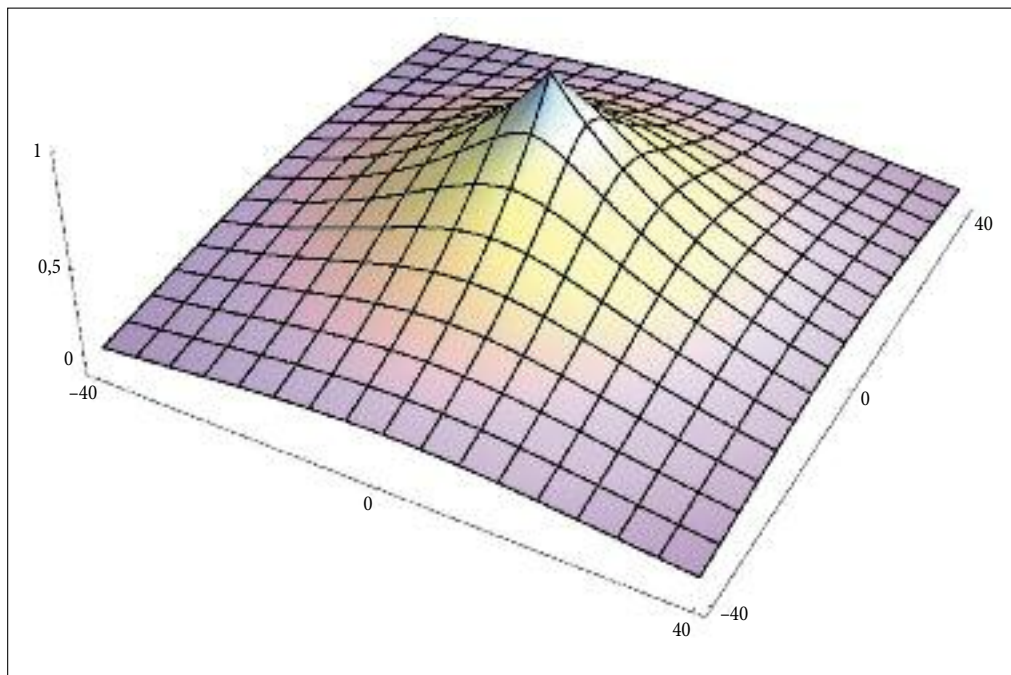
regionalno središče	standardna napaka ocene SNO (13)	determinacijski koeficient $R^2$ (14)	parameter $a$ (v 11)	parameter $b$ (v 11)
Ljubljana	0,095	0,777	0,043	0,839
Maribor	0,039	0,939	0,009	1,423
Koper-Izola-Piran	0,022	0,932	0,044	0,967
Murska Sobota	0,065	0,786	0,057	1,001
Ptuj	0,050	0,695	0,224	0,718
Celje	0,031	0,895	0,094	0,894
Velenje	0,028	0,878	0,030	1,346
Kranj	0,046	0,648	0,213	0,712
Novo mesto	0,028	0,946	0,009	1,473
Postojna	0,017	0,733	0,069	1,098
Nova Gorica	0,027	0,911	0,074	0,883
Slovenj Gradec-Dravograd- Ravne na Koroškem	0,027	0,922	0,020	1,338
Jesenice-Radovljica	0,033	0,739	0,116	0,883
Trbovlje-Hrastnik- Zagorje ob Savi	0,009	0,912	0,177	0,887
Sevnica-Krško-Brežice	0,023	0,807	0,020	1,345



Slika 2: Normirana ploskev vpliva razdalje na jakost delovne mobilnosti v Ljubljano.

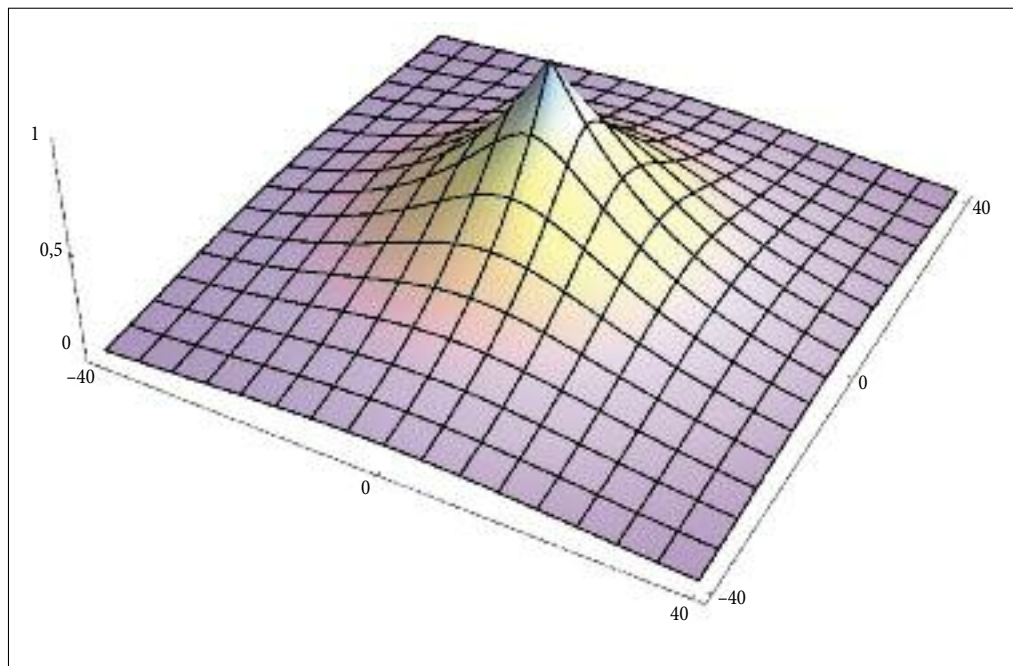


Slika 3: Normirana ploskev vpliva razdalje na jakost delovne mobilnosti v Maribor.

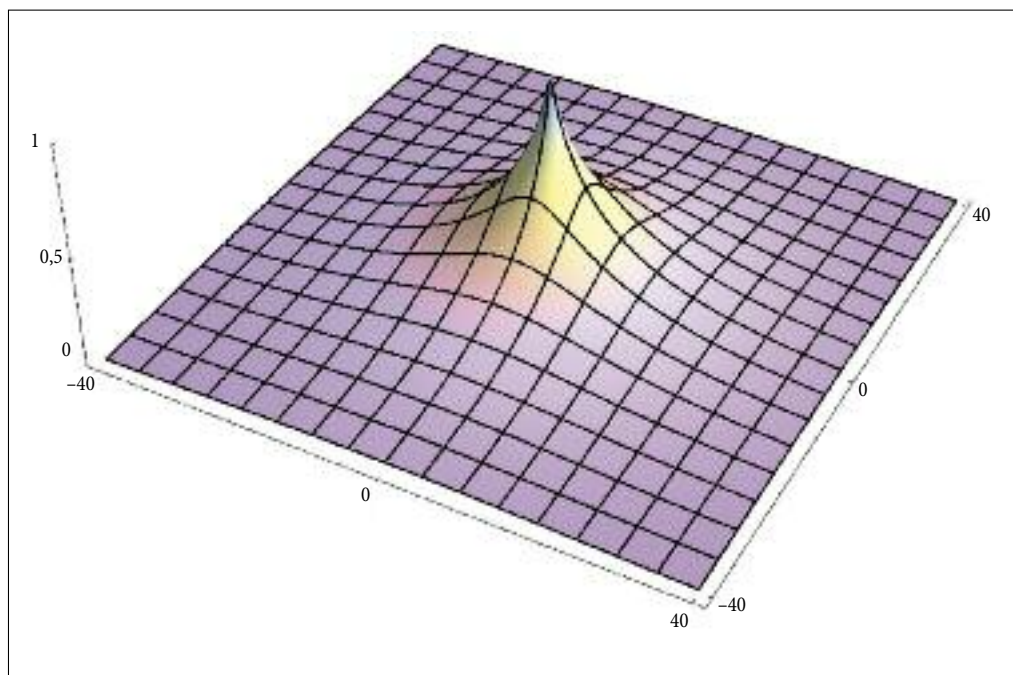


Slika 4: Normirana ploskev vpliva razdalje na jakost delovne mobilnosti v Koper-Izolo-Piran.

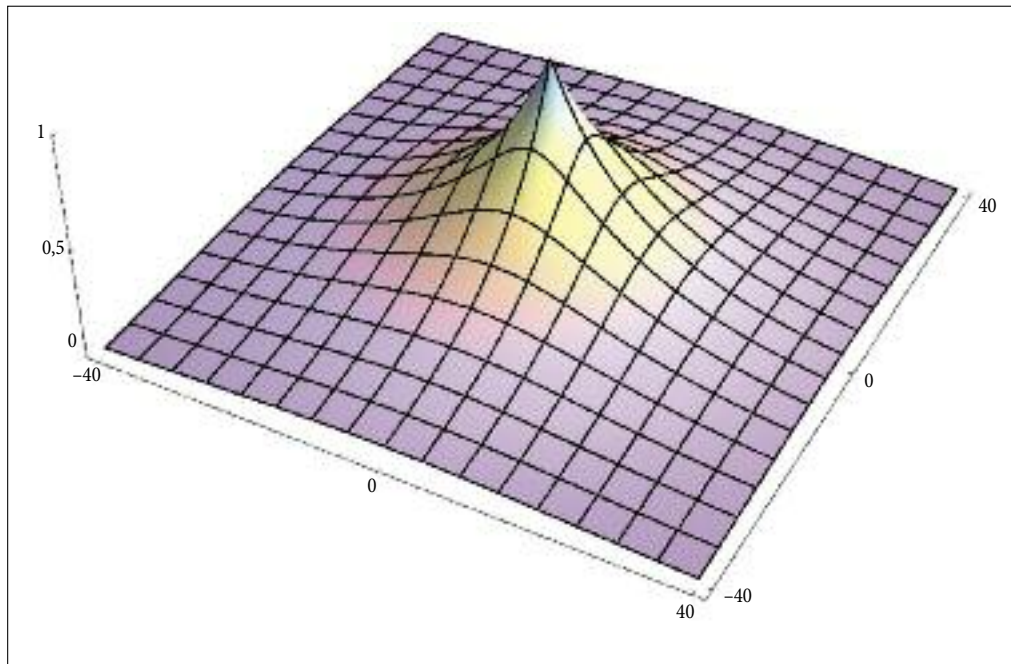




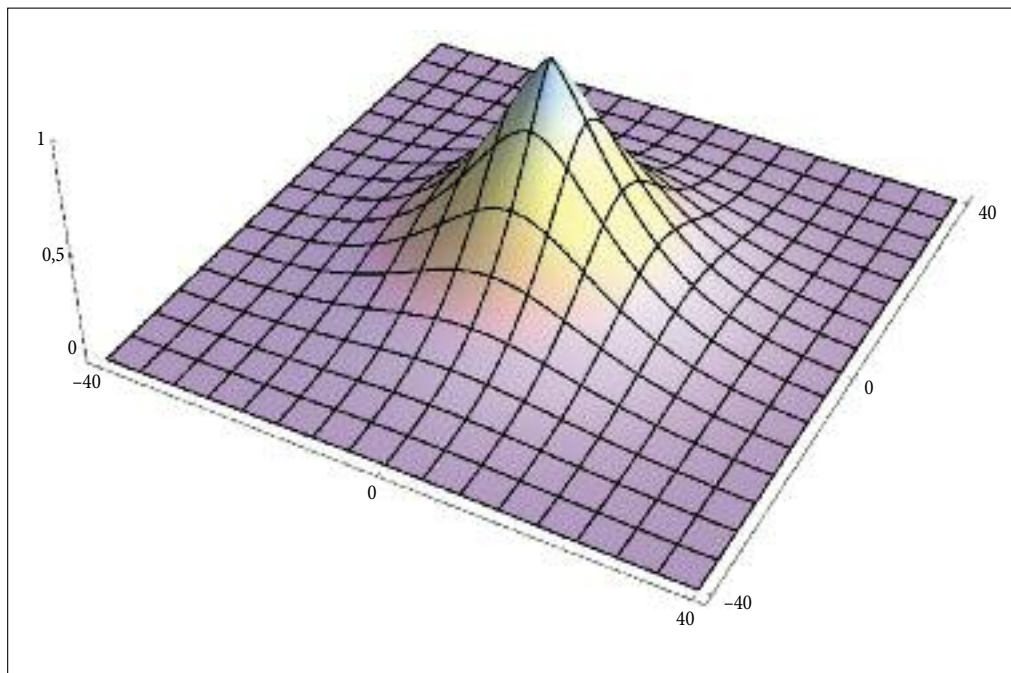
Slika 5: Normirana ploskev vpliva razdalje na jakost delovne mobilnosti v Mursko Soboto.



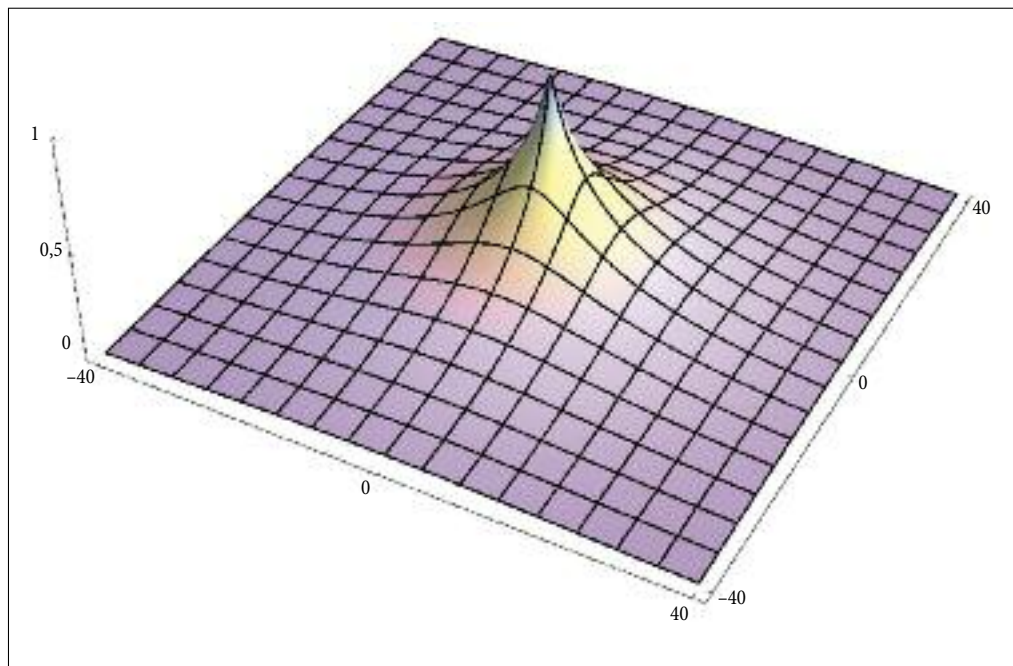
Slika 6: Normirana ploskev vpliva razdalje na jakost delovne mobilnosti v Ptuj.



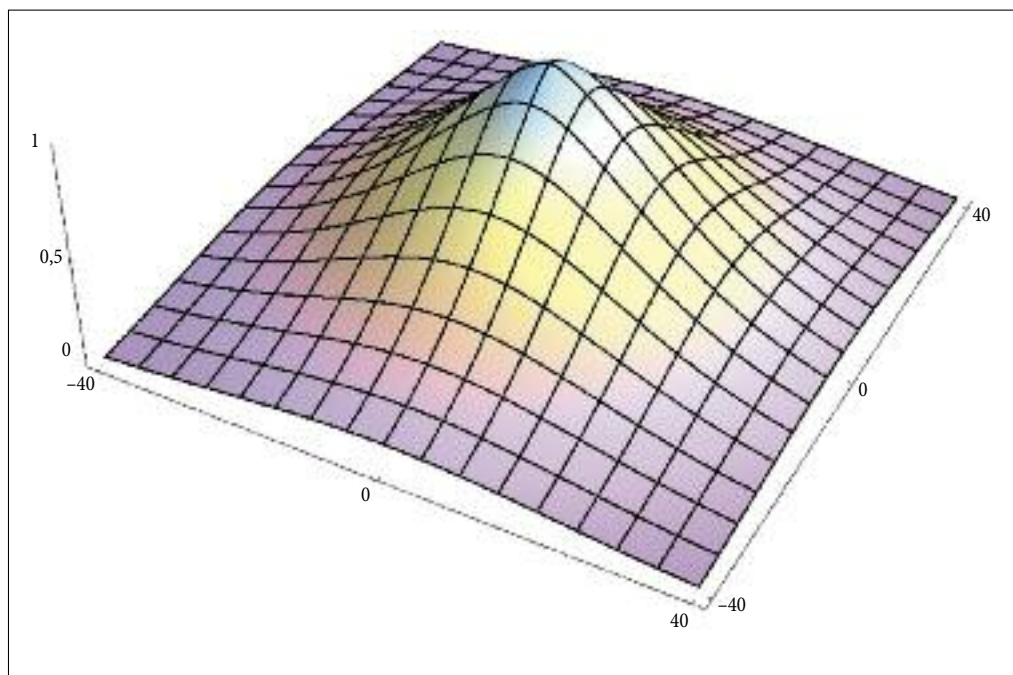
Slika 7: Normirana ploskev vpliva razdalje na jakost delovne mobilnosti v Celje.



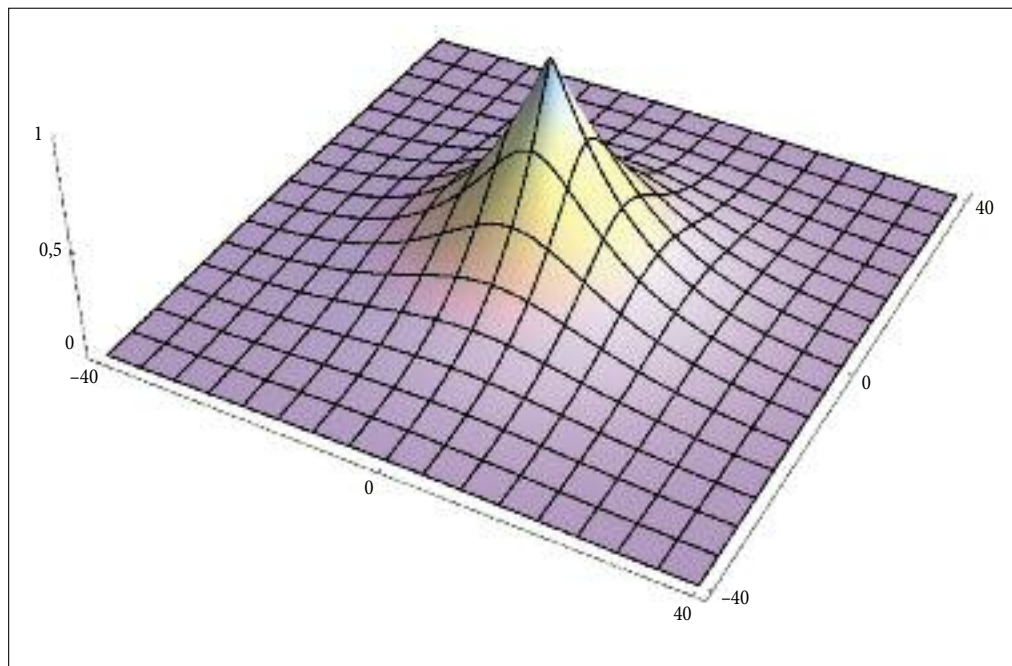
Slika 8: Normirana ploskev vpliva razdalje na jakost delovne mobilnosti v Velenje.



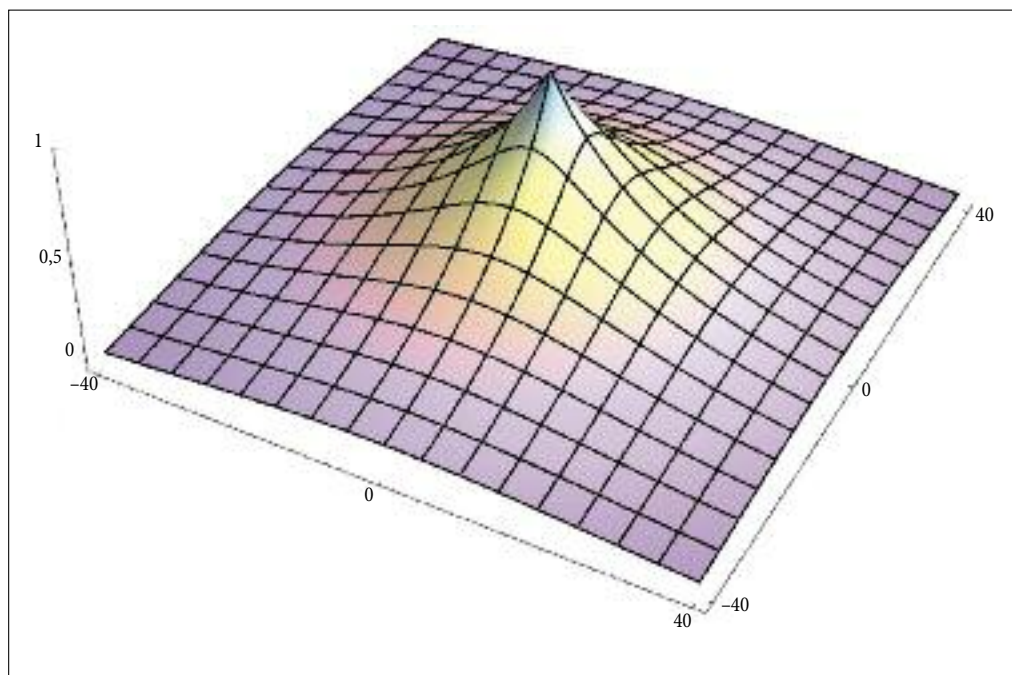
Slika 9: Normirana ploskev vpliva razdalje na jakost delovne mobilnosti v Kranj.



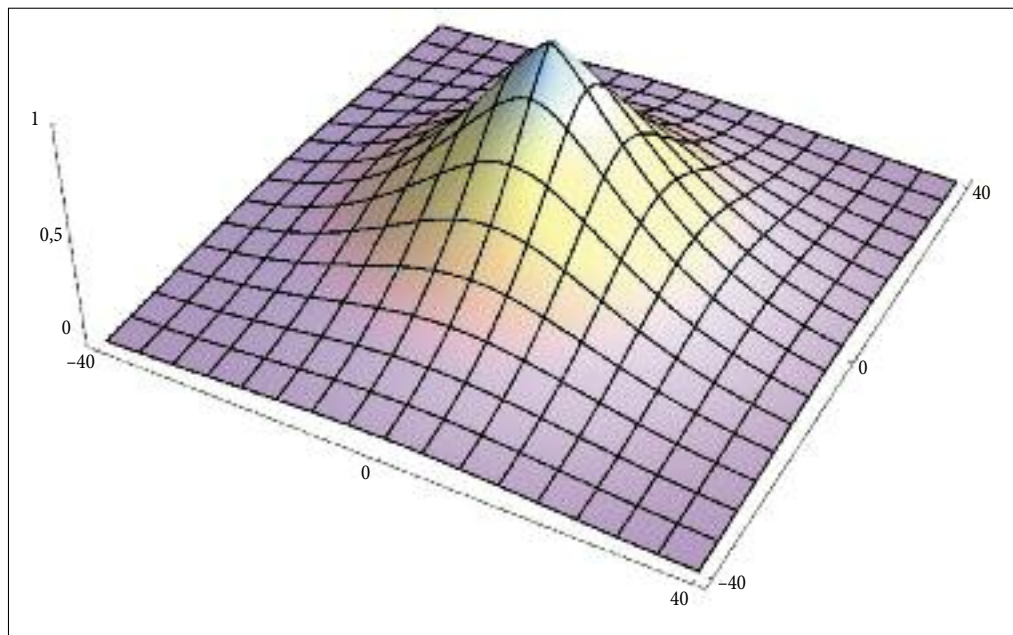
Slika 10: Normirana ploskev vpliva razdalje na jakost delovne mobilnosti v Novo mesto.



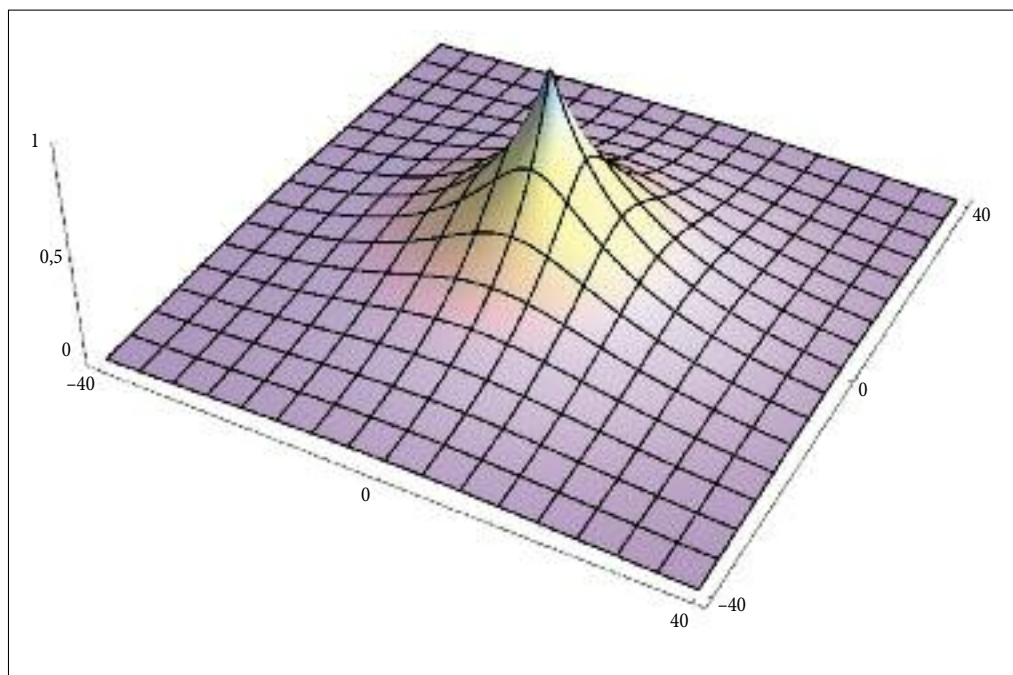
Slika 11: Normirana ploskev vpliva razdalje na jakost delovne mobilnosti v Postojno.



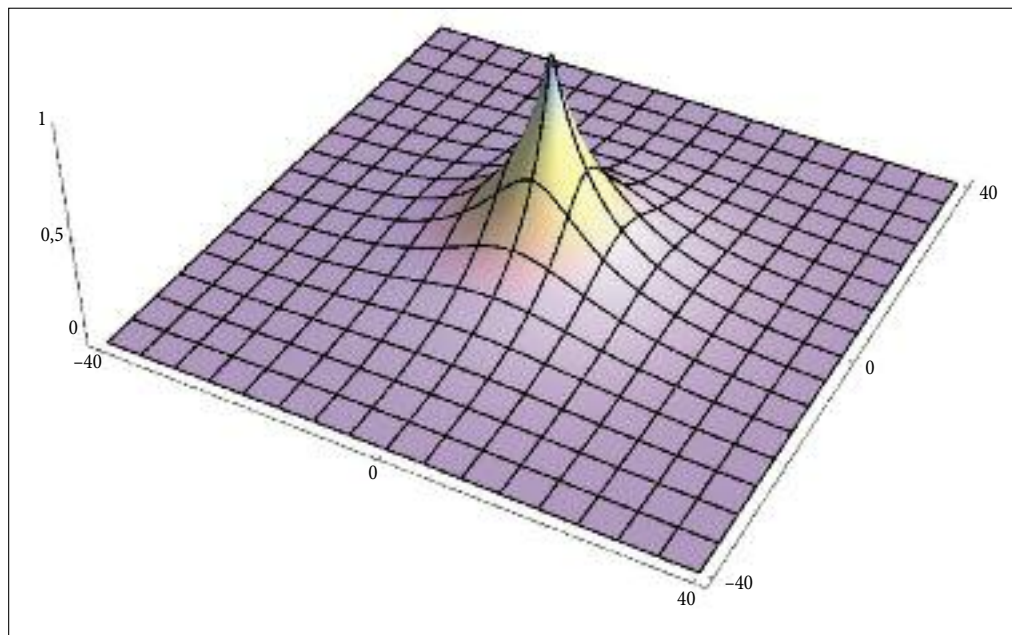
Slika 12: Normirana ploskev vpliva razdalje na jakost delovne mobilnosti v Novo Gorico.



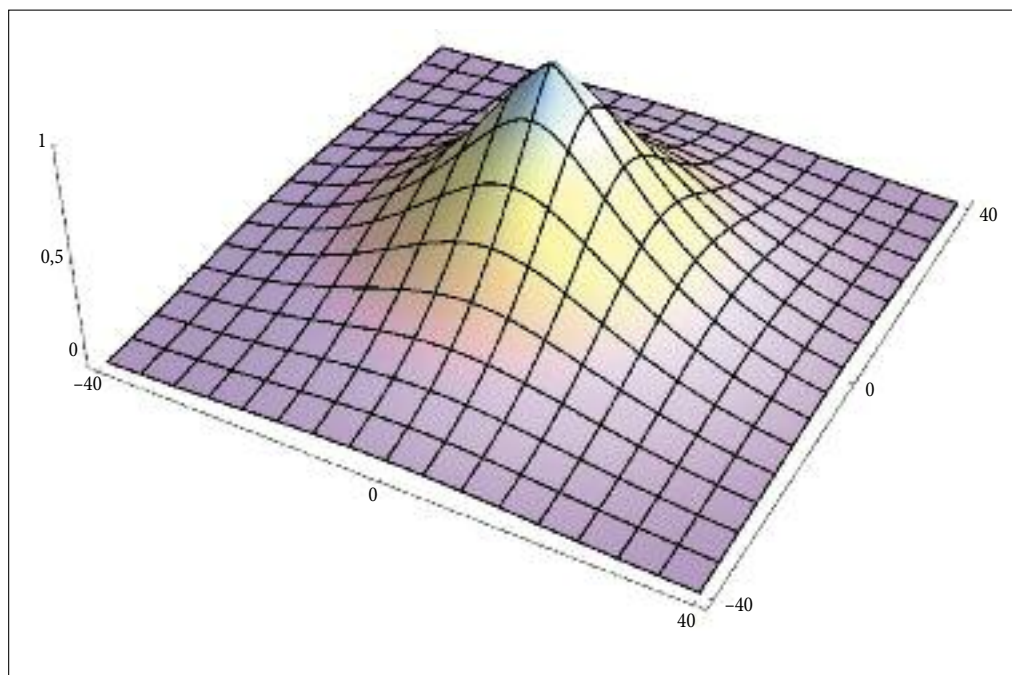
Slika 13: Normirana ploskev vpliva razdalje na jakost delovne mobilnosti v Slovenj Gradec-Dravograd-Ravne na Koroškem.



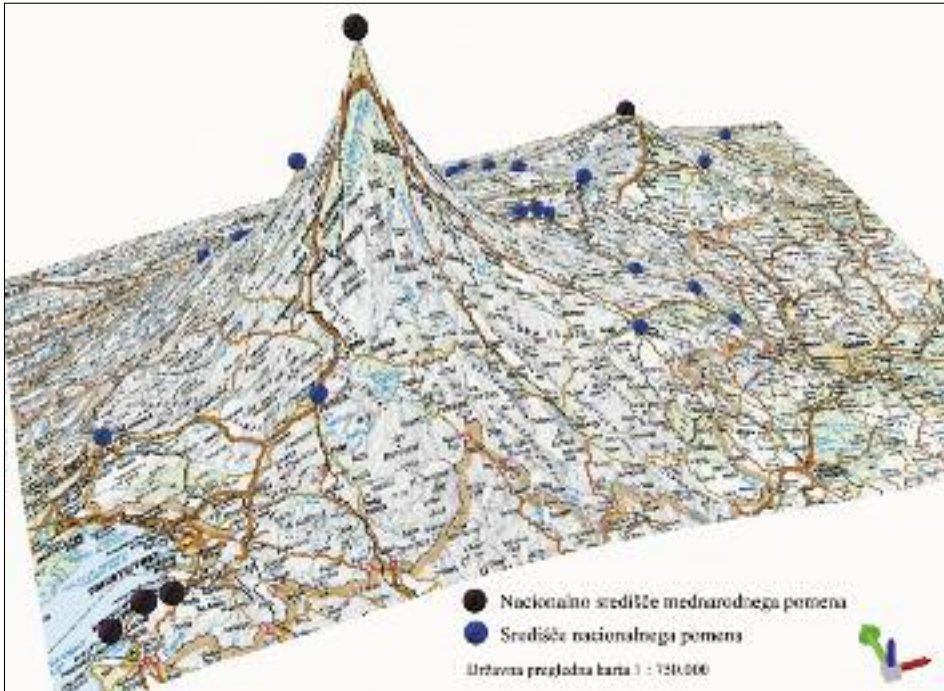
Slika 14: Normirana ploskev vpliva razdalje na jakost delovne mobilnosti v Jesenice-Radovljico.



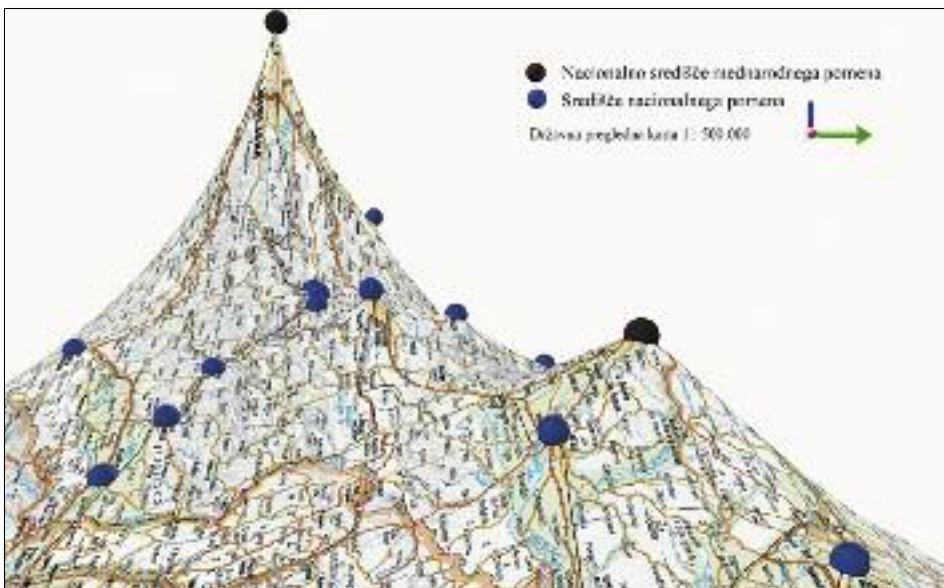
Slika 15: Normirana ploskev vpliva razdalje na jakost delovne mobilnosti v Trbovlje-Hrastnik-Zagorje ob Savi.



Slika 16: Normirana ploskev vpliva razdalje na jakost delovne mobilnosti v Sevnico-Krško-Brežice.



Slika 17: Perspektivni prikaz potenco-eksponentnega padanja jakosti delovne mobilnosti v regionalna središča Slovenije z najkrajšo razdaljo po mreži državnih cest za leto 2011 – pogled z jugozahoda.



Slika 18: Perspektivni prikaz potenco-eksponentnega padanja jakosti delovne mobilnosti v regionalna središča Slovenije z najkrajšo razdaljo po mreži državnih cest za leto 2011 – pogled z vzhoda.

prikaz takšne združene ploskve (pogled z jugozahoda), kjer lahko vidimo močan vpliv Ljubljane ter podrejen vpliv Kranja v neposredni bližini prestolnice. Na sliki 18 je pogled z vzhoda, kjer izpostavljamo vpliv Maribora in Celja. Ptuj in Murska Sobota ležita v območju vpliva Maribora.

## 4 Sklep

V prispevku smo analizirali vpliv razdalje na jakost delovne mobilnosti v regionalna središča Slovenije. Rezultati so pokazali, da interakcije najbolje opišemo s potenčno-eksponentnim modelom. Študija je tudi pokazala, da obstajajo razlike v obliki in dosegu vpliva regionalnih središč – največji doseg imajo središča mednarodnega pomena: Ljubljana, Maribor in somestje Koper-Izola-Piran; od preostalih središč pa tudi Nova Gorica in Novo mesto. Primerjava oblike modelov je izpostavila predvsem dve skupini središč:

- središča, katerih vpliv počasi pada z razdaljo (Maribor, Novo mesto, Nova Gorica in somestji Slovenj Gradec-Dravograd-Ravne na Koroškem ter Sevnica-Krško-Brežice),
- središča, katerih vpliv izredno hitro pada z razdaljo (Kranj, Ptuj, somestje Trbovlje-Hrastnik-Zagorje ob Savi).

Ocene parametrov modelov vpliva razdalje do posameznih regionalnih središč dajo prikaz oblike in dometa vpliva posameznega središča. Pri iskanju skupnega modela za vsa regionalna središča so Halas in sodelavci (2014) predpostavili enak parameter. V našem pristopu modeliranja skupnega modela to ni potrebno.

V prihodnje je smiselno raziskati možnosti in načine modeliranja anizotropnih vplivnih območij ter možnost modeliranja »polmera vplivanja«; glej primer v Halas in sodelavci (2014). V prispevku obravnavan pristop pa je smiselno preizkusiti še na časovni seriji interakcij v izbrana središča države.

## 5 Viri in literatura

- Bogataj, M., Drobne, S. 1997: The influence of investments in highways on gravity and interaction in Slovenia. The 4th International Symposium on Operational Research in Slovenia. Preddvor.
- Bogataj, M., Drobne, S. 2005: Does the improvement of roads increase the daily commuting?: Numerical analysis of Slovenian interregional flows. Selected Decision Support Models for Production and Public Policy Problems. Ljubljana.
- Bole, D. 2004: Dnevna mobilnost delavcev v Sloveniji. Acta geographica Slovenica 44-1. Ljubljana.
- Bole, D. 2011: Changes in employee commuting: A comparative analysis of employee commuting to major Slovenian employment centers from 2000 to 2009. Acta geographica Slovenica 51-1. Ljubljana.
- Bole, D., Gabrovec, M. 2012: Daily commuters in Slovenia. Geografski vestnik 84-1. Ljubljana.
- de Vries, J. J., Nijkamp, P., Rietveld, P. 2009: Exponential or power distance-decay for commuting? An alternative specification. Environment and Planning A 41-2. London.
- Dolenc, D. 2000: Delovne migracije v Sloveniji. Statistični dnevi 2000. Zbornik del. Radenci.
- Drobne, S. 2003. Modelling accessibility fields in Slovene municipalities. The 7th International Symposium on Operational Research in Slovenia. Podčetrtek.
- Drobne, S. 2005: Do administrative boundaries fit accessibility fields in Slovenia? Environmental Engineering: The 6th International Conference. Vilna.
- Drobne, S. 2012a: Izračun povprečne dostopnosti do najbližjega priključka na avtocesto ali hitro cesto po občinah Republike Slovenije v letu 2011. Projektna naloga, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Drobne, S. 2012b: Vpliv razdalje na tokove delavcev vozačev v Sloveniji. GIS v Sloveniji 11. Ljubljana.
- Drobne, S. 2013: Vpliv recesije na privlačnost mestnih in podeželskih območij Slovenije. Geodetski vestnik 58-1. Ljubljana



- Drobne, S., Bogataj, M. 2005: Intermunicipal gravity model of Slovenia. The 8th International Symposium on Operational Research in Slovenia. Nova Gorica.
- Drobne, S., Bogataj, M. 2011: Accessibility and flow of human resources between Slovenian regions. Ljubljana, Šempeter pri Gorici.
- Drobne, S., Bogataj, M. 2013: Vpliv recesije na parametre kakovosti regionalnih središč in njihovo privlačnost. Revija za univerzalno odličnost 2-2. Novo mesto.
- Drobne, S., Bogataj, M., Lisec, A. 2008: The influence of accessibility to inter-regional commuting flows in Slovenia. Taking Geoinformation Science One Step Further. Girona.
- Drobne, S., Bogataj, M., Lisec, A. 2012: Dynamics and local policy in labour commuting. Business Systems Research Journal 3-2. Zagreb.
- Drobne, S., Bogataj, M., Paliska, D., Fabjan, D. 2005: Will the future motorway network improve the accessibility to administrative centres in Slovenia? The 8th International Symposium on Operational Research in Slovenia. Nova Gorica.
- Drobne, S., Paliska, D., Fabjan, D. 2004: Rastrski pristop dvostopenjskega modeliranja dostopnosti v GIS-u. GIS v Sloveniji 7. Ljubljana.
- Drobne, S., Rajar, T., Lisec, A. 2013: Dinamika selitev in delovne mobilnosti v urbana središča Slovenije, 2000–2011. Geodetski vestnik 57-2. Ljubljana.
- DRSC 2013: Mreža državnih cest za leto 2011. Družba Republike Slovenije za ceste. Ljubljana.
- Fotheringham, A. S. 1980: Spatial Structure, Spatial Interaction, and Distance-Decay Parameters. Doktorško delo, McMaster University. Hamilton.
- Fotheringham, A. S. 1981: Spatial structure and distance-decay parameters. Annals of the association of American geographers 71-3. Washington.
- Fotheringham, A. S. 1984: Spatial flows and spatial patterns. Environment and Planning A 16. London.
- Fotheringham, A. S., O'Kelly, M. E. 1989: Spatial Interaction Models: Formulations and Applications. Dordrecht.
- Gabrovec, M., Bole, D. 2006: Dostopnost do avtobusnih postajališč. Geografski vestnik 78-2. Ljubljana.
- Gabrovec, M., Bole, D. 2009: Dnevna mobilnost v Sloveniji. Georitem 11. Ljubljana.
- Goux, J. M. 1962: Structure de l'espace et migration. Human Displacements. Measurement Methodological Aspects. Monaco.
- GURS 2013: Prostorski podatki o občinah Slovenije za leto 2011. Geodetska uprava Republike Slovenije. Ljubljana.
- Halás, M., Klapka, P., Kladiivo, P. 2014: Distance-decay functions for daily travel-to-work flows. Journal of Transport Geography 35. Oxford.
- Haynes, K. E., Fotheringham, S. 1984: Gravity and Spatial Interaction Models. Beverly Hills.
- Hočevár, M., Kos, D., Makarovič, J., Trček, F., Štebe, J., Uršič, M. 2004: Vrednote prostora in okolja, 3. fazno in končno poročilo. Raziskovalno poročilo, Fakulteta za družbene vede Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Kozina, J. 2010a: Prometna dostopnost v Sloveniji. Georitem 14. Ljubljana.
- Kozina, J. 2010b: Transport accessibility to regional centres in Slovenia. Acta Geographica Slovenica 50-2. Ljubljana.
- Pavlin, B., Sluga, G. 2000: Ljubljana kot zaposlitveno središče. Ljubljana: geografija mesta. Ljubljana.
- Pelc, S. 1988: Prometna dostopnost do delovnih mest in njen pomen pri urejanju prostora. Magistrsko delo, Filozofska fakulteta Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Ravenstein, E. 1885: The laws of migration. Journal of the Statistical Society of London 48-2. London.
- SPRS 2004: Strategija prostorskega razvoja Slovenije. Ministrstvo za okolje in prostor Republike Slovenije. Ljubljana.
- Stewart, J. Q. 1941: An inverse distance variation for certain social influences. Science 93.
- Stewart, J. Q. 1948: Demographic gravitation: evidence and applications. Sociometry 11, 1-2. Albany.
- SURS 2013: Delovna mobilnost med občinami Slovenije za leto 2011. Statistični urad Republike Slovenije. Ljubljana.

- Taylor, P.J. 197: Distance transformation and distance decay function. *Geographical Analysis* 3-3. Columbus.
- Taylor, P.J. 1975: Distance decay in spatial interactions. *Concepts and Techniques in Modern Geography*. London.
- Tobler, W. 1970: A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography* 46. Worcester.
- Zavodnik Lamovšek, A., Drobne, S., Pichler-Milanović, N. 2009: Accessibility to public services as a tool to achieve the polycentric regional development in Slovenia. *Thematic Conference Proceedings* 1. Beograd.



# RAČUNANJE DOSTOPNOSTI DO JAVNEGA POTNIŠKEGA PROMETA V LJUBLJANI Z METODO PTAL

**Jernej Tiran**

Geografski inštitut Antona Melika, Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti  
jernej.tiran@zrc-sazu.si

**dr. Luka Mladenovič, Simon Koblar**

Urbanistični inštitut Republike Slovenije  
luka.mladenovic@uir.si, koblar.simon@gmail.com

UDK: 911.3:656.132(497.4)

## IZVLEČEK

### **Računanje dostopnosti do javnega potniškega prometa v Ljubljani z metodo PTAL**

V pričujočem prispevku je predstavljena uporaba metode PTAL (Public Transport Accessibility Level), s katero smo na območju mesta Ljubljane izračunali koeficient dostopnosti do javnega potniškega prometa. V koeficient je poleg prostorske dostopnosti do avtobusnih postajališč vključena tudi pogostnost voženj avtobusov posameznih linij na posamezna postajališča. Koeficient PTAL je kljub nekaterim pomanjkljivostim neposredno uporaben v prostorskem načrtovanju kot podlaga za določanje primerne gostote gradnje in parkirnih standardov. Rezultati lahko služijo tudi kot podlaga za optimiziranje omrežja avtobusnih linij.

## KLJUČNE BESEDE

geografija prometa, dostopnost, javni potniški promet, avtobusno postajališče, GIS, Ljubljana

## ABSTRACT

### **Calculation of accessibility to public transport in the city of Ljubljana: the use of the PTAL method**

The article presents the use of the PTAL (Public Transport Accessibility Level) method, which was used to calculate the coefficient of accessibility to public transport in the city of Ljubljana. In addition to the spatial accessibility to the bus stops, the coefficient includes the frequency of bus rides to individual bus stops. Despite its shortcomings, the PTAL coefficient is directly applicable to spatial planning as the basis for determining the appropriate residential density and parking standards. The result can also be used as the basis for optimising the bus line network.

## KEY WORDS

transport geography, accessibility, public transport, bus stops, GIS, Ljubljana

## 1 Uvod

Dostopnost območja z javnim potniškim prometom (v nadaljevanju JPP) zagotavlja prebivalcem možnost opravljanja vsakodnevnega potovanja ne glede na njihovo osebno lastništvo prevoznih sredstev. V okviru koncepta trajnostnega (urbanega) razvoja predstavlja enega najpomembnejših prometnih stebrov, saj zagotavlja demokratičen, ekonomsko dostopen način za opravljanje vsakodnevnih poti z minimalnimi vplivi na okolje, s čimer zvišuje kakovost bivalnega okolja in kakovost življenja.

Ljubljana ima dobro prostorsko dostopnostjo do postajališč JPP, saj je leta 2005 v 500-metrski oddaljenosti od postajališč živelo 92,1 % prebivalcev (Kozina 2010). Manj spodbuden je delež potovanj z javnim prometom glede na ostala prometna sredstva, ki po zadnjih dostopnih podatkih znaša le 13 % (Anketa po gospodinjstvih ... 2003), kar Ljubljano uvršča med evropska mesta z majhnim deležem uporabe JPP.

To kaže tudi na pomanjkljivost merjenja dostopnosti do JPP samo z oddaljenostjo do postajališč, brez upoštevanja drugih dejavnikov, ki vplivajo na kakovost storitve in posledično odločitev o uporabi prevoznega načina za izbrano pot. Takšne študije in prikazi so zaradi enostavnega izračuna še vedno prevladujoči (Strokovne podlage ... 2009; Interaktivna shema ... 2014). Metode, ki bi upoštevale tudi druge dejavnike dostopnosti, kot je na primer pogostnost voženj, so v Sloveniji (na primer Gabrovec in Bole 2006).

Bolj kompleksne metode računanja dostopnosti do JPP bi lahko koristile tudi prostorskemu načrtovanju. 97. člen Prostorskega reda Slovenije (2004) na primer govori o neposredni uporabi kazalnika dostopnosti do JPP pri določanju ustreznega števila parkirnih mest, a je uresničevanje tega člena v praksi brez ustreznega orodja za vrednotenje dostopnosti oteženo.

V pričujočem prispevku je predstavljena uporaba metode PTAL (*Public Transport Accessibility Level*) za merjenje dostopnosti do JPP, ki se kot podlaga za prostorsko načrtovanje od leta 2004 uporablja v londonskem prostorskem načrtu. Metodo, ki poleg prostorske dostopnosti do postajališč upošteva tudi število avtobusnih linij in pogostnost njihovih prihodov na postajališča, smo nekoliko prilagodili in z njo izračunali koeficient dostopnosti do JPP na območju mesta Ljubljane.

## 2 Metodologija

### 2.1 Metoda PTAL

Metoda PTAL je ena od bolj priznanih metod za ugotavljanje dostopnosti do JPP. Leta 1992 sta jo začeli razvijati londonski občini Hammersmith in Fulham. Njen prvotni namen je bil določitev območij z dobro dostopnostjo, kjer bi se znižali parkirni standardi. Razvoj metodologije je sčasoma pripomogel k njeni širši uporabnosti, s čimer je bila leta 2004 vključena v londonski prostorski načrt kot temelj za določanje primerne gostote gradnje za posamezna območja ter za preveritev vrednosti koeficienta dostopnosti do JPP na mikrolokaciji v postopku pridobivanja projektnih pogojev in gradbenega dovoljenja (The London ... 2006).

Izračun koeficienta za izbrano lokacijo poteka v nekaj korakih (Measuring Public ... 2010). Najprej se izračuna **čas hoje** do vseh postajališč javnega prometa znotraj določenega polmera. Sledi izračun **povprečnega časa čakanja** na posameznih postajališčih na podlagi frekvenc javnega prometa v določenem časovnem obdobju, na primer med jutranjo prometno konico. Povprečnemu času čakanja je dodan **faktor zanesljivosti**, ki odraža pričakovano oziroma sprejemljivo zamudo in primerno obteži zanesljivost prihodov med različnimi oblikami javnega prometa. Ta je pomemben predvsem v mestih, kjer so bistvene razlike v zanesljivosti različnih ponudnikov (na primer podzemna železnica, tramvaj, avtobus). Na podlagi teh treh kazalnikov se izračuna skupni čas dostopa točke obravnave do posameznih točk dostopa do javnega prometa. Ta je osnova za izračun **ekvivalentne pogostnosti dostopa od vrat do vrat**, na podlagi katere lahko določimo faktor dostopnosti do JPP.

Metoda PTAL pri izračunu dostopnosti tako upošteva (Measuring Public ... 2010):

- pogostnost prihodov različnih sredstev javnega prometa,
- čas hoje od točk obravnave do točk dostopa do JPP,
- število točk dostopa do JPP v polmeru peš dostopnosti in
- zanesljivost različnih oblik JPP.

Koeficient PTAL ima tudi nekatere pomanjkljivosti. Tako med drugim ne upošteva hitrosti različnih oblik javnega prometa, kakovosti poti do točk dostopa do javnega prometa, kakovosti storitve javnega prometa, cene prevoza, preprostosti glede prestopanja in podobno (Measuring Public ... 2010).

## 2.2 Uporaba metode na primeru Ljubljane

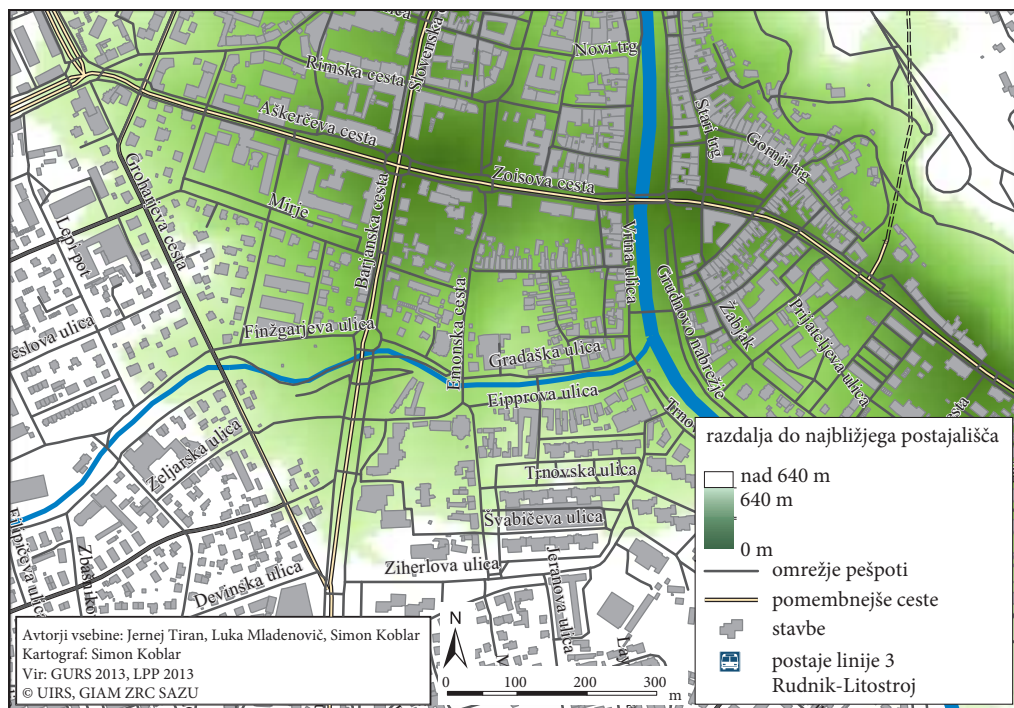
V izvorni metodologiji se koeficient PTAL računa po posameznih postajališčih za vse linije javnega prevoza hkrati. Ker nismo razpolagali s programskimi orodji, s katerimi bi premostili nekatere težave (na primer prekrivanje območij postajališč iste linije), smo postopek izračuna nekoliko prilagodili. Koeficiente PTAL smo izračunali za vplivna območja postajališč vsake linije posebej in jih nato sešteli. Od sredstev javnega prevoza smo upoštevali samo redne avtobusne linije mestnega potniškega prometa (LPP), saj je uporaba ostalih javnih prevoznih sredstev, kot sta vlak in medkrajevni avtobusni promet, v Ljubljani precej skromna. Vse prostorske analize smo izdelali s programskim orodjem ArcGIS 10.0 in 10.2. Zaradi velikega števila izračunov smo uporabili orodje *Model builder*.

Najprej smo izračunali čas hoje (ČH) do avtobusnih postajališč. Poznamo več metod za računanje prostorske dostopnosti do postajališč javnega potniškega prometa. Najbolj preprosto in zaradi pomanjkanja ustreznih prostorskih podatkov tudi najbolj pogosto, je računanje na podlagi evklidske (zračne) oddaljenosti. Ta metoda običajno preceni prostorsko dostopnost, še posebej na območjih s slabo zasnovano cestno oziroma ulično mrežo, z veliko slepimi ulicami, naravnimi in umetnimi ovirami (na primer reke, kanali, avtoceste, ograje, zidovi). Zaradi teh pomanjkljivosti se za računanje prostorske dostopnosti vse bolj pogosto uporablja mrežna analiza, pri kateri izračun razdalje poteka v topološko urejeni mreži cest ali ulic. Kozina (2010) je na primeru Ljubljane ugotovil, da analiza dostopnosti z evklidsko razdaljo v primerjavi z analizo dejanske oddaljenosti močno preceni prostorsko dostopnost postajališč JPP. Podobno so ugotovili tudi Paliska, Drobne in Fabjan (2004). Natančnost mrežne analize se je izboljšala tudi z razvojem GIS, zato se mrežna analiza kot orodje za izračun prostorske dostopnosti uporablja čedalje bolj pogosto (Zhao s sodelavci 2003; Čeh s sodelavci 2008; Zavodnik Lamovšek, Čeh in Košir 2010).

Predpostavljali smo, da ljudje do postajališč dostopajo peš in za še sprejemljivo razdaljo do njih določili 640 metrov, kar ustreza 8 minutam hoje. Enaka razdalja je bila uporabljena tudi v izvorni metodologiji (Measuring Public ... 2010). Obsege storitvenih območij postajališč posamezne linije smo izračunali na podlagi dreves poti po ulični mreži z izhodiščem v centroidih avtobusnih postajališč. Pri tem smo uporabili omrežje pešpoti v Ljubljani (Kozina in Tiran 2013), ki je bilo izdelano na podlagi podatkov o cestnem omrežju in izboljšano s pomočjo digitalnih ortofoto posnetkov, baze *OpenStreetMap* in terenskega preverjanja na najbolj problematičnih lokacijah. Storitvena območja smo izdelali po 10-metrskih pasovih oddaljenosti od postajališč in jih nato pretvorili v raster z 10-metrsko ločljivostjo (slika 1). Izračune prostorske dostopnosti smo opravili z modulom *Network Analyst* v programskem orodju ArcGIS 10.0. Za izračun časa hoje smo po vzoru izvorne metodologije upoštevali hitrost hoje 4,8 km/h oziroma 80 m/min ter vrednosti oddaljenosti pomnožili z 0,0125 min/m:

$$\text{ČH [min]} = \text{razdalja do postajališč [m]} \times 0,0125 \text{ min/m.}$$

Sledil je izračun povprečnega časa čakanja (PČČ) na prihod avtobusa. Izračunali smo ga tako, da smo 60 minut delili s številom prihodov avtobusov (posamezne linije) v času jutranje konice, dobljeno



Slika 1: Primer opredelitve obsega storitvenega območja avtobusnih postajališč posamezne linije.

vrednost pa pomnožili z 0,5 (predpostavili smo, da potniki do postajališč dostopajo naključno oziroma na avtobus v povprečju čakajo polovico časovnega intervala):

$$P\check{C}\check{C} \text{ [min]} = 0,5 \times (60 \text{ min} / \text{število prihodov}).$$

Podatke o voznih redih smo pridobili na spletni strani Ljubljanskega potniškega prometa. Za vsako linijo smo upoštevali število odhodov iz začetne postaje v času od 7:30 do 8:30, ko je v skladu s povpraševanjem pogostnost voženj na večini linij največja. V tem času vozijo avtobusi na 56 rednih linijah, pri čemer smo upoštevali linije v vsako smer posebej, saj se pogostnost voženj med njima nekoliko razlikuje. Povprečni čas čakanja smo izračunali s programom *Microsoft Excel*.

Dobljeno vrednost smo nato prišteli sloju časa hoje do postajališča. Tako smo dobili skupni čas dostopa (SČD):

$$S\check{C}D \text{ [min]} = P\check{C}\check{C} \text{ [min]} + \check{C}H \text{ [min]}.$$

V originalni metodologiji PTAL se pri izračunu SČD sicer upošteva še faktor zanesljivosti za različna sredstva JPP (Measuring Public ... 2010). V Ljubljani bi morali za določitev tega faktorja opraviti dodatne raziskave.

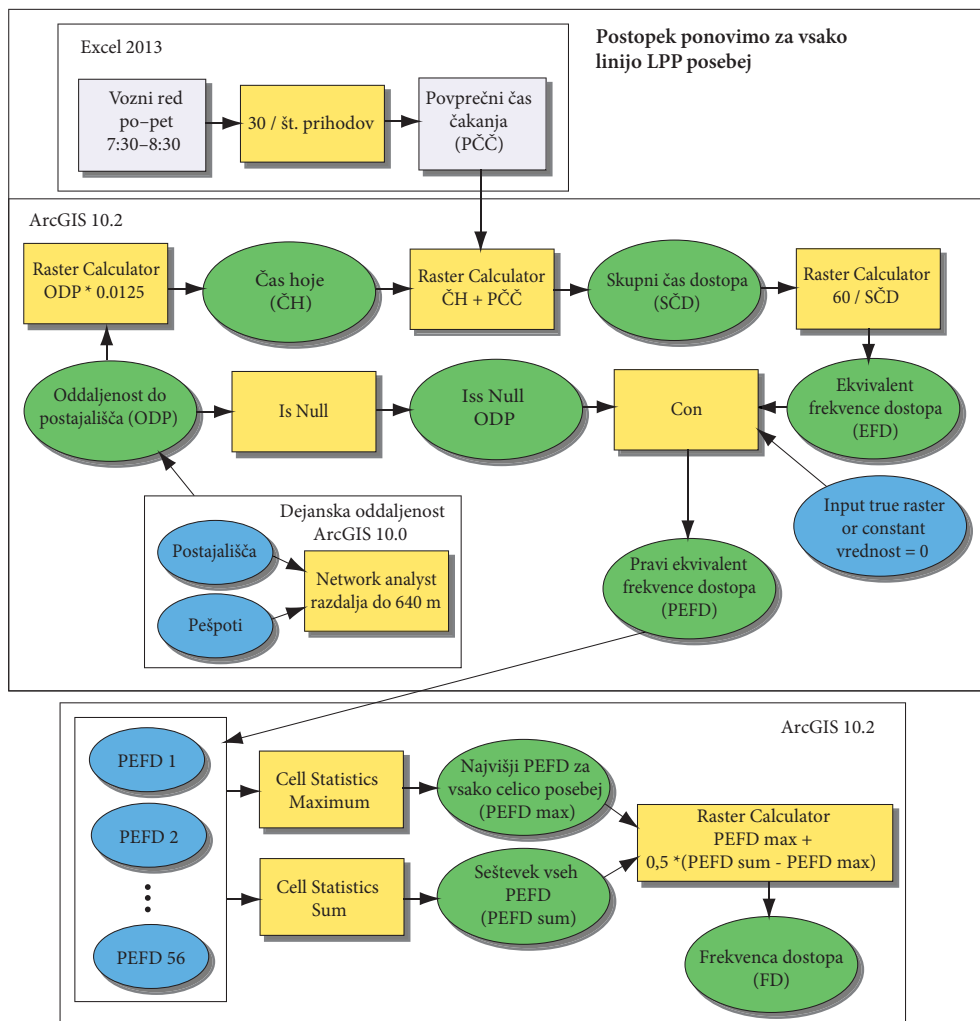
Sledila je pretvorba skupnega časa dostopa v ekvivalent frekvence dostopa (EFD). Izračunali smo ga tako, da smo 60 minut delili s skupnim časom dostopa (višje vrednosti tako pomenijo boljšo dostopnost in obratno):

$$EFD = 60 \text{ min} / S\check{C}D \text{ [min]}.$$

Območjem, ki so od postajališč posameznih linij oddaljena več kot 640 m, smo pripisali vrednost 0. Dobljeni sloj smo poimenovali prava frekvenca dostopa (PEFD). Ko smo izračunali le-te za vse linije, smo z orodjem *Cell Statistics* določili sloj najboljše dostopnosti od vseh linij ( $PEFD_{MAX}$ ). Z istim orodjem smo izračunali še seštevek pravih ekvivalentnih frekvenc dostopa ( $PEFD_{SUM}$ ), ki smo ga potrebovali v zadnjem koraku izračuna, ko smo sešteli najvišjo pravo ekvivalentno frekvenco dostopa in polovično vrednost seštevka prave ekvivalentne frekvence dostopa, od katere smo odšteli najvišjo pravo ekvivalentno frekvenco dostopa (s tem smo se izognili, da bi bile te linije upoštevali dvakrat):

$$FD = PEFD_{MAX} + (0,5 \times (PEFD_{SUM} - PEFD_{MAX})).$$

Tako smo dobili vrednosti faktorja dostopnosti (FD), ki smo jih prikazali na 8-stopenski lestvici, prevzeti po izvirni metodologiji.

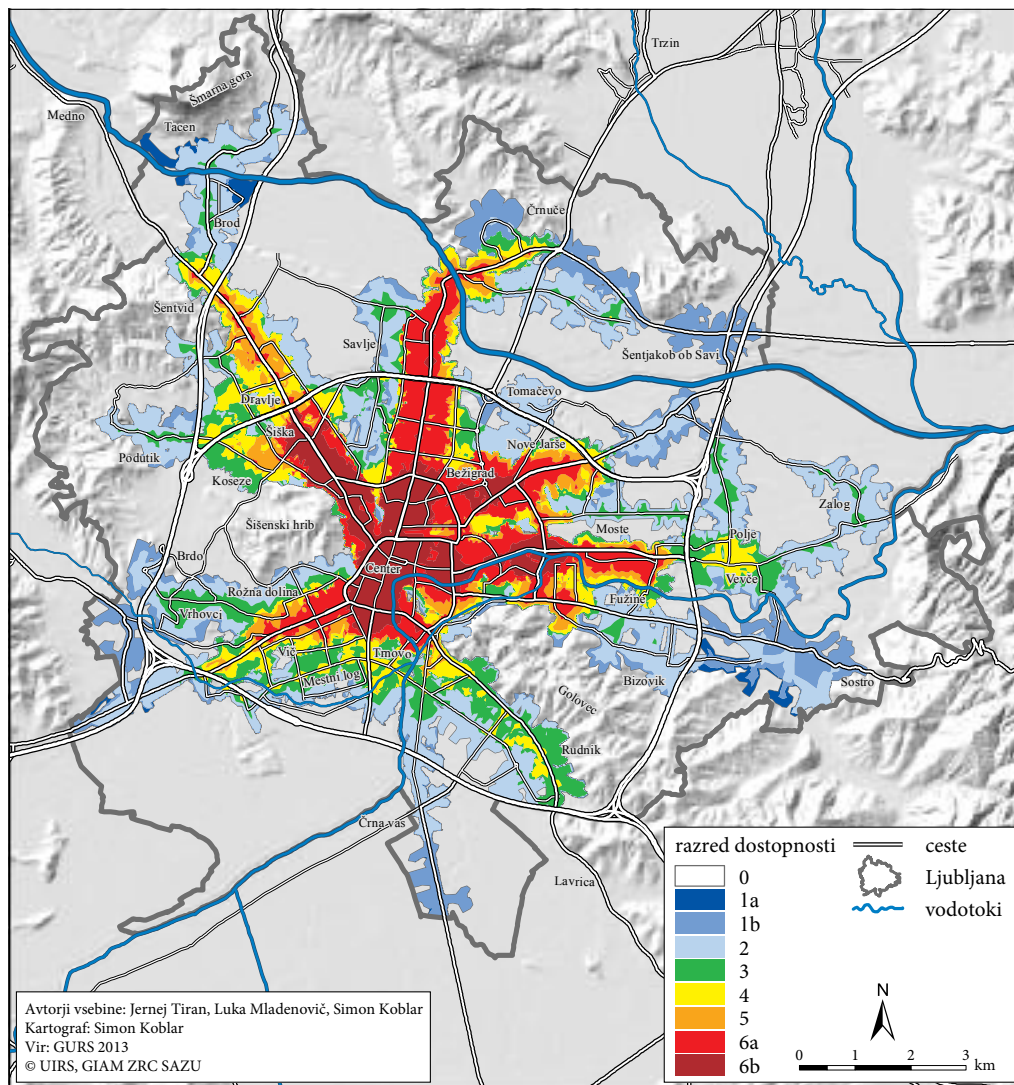


Slika 2: Postopek izračuna koeficienta dostopnosti do JPP v Ljubljani.



### 3 Rezultati

Rezultati izračuna so prikazani na preglednem zemljevidu dostopnosti do JPP v Ljubljani (slika 3) in v preglednici 1. Najboljšo, odlično dostopnost (razreda 6a in 6b) imajo: širše mestno središče in območja vzdolž večine mestnih vpadnic (Dunajska cesta do Črnuče, Celovška in Šmartinska cesta do severne ljubljanske obvoznice, Zaloška cesta do vzhodne ljubljanske obvoznice in Tržaška cesta do Viške ceste). V teh območjih, kjer so tudi številne večje stanovanjske soseske (med drugimi Nove Fužine, Savsko naselje, Župančičeva jama in večino šišenskih ter bežigrayskih sosesk), ima stalno prebivališče glede na vse razrede dostopnosti največ prebivalcev Ljubljane (skupno 42,2%). Po drugi strani pa v območjih slabe in zelo slabe dostopnosti do JPP (razredi 0, 1a, 1b in 2) živi 24,3 % prebivalcev Ljubljane. Med



Slika 3: Prostorski prikaz dostopnosti do javnega potniškega prometa v Ljubljani.

najslabše dostopnimi (razredi 0, 1a in 1b) so območja skrajnega jugozahodnega in južnega dela Ljubljane v bližini južne ljubljanske obvoznice, za katere je značilna manjša gostota prebivalstva in prevladujoča gradnja enodružinskih, večinoma »podstandardnih« hiš (del Rakove Jelše, Sibirija), nekatera urbanizirana ruralna naselja na vzhodnem (Dobrunje, Sostro, Spodnji in Zgornji Kašelj) in severovzhodnem delu Ljubljane (Jarše, Obrije in Šentjakob ob Savi) ter del Broda in Črnuč. Tudi med območji slabe dostopnosti (razred 2) prevladujejo območja z manjšo gostoto prebivalstva (Dolgi most, območja vzdolž Ižanske in Jurčkove ceste, Tomačevo, večji del Polja in Zaloga), vključno z nekaterimi »nadstandardnimi« soseskami enodružinskih hiš, kot so Podutik, Vrhovci in Murgle.

*Preglednica 1: Število in delež prebivalcev v posameznih razredih dostopnosti do javnega potniškega prometa v Ljubljani.*

razred dostopnosti	razpon vrednosti FD	opis	število prebivalcev (2013)	delež prebivalcev (%)
0	0	zelo slabo (več kot 640 m od postajališč)	18.719	7,1
1a	0,01–2,5	zelo slabo	846	0,3
1b	2,5–5	zelo slabo	11.139	4,2
2	5–10	slabo	33.313	12,6
3	10–15	srednje	32.295	12,3
4	15–20	dobro	29.502	11,2
5	20–25	zelo dobro	26.599	10,1
6a	25–40	odlično	65.565	24,9
6b	40 in več	odlično	45.577	17,3

## 4 Sklep

V prispevku opisana uporaba metode PTAL pomeni premik k uporabi kompleksnejših in natančnejših metod vrednotenja dostopnosti do JPP. Metoda je prenosljiva in uporabna tudi za ostala slovenska mesta ter je lahko koristno orodje pri prostorskem načrtovanju, v katerega bi lahko vključili korelacijo med koeficientom dostopnosti in primerno gostoto gradnje. Območja z dobro dostopnostjo do JPP so namreč primerna za višje gostote gradnje in manjše zahteve po parkirnih mestih. Rezultati lahko služijo tudi kot podlaga za optimiziranje omrežja avtobusnih linij. S primerjavo faktorja dostopnosti in izračunov gostot prebivalstva ali delovnih mest je mogoče izboljšati potek linij ter pogostnost voženj v smeri večje učinkovitosti in racionalnosti.

Opozoriti velja tudi na nekatere pomanjkljivosti uporabljene metode. Ena od teh je opredelitev območij sprejemljive oddaljenosti do postajališč v določenem polmeru, ki povzroči velike razlike v koeficientu dostopnosti do JPP med območjema manjše in večje oddaljenosti od izbranega polmera, ki dejansko niso tako izrazite. Metoda tudi ne upošteva dejstva, da verjetnost uporabe JPP s povečevanjem časovno-prostorske oddaljenosti od postajališč ne upada linearno (Kimpel, Dueker in El-Genieidy 2007). Čas hoje bi bilo v postopku izračuna tako smiselno nadgraditi s funkcijo upada pripravljenosti hoje do avtobusnih postajališč, pri tem pa upoštevati tudi nekatere lastnosti poti, kot sta težavnost in prijetnost.

Z metodo PTAL nismo mogli upoštevati »uporabnosti« posamezne linije in avtobusnih postajališč. Izračun sicer obteži delni koeficient najbolj pogostne linije, kar pa ne odraža nujno dejanskih potreb potnikov, ki lahko za svoje potovanje izberejo katero od manj pogostnih linij. Do razlik prihaja tudi

med postajališči posameznih linij, saj se postajališča, ki so bližje končni postaji, po večini uporabljajo le za izstopanje, s čimer niso povsem enakovredna tistim, ki jih potniki uporabljajo tudi za vstopanje.

Metodo PTAL bi bilo zato smiselno nadgraditi z dodatnimi elementi, ki bi odpravili omenjene pomanjkljivosti, pri čemer pa bi bilo treba drugače ovrednotiti dobljene vrednosti faktorja dostopnosti.

*Zahvala: Za pomoč in koristne nasvete se najlepše zahvaljujemo dr. Mateju Gabrovcu.*

## 5 Viri in literatura

- Anketa po gospodinjstvih: raziskava potovalnih navad prebivalcev ljubljanske regije. URBI d. o. o., PNZ d. o. o., Ninamedia d. o. o. Ljubljana, 2003.
- Čeh, M., Zavodnik Lamovšek, A., Rom, J., Kiderič, D. 2008: Analiza dostopnosti prebivalstva do javnih dejavnosti z javnim potniškim prometom s pomočjo dveh GIS gravitacijskih modelov. GIS v Sloveniji 9. Ljubljana.
- Gabrovec, M., Bole, D. 2006: Dostopnost do avtobusnih postajališč. Geografski vestnik 78-2. Ljubljana.
- Interaktivna shema linij mestnega potniškega prometa. Ljubljanski potniški promet. Ljubljana, 2014. Medmrežje: [http://www.lpp.si/sites/default/files/lpp\\_vozniredi/MPP/shema/shema.swf](http://www.lpp.si/sites/default/files/lpp_vozniredi/MPP/shema/shema.swf) (15. 3. 2014).
- Kimpel, T., Dueker, K., El-Geneidy, A. 2007: Using GIS to measure the effects of service areas and frequency on passenger boardings at bus stops. Journal of the Urban and Regional Information Systems Association 19-1. Des Plaines.
- Kozina, J. 2010: Modeliranje prostorske dostopnosti do postajališč javnega potniškega prometa v Ljubljani. Geografski vestnik 82-1. Ljubljana.
- Kozina, J., Tiran, J. 2013: Omrežje pešpoti v Ljubljani. Podatkovni sloj, Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU. Ljubljana.
- Linije mestnega potniškega prometa s pripadajočimi postajališči. Ljubljanski potniški promet. Ljubljana, 2014.
- Measuring Public Transport Accessibility Levels. Transport for London. London, 2010. Medmrežje: <http://data.london.gov.uk/documents/PTAL-methodology.pdf> (25. 3. 2014).
- Paliska, D., Drobne, S., Fabjan, D. 2004: Uporaba GIS-a za proučevanje prostorske dostopnosti v analizi povpraševanja po storitvi JPP. GIS v Sloveniji 7. Ljubljana.
- Redni vozni redi mestnega potniškega prometa. Ljubljanski potniški promet. Ljubljana, 2014. Medmrežje: <http://www.lpp.si/javni-prevoz/vozni-redi-mestni-potniski-promet/vozni-redi-redni> (6. 2. 2014).
- Strokovne podlage urejanja javnega prometa v regiji. Končno poročilo, OMEGA Consult. 2009. Medmrežje: [http://www.ruralur.si/fileadmin/user\\_upload/projekti/Promet/JPP\\_v\\_LUR\\_KP\\_pog1.pdf](http://www.ruralur.si/fileadmin/user_upload/projekti/Promet/JPP_v_LUR_KP_pog1.pdf) (17. 3. 2014).
- The London Plan. Greater London Authority. London, 2006.
- Transport Assessment Best Practice: Guidance Document. Transport for London. London, 2006.
- Uredba o prostorskem redu Slovenije. Uradni list Republike Slovenije 122/2004. Ljubljana.
- Register prostorskih enot: Hišne številke, stanje na dan 24. 3. 2014. Geodetska uprava Republike Slovenije. Ljubljana, 2014.
- Centralni register prebivalstva, stanje na dan 31. 12. 2013. Ministrstvo za notranje zadeve Republike Slovenije. Ljubljana, 2013.
- Zavodnik Lamovšek, A., Čeh, M., Košir, U. 2010: Analiza dostopnosti prebivalcev do javnih dejavnosti z medkrajevnim avtobusnim potniškim prometom. GIS v Sloveniji 10. Ljubljana.
- Zhao, F., Chow, L.-F., Li, M.-T., Gan, A., Ubaka, I. 2003: Forecasting transit walk accessibility: Regression model alternative to buffer method. Transportation Research Record 1835. Washington.

# MODELIRANJE PROSTORSKIH VZORCEV DELOVNE MOBILNOSTI IN SELITEV Z VEKTORSKIMI POLJI

**Dejan Jenko**

*dejan.jenko1@gmail.com*

**mag. Samo Drobne**

*Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani*

*samo.drobne@fgg.uni-lj.si*

UDK: 528:331.55(497.4)

659.2:004:91(497.4)

## IZVLEČEK

### **Modeliranje prostorskih vzorcev delovne mobilnosti in selitev z vektorskimi polji**

*V prispevku modeliramo prostorske interakcije delovne mobilnosti in notranjih selitev med občinami Slovenije za leto 2011. Pri tem sledimo Toblerjevemu (1975; 1976) pristopu upodabljanja prostorskih interakcij z vektorskim poljem. Modeliranje tokov smo izvedli v programskem orodju MatLab, kartografske upodobitve interakcij pa v GIS orodju ArcMap.*

## KLJUČNE BESEDE

*prostorske interakcije, modeliranje interakcij, zemljevid interakcij, zemljevid tokov, vektorsko polje, selitve, delovna mobilnost, GIS*

## ABSTRACT

### **Modelling commuting and migration patterns using vector fields**

*In the paper we model commuting and migration patterns between municipalities in Slovenia for the year 2011. We are following Tobler's (1975; 1976) approach in modelling and representing interactions using vector fields. MatLab was used for modelling and ArcMap for cartographical presentations of interactions.*

## KEY WORDS

*spatial interactions, modelling interactions, map of interactions, flow map, vector field, migration, commuting, GIS*

## 1 Uvod

Raziskovalce že dolgo zanima gibanje ljudi in blaga v prostoru, v zadnjem času pa tudi gibanje informacij. Takšni premiki iz ene lokacije na drugo – prostorske interakcije – so gonilne sile, ki poganjajo številne družbeno-gospodarske procese (Guo 2009). Zato so prostorske interakcije že dolgo predmet številnih raziskav. Pri tem se je večina raziskovalcev osredotočila predvsem na količine v izvorih in ponorih, na vpliv razdalje na interakcije ter na kakovostno vrednotenje lokacij, manj pa se jih je v preteklosti posvetilo raziskovanju in kartografskemu upodabljanju vzorcev prostorskih interakcij (Rae 2009; Yan in Thill 2007).

Zemljevidi prostorskih interakcij so sredstvo za upodabljanje in analizo prostorskih interakcij. Med najbolj odmevna dela kartografskega upodabljanja vzorcev prostorskih interakcij štejemo dela Walda Toblerja (1975; 1976; 1987; 1995). Prvi, zelo odmeven, analitičen zemljevid tokov pa je leta 1889 objavil Ernst Georg Ravenstein: Zemljevid št. 5: Zemljevid tokov selitev Združenega Kraljestva (Ravenstein 1889). Od takrat je minilo že prek sto let, zato je presenetljivo, da na področju kartografskega upodabljanja »... še vedno ni standardiziranih tehnik upodabljanja prostorskih interakcij ...« (Rae 2009, 161).

Po Yanu in Thillu (2007) sta se v preteklosti uveljavila predvsem dva pristopa raziskav s področja raziskovanja podatkov prostorskih interakcij. Prvi pristop se osredotoča na izboljšanje tehnik upodabljanja, medtem ko se metode drugega pristopa posvečajo raziskovalnim analizam tokov med regijami. Najpomembnejši predstavnik razvoja metod in tehnik upodabljanja prostorskih interakcij je že omenjeni Waldo Tobler (1975; 1976; 1987; 1995), na področju tehnik analitičnega prostorsko-časovnega upodabljanja pa so se močno uveljavili Marble in sodelavci (1995; 1997).

V prispevku sledimo Toblerjevemu (1975; 1976) pristopu modeliranja in kartografskega upodabljanja prostorskih interakcij, ki smo ga izvedli s programskim orodjem *MatLab*, kartografske upodobitve pa smo izvedli v geografskem informacijskem sistemu *ArcMap*. Pristop upodobitve prostorskih interakcij smo aplicirali na tokove notranjih selitev in delovno mobilnost med občinami Slovenije za leto 2011.

Izčrpen pregled literature je opravil Rae (2009), primere analitičnega kartografskega upodabljanja prostorskih interakcij v Sloveniji pa najdemo v delih: Banovca in sodelavcev (1971; 1972; 1975), ki so izdelali analitične zemljevide dnevne delovne mobilnosti z vektorji, Konjarja in sodelavcev (2010), ki so s pomočjo zemljevidov delovne mobilnosti analizirali funkcionalne povezave v Sloveniji, ter Boleta (2011), ki je analiziral spremembe v mobilnosti zaposlenih v večja zaposlitvena središča Slovenije.

V nadaljevanju najprej predstavimo podatke, obravnavamo razvoj metodologije ter skriptnega orodja, sledi primer upodobitve tokov selitev in delovne mobilnosti med občinami Slovenije, na koncu pa tudi vrednotimo sam postopek in rezultate modeliranja.

## 2 Metodologija

Toblerjev pristop (1975; 1976; 1987, 1995) modeliranja in kartiranja prostorskih interakcij s pomočjo vektorjev in vektorskih polj je namenjen upodabljanju neto tokov med izvori in ponori. Tokovi, ki jih je Tobler v praktičnih primerih največkrat obravnaval, so bili tokovi začasnih in/ali trajnih selitev.

Neto tokove (prostorskih interakcij) prikažemo kot polje vektorjev, ki predstavlja gradient skalarnege potenciala izračunanega iz relativnih razlik obravnavanih tokov.

Metodo modeliranja prostorskih interakcij (Tobler 1975) najlažje razložimo s pomočjo preprostege primera izračuna potovalnega časa med dvema lokacijama. Obravnavajmo primer veslača na reki. Čas  $t_{ij}$ , ki ga potrebuje veslač za pot od položaja  $i$  do položaja  $j$ , izračunamo po enačbi:

$$t_{ij} = \frac{d_{ij}}{r + \bar{C}_{ij}}, \quad (1)$$

pri čemer je  $D_{ij}$  razdalja med položajema  $i$  in  $j$  v metrih,  $r$  hitrost veslanja v metrih na sekundo,  $\bar{C}_{ij}$  pa vektor hitrosti vodnega toka. Zaradi (hitrosti) vodnega toka, sta potovalna časa od  $i$  proti  $j$  in obratno različna. Pomemben je tudi odnos med vektorjema  $\bar{C}_{ij} = -\bar{C}_{ji}$ , pri čemer  $\bar{C}_{ij}$  izračunamo kot:

$$\bar{C}_{ij} = r \frac{t_{ji} - t_{ij}}{t_{ij} + t_{ji}}. \quad (2)$$

Model (2) apliciramo na splošni problem modeliranja vzorca poljubnih prostorskih interakcij, (na primer: trajne in/ali začasne selitve, delovna mobilnost, potovanja v šolo, pretok informacij, povezave v socialnih mrežah, gibanje posameznih vrst živali):

$$\bar{C}_{ij} = r \frac{I_{ij} - I_{ji}}{I_{ij} + I_{ji}}, \quad (3)$$

pri čemer je  $I_{ij}$  vrednost interakcije (jakost toka) iz položaja  $i$  v položaj  $j$ ,  $I_{ji}$  pa vrednost interakcije (jakost toka) iz položaja  $j$  v položaj  $i$ . Ob primerni uporabi enot, je  $r = 1$ , kar poenostavi enačbo (3).

$\bar{C}_{ij}$  je torej vektor hitrosti vodnega toka v smeri od  $i$  proti  $j$ . V primeru, da je vrednost  $\bar{C}_{ij}$  pozitivna, je interakcija v smeri vektorja lažja. Izračun se nanaša na isti geografski lokaciji z obratnimi vplivi, zato velja tudi  $\bar{C}_{ij} = -\bar{C}_{ji}$ . Glede na to, da poznamo položaja  $i$  in  $j$ , ter ob dejstvu, da je vektor rezultat vplivov na obeh lokacijah, lahko predstavimo polovico vektorja od  $i$  proti  $j$ , drugo polovico pa v položaju  $j$  stran od  $i$ . V primeru, da je  $\bar{C}_{ij}$  negativen, pa obratno. Ko izračun ponovimo za vse kombinacije  $i$  in  $j$ , dobimo gručo vektorjev na vsaki lokaciji. Rezultat vektorskega seštevanja na opazovani točki dá vektor rezultante.

V prvem koraku modeliranja tokov z vektorji se odločimo, na katerih položajih bomo obravnavali izvore in ponore interakcij. V primeru analize interakcij med prostorskimi območji (med naselji, med občinami, med regijami) so položaji najpogosteje opredeljeni v gravitacijskih središčih (centroidih) obravnavanih prostorskih enot, lahko pa so tudi v upravnem središču (na primer v občinskem ali regijskem središču). V naši analizi smo obravnavali položaje tako v centroidih kot tudi v upravnih središčih občin. Zaradi prostorske omejitve prispevka v nadaljevanju omenjamo in predstavimo le rezultate modeliranja interakcij med centriidi občin.

V naslednjem koraku je treba določiti »neto izvore« in »neto ponore« na obravnavanih položajih izvorov in ponorov (v našem primeru v centroidih občin). »Neto ponor« je obravnavan položaj, kjer je vsota vseh tokov v in iz položaja negativna oziroma kamor interakcije »v splošnem poniknejo«, »neto izvor« pa je položaj, kjer je vsota vseh tokov pozitivna oziroma od koder interakcije »v splošnem izvirajo«. Primeri neto izvorov so podeželske občine, ki se praznijo (ljudje se odseljujejo), primeri neto ponorov pa so občine regionalnih središč, kamor se več ljudi priseli kot se jih odseli.

Sledi izračun vektorjev, ki predstavljajo smer in jakost toka na geografskem položaju. Izračunamo jih po enačbi (Tobler 1975: 13):

$$\bar{C}_i = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n W_j \cdot \frac{I_{ij} - I_{ji}}{I_{ij} + I_{ji}} \cdot \frac{1}{d_{ij}} \cdot [(X_j - X_i), (Y_j - Y_i)], \quad (4)$$

pri čemer je  $d_{ij}$  razdalja med položajema  $i$  in  $j$  in jo izračunamo kot:

$$d_{ij}^2 = (X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2, \quad (5)$$

$W_j$  pa je utež, ki jo izračunamo kot:

$$W_j = \frac{1}{d_{ij} \sum_{j=1}^n \frac{1}{d_{ij}}}, \quad (6)$$

pri čemer sta  $X_i$  in  $Y_i$  koordinati položaja  $i$ ,  $X_j$  in  $Y_j$  pa koordinati položaja  $j$ .

Utež zagotovi upoštevanje prvega Toblerjevega zakona, ki pravi: »Vse stvari v prostoru so povezane, bližnje bolj, bolj oddaljene pa manj.« Tako imajo v postopkih prostorske interpolacije bližnje interakcije večji vpliv, tiste bolj oddaljene pa manjšega.

V naslednjem koraku izrišemo izračunane vektorje prostorskih interakcij (v našem primeru notranjih selitev in delovne mobilnosti med občinami) v primernem merilu na obravnavanih položajih (v našem primeru na centroidih občin).

Sledi izračun vektorskega polja: s pomočjo vektorjev interpoliramo vektorsko polje; najpogosteje jih interpoliramo na pravilno gridno mrežo celic izbrane velikosti. V našem primeru smo izvedli interpolacijo z uporabo metode obratne utežene razdalje (angl. *Inverse Distance Weighted* – IDW). Pri tem je pomembna smiselna nastavitev polmera vpliva oziroma izločitev tistih lokacij iz postopka interpolacije, ki so izven izbranega polmera. V našem primeru smo polmer vpliva opredelili izkustveno: določili smo ga kot polmer povprečne površine slovenske občine pomnoženo s faktorjem 4000, kar je dalo 22,169 km.

Opisano metodo smo aplicirali na tokove delovne mobilnosti in na tokove notranjih selitev med občinami Slovenije. Podatke smo pridobili na Statističnem uradu Republike Slovenije (SURS 2013a; 2013b). Postopek modeliranja neto tokov smo izvedli v programskem orodju za tehnično računanje *MatLab*, v katerem smo oblikovali skriptna orodja za modeliranje, kartografsko upodobitev neto izvorov in neto ponorov, vektorjev tokov in polj vektorjev pa smo izvedli v orodju *ArcMap*. Vektorje tokov delovne mobilnosti in notranjih selitev smo računali na položaje gravitacijskih središč občin, polja vektorjev pa interpolirali na mrežo velikosti 20 kilometrov v naravi, kar smo določili izkustveno.

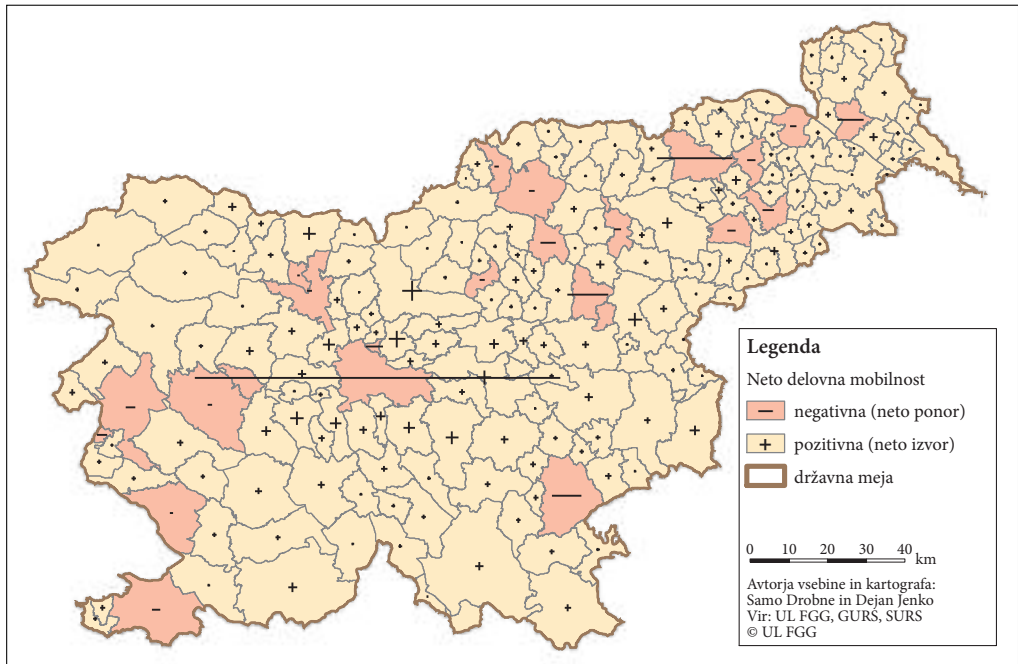
### 3 Rezultati

V nadaljevanju prikazujemo rezultate modeliranja tokov selitev in delovne mobilnosti med občinami Slovenije za leto 2011. Po nekaterih avtorjih (na primer Evers in Van der Veen 1985) lahko delovno mobilnost razumemo kot nadomestek za selitev (v primeru, ko sta lokaciji dela in bivanja prostorsko ločeni), lahko pa ju razumemo tudi kot dopolnilo (v primeru, ko se posameznik odloči, da se preseli dlje od lokacije dela, nato pa se dnevno vozi na delo). Slednje je eden poglavitnih razlogov za pojav suburbanizacije. Posameznik se pogosto odloči za vožnjo na delo, namesto da bi se preselil bližje delovnemu mestu, če obstajajo pogoji za (vsakodnevno) delovno mobilnost; ali obratno: slabe pogoje za vožnjo na delo lahko razumemo kot predpogoj za selitev (Drobne in sodelavci 2013). Zato smo, zaradi lažje vsebinske primerjave rezultatov, zemljevide selitev primerjali z zemljevidi delovne mobilnosti.

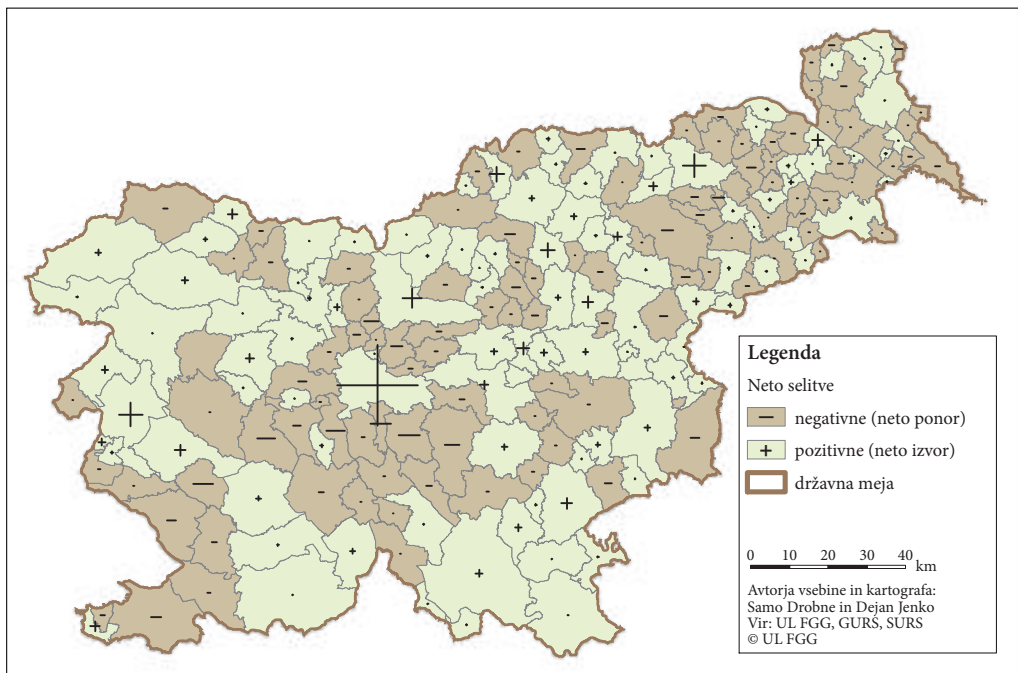
Sliki 1 in 2 prikazujeta ponore (znak minus oziroma senčene občine) ter izvore (znak plus) neto tokov delovne mobilnosti in neto tokov selitev. Pomembnejše ponore delovne mobilnosti predstavlja jo občine Ljubljana, Maribor, Celje, Novo Mesto, Murska Sobota in Velenje. Izvori neto delovne mobilnosti se pojavljajo predvsem okoli večjih zaposlitvenih središč, torej jih opazimo okoli Ljubljane, Maribora in Celja. Na sliki 2 opazimo ravno obratni pojav. Večja mesta, ki so hkrati zaposlitvena središča, v splošnem predstavljajo neto izvore selitev, medtem ko se ponori pojavljajo v okolici večjih zaposlitvenih središč. Omenjen pojav omogoča relativno lahka dostopnost oziroma trend voženj na delo. Na podlagi tega lahko sklepamo, da se ljudje izseljujejo iz urbanih središč v primestna območja, ki ponujajo boljše kvaliteto življenja, obenem pa zagotavljajo relativno lahek dostop do delovnih mest.

Na slikah 3 in 4 so prikazane rezultante vektorjev neto tokov delovne mobilnosti in selitev. V primeru delovne mobilnosti (slika 3) je mogoče opaziti nekatere značilne vzorce tokov. Na vzhodu države je pretežni vzorec delovne mobilnosti v smeri severovzhod–jugozahod, v zahodnem delu pa v smeri Ljubljane – z izjemo obmejnih občin. Posebej izrazit je vzorec v okolici Ljubljane, kjer vsi okoliški vektorji tokov nakazujejo smer proti prestolnici. V primeru rezultant vektorjev tokov selitev (slika 4) takšnih izrazitih vzorcev ni – razen vzorca izseljevanja iz Ljubljane.

Sliki 5 in 6 prikazujeta interpolirani vektorski polji tokov delovne mobilnosti in tokov selitev, kjer smo uporabili metodo IDW (polmer vpliva je bil 22,169 km v naravi in s pravilno mrežo velikosti 20 km).

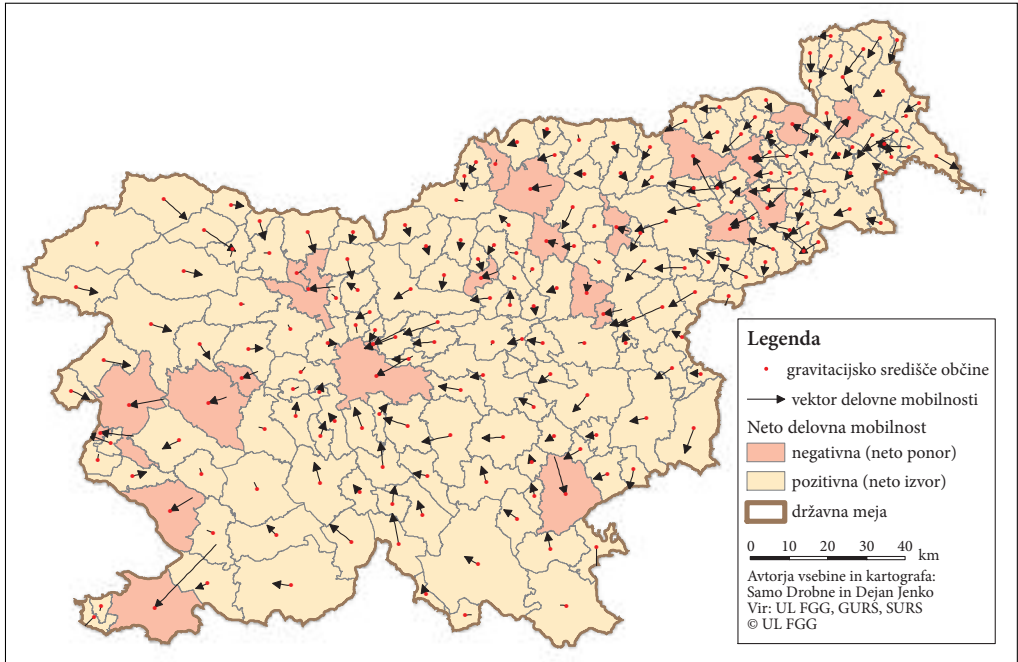


Slika 1: Občinska središča kot neto izvori in neto ponori tokov delovne mobilnosti leta 2011.

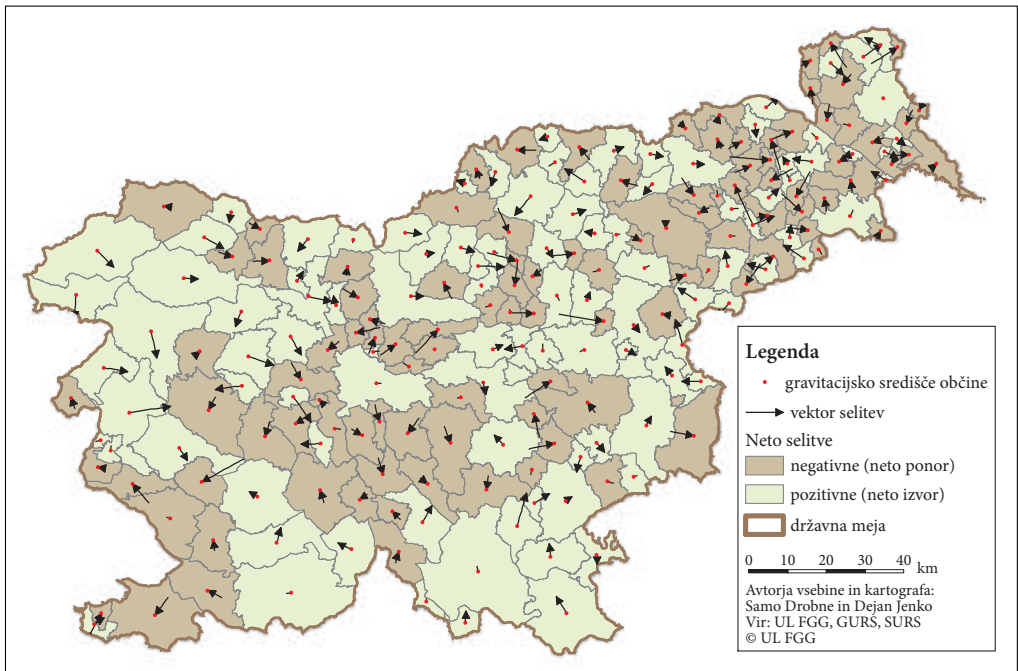


Slika 2: Občinska središča kot neto izvori in neto ponori tokov selitev leta 2011.

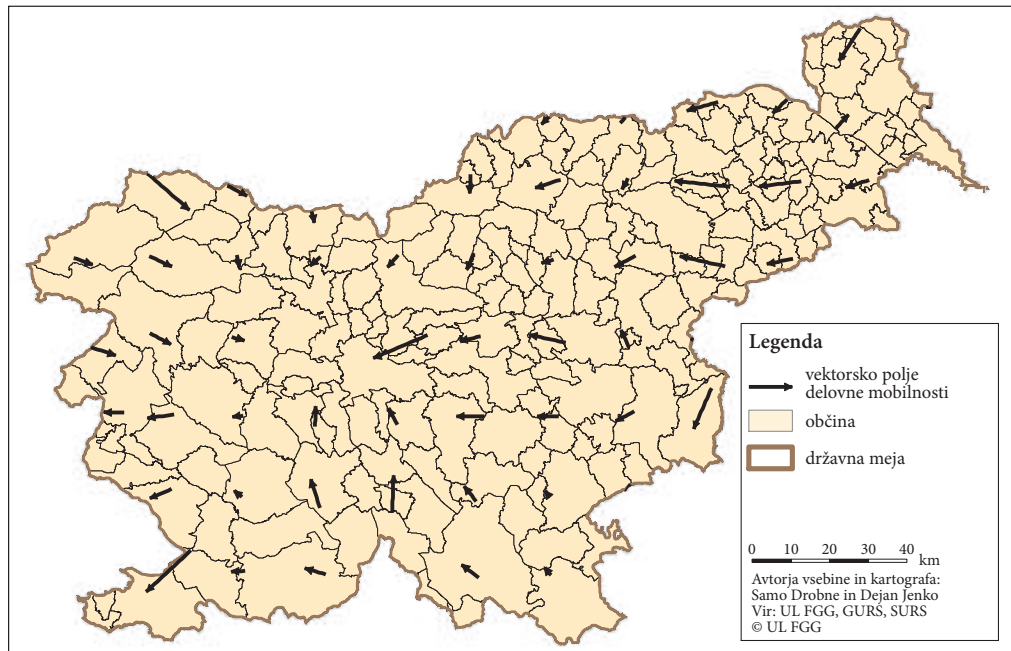




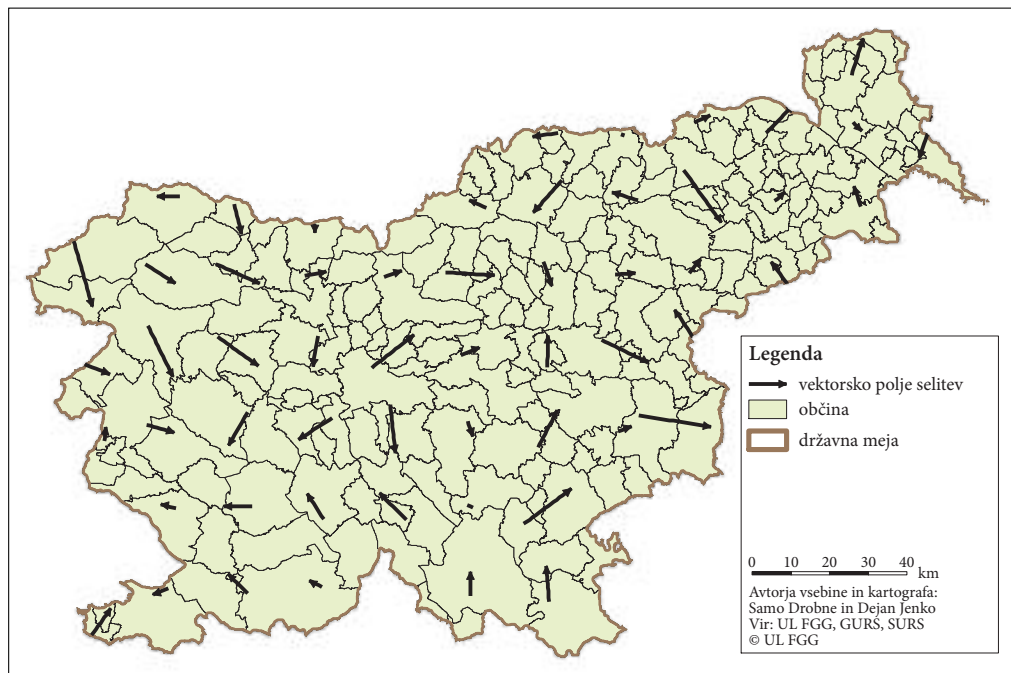
Slika 3: Vektorji tokov delovne mobilnosti med občinami Slovenije leta 2011.



Slika 4: Vektorji tokov selitev med občinami Slovenije leta 2011.



Slika 5: Vektorsko polje delovne mobilnosti med občinami Slovenije leta 2011 (opomba: vektor severozahodno od Ljubljane, je usmerjen proti Ljubljani in je zelo kratek).



Slika 6: Vektorsko polje selitev med občinami Slovenije leta 2011.

Interpolirano vektorsko polje izhaja iz vektorjev tokov, zato je logično in povsem pravilno pričakovati podobno upodobitev. Na končnem prikazu interpoliranih vektorskih polj (sliki 5 in 6) smo nekatere vektorje na državni meji delno, toda usklajeno z vsebino, izkustveno premaknili na območje Slovenije. Zopet se kot izrazit ponor delovne mobilnosti pokaže Ljubljana, ob opazovanju smeri vektorjev delovne mobilnosti (slika 5) pa zopet opazimo izrazit vzorec tokov delovne mobilnosti iz vzhodne proti osrednji Sloveniji. Vektorsko polje selitev (slika 6) prikaže Ljubljano kot glavni izvor tokov selitev v suburbana območja, na primer v občine Domžale, Kamnik, Ig in Grosuplje.

## 4 Sklep

Poznavanje tokov voženj na delo ali v šolo je ključnega pomena pri načrtovanju infrastrukture, prometa in bivališč. Z njimi lahko razmejimo funkcionalne regije; tudi funkcionalne regije na lokalni ravni (trg dela na lokalni ravni). Le-te so pomembne za vrednotenje razmer na trgu dela (Drobne in Bogataj 2012).

Predstavljen način modeliranja in upodobitve prostorskih interakcij nudi dober vpogled v obravnavano področje. Obenem pa je prvi korak k razumevanju obravnavanih tokov.

Rezultatom analize ne smemo slepo verjeti, temveč jih moramo temeljito pregledati in razmisliti, kakšna nova spoznanja nam nudijo. Pomembno je poznati tudi prednosti in slabosti (omejitve) uporabljene metode.

Sami prepoznamo pozitivne lastnosti predvsem v vsestranskosti metode, neodvisnosti in neomejenosti na le določen tip podatkov. Slabosti nam predstavljajo predvsem težave pri postavitvi vektorjev ter določitev položaja mreže. Nekateri rezultati se na prvi pogled kažejo kot nelogični, kar lahko hitro zavrnamo ob pravilnem razumevanju obravnavane problematike: takšen primer je upodobitev rezultante vektorjev neto tokov delovne mobilnosti v Koper (slika 3), ki je bistveno daljši, kot je vektor neto tokov v Ljubljano. Takšen rezultat si razlagamo z dejstvom, da se v Ljubljano vozijo delavci iz vseh smeri, v Koper pa pretežno iz severovzhodne smeri.

Načinov modeliranja prostorskih interakcij je več, celostno razumevanje teh tokov pa je mogoče le ob uporabi in analizi rezultatov različnih metod.

V prihodnje bi bilo smiselno raziskati še druge metode in tehnike modeliranja oziroma kartografske upodobitve prostorskih interakcij. V mislih imamo tako rastrske kot vektorske pristope modeliranja. Med rastrskimi pristopi bi bilo zanimivo primerjati rezultate izpeljank gravitacijskih modelov ter izračune in simulacije gostot prostorskih interakcij. Na področju vektorskega modeliranja prostorskih interakcij, pa bi bilo smotno razviti pristope podobne metodologiji obravnavani v tem prispevku ter jih izčrpno primerjati med seboj. Smiselno pa bi bilo tudi preučiti možnosti uporabe kombiniranih (rastrskih in vektorskih) rezultatov modeliranja prostorskih interakcij (na primer Rae 2009).

## 5 Viri in literatura

- Banovec, T., Podobnikar, M., Svetik, P., Mandelj, F., Prosen, A. 1971: Zasnova študije o prostorskih dokumentacijskih sistemih. Raziskovalno poročilo, Inštitut Geodetskega Zavoda SRS. Ljubljana.
- Banovec, T., Naprudnik, M., Svetik, P. 1972: Zasnova študije o prostorskih dokumentacijskih sistemih. Zavod SRS za regionalno prostorsko planiranje. Ljubljana.
- Banovec, T., Breška, V., Jenko, M., Kmet, A., Kozak, J., Kristan, B., Peterca, M., Svetik, P., Zupan, K. 1975: Avtomatizirana kartografija za potrebe prostorskih informacijskih sistemov: izvleček. Zavod SRS za regionalno prostorsko planiranje. Ljubljana.
- Bole, D. 2011: Spremembe v mobilnosti zaposlenih: primerjalna analiza mobilnosti delavcev v največja zaposlitvena središča Slovenije med letoma 2000 in 2009. *Acta geographica Slovenica* 51-1. Ljubljana.

- Drobne, S., Bogataj, M. 2012: Metoda opredelitve števila funkcionalnih regij: Aplikacija na ravneh NUTS 2 in NUTS 3 v Sloveniji. Geodetski vestnik 56-1. Ljubljana.
- Drobne, S., Rajar, T., Lisec, A. 2013: Dinamika selitev in delovne mobilnosti v urbana središča Slovenije, 2000–2011. Geodetski vestnik 57-2. Ljubljana.
- Evers, G. H. M., Van der Veen, A. 1985: A simultaneous non-linear model for labour migration and commuting. *Regional Studies* 19-3. Cambridge.
- Guo, D. 2009: Flow mapping and multivariate visualization of large spatial interaction data. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 15-6. New York.
- Haynes, K., Fotheringham, A. 1984: *Gravity and Spatial Interaction Models*. London.
- Konjar, M., Boyandin, I., Lalanne, D., Lisec, A., Drobne, S. 2010: Using flow maps to explore functional regions in Slovenia. The Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Information Society and Information Technologies. Dolenjske Toplice.
- Marble, D. F., Gou, Z., Liu L 1995: Visualization and exploratory data analysis of interregional flows. Proceedings of the 1995 Conference on Geographic Information Systems in Transportation. Washington.
- Marble, D. F., Gou, Z., Liu, L., Sauders, J. 1997: Recent advances in the exploratory analysis of interregional flows in space and time. *Innovations in GIS* 4 London.
- Rae, A. 2009: From spatial interaction data to spatial interaction information? Geovisualisation and spatial structures of migration from the 2001 UK census. *Computers, Environment and Urban Systems* 33. New York.
- Ravenstein, E. 1889: The Laws of Migration: Second Paper. *Journal of the Royal Statistical Society* 52. London.
- SURS 2013a: Notranje selitve med občinami Slovenije. Statistični urad Republike Slovenije. Ljubljana.
- SURS 2013b: Delovna mobilnost med občinami Slovenije. Statistični urad Republike Slovenije. Ljubljana.
- Tobler, W. 1975: Spatial interaction patterns. Raziskovalno poročilo, International Institute for Applied Systems Analysis. Laxenburg.
- Tobler, W. 1976. Spatial interaction patterns. *Journal of Environmental Systems* 6. Farmingdale.
- Tobler, W. 1995: Migration: Ravenstein, Thorntwaite, and beyond. *Urban Geography* 16-4.
- Tobler, W. 1987: Experiments in migration mapping by computer. *The American Cartographer* 14-2. Falls Church.
- Yan, J., Thill, J. C. 2007: Visual exploration of us domestic airline market structures. *Papers of the Applied Geography Conferences* 30.



## PROSTORSKE ANALIZE SLOVENSKE LITERARNE ZGODOVINE

**mag. Jerneja Fridl**

Geografski inštitut Antona Melika, Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti  
jerneja@zrc-sazu.si

**dr. Marko Juvan**

Inštitut za slovensko literaturo in literarne vede, Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti  
mjuvan@zrc-sazu.si

**Jaka Ortar**

Geografski inštitut Antona Melika, Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti  
jaka.ortar@zrc-sazu.si

UDK: 91(497.4):821.163.6«1780/1940«

### IZVLEČEK

#### **Prostorske analize slovenske literarne zgodovine**

Osvetliti želimo raziskave v okviru projekta *Prostor slovenske literarne kulture: literarna zgodovina in prostorska analiza z GIS*. Cilj projekta, prvega te vrste na Slovenskem, je opredeliti ključne probleme in izzive interdisciplinarnega sodelovanja med literarno vedo in geografijo ter preučiti možnosti za nadaljnji razvoj GIS-humanistike na Slovenskem. Osredotočili smo se na podatke o pomembnejših literarnih akterjih, razvoju literarnih medijev in institucij, na kraje v slovenskih zgodovinskih romanih in spominska obeležja, povezana s književnostjo. V projektu smo se omejili na obdobje med letoma 1780, ko so natisnjena prva leposlovna dela v slovenščini, in 1940, skorajšnjim začetkom druge svetovne vojne. Originalne podatke smo uredili v relacijski bazi in jih analizirali z različnimi statističnimi in GIS metodami.

### KLJUČNE BESEDE

geografija, literarna kultura, literarna zgodovina, geografski informacijski sistem, prostorska analiza, tematska kartografija

### ABSTRACT

#### **The Spatial Analyses of Slovenian Literary Culture**

This article presents the studies that were carried out as part of the project »Prostor slovenske literarne kulture: literarna zgodovina in prostorska analiza z GIS« (The Space of Slovenian Literary Culture: Literary History and Spatial GIS-Analysis). The goal of this project, the first of its kind in Slovenia, is to define the key issues and challenges of interdisciplinary cooperation between literary studies and geography, and to study opportunities for the further development of GIS-humanities in Slovenia. The focus was on prominent literary actors, the development of the media and institutions, places mentioned in Slovenian historical novels, and memorials connected with literature. The project covered the period between 1780, when the first works of fiction appeared in Slovenian, and 1940, which marks the imminent start of the Second World War. Original data were organized into a relational database and analyzed using various statistical and GIS methods.

### KEY WORDS

geography, literary culture, literary history, geographic information system, spatial analysis, thematic cartography

## 1 Uvod

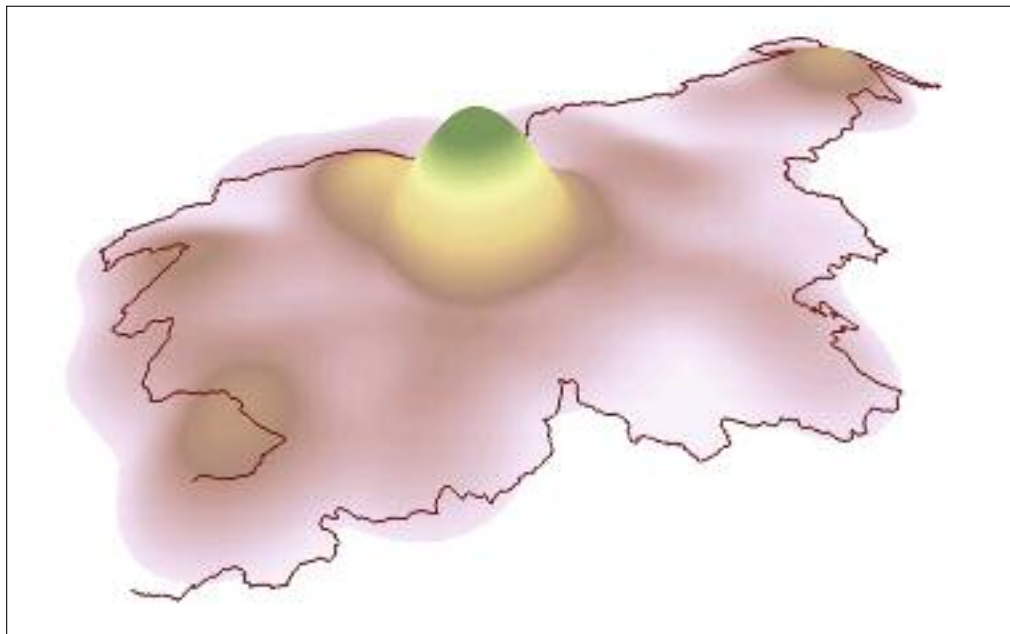
Z vidika sodobnih raziskovalnih metod razumemo literaturo kot sestav, v katerem so besedila kot prvine diskurza neločljivo povezana z dejavnostmi, akterji, mediji, proizvodi in institucijami posebnega polja (Juvan 2006; Perenič 2013). Označujemo ga z izrazom »literarna kultura«. Ta se je v slovenščini začela oblikovati v času evropskih narodnih preporodov, v svoji diferenciranosti pa se je razvila do prve polovice 20. stoletja. V osemdesetih letih 20. stoletja je s »prostorskim obratom« (angl. *spatial turn*) metodološka samorefleksija humanističnih in družboslovnih ved začela prepoznavati prostor kot razlagalni ključ za razumevanje zgodovine, družbe in kulture (Juvan 2013; Terian 2013). V zadnjih dveh desetletjih so svoj prostorski obrat doživele tudi raziskave literarne kulture, ki sta jih zaznamovala vpliv geografije in razvoj geografskih informacijskih sistemov. Prostore, v katerih literatura živi, in prostore, ki jih književna besedila upodabljajo, vse pogosteje preučujejo v povezavi z geografskim prostorom. Pri nas so tovrstni pristopi sicer še vedno redki (Hladnik in Fridl 2012; Perenič 2014, Juvan 2013), v svetu pa so vse bolj uveljavljeni (Crang 1998; Piatti 2008; Bodenhamer 2010). Zavest o pomenu kategorije prostora kot plodnega izhodišča za razlage književnosti nas je poleg nekaterih uspešnih tujih zgledov vodila k prijavi triletnega temeljnega raziskovalnega projekta Prostor slovenske literarne kulture: literarna zgodovina in prostorska analiza z geografskim informacijskim sistemom, ki ga od leta 2012 financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

Projekt je zasnovan na predpostavki, da družbeno-geografski prostor neposredno ne določa razvoja slovenske literature, njenih medijev in življenja, vsekakor pa posredno vpliva nanj. Po drugi strani tudi literatura – s svojim diskurzom, praksami in institucijami – vpliva na dojemanje in strukturiranje tega prostora, kakor tudi na njegovo povezanost s širšo regijo, Evropo in svetom.

## 2 Vloga tematskih zemljevidov pri kartiranju in interpretiranju literarnih vsebin

Skozi celo 20. stoletje so tematske zemljevide v literarni geografiji uporabljali predvsem kot pripomočke za ponazoritev življenjskih prostorov književnikov ali dogajališč romanov. V Evropi so zametki »literarnih« zemljevidov nastali že v drugi polovici 19. stoletja, ko sta Baedeker in Murray v turistične vodnike vključila lokacije Dickensovega junaka Davida Copperfielda ali predlagala potovanja po sledih Byronovega Don Juana. V prvi polovici 20. stoletja so sledili številni literarni atlasi, na primer *Deutscher Literaturatlas* (Nagel 1907), *A Literary and Historical Map of Europe* (Bartholomew 1910), *Literaturgeschichte der deutschen Stämme und Landschaften* (Nadler 1912–1928), *Deutscher Kulturatlas* (Lüdtke in Mackensen 1928–1938), v katerih so na zemljevidih prikazovali v glavnem lokacije iz življenja književnikov. Novejši literarni atlasi se zgledujejo predvsem po nemškem tematskem atlasu *Dtv-Atlas zur deutschen Literatur* (Schlosser 1983).

Z zemljevidi kot analitičnimi orodji, s katerimi se lahko literarna veda približa idealom sodobnih prostorskih raziskav, se je v večjem obsegu začel ukvarjati Moretti (2005). Kartiral je prostore, predstavljene v literarnih besedilih, pa tudi prostore, v katerih je literatura živela in se razvijala. Kvantitativni in prostorski podatki tako niso le ponazoritev vnaprej danih literarnozgodovinskih ugotovitev, temveč sredstvo, prek katerega literarna veda šele ugotavlja zakonitosti literarnih procesov. Ne zanimajo pa se samo literarni zgodovinarji za geografijo, temveč tudi geografi za spoznanja literarne in drugih humanističnih ved. Slovenski geografi so se v zadnjem času začeli ukvarjati z družbenim oziroma individualnim doživljanjem okolja in pokrajine; pri tem se je za upoštevanja vreden vir izkazala tudi književnost. S teorijo prostora in prostorskosti se je ukvarjal geograf in filozof Matej Vranješ (2002). Blaž Komac je preučeval družbeni spomin na naravne nesreče (Komac 2009), Mimi Urbanc (2008, 2008b) pa je z analizo literarnih besedil preučevala doživljanje pokrajine.



Slika 1: 3-razsežnostni sintezni zemljevid gostote rojstev 323 književnikov, zajetih v analizo. Tu se je za zelo ustrezno izkazala uporaba funkcije »jedrne gostote« (angl. kernel density) s celicami velikosti 100 krat 100 m.

Pri zastavljenem projektu smo nadgradili delo naših predhodnikov in izkoristili prednosti GIS-ov, ki omogočajo umeščanje, povezovanje, analiziranje ter predstavljanje prostorsko opredeljenih literarnih podatkov v obliki sinteznih zemljevidov (slika 1).

### 3 Temeljna izhodišča za literarno-prostorske raziskave slovenskega etničnega prostora

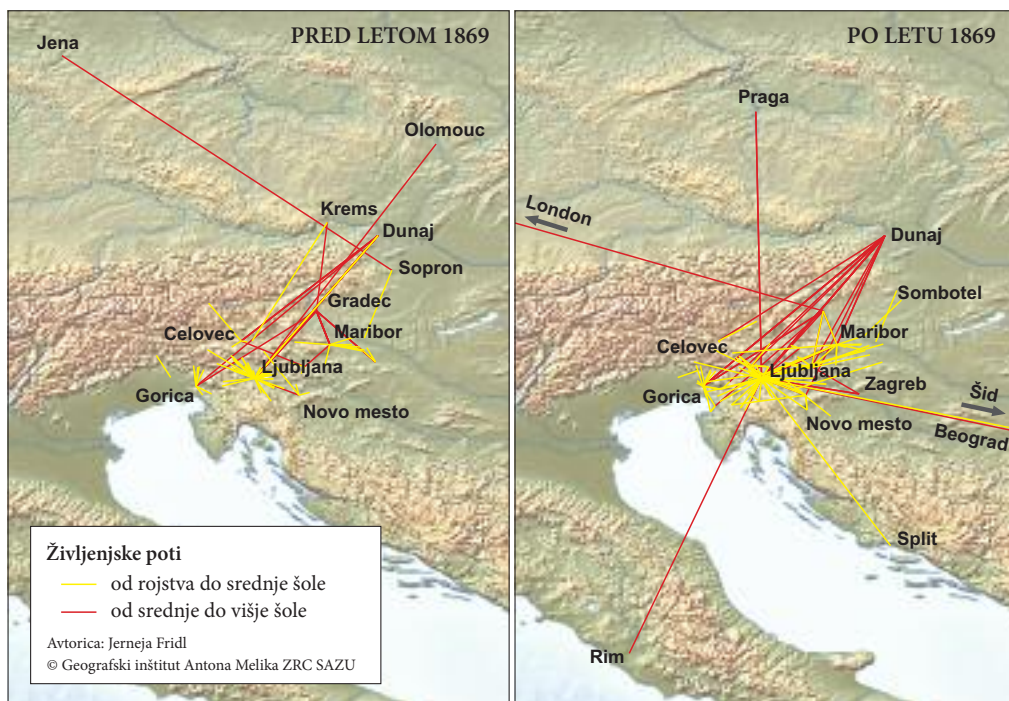
Pri načrtovanju projekta smo izhajali iz predpostavke, da je prostor slovenske literarne kulture večslojen in raznorodn: umeščen je v preplet naravno-fizično danega in družbeno-kulturno proizvedenega prostora, ki pa ga opomenjajo tudi literarno zamišljeni prostori, predstavljeni v literarnih delih. Ker je namen projekta poiskati najprimernejše metode za prostorske analize literarnih danosti in ne zbrati vseh razpoložljivih podatkov, smo posamezne prvine literarne kulture (osebnosti, medije, institucije, spominska obeležja in dogajališča zgodovinskih romanov) obravnavali le na podlagi izbranih manjših vzorcev.

Časovno smo se omejili na obdobje med letoma 1780 in 1940, to je od začetkov umetne, estetske-mu dojemaju namenjene literature v slovenščini, do druge svetovne vojne, pred katero je slovenska literarna kultura dosegla polno institucionalno in medijsko razvitost. Tako so bili upoštevani književniki, ki so se rodili po letu 1720 in umrli do leta 1950.

Prostorsko so bili v analizo zajeti akterji, rojeni ali živeči na slovenskem etničnem ozemlju, to je ozemlju današnje Republike Slovenije in njenega zamejstva; upoštevani so bili tudi kraji na vseh celinah, kamor je slovenske pisatelje, kritike, urednike in druge zanesla pot, kot je delno prikazano na sliki 2.

Ker je v preučevanem obdobju slovensko etnično ozemlje pripadalo različnim državnim tvorbam (avstrijski in avstro-ogrski monarhiji, Beneški republiki, Ilirskim provincam, Kraljevina SHS in





Slika 2: Poti šolanja izbranih književnikov pred letom 1869 in po njem, ko je liberalnejša šolska zakonodaja poddržavila šole in uvedla obvezno osnovno šolanje.

Kraljevini Jugoslaviji), smo si prizadevali od zgodovinarjev dobiti podatkovne sloje z natančnejšimi upravnimi razmejitvami. Ker za vsa obdobja ti ne obstajajo in bi njihova priprava zahtevala dodatne zgodovinske raziskave, smo se bolj posvetili tudi bližnjim italijanskim, avstrijskim, madžarskim in južnoslovanskim urbanim središčem, kamor so gravitirali slovenski pisatelji, kritiki, uredniki in drugi književniki.

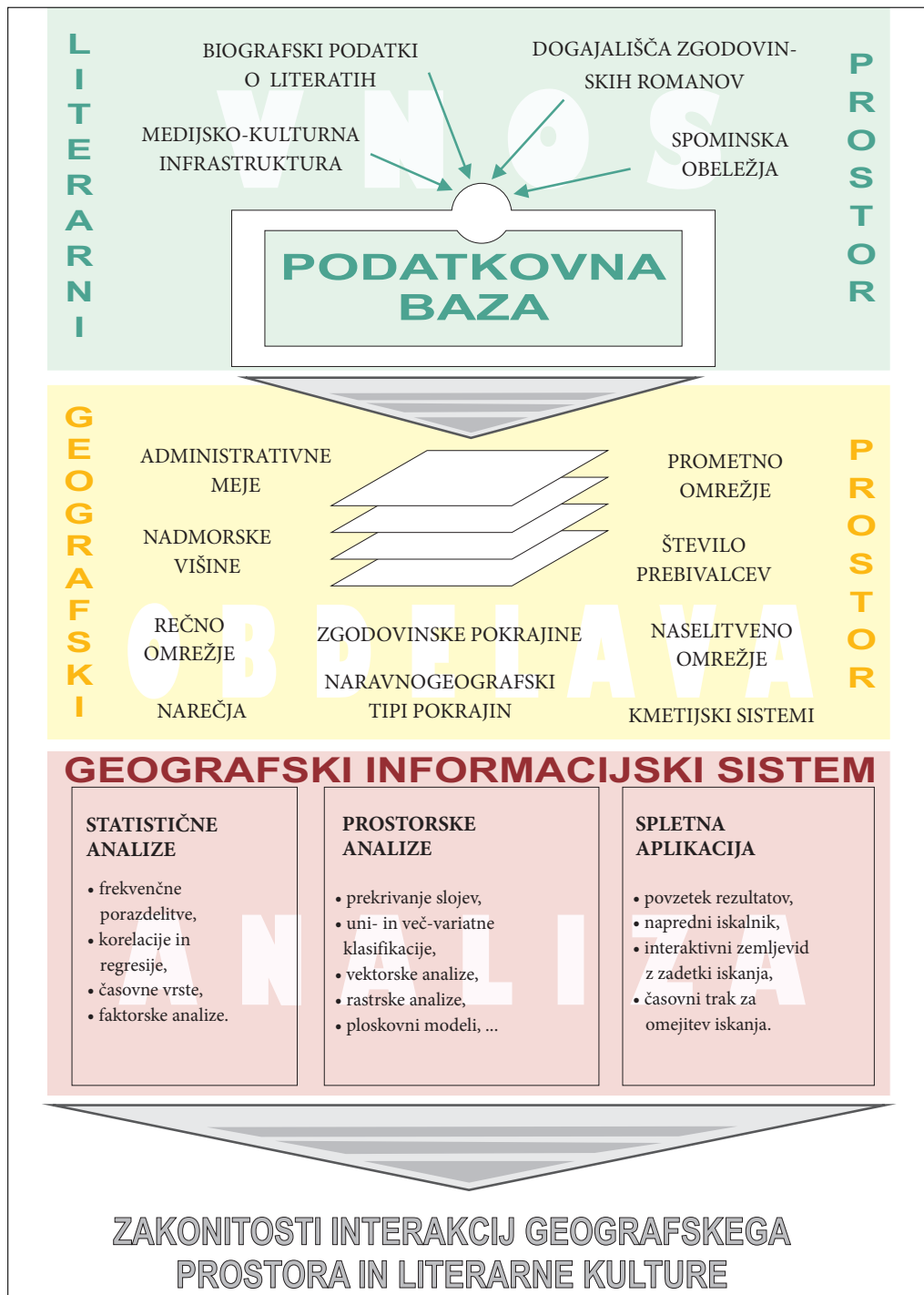
## 4 Metodološki pristop k zastavljeni raziskavi

V Sloveniji je pričujoči projekt prvi, ki se je osredotočil na uporabnost GIS-ov pri ugotavljanju vloge geografskih dejavnikov pri umeščanju, oblikovanju in zgodovinskem razvoju literarne kulture. Zato raziskave ni bilo mogoče graditi na preizkušenih metodoloških smernicah, temveč smo pristop dograjevali glede na individualne izkušnje sodelujočih raziskovalcev obeh ved. Metodološko izvedbo shematsko prikazuje slika 3.

### 4.1 Ključne prvine literarnega prostora

Največ časa je vzel prvi korak, namenjen določitvi atributnih podatkov za posamezne objekte literarnega prostora, zbiranju in vnosu podatkov ter njihovemu revidiranju. V Excelove preglednice so člani projektne skupine ter študentke in študenti Oddelka za slovenistiko na Filozofski fakulteti Univerze

Slika 3: Shematski prikaz metodološke izvedbe interakcije geografskega prostora in literarne kulture. ►



v Ljubljani pod mentorstvom in nadzorom Urške Perenič vnesli štiri vrste literarnozgodovinskih podatkov in njihovih lokacij (slika 3):

- **o biografijah književnikov:** pisateljev, kritikov in esejistov, urednikov, literarnih zgodovinarjev, kulturnih mecenov, založnikov in drugih akterjev literarne kulture (na primer rojstni kraji, kraji šolanja, službovanja, pisateljskega udejstvovanja in smrti);
- **o razmestitvi medijsko-kulturne infrastrukture:** časopisih, literarnih in kulturnih revijah, tiskarnah in založbah, čitalnicah in kulturno-umetniških društvih, gledališčih in narodnih domovih;
- **o literarno predstavljenih prostorih:** geografsko določljivih dogajališčih slovenskega zgodovinskega romana in
- **o prostorskem omrežju spominskih obeležjih:** celopostavnih javnih kipih avtorjev, doprskih javnih kipih avtorjev, javnih kipih literarnih junakov, poimenovanju lokacij, poimenovanju ustanov, spominskih poteh in spominskih objektih.

Podatke smo zajemali predvsem iz leksikonskih in enciklopedičnih del (Slovenski biografski leksikon, Enciklopedija Slovenije, Primorski slovenski biografski leksikon, Wikipedia), literarnozgodovinskih sintez (Slodnjak, Pogačnik in Zadavec), opomb k Zbranim delom slovenskih pesnikov in pisateljev, vodnikov po literarnozgodovinskih ekskurzijah in krajevnih zbornikih.

V raziskavo je bilo zajetih 323 osebnosti, 97 periodičnih tiskov, 40 tiskarn in založb, 58 čitalnic, 26 gledališč in narodnih domov, 48 zgodovinskih romanov oziroma povesti in 1676 spominskih obeležij, povezanih s književniki in književnostjo.

Ker smo želeli podatke urediti enoznačno, smo vse vnose povezali v relacijskem podatkovnem modelu (slika 4). Obstoječe podatke smo smiselno združili v 17 entitetnih tipov in jih med seboj povezali s sedmimi primarnimi ključi (identifikacijska številka osebe, identifikacijska številka medija, identifikacijska številka ustanove, identifikacijska številka romana, identifikacijska številka spomenika, vrsta dogodka, identifikacijska številka lokacije, ki se nanaša na koordinate objektov, in koda naselja, ki opredeljuje koordinate naselij). S tem smo se izognili nezaželenemu podvajanju podatkov, ki povečuje stroške vzdrževanja podatkovne baze in možnosti napak.

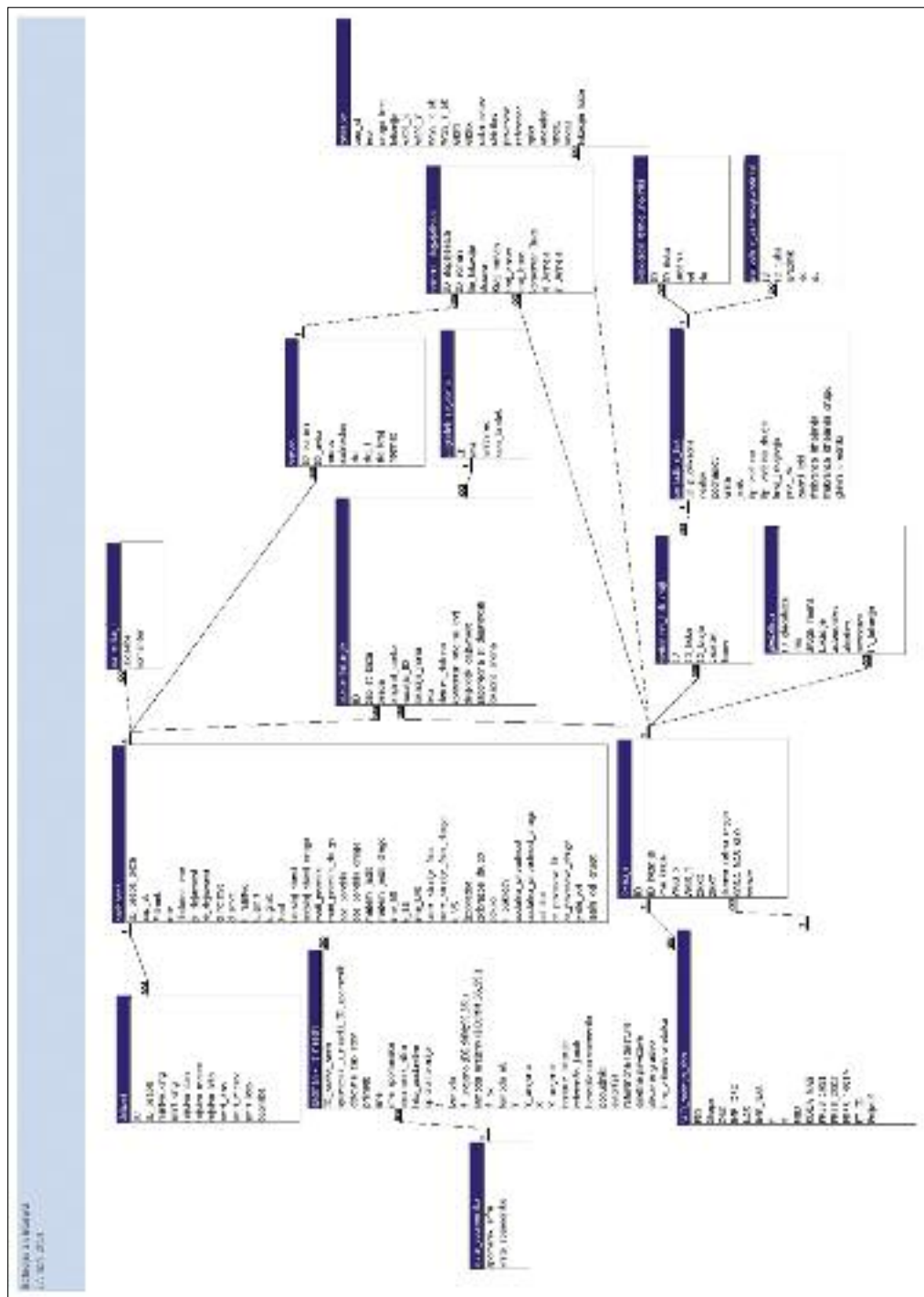
## 4.2 Ključne prvine geografskega prostora

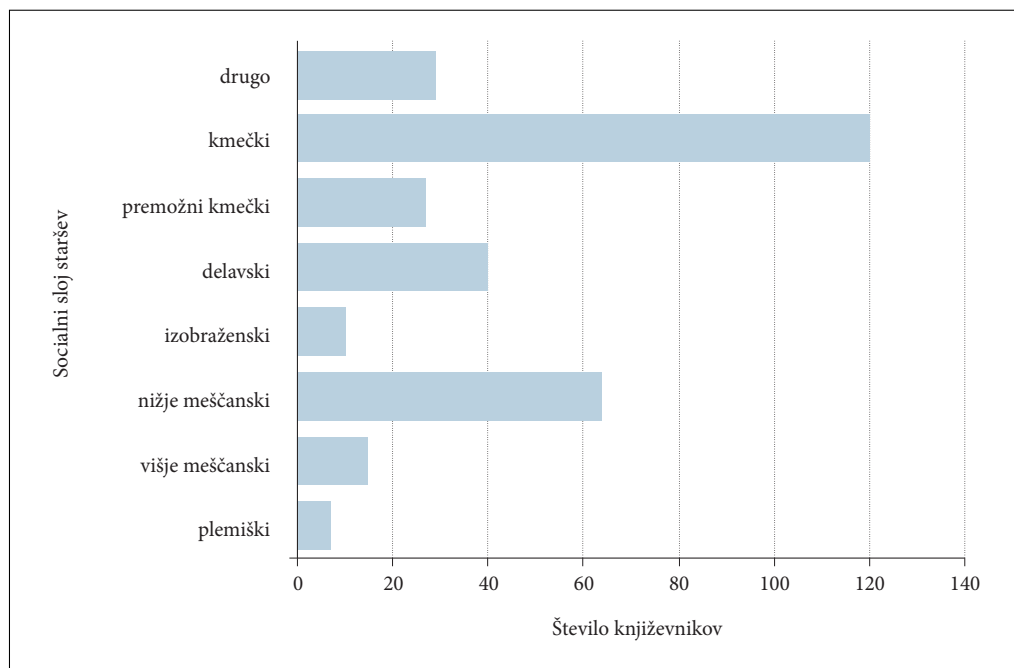
Kot dokazujejo nekateri raziskovalci na področju humanistične in literarne geografije (Soja 1989; Piatti 2008), je nujno upoštevati soodvisnost med geografskimi in literarnimi prostori. Ob zavedanju tega dejstva smo v raziskavo vključili geografske dejavnike, ki po naših predvidevanjih posredno vplivajo na razvoj, položaj, strukturo ter žarišča slovenske literarne kulture med letoma 1780 in 1940 ter imamo za njih na razpolago zadovoljive prostorske in številčne podatke. V večjem obsegu so bili to podatkovni sloji, ki smo jih prvič pripravili za zemljevide Geografskega atlasa Slovenije (Fridl 1998). Izmed 106 tematskih zemljevidov smo za namene raziskave uporabili naslednje podatke: nadmorske višine, naravnogeografske tipe pokrajin, zgodovinske regije leta 1914, upravno razdelitev leta 1941, omrežje naselij, železniško omrežje z obdobji izgradnje, glavno cestno omrežje, glavno rečno omrežje, število prebivalcev ob popisih 1869, 1880, 1890, 1900, 1910, 1931 in 1948, kmetijske sisteme leta 1929 in slovenska narečja. Obstaja še vrsta možnosti, ki bi jih lahko upoštevali, vendar smo v projektu želeli več pozornosti nameniti testiranju različnih GIS metod in ne dopolnjevanju manjkajočih prostorskih podatkov.

## 4.3 Analize interakcij geografskega prostora in literarne kulture

Zbrani in v ustrezni obliki pripravljeni podatki omogočajo številne možnosti statističnih in prostorskih analiz, s katerimi želimo dokazati statistično značilne interakcije med etnično slovenskim geografskim prostorom in slovensko literarno kulturo v različnih razvojnih fazah in družbeno-državnih ureditvah.

*Slika 4: Struktura relacijske podatkovne baze literarnega prostora. ►*





Slika 5: Ena od predstavitev frekvenčnih vrednosti književnikov glede na socialni položaj njihovih staršev.

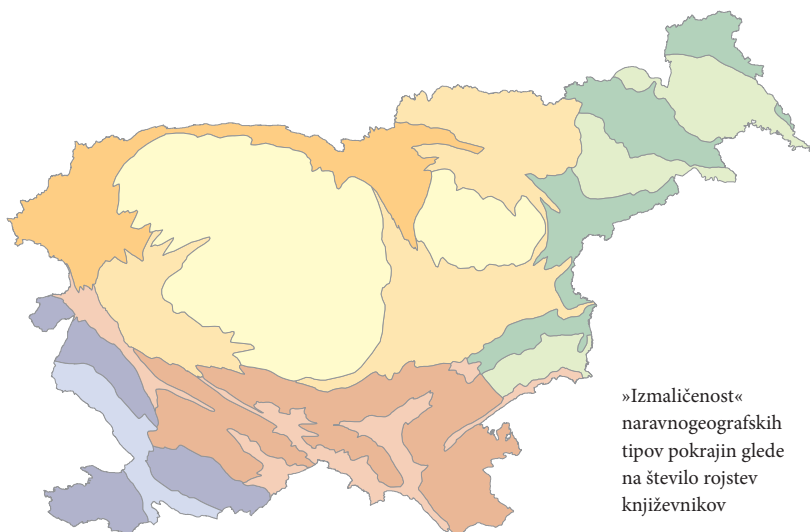
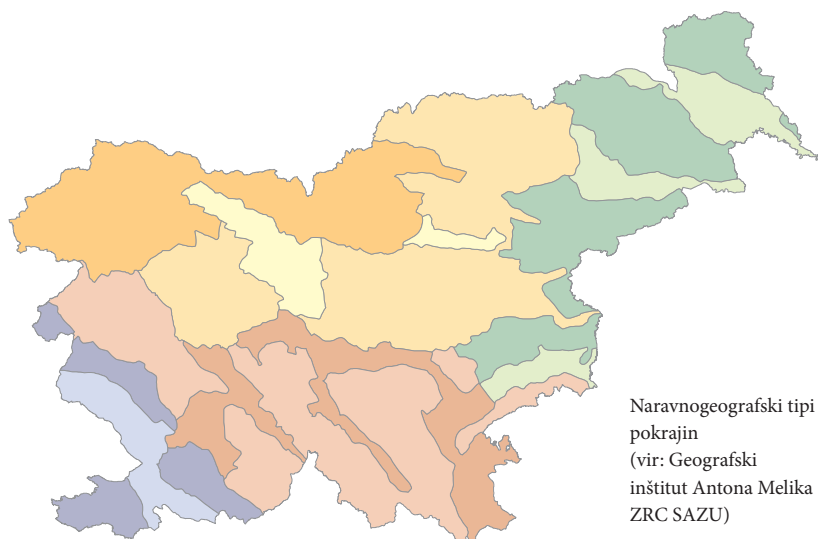
V času priprave pričujočega prispevka smo v večjem obsegu že zaključili statistične analize, med katerimi zaradi vrste podatkov prevladujejo frekvenčne porazdelitve (slika 5). V primeru iskanja odvisnosti med dvema spremenljivkama smo najpogosteje uporabili razsevne grafikone. Zaradi množice časovno opredeljenih dogodkov, na primer datum rojstva in smrti avtorja, leto izida prvenca, leto začetka delovanja ali ukinitve gledališča in podobno, smo uporabili tudi statistične metode časovnih vrst in ugotavljali dinamiko pojavov.

Pri doslejšnjih prostorskih analizah smo do rezultatov prišli z več alternativnimi metodami. Kate-ro pot smo izbrali, je bilo odvisno od problema, od razpoložljivih podatkov, pa tudi od osebnih prioritet in poznavanja možnosti, ki jih ponujajo tovrstni programi. Naša najpogosteje uporabljena prostorska analiza je bila prekrivanje vektorskih podatkovnih slojev. Pri tem dobi vsaka točka, linija ali območje v novem podatkovnem sloju attribute iz obeh izvornih podatkovnih slojev (Drobne 2014).

Med pogosteje uporabljenimi operacijami naj omenimo še:

- določanje razredov: univariatne klasifikacije, ki temeljijo na eni številčni ali opisni spremenljivki, ali več-variantne klasifikacije, ki temeljijo na več spremenljivkah in preučevanju njihove medsebojne odvisnosti,
- računanje razdalj iz koordinat krajev, ki predstavljajo mejnike na življenjskih poteh avtorjev, in določitev dolžin življenjskih poti posameznikov,
- določanje gostot kot povezav med diskretnimi objekti in zveznimi polji, na primer rojstev ali smrti književnikov (slika 1), gostot prebivalcev v različnih časovnih obdobjih in podobno,
- določanje vplivnih območij kulturnih in upravnih središč,
- mrežne analize za ugotavljanje selitvenih tokov glede na strukturo prometnega omrežja, razdaljo in čas potovanja,

Slika 6: Anamorfozni kartogram števila rojstev književnikov po posameznih naravnogeografskih tipih pokrajin. ►



Tip pokrajine	Dejanska površina v km <sup>2</sup>	Izmaličena površina v km <sup>2</sup>	Razlika	Tip pokrajine	Dejanska površina v km <sup>2</sup>	Izmaličena površina v km <sup>2</sup>	Razlika
alpska gorovja	3061,77	2013,61	-1048,17	dinarska podolja in ravniki	1896,93	2812,89	915,96
alpska hribovja	4659,97	3974,02	-685,95	dinarske planote	3809,32	1182,30	-2627,03
alpske ravnine	819,21	5191,81	4372,61	sredozemska gričevja	1061,02	1236,60	175,58
panonska gričevja	2994,52	1828,04	-1166,48	sredozemske planote	673,27	548,14	-125,13
panonske ravnine	1297,00	1622,99	325,99	<b>SKUPAJ</b>	<b>20.273,00</b>	<b>20.410,39</b>	

- ploskovne analize za določanje značilnosti površja, na primer nadmorske višine in posredno naravnogeografski tipi pokrajin,
- območja zgoščanj socialnih omrežij literarnih akterjev in medijev,
- statistične ali koropletnne metode za izdelavo kartogramov (slika 6).

Težava prikazov s kartogrami je nenamerno poudarjanje prostorskih enot z večjo ploščino ne glede na vrednost pojava. Človeško oko in um namreč zaznavata telesa predvsem na podlagi njihove ploščine (Cauvin in Schneider 1989). Sodobni programi omogočajo tudi boljšo možnost prikaza kvantitativnih podatkov, in sicer z namerno deformacijo kartografske projekcije. Ta tip kartogramov imenujemo anamorfoze (Sluga 2003, 78) ali anamorfozni (izmaličeni) kartogrami.

Širša javnost lahko do rezultatov projekta dostopa na spletu, kjer so znanstvene študije podprte s tematskimi zemljevidi. Obiskovalci lahko z naprednim poizvedovanjem na interaktivnem zemljevidu prikažejo izbrane podatke, kar je zelo uporabno pri pouku književnosti v šolah, načrtovanju strokovnih ekskurzij, izdelavi turističnih vodnikov in pri oblikovanju politik varovanja slovenske kulturne dediščine.

## 5 Sklep

S temeljnim raziskovalnim projektom *Prostor slovenske literarne kulture: literarna zgodovina in prostorska analiza z GIS*, ki ga predstavljamo v tem prispevku, poskušamo odgovoriti na vrsto vprašanj. Kako sta na slovenskem etničnem ozemlju od konca 18. do sredine 20. stoletja drug na drugega vplivala geografski in literarni prostor? Kako so na literarno življenje vplivale naravne lastnosti prostora, na primer relief, rečno omrežje, naravnogeografski tipi pokrajin in kako družbenogeografske lastnosti, kot so prometno omrežje, gostota poselitve, naselbinsko omrežje, državno-upravna ureditev, gospodarska in kulturna razvitost regij? Kako je literatura svoj življenjski prostor besedilno predstavljala in s tem vplivala na družbeno dožemanje prostora? Kako je v ta prostor posegala z mediji in institucijami? Kako so književniki s svojimi življenjskimi potmi in družbenimi omrežji povezovali različne kraje?

Na ta in podobna vprašanja lahko bolj zanesljivo odgovorimo, če so naše raziskave podkrepljene s statističnimi analizami in matematičnimi prostorskimi modeli. Čeprav je na prvi pogled struktura GIS-a prilagajena realistično-pozitivistični spoznavni teoriji in kvantitativni analitičnosti, značilni za družboslovne in naravoslovne znanosti, smo s projektom dokazali, da so lahko tudi uporabno orodje na področju humanistike, katere zanimanje je bolj usmerjeno v kvalitativno in zgodovinsko obravnavo pojavov. Z omenjenim projektom smo ujeli korak s tujimi raziskovalci na področju GIS-humanistike. S številnimi tematskimi zemljevidi, še posebej s spletnim interaktivnim zemljevidom literarne kulture na slovenskem etničnem ozemlju v izbranem zgodovinskem obdobju, smo nova znanstvena spoznanja utemeljili in jih predstavili širši javnosti.

## 6 Viri in literatura

- Bartholomew, J. G. 1910: *A Literary and Historical Map of Europe*. London.
- Bodenhamer, D. J. 2010: *The potential of spatial. The Spatial Humanities: GIS and the Future of Humanities Scholarship*. Bloomington.
- Cauvin, C., Schneider, C. 1989: *Cartographic transformations and the piezopleth maps method*. *The Cartographic Journal* 26-2. Leeds.
- Crang, M. 1998: *Cultural Geography*. London.
- Drobne, S. 2014: *Prekrivanje podatkovnih slojev. Medmrežje*: [http://www.fgg.uni-lj.si/sdrobne/GIS\\_Pojm/PREKRIVANJE%20PODATKOVNIH%20SLOJEV.htm](http://www.fgg.uni-lj.si/sdrobne/GIS_Pojm/PREKRIVANJE%20PODATKOVNIH%20SLOJEV.htm) (7. 4. 2014).

- Fridl, J., Kladnik, D., Orožen Adamič, M., Perko, D. (ur.) 1998: Geografski atlas Slovenije: država v prostoru in času. Ljubljana.
- Hladnik, M., Fridl, J. 2012: Prostor v slovenski zgodovinski povesti in njegova geografska prezentacija. Slavistična revija 60-3. Ljubljana.
- Juvan, M. 2006: Literarna veda v rekonstrukciji: uvod v sodobni študij literature. Ljubljana.
- Juvan, M. 2013: Prostorski obrat, literarna veda in slovenska književnost: uvodni zaris. Primerjalna književnost 36-2. Ljubljana.
- Komac, B. 2009: Social memory and geographical memory of natural disasters. Acta geographica Slovenica 49-1. Ljubljana.
- Lüdtke, G., Mackensen, L. 1928–1938: Deutscher Kulturatlas. Berlin.
- Moretti, F. 2005: Graphs, Maps, Trees: Abstract Models for a Literary History. London.
- Nadler, J. 1912–1928: Literaturgeschichte der deutschen Stämme und Landschaften. Regensburg.
- Nagel, S. R. 1907: Deutscher Literaturatlas: Die geographische und politische Verteilung der deutschen Dichtung in ihrer Entwicklung nebst einem Anhang von Lebenskarten der bedeutendsten Dichter. Dunaj.
- Perenič, U. 2013: V prerezu slovenske empirične literarne znanosti. Slavistična revija 61-1. Ljubljana.
- Perenič, U. 2014: An overview of literary mapping projects on cities: literary spaces, literary maps and sociological (re)conceptualisations of space. Neohelicon 41-1. Houten.
- Piatti, B. 2008: Die Geographie der Literatur: Schauplätze, Handlungsräume, Raumphantasien. Göttingen.
- Schlosser, H. D. 1983: Dtv-Atlas zur deutschen Literatur. München.
- Sluga, G. 2003: Anamorfoze v tematski kartografiji. Magistrsko delo, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Soja, E. W. 1989: Postmodern Geographies: The Reassertion of Space in Critical Social Theory. London.
- Terian, A. 2013: Constructing transnational identities: the spatial turn in contemporary literary historiography. Primerjalna književnost 36-2. Ljubljana.
- Urbanc, M. 2008a: Stories about real and imagined landscapes: the case of Slovenian Istria. Acta geographica Slovenica 48-2. Ljubljana.
- Urbanc, M. 2008b: Večdimenzionalnost pokrajine: primer slovenske Istre. Geografski vestnik 80-2. Ljubljana.
- Vranješ, M. 2002: Družbena produkcija prostora: k epistemologiji prostora v geografiji in humanistiki. Geografski vestnik 74-2. Ljubljana.





# SAMODEJNO ZAZNAVANJE PLOVIL NA VISOKO-LOČLJIVIH OPTIČNIH SATELITSKIH POSNETKIH

**Urša Kanjir, Aleš Marsetič, Peter Pehani, dr. Krištof Oštir**

*Inštitut za antropološke in prostorske študije, Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti*

*ursa.kanjir@zrc-sazu.si, peter.pehani@zrc-sazu.si, ales.marsetic@zrc-sazu.si, kristof@zrc-sazu.si*

UDK: 528.7:629.51/.58

## IZVLEČEK

### **Samodejno zaznavanje plovil na optičnih satelitskih posnetkih**

*V okviru projekta NEREIDS (Nove storitvene zmogljivosti za integriran in napreden pomorski nadzor) je bil razvit algoritem samodejne zaznave plovil iz večspektralnih satelitskih optičnih senzorjev zelo visoke ločljivosti. Algoritem predstavlja pomembno alternativo že uveljavljenim postopkom, ki so v večini razviti iz radarskih posnetkov. Postopek poteka v več korakih in temelji na dejstvu, da so plovila v morju v vidnem in bližnje infrardečem spektru svetlejša od svoje neposredne okolice. Pri zaznavi zato upoštevamo njihove specifične spektralne vrednosti. Za zaznavo segmentov, ki predstavljajo plovila, smo uporabili segmentacijo na podlagi histograma ter morfološke metode obdelave podob. Predlagani algoritem je učinkovit, hiter in preprost, kar je ključnega pomena pri zaznavanju plovil na morju.*

## KLJUČNE BESEDE

*samodejno zaznavanje plovil, maska kopnega, segmentacija, zelo visokoločljivi optični satelitski posnetki*

## ABSTRACT

### **Automatic vessel detection from very high-resolution optical satellite data**

*In the frame of the NEREIDS (New Service Capabilities for Integrated and Advanced Maritime Surveillance Project) we have developed an algorithm for automatic vessel detection from very high-resolution (VHR) multispectral optical satellite data. Algorithm represents an important alternative to the established procedures that are developed mostly from radar data. It works with many steps and is based on the fact that the vessels on the sea are brighter in the visible and near-infrared spectrum than their immediate surroundings. Therefore we use their spectral values for their detection. The automatic vessel detection algorithm uses histogram-based segmentation and morphological methods for image processing. The proposed algorithm is efficient, quick and simple, which is of key importance for vessel detection.*

## KEY WORDS

*automatic vessel detection, land mask, segmentation, very high-resolution (VHR) optical satellite data*

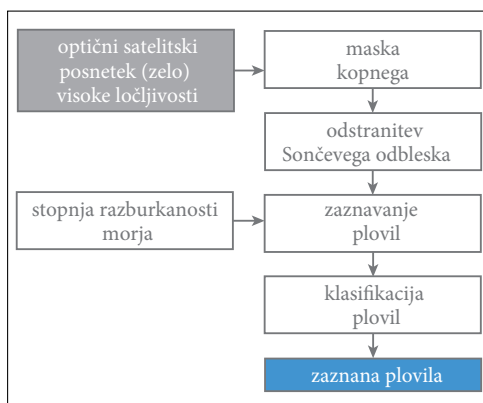
## 1 Uvod

Zaznavanje plovil iz daljinsko zaznanih podob predstavlja pomemben segment pri zagotavljanju varnosti pomorskega prometa, nadzoru ribolova, opazovanju in preprečevanju naftnih izlivov ali pregledu nad nezakonitimi migracijami na morju. Sistem spremljanja plovil VMS (ang. *Vessel Monitoring System*) na krovu plovil omogoča stalno spremljanje in opazovanje plovil v realnem času. Toda predvsem manjša plovila, ki jim ni treba upoštevati obstoječe direktive, niso opremljena s tem sistemom. Z daljinskim zaznavanjem lahko zaznamo plovila, ki so opremljena z VMS sistemom, brez njega ali tiste z lažnim VMS sistemom (Corbane s sodelavci 2010).

Večina postopkov za odkrivanje plovil iz satelitskih posnetkov temelji danes na obdelavi radarskih posnetkov (na primer Inggs in Robinson 1999; Tello s sodelavci 2004; Liu s sodelavci 2005). Ti posnetki so zaradi sposobnosti snemanja podnevi in ponoči ne glede na vremenske razmere ter zaradi njihovega načina delovanja (popolni odboj na vodi omogoča enostavno prepoznavo vodnih celic) izjemno priročni za opazovanje morja.

Manj raziskav se je ukvarjalo z zaznavanjem plovil iz satelitskih optičnih podob (na primer Burgess 1993; Corbane s sodelavci 2010; Huang s sodelavci 2011). To je predvsem posledica dejstva, da so visoko prostorsko ločljivi optični sistemi relativno novi, imajo pa tudi dokaj majhno širino snemalnega pasu, poleg tega pa so na posnetkih pogosto prisotni oblaki. Uporaba optičnih posnetkov pri zaznavanju plovil nedvomno predstavlja pomembno dopolnilo uveljavljenim radarskim tehnologijam, saj za zaznavanje in klasifikacijo plovil na morju izkoriščajo njihove spektralne lastnosti. Prednost visokoločljivih optičnih posnetkov (na primer *GeoEye*, *RapidEye*, *Ikonos*) je, da lahko na njih zaznamo tudi majhna plovila (od 4 do 20 metrov), lesene čolne ter plovila iz steklenih vlaken, ki jih je težje zaznati z radarjem (Greidanus s sodelavci 2004). Dodaten argument v prid optičnim posnetkom je tudi rastoče število malih optičnih satelitskih sistemov, kar ima za posledico izboljšanje časovne in spektralne ločljivosti opazovanj pri spremljanju določenega območja.

Metode za zaznavanje vode iz optičnih satelitskih sistemov temeljijo na: (a) segmentaciji na podlagi histograma (iskanje praga v histogramu), (b) spektralnih vodnih indeksih ali (c) tematski klasifikaciji. Slednje (Li s sodelavci 2003; Hung in Wu 2005) so algoritemsko in procesno zahtevne ter temeljijo na učnih vzorcih in so zato neustrezne za opazovanje plovil. Metode na podlagi vodnih indeksov temeljijo na uporabi normaliziranega diferenčnega vodnega indeksa NDWI (ang. *Normalised Difference Water Index*) (McFeeters 1996) ter njegovih izpeljank (Xu 2006; Lacaux s sodelavci 2007). Za vsako celico računajo razmerje med enim izmed infrardečih kanalov ter enim izmed vidnih (običajno zelenim). V trenutni fazi razvoja algoritma smo uporabili preprost algoritem segmentacije na podlagi histograma (ang. *histogram-based segmentation*). Ta tehnika temelji na predpostavki, da se objekti na podobi



Slika 1: Metoda za iskanje plovil na optičnih posnetkih.

razlikujejo glede na njihove sive vrednosti (Weszka 1978). Glavni cilj segmentacije je razvrstiti celice glede na njihove statistične porazdelitve znotraj določenega praga vrednosti v histogramu. Ta metodologija je še posebej priljubljena zaradi njene enostavnosti, zlasti na področjih kjer je treba zagotoviti rezultate v realnem času, kar še posebej velja v primeru opazovanja plovil na morju. Čeprav v pričujočem delu predstavljamo delovanje algoritma samo na posnetkih satelitskega senzorja *GeoEye*, pa je bila metoda zaradi njene univerzalnosti in učinkovitosti uspešna tudi pri drugih optičnih satelitskih senzorjih (*WorldView-2*, *Ikonos*, *QuickBird*).

V okviru projekta NEREIDS (Nove storitvene zmogljivosti za integriran in napreden pomorski nadzor), ki je potekal pod okriljem 7. okvirnega programa Evropske unije, smo razvili prototip za samodejno zaznavo plovil iz optičnih posnetkov zelo visoke ločljivosti. Procesni algoritem je sestavljen iz štirih glavnih delov (slika 1): (1) maska kopnega, (2) odstranitev Sončevega odbleska, (3) določitev stopnje razburkanosti morja in (4) zaznavanje potencialnih segmentov plovil. Opisi posameznih delov so podani v nadaljevanju.

## 2 Uporabljeni podatki

Algoritem je bil testiran na posnetkih sistema *GeoEye* s prostorsko ločljivostjo 0,5 m v pankromatskem oziroma 2 m v večspektralnih kanalih. Posnetki so bili predhodno grobo umeščeni (ortorektificirani) v UTM projekcijo. Radiometrični popravki niso bili opravljeni, kar pomeni, da vrednosti celic na posnetkih niso predstavljale odbojnosti, temveč sevanje, kot ga zazna senzor, zapisano v uteženi lestvici digitalnih števil. Posledično tudi razmerja med kanali niso prava, saj se svetloba siplje različno intenzivno glede na valovno dolžino (najbolj modra).

Za doseg višje prostorske ločljivosti smo večspektralne posnetke zaradi potreb po zaznavanju čim manjših plovil izostrili s pankromatskim posnetkom (ang. *pan-sharpening*) in z uporabo metode IHS (intenziteta-barva-nasičenost; ang. *Intensity-Hue-Saturation*), ki se je v primeru zaznavanja plovil izkazala kot najprimernejša.

## 3 Maskiranje kopnega

Prvi korak algoritma je izločanje oziroma maskiranje kopnega. Za razločevanje kopnih in vodnih površin smo uporabili metodo določanja praga na histogramu bližnje infrardečega kanala. Metoda temelji na dejstvu, da je odbojnost vodnih površin v območju bližnje infrardečega valovanja zelo nizka, ter nasprotno pri odbojnosti prsti, rastja in oblakov visoka (slika 2). Histogram vrednosti celic bližnjega infrardečega kanala »idealnega« posnetka ima značilno obliko z dvema vrhovoma (slika 3). Bolj izraziti levi vrh predstavlja vodno površino, desni pa kopno. Minimum med obema vrhovoma pomeni prag med morjem in kopnim, ki ga določimo z odvodom histograma.

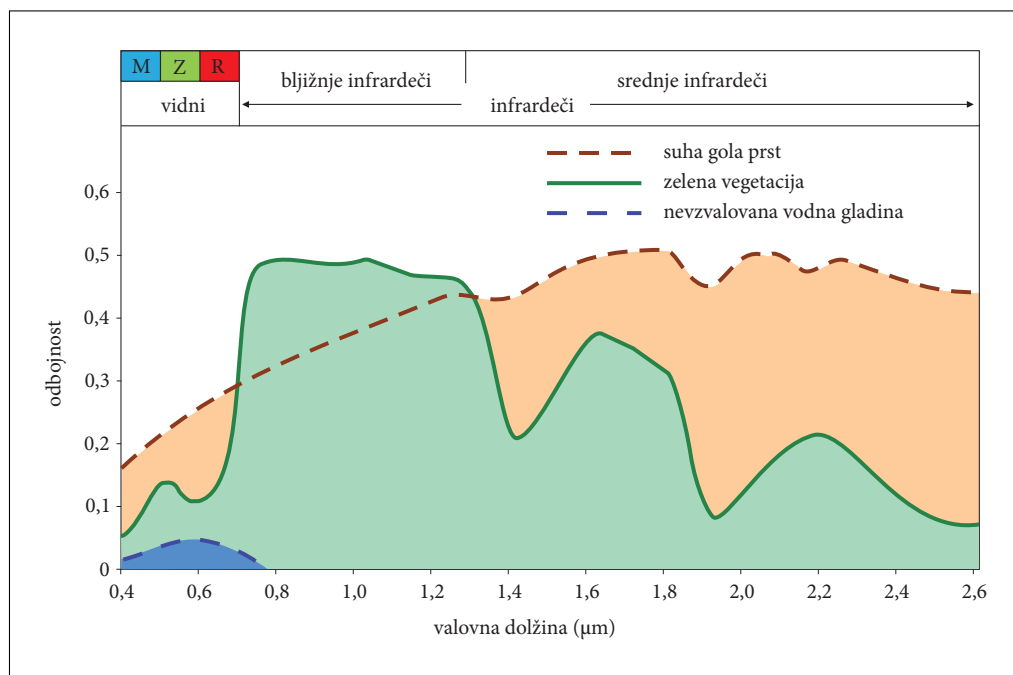
Analizirani satelitski posnetki se lahko razlikujejo od idealnega, ko: (a) posnetek ni radiometrično popravljen, (b) morje ni mirno, (c) kopno ni prisotno. V našem primeru posnetki niso bili radiometrično popravljeni, a smo vseeno dobili zadovoljive rezultate, saj algoritem ne deluje na razmerju med kanali.

Nemirno morje predstavlja velik izziv, saj lahko zaradi valov pride do majhnih območij popolnega odboja oziroma se valovi penijo. To onemogoči zaznavo vode, saj takrat odbojnost vode ni več nizka. Vpliv valov zmanjšamo tako (slika 4), da satelitski posnetek pred iskanjem praga prevzorčimo na empirično določeno ločljivost 20 m. Če na posnetku ni kopnega, pride do samo enega izrazitega vrha (voda), ter več manj izrazitih vrhov (na primer plovila, čeri, popolni odboji). Za določitev praga v takih primerih na histogramu prevzorčenih celic poiščemo minimum med dvema izrazitima vrhovoma. Ker je to kritičen del algoritma, poteka iterativno in z več kontrolami.

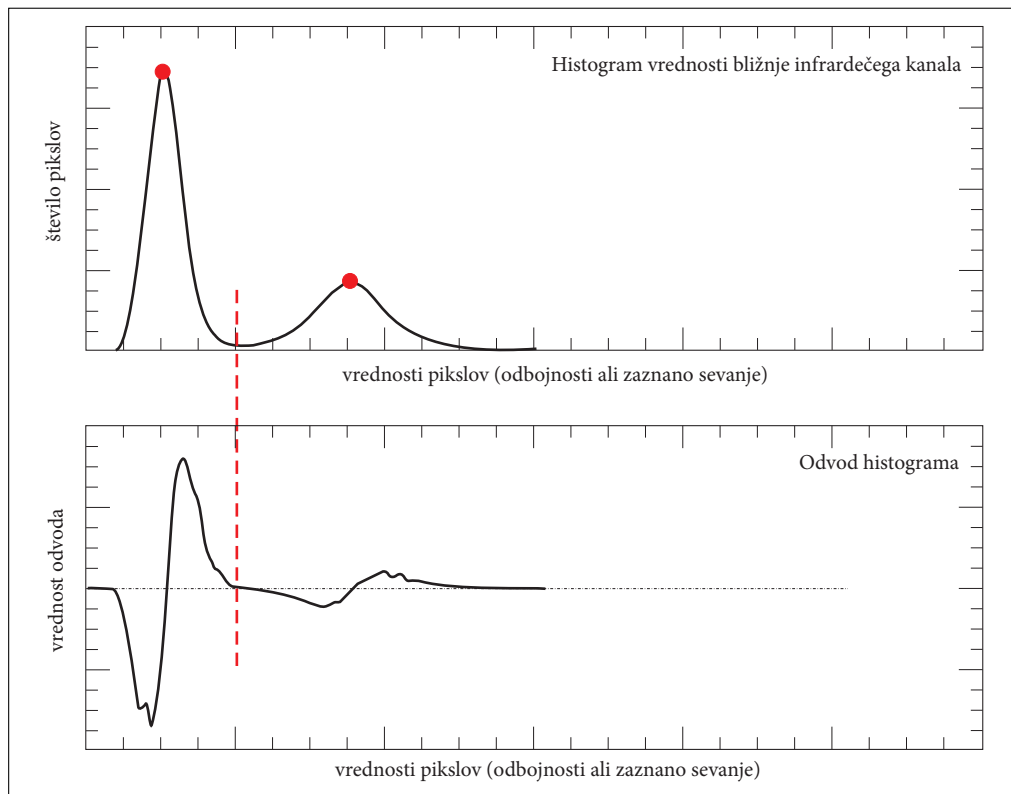
Ko je prag določen, algoritem izloči kopno iz nadaljnje obdelave v več korakih: določi začetno masko – celice, ki naj bi predstavljale kopno, zgladi masko z uporabo morfoloških filtrov in vrne manjše regije nazaj v morje (možna plovila). Na koncu se okoli kopnega v prvotni ločljivosti uporabi še vmesno cono (ang. *buffer*) empirično določene širine 50 m (6). Na ta način se izloči veliko priobalnih pojavov (na primer čeri, valovi, kalna voda), ki motijo nadaljnjo samodejno zaznavo, premikajočih se plovil pa v tem delu večinoma ni. Priobalni pas tudi ni bil naš primarni cilj, saj so na tem območju veliko učinkovitejši terestrični sistemi opazovanja plovil.

## 4 Sončev odblesek

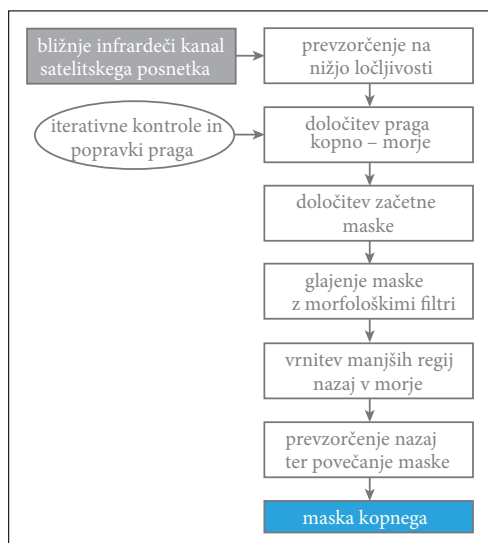
Zaznavanje vodnih površin iz optičnih posnetkov je lahko resno ovirano zaradi različnega stanja vodne površine. V primeru določene kombinacije položaja Sonca in satelita v času zajema, lahko na večjih območjih morja pride do popolnega odboja oziroma do Sončevega odbleška (ang. *sun glint*). Ta se pojavlja ravno ob lepem vremenu oziroma v tistih pogojih, kjer so posnetki daljinskega zaznavanja najuporabnejši. Sončni odblesek močno vpliva na rezultat klasifikacije. Hochberg s sodelavci (2003) so za premostitev problema razvili metodo, ki zmanjša Sončev odblesek na podlagi izračunov vrednosti v infrardečem kanalu (valovna dolžina med 700–910 nm). Celice z visokimi odboji so zmanjšane na vrednost ostalih vodnih površin na posnetku. Predpostavimo, da so visoke vrednosti celic posledica Sončevega odbleška, ter da je količina odboja v vidnih kanalih v linearnem odnosu z vrednostmi visokih odbojev v infrardečem kanalu (Mobley 1994). Z linearno regresijo ugotavljamo za koliko se mora zmanjšati vrednost celic, da se odstrani Sončev odblesek (slika 5).



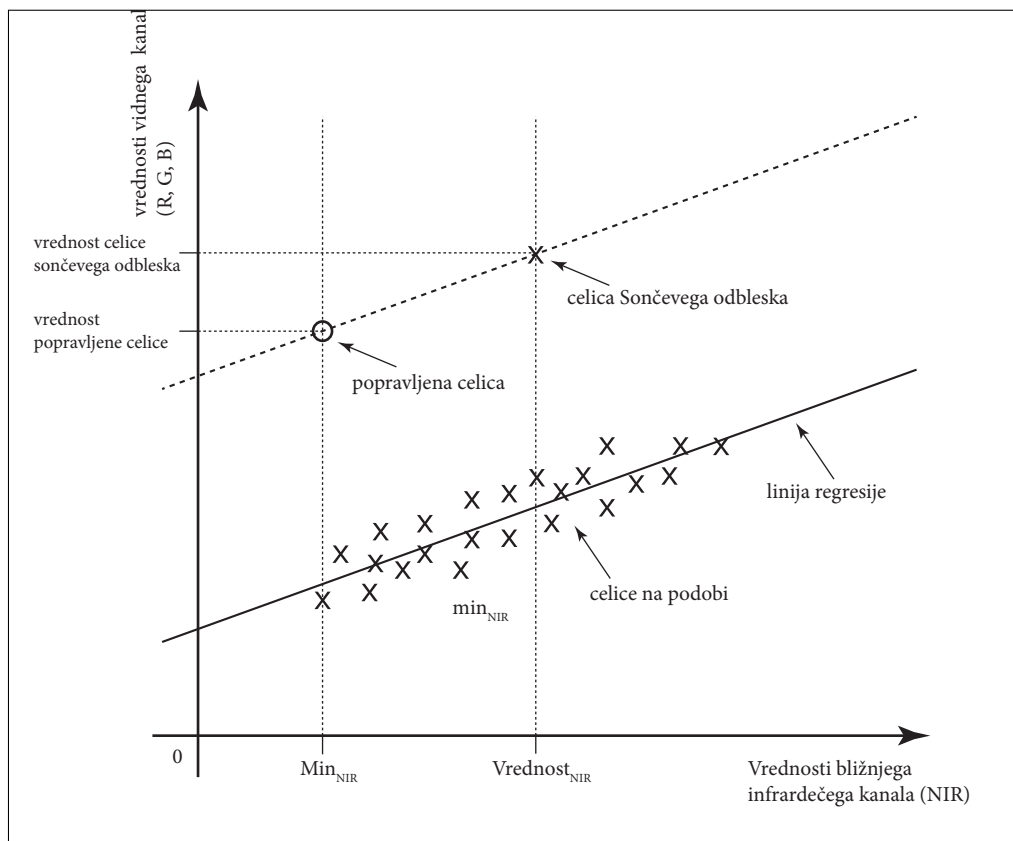
Slika 2: Krivulje odbojnosti v odvisnosti od valovne dolžine za tri vrste pokrovnosti (Lillesand in Kiefer 1994).



Slika 3: Tipični histogram vrednosti celic bližnje infrardečega kanala. Prag med kopnim in morjem določimo kot minimum med dvema izrazitima vrhovoma.

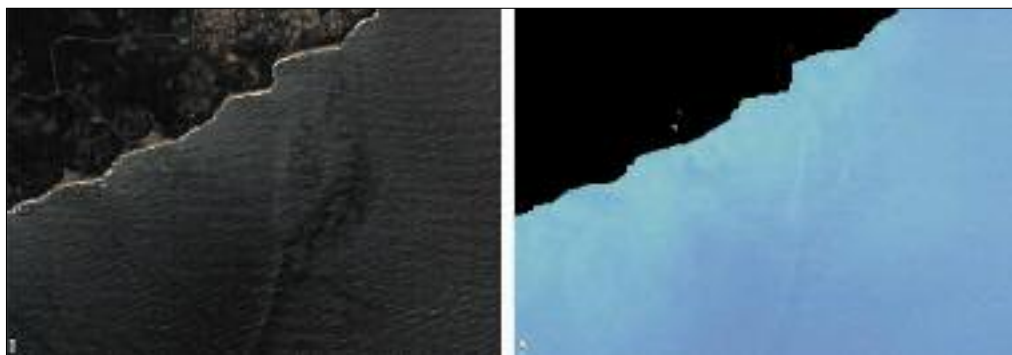


Slika 4: Priprava maske kopnega.



Slika 5: Izboljšava posnetka v primeru Sončevega odbleska (povzeto po Hedley s sodelavci 2005).

Vhodni podatek je v našem primeru maska morja. Na sliki 6 je predstavljen popravljen posnetek v primeru Sončevega odbleska.

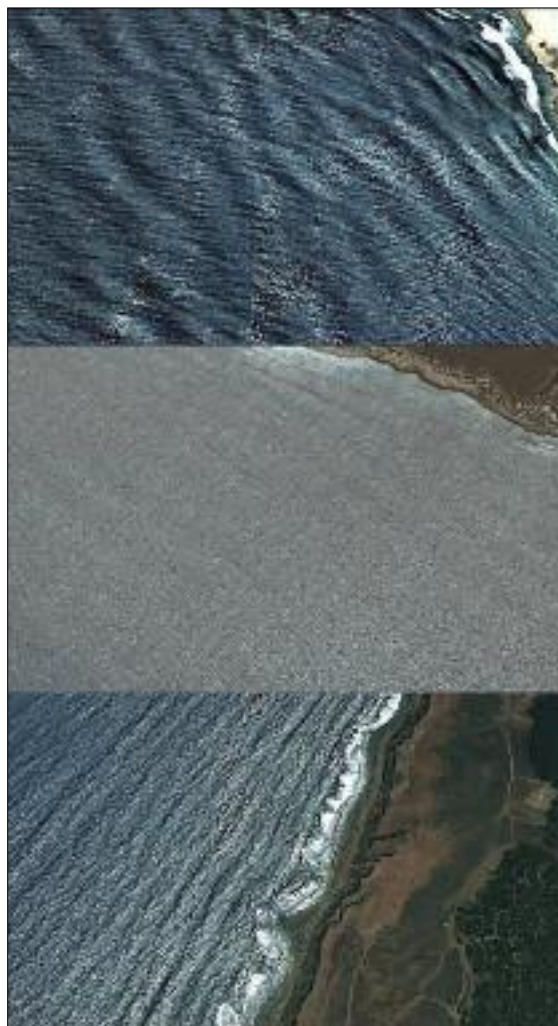


Slika 6: Primer izboljšave Sončevega odbleska na maski morja (desna podoba).

## 5 Stopnja razburkanosti morja

Stanje vodnih površin na podobi se spreminja tudi zaradi vpliva različnih vremenskih razmer (veter), valovanja morja in tipa snemalnega senzorja (slika 7). Vse to vpliva na razlike v intenziteti in kontrastu vodnih površin, odraža pa se v ponavljajoči teksturi. Tekstura vsebuje pomembne informacije o strukturni ureditvi površin (Haralick s sodelavci 1973). V našem primeru smo uporabili preprosto statistično metodo določanja teksture, izračun standardnega odklona maske morja, iz katere dobimo stopnjo razburkanosti morja, ki nam olajša določitev segmentov plovil. Iz rezultatov smo razvili empirično lestvico razburkanosti s stopnjami od 1 do 12 (višja kot je, večja je razburkanost). Pri tem smo površino plovil zanemarili, saj je načeloma majhna glede na površino morja. Preizkusili smo tudi druge specifične teksturne karakteristike (homogenost, kontrast, entropija ...), vendar niso dodale pomembnih informacij o razburkanosti morja.

Stopnja razburkanosti morja je vhodni parameter pri koraku zaznavanja plovil.



*Slika 7: Tri različne teksture morske površine.*



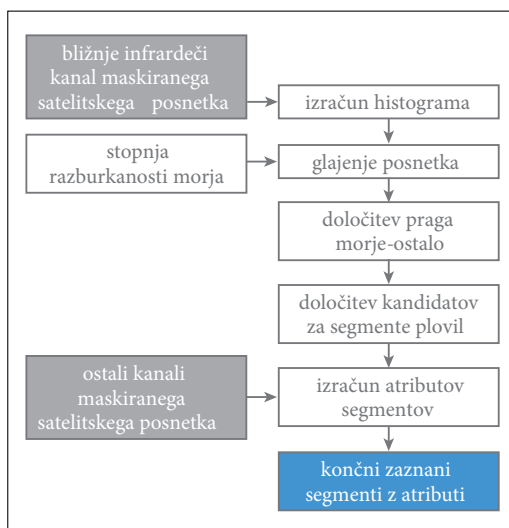
## 6 Zaznavanje plovil

Ker je celoten postopek zaznavanja plovil samodejen, je njegova uspešnost odvisna od pravilnosti maske kopnega, uspešno odstranjenega Sončevega odbleska in pravilne določitve razburkanosti morja. Pomembno je natančno usklajevanje med posameznimi deli algoritma.

Sam postopek zaznavanja je podoben postopku določitve maske kopnega (slika 8), uporablja pa se histogram celic bližnje infrardečega kanala maskiranega posnetka. Algoritem najprej izdelava histogram ter glede na pogostost pojavljanja celic izloči vse celice z nizkim spektralnim odbojem. Metoda deluje tudi v primeru različnih stanj morja na posnetku (Guang 2011), saj upošteva nihanje kumulativne funkcije histograma. Dobljena maska prikazuje le gruče celic z visoko odbojnostjo, ki potencialno predstavljajo plovila. Takih objektov je v primeru razburkanega morja lahko veliko. Ker se valov želimo znebiti, v koraku pred tem uporabimo metodo glajenja posnetka. Z glajenjem odstranimo večino valov, hkrati pa povečamo velikost plovil. Pravo velikost nato dobimo z uporabo originalnega, neglajenega posnetka z aritmetičnimi operacijami in morfološkimi filtri.

S predlagano metodo dobimo tudi objekte velikosti nekaj celic, posebno pri posnetkih z mirnim morjem, zato lahko zaznamo tudi manjša plovila. Vsa zaznana plovila so v rezultatih prikazana s križcem (slika 9), čeprav so prepoznana kot segmenti.

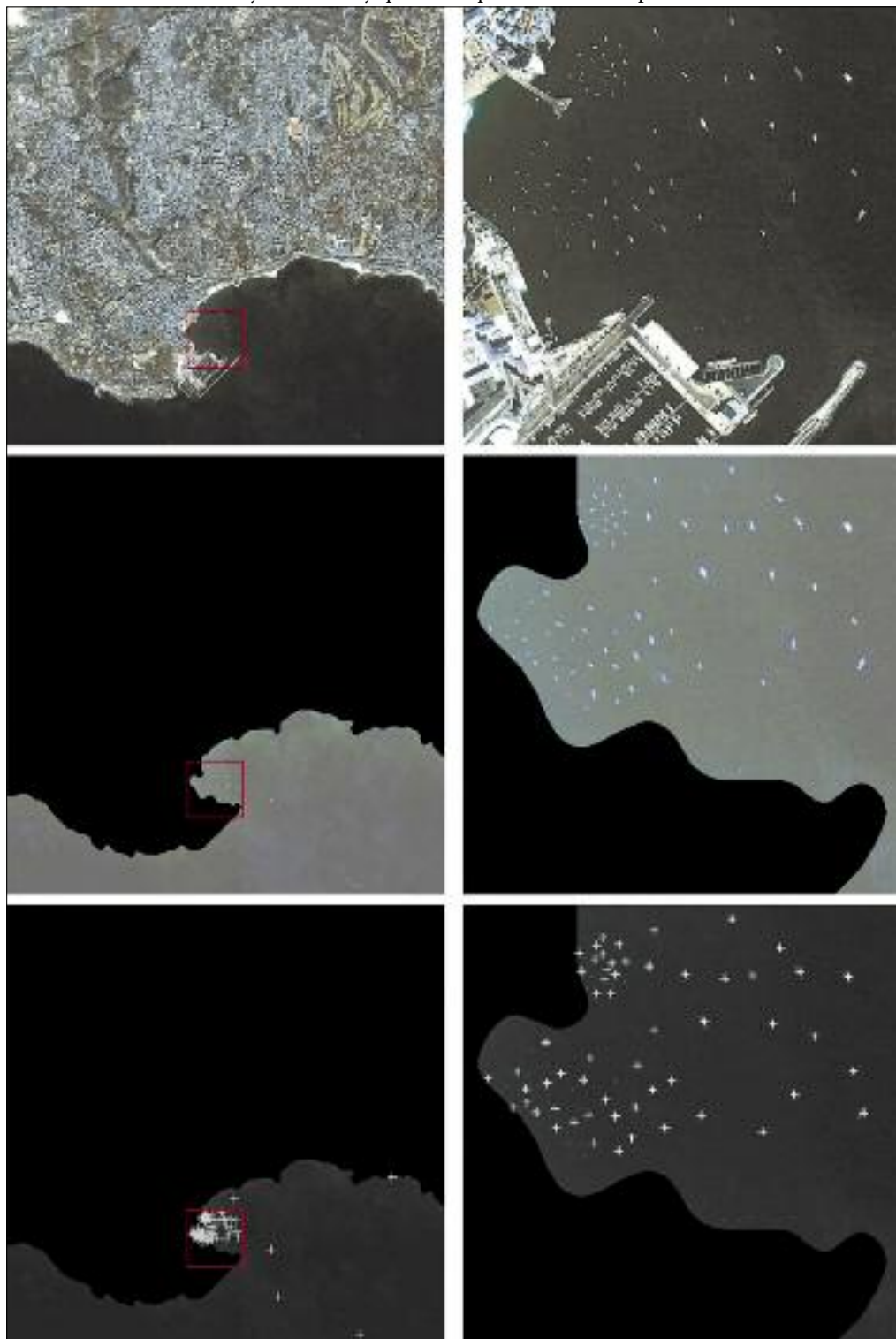
Zaznani objekti niso vedno le plovila, zato je treba pridobljene segmente še klasificirati. Za potrebe klasifikacije, ki je zadnja faza procesnega algoritma in je trenutno še v izdelavi, moramo vsem segmentom izračunati attribute. Ti so geometrični (površina, dolžina, širina) in spektralni (povprečje in standardna deviacija vseh kanalov). Vsak zaznan objekt tudi umestimo v prostor z izračunom koordinat v UTM projekciji.



Slika 8: Postopek zaznavanja plovil.

Slika 9: Zaznana plovila na posnetku GeoEye (Cascais, Portugalska). Levi stolpec prikazuje celoten posnetek, desni njegov približan izsek. V prvi vrstici je prikazana originalna podoba, v drugi rezultat maske kopno-morje, v tretji vrstici pa zaznani segmenti plovil. ►

Samodejno zaznavanje plovil na optičnih satelitskih posnetkih



## 7 Vrednotenje rezultatov

Pravilnost zaznavanja plovil smo ugotavljali z vizualno interpretacijo posnetka na treh različnih testnih območjih, pri čemer smo preverjali geometričen položaj segmentov plovil (preglednica 1). Zaznani segmenti predstavljajo z opisanim algoritmom dobljene potencialne segmente plovil; vizualno določena plovila so plovila, ki smo jih določili ročno, zaznana plovila pomenijo število pravilno zaznanih plovil glede na zaznane segmente, izpuščena plovila pa so tista, ki jih algoritem ni zaznal.

*Preglednica 1. Vrednotenje samodejnega zaznavanja plovil na treh testnih območjih.*

območje (posnetek <i>GeoEye</i> )	zaznani segmenti	vizualno določena plovila	zaznana plovila	izpuščena plovila	uspešnost zaznave [%]
Cascais (Portugalska)	72	83	72	11	86,7
Mbour_1 (Senegal)	66	55	54	1	80,6
Mbour_2 (Senegal)	24	21	21	0	87,5

Rezultati kažejo, da lahko z omenjeno metodo zaznamo plovila na morju z natančnostjo približno 85 %. Na vseh treh testnih območjih so napačno zaznani segmenti praviloma valovi, izpuščena plovila pa so v prvem primeru zelo majhni čolni, na drugem testnem območju pa plovili, ki se dotikata in sta zato zaznani kot eno plovilo.

V nekaterih primerih se pojavijo težave pri zaznavanju pravilne oblike plovil. To se pogosto zgodi pri premikajočih plovilih, kjer je (zaradi penjenja) dolžina in širina dejanskih segmentov močno precejšena. Prav tako smo zaznali napačne segmente na robovih maske, ki sicer lahko predstavljajo dele plovil ali pa druge elemente ostankov kopnega. Prav tako v maski morja ostanejo ozki pomoli, zato jih algoritem kasneje napačno zazna kot plovila (slika 10).

## 8 Sklep

V članku predstavljena metodologija za zaznavanje plovil je popolnoma samodejna in za procesiranje posnetka velikosti 6000 × 6000 celic (350 MB) potrebuje okoli minute na računalniku s 16 GB pomnilnikom in 3,4 GHz procesorjem. Uspešna zmogljivost algoritma je dokaz njegovega potenciala za različne uporabnike (na primer luška kapitanija, obalna straža, reševalne ekipe).

Samodejno zaznani segmenti pogosto vsebujejo lažne »alarme« (majhni oblaki, otoki, valovi), ki pa se razlikujejo po geometrijski obliki, saj imajo plovila specifično razmerje med dolžino in širino segmentov. Nadaljnje raziskovalno delo je zato usmerjeno v razvoj klasifikacije dobljenih segmentov, ki je trenutno še v razvojni fazi in zato posledično ni vključena v celoten postopek. Prav tako testiramo uspešnost postopka tudi na posnetkih ostalih zelo visoko ločljivih optičnih satelitskih senzorjev.

*Zahvala: Raziskava je bila izvedena v okviru projekta EC FP7 NEREIDS 263468 (New Service Capabilities for Integrated and Advanced Maritime Surveillance).*

*Slika 10. Različni območji (levi stolpec: Mbour\_1, desni stolpec: Mbour\_2) prikazujeta v drugi vrstici masko morja in v tretji zaznane objekte. Opazni so napačno zaznani segmenti na robu maske (levi stolpec) in na ozkem pomolu (desni stolpec). ►*

Samodejno zaznavanje plovil na optičnih satelitskih posnetkih



## 9 Viri in literatura

- Burgess, D. W. 1993: Automatic ship detection in satellite multispectral imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 59. Falls Church.
- Corbane, C., Najman, L., Pecoul, E., Demagistri, L., Petit, M. 2010: A complete processing chain for ship detection using optical satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing* 31-22. London.
- Greidanus, H., Clayton, P., Indregard, M. and Staples, G. 2004: Benchmarking operational SAR ship detection. *Geoscience and Remote Sensing*. Anchorage.
- Guang, Y., Qichao, L., Feng, G. 2011: A novel ship detection method based on sea state analysis from optical imagery. *IEEE Sixth International Conference on Image and Graphics*.
- Haralick, R. M., Shanmugan, K., Dinstein, I. 1973: Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 3-6. New York.
- Hedley, J. D., Harborne, A. R., Mumby, P. J. 2005: Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. *International Journal of Remote Sensing* 26-10. London.
- Hochberg, E. J., Andrefouet, S., Tyler, M. R. 2003: Sea surface correction of high spatial resolution Ikonos images to improve bottom mapping in near-shore environments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41. New York.
- Huang, G., Wang, Y., Zhang, Y., Tian, Y. 2011: Ship detection using texture statistics from optical satellite images. *13th International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications*. Noosa.
- Hung, M. C., Wu, Y. H. 2005: Mapping and visualizing the Great Salt Lake landscape dynamics using multi-temporal satellite images, 1972–1996. *International Journal of Remote Sensing* 26-9. London.
- Inngs, M. R., Robinson, A. D. 1999: Ship target recognition using low resolution radar and neural networks. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 35. New York.
- Lacaux, J. P., Tourre, Y. M., Vignolles, C., Ndione, J. A., Lafaye, M. 2007: Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment* 106-1. New York.
- Li, J., Narayanan, R. M. 2003: A shape-based approach to change detection of lakes using time series remote sensing images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41-11. New York.
- Liu, C., Vachon, P. W., Geling, G. W. 2005: Improved ship detection with airborne polarimetric SAR data. *Canadian Journal of Remote Sensing* 31. Ottawa.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W. 1994: *Remote Sensing and Image Interpretation*. New York.
- McFeeters, S. K. 1996: The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing* 17-7. London.
- Mobley, C. D. 1994: *Light and Water*. San Diego.
- Tello, M., Lopez-Martinez, C., Mallorqui, J., Greidanus, H. 2004: A novel algorithm for ship detection in Envisat SAR imagery based on the wavelet transform. *Proceedings of the 2004 Envisat & ERS Symposium*. Salzburg.
- Weszka, J. S. 1978: A survey of threshold selection techniques. *Computer Graphics Image Process* 7. New York.
- Xu, H. 2006: Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing* 27-14. London.

# GEINFORMACIJSKO VREDNOTENJE LOKACIJ ZA POSTAVITEV SONČNIH CELIC V NASELJU LAVRICA

**Nino Mohorič**

ninomohoric5@gmail.com

**dr. Blaž Repe**

Oddelek za geografijo, Filozofska fakulteta, Univerza v Ljubljani

blaz.repe@ff.uni-lj.si

UDK: 911.2:502.21:523.9(497.4Lavrica)

621.311.243(497.4Lavrica)

## IZVLEČEK

### **Geoinformacijsko vrednotenje lokacij za postavitev sončnih celic v naselju Lavrica**

Vse pogostejša je uporaba čistejših tehnologijah, ki pri pridobivanju energije puščajo čim najmanjši ekološki odtis. Ena izmed takšnih je tudi fotovoltaična tehnologija, ki za pridobivanje električne energije izkorišča obnovljivo zalogo sončne energije. Za večjo prepoznavnost in aplikacijo fotovoltaične tehnologije ter preizkus nekaterih izbranih GIS postopkov smo izdelali model, s katerim smo ugotavljali smiselnost postavitve sončnih elektrarn v naselju Lavrica. Izdelavo modela smo razdelili na več delov. Najprej smo s pomočjo orodja ArcGIS Solar Analyst izdelali zemljevid globalnega obsevanja, ga obdelali ter iz njega pridobili absolutne vrednosti. Te smo nato uporabili za nadaljnji izračun podatkov, ki pomagajo pri odločanju za postavitev sončnih elektrarn. Ob tem smo naleteli na težave pri natančnosti in dostopnosti podatkov. Kljub vsemu smo uspeli dobiti uporabno podatkovno bazo, na podlagi katere smo ocenili možnost za postavitev sončnih sistemov v naselju Lavrica.

## KLJUČNE BESEDE

sončna energija, fotovoltaika, GIS, podpora odločanju, Lavrica

## ABSTRACT

### **GIS evaluation of possible future solar panel installation sites in the settlement of Lavrica**

Cleaner technologies which leave a smaller ecological footprint from producing energy have been in placed the foreground in the recent years. One of them is photovoltaic technology which harnesses the infinite supply of solar energy. A model was designed to determine how reasonable is the placement of solar power plants in the village of Lavrica, encouraging popularity and recognisability of solar technologies. The work was divided into three parts. First, a card of global insolation was made and modified with the help of ArcGIS tool Solar Analysis. Then the values were extracted and used for further calculations. Problems arose because of the limitations of data accuracy and accessibility. Despite this, a valuable database was created for the successful evaluation of Lavrica solar capabilities.

## KEY WORDS

solar energy, photovoltaics, GIS, decision support, Lavrica

## 1 Uvod

Na področju sončnih celic je bilo v zadnjih desetletjih narejeno veliko, a obstaja še velik potencial za nadaljnji razvoj (Jayakumar, 2009). Za učinkovit razvoj je pomembno nižanje stroškov proizvodnje in namestitve. Razvoj gre v smeri vedno večjega izkoristka v vseh fazah proizvodnje in uporabe te tehnologije (Klärle, Ludwig in Lanig 2012).

Eden izmed načinov za povečanje uporabe sončne energije, je izdelava sončnih zemljevidov, ki uporabniku preprosto in informativno prikažejo, kakšen potencial ima njihova lokacija. Zelo razširjeno je kartiranje sončnega potenciala streh na različnih objektih. Pri izdelavi takšnih zemljevidov vodi Nemčija, kjer ima sončna energija veliko podporo; sledijo ji Velika Britanija in ZDA. Zelo razširjen je model *SUN-AREA*, ki uporablja LIDAR za izris natančnega zemljevida sončnega obsevanja (Klärle, Ludwig in Lanig, 2012).

Za prikaz primernosti postavitve sončnih elektrarn na objekte v območju naselja Lavrica smo uporabili metodo, ki temelji na izdelavi sončnih zemljevidov. Izbrali smo podobno metodologijo, ko je bila uporabljena pri projektu *Solar Map Boston*, saj so bili uporabljeni enaki vnosni podatki (*Solar Boston Map 2007*; Klärle, Ludwig in Lanig 2012). Metoda je bila v nadaljevanju oblikovana samostojno.

## 2 Metode

### 2.1 Solar Boston Map

Kot osnovo za modeliranje so avtorji uporabili DMV z reliefno natančnostjo 3 m in DMV, pridobljen s tehnologijo LIDAR z ločljivostjo 1 m. Slabša natančnost DMV podatkov ni omogočala upoštevanja senčenja dreves in oblik streh pri izračunu samega zemljevida.

Sončni zemljevid Bostona se je kljub slabše natančnim izhodnim podatkom izkazal kot uporabno orodje za razširjanje uporabe fotovoltaične tehnologije, ozaveščanja o njenih napredkih in pospeševanja izgradnje virov čiste energije (What... 2004). Izračuni so predstavljeni na javno dostopnem interaktivnem spletnem zemljevidu (*Solar Boston Map 2007*). Vsak obris stavbe vsebuje povezavo do izračunanih podatkov, na podlagi katerih se lahko uporabnik pouči o sončnem potencialu za izbrano stavbo. Za izdelavo zemljevida so uporabili orodje *Solar Analyst*, ki je v sklopu *Spatial Analysta* na voljo v programu ArcGIS.

### 2.2 SUN-AREA

Model *SUN-AREA* se je izkazal za uspešnega v številnih mestih v Nemčiji, Veliki Britaniji in ZDA (Klärle, Ludwig in Lanig 2012).

Analiza najpogosteje temelji na podatkih, pridobljenih z LIDAR tehnologijo. Ob natančnosti dveh točk ali več na kvadratni meter in višinsko natančnostjo približno 15 cm je mogoče zaznati tudi najmanjše strukture na strehi (na primer dimnike) ter jih vključiti v končne izračune.

## 3 Metodologija

Za analizo možnosti postavitve sončnih celic v naselju Lavrica smo uporabili program ArcGIS 10.1. Najpomembnejše orodje za izračun globalnega sončnega obsevanja je bilo *Area Solar Radiation*, kjer smo uporabili vhodne podatke digitalnega modela višin z ločljivostjo 5 m (Digitalni... 2011). Območje naselja Lavrica smo omejili z vektorskimi podatki za naselja (Naselja... 2013). Za izvleček in preračun vrednosti iz zemljevida osončenosti smo uporabili sloj podatkov katastra stavb (Podatki katastra... 2013).

Vse uporabljene podatkovne baze smo na podlagi podrobnega pregleda literature in podatkov, povezanih s postavitvijo sončnih celic, preračunali z enačbami pretvorbe (glej v nadaljevanju). Vsi pridobljeni sloji so služili kot podlaga za iskanje stavb, primernih za postavitve sončnih elektrarn:

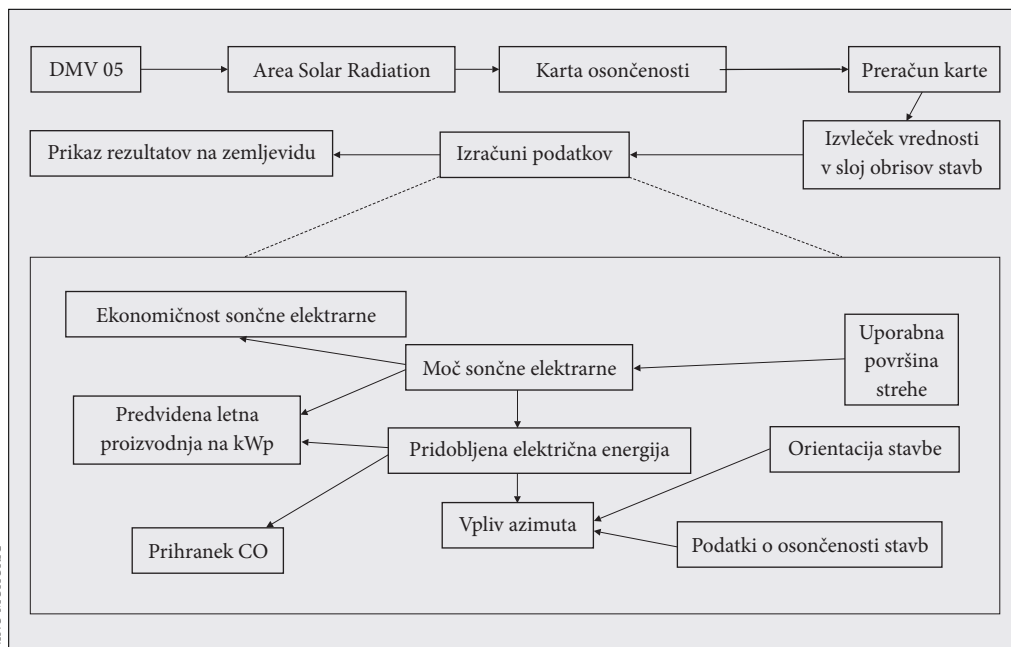
- moč sončne elektrarne,
- strošek postavitve sončne elektrarne,
- pridobljena električna energija,
- vrednost pridobljene električne energije in povračilo denarnega vložka,
- prihranek CO<sub>2</sub>,
- učinkovitost sončne elektrarne (predvidena letna proizvodnja na kWp).

Pri modeliranju smo se držali naslednjih predpostavk:

- strehe stavb so zaradi omejitev pri natančnosti in dostopnosti podatkov opredeljene kot ravne; to smo v izračunih poizkusili vsaj delno korigirati z določitvijo uporabne površine za postavitve elektrarne s 40 % za nagnjene strehe in 80 % za ravne strehe (Highman 2011; Solar Boston Map 2007);
- senčenje zaradi nenatančnih podatkov DMV ni upoštevano, a je vključeno v manjši meri v deležu uporabne strehe;
- moč celic je privzeta 0,16 kWp/m<sup>2</sup>, kot je povprečje ponudbe na trgu (How to Find ... 2013); učinkovitost celic je privzeta: 16 %;
- cena sončnih celic na kvadratni meter je 1,66 €, vključno s stroškom namestitve (Flego 2013; Set ... 2013);
- odkupna cena električne energije je določena na 0,138 €/kWh za elektrarne, manjše od 50 kWp in 0,126 €/kWh z velikost med 50 kWh in 1 MWh (Borzen 2013).

### 3.1 Obdelava zemljevida globalnega obsevanja

Na podlagi izračunov prejme območje Lavrice v idealnih pogojih 4376 ur sončnega obsevanja oziroma okoli 3883 kWh/m<sup>2</sup>. Po podatkih Kastelca in sodelavcev (2007) prejme Ljubljana na leto povprečno



NINO MOHORČIČ

Slika 1: Postopek izdelave zemljevida primernosti postavitve sončnih celic na objekte v naselju Lavrica.



1229 kWh/m<sup>2</sup> sončne energije v 2177 urah sončnega obsevanja. Zaradi neupoštevane faktorja oblačnosti in megle oziroma uporabe zgolj osnovnih funkcij *Solar Analysta* smo se odločili za obdelavo dobljenega zemljevida globalnega obsevanja s pomočjo *Raster Calculatorja*. Pri tem smo uporabili enačbo:

$$R_p = R_{go} \cdot \frac{\bar{E}_{\text{Bežigrad}}}{\bar{E}_{\text{izračunan}}} \quad (1)$$

- $R_p$  – preračunan raster globalnega obsevanja [kWh/m<sup>2</sup>],  
 $R_{go}$  – raster globalnega obsevanja,  
 $\bar{E}_{\text{Bežigrad}}$  – povprečno globalno obsevanje bežigradske postaje [kWh/m<sup>2</sup>],  
 $\bar{E}_{\text{izračunan}}$  – v *Solar Analystu* izračunano povprečno globalno obsevanje [kWh/m<sup>2</sup>].

Enačba je izračunane podatke znižala in približala zabeleženim na meteorološki postaji Bežigrad ter hkrati obdržala pomembno razporeditev obsevanja za celotno območje.

### 3.2 Orientacija stavb in njen vpliv na prejeto obsevanje

Najboljša orientacija sončnih modulov je na severni polobli proti jugu, s čimer se doseže ugoden kot med modulom in Soncem za najboljši izkoristek sončnega obsevanja. Po literaturi je na območju Ljubljane najugodnejša orientacija za sončne elektrarne 185° oziroma 5° od juga proti zahodu (Kastelec, Rakovec in Zakšek 2007).

V ArcGIS-u smo orientacijo objektov izračunali s pomočjo orodja *Calculate Polygon Main Angle*. Za potrebe definiranja primernosti postavitve sončnih elektrarn so bili rezultati razdeljeni na 5 strani neba (preglednica 1). Vrednosti prejete sončne energije z upoštevanim vplivom orientacije objekta so bile izračunane z vključitvijo podatkov, ki jih je izračunal Bas (2010). Ravne strehe so dobile enako vrednost kot južno usmerjene strehe zaradi možnosti poljubne orientacije sončnih celic pri postavitvi.

*Preglednica 1: Parametri za izračun vpliva orientacije stavbe (Bas 2010).*

orientacija stavb [°]	orientacija strehe (poenostavljena)	delež prejetega sončnega obsevanja
-90 do -67,5	zahod	0,87
-67,5 do -22,5	jugozahod	0,95
-22,5 do 22,5	jug in ploščate strehe	1
22,5 do 67,5	jugovzhod	0,95
67,5 do 90	vzhod	0,85

### 3.3 Izračun uporabnih strešnih površin in moči sončne elektrarne

Za izračun prejete sončne energije je bilo treba določiti uporabne površine posameznih streh. Za stavbe z nagnjenimi strehami smo uporabili 40 % površine, kar je posledica ekonomske postavitve celic le na eni strani strehe ter potencialnega senčnega in omejevalnega vpliva oblik streh ter njenih strešnih elementov. Za ravne strehe smo v enačbi uporabili kot potencialno uporabno površino 80 %, ob upoštevanju konstrukcij na strehi (Solar Boston Map 2007).

Moč elektrarne je bila nato izračunana na podlagi uporabnih površin streh. Povprečje moči različnih proizvajalcev je 0,16 kWp na kvadratni meter sončnih modulov (How to Find ... 2013).

### 3.4 Izračun pridobljene električne energije

Za izračun je nujen podatek o prejeti sončni energiji za vsako stavbo. Poleg tega potrebujemo tudi učinkovitost proizvodnje električne energije ter površino sončne elektrarne za izračun pridobljene električne energije na kvadratni meter sončne elektrarne. Zaradi upora v celicah, vezjih, žicah in razsmernikih, se v sistemu izgubi 15 % električne energije (Jayakumar 2009), kar se odraža tudi v našem izračunu. Z vključitvijo omenjenih parametrov v izračun dobimo proizvedeno električno energijo za celotno elektrarno na objektu.

### 3.5 Ekonomičnost sončne elektrarne

Z izračunom so bili prikazani tudi stroški postavitve same sončne elektrarne. Povprečna cena se prikazuje v evrih na nameščen Wp ali €/Wp, ki je v Sloveniji okoli 1,6 €/Wp. V to je vključena tudi namestitev konstrukcije (Flego 2013; Set ... 2013). Prav tako potrebujemo podatek o nameščeni moči.

Zanimala sta nas tudi čas povrnitve vložka in ekonomičnost investicije. Slednjo smo izračunali kot denarna sredstva, ki bi se nam povrnila za proizvedeno električno energijo, prodano v omrežje z odkupnimi cenami 0,138 €/kWh za elektrarne, manjše od 50 kWp ter 0,126 €/kWh za elektrarne med 50 in 1 MWp (Borzen 2013).

### 3.6 Prihranek CO<sub>2</sub>

Ob proizvodnji vsakega vata električne energije v klasičnih termoelektarnah se sprostijo tudi toplogredni plini, med katerimi se največkrat omenja izpust CO<sub>2</sub>. Zanj v Sloveniji znaša povprečje 0,55 kg CO<sub>2</sub> na proizvedeno kWh električne energije (Izpust ... 2009). Tudi ta vrednost je bila uporabljena pri izračunu.

### 3.7 Predvidena letna proizvodnja na kWp

Najpomembnejšo kategorijo, ki nam pokaže učinkovitost posamezne sončne elektrarne, smo izračunali kot razmerje moči sončne elektrarne in proizvedene električne energije (v kWh/kWp) (Flego 2013):

$$E_{\text{pred.p.}} = \frac{E_p}{P_{\text{nam.}}} \quad (2)$$

- $E_{\text{pred.p.}}$  – predvidena letna proizvodnja na kWp [kWh/kWp],  
 $E_p$  – pridobljena električna energija [kWh],  
 $P_{\text{nam.}}$  – nameščena moč [kWp].

## 4 Rezultati učinkovitosti sončnih elektrarn

Rezultate smo za potrebo ocene primernosti razdelili na pet kategorij – od idealne do slabe (preglednica 2; prvi dve ocenjujemo kot ugodni, zadnji dve pa kot neugodni za postavitev elektrarne).

Rezultati kažejo, da sodijo objekti na območju Lavrice v povprečju med dokaj primerne za postavitev sončnih elektrarn. Kar 77,2 % stavb ima ugoden izkoristek za postavitev sončnih elektrarn.

2 % stavb, ki so v kategoriji »idealno« ima poleg ugodnega obsevanja, tudi orientiranost strehe proti jugu. Skoraj vse se nahajajo na vzpetih območjih, saj ta zaradi nezastrtga horizonta prejmejo največji delež sončne energije.

Preglednica 2: Končni rezultat za izkoristek sončnih elektrarn.

izkoristek [kwh/kwp]	primernost	število stavb	odstotek stavb [%]	kumulativni odstotek [%]
1224–1130	idealno	19	2,0	2,0
1130–1070	zelo dobro	131	13,8	15,8
1070–980	dobro	585	61,4	77,2
980–890	neprimerno	199	20,9	98,1
890–785	slabo	18	1,9	100
	skupaj	952	100	100

Stavbe z zelo dobrim izkoristkom prav tako ležijo v višjih legah, vendar jim primernost znižuje slabša orientacija. Med izjeme sodijo stavbe, ki ležijo na samem Barju in na ravninah ob vodotokih, saj imajo zelo ugodno orientacijo.

Kategorija »srednje« ali »dobre« primernosti za postavitve sončne elektrarne je najboljšežnejša. Vanjo sodi kar 61 % vseh stavb v naselju Lavrica. V to kategorijo sodi velika večina stavb na ravninskem delu naselja ter tiste na vzpetih delih (na primer Debeli hrib) z izrazito slabšo orientacijo. Za ravninske stavbe je sicer značilno dokaj dobro obsevanje, vendar imajo pogosto zelo slabo orientacijo (samo proti vzhodu ali zahodu).

Stavbe s »slabo« primernostjo so postavljene v senčnih legah severnih pobočij Smrečnika in Babne Gorice. Pri teh stavbah je postavitve nesmiselna.

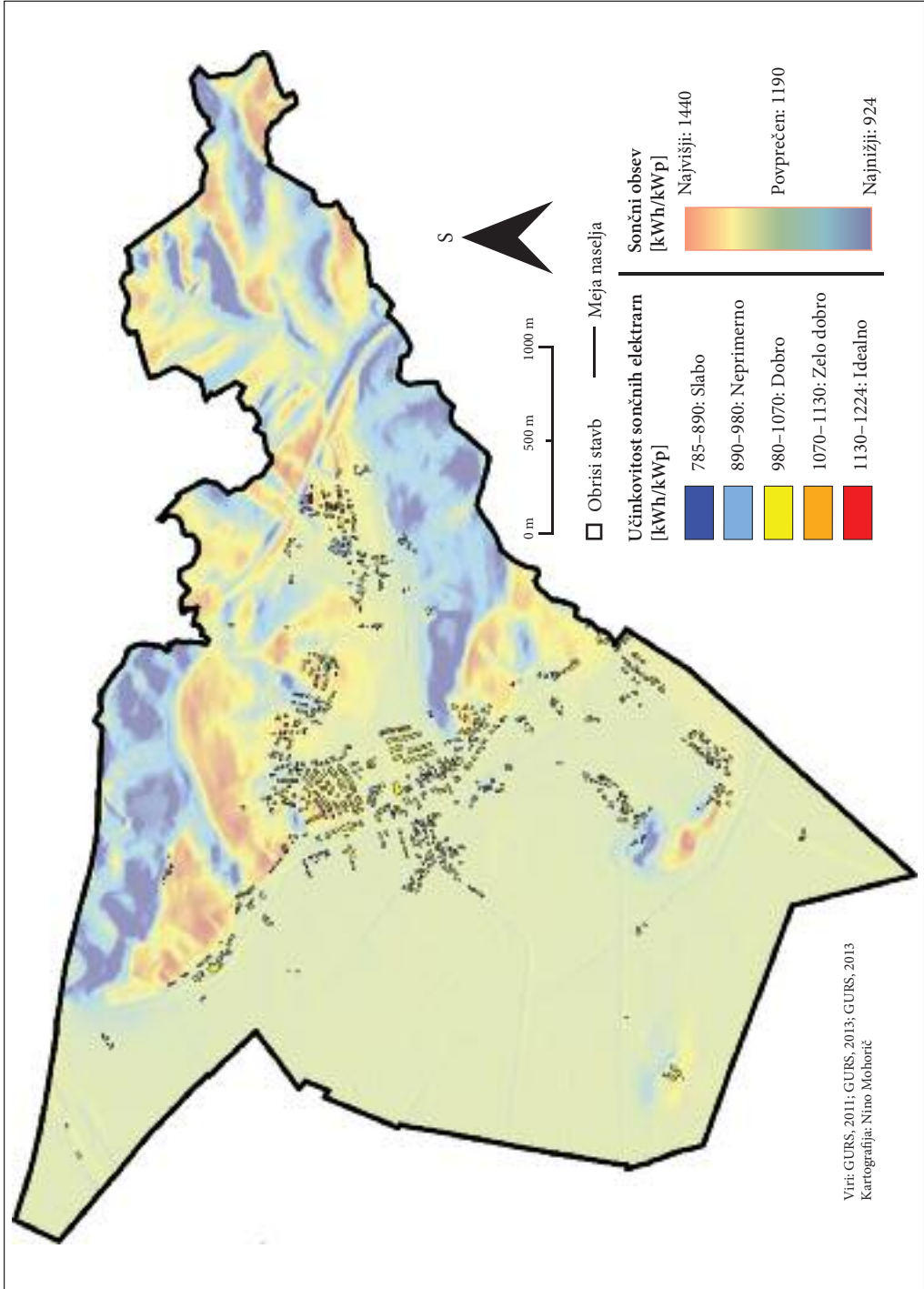
## 5 Primerjava rezultatov s podatki o sončni elektrarni na objektu SBS Lavrica

Natančnost našega modela smo preverili s primerjavo podatkov o lastnostih edine sončne elektrarne na obravnavanem območju in sicer na trgovini SBS Lavrica (preglednica 3). Ob tem velja opozoriti, da je težko primerjavo posplošiti na celotno naselje Lavrica.

Preglednica 3: Primerjava podatkov obstoječe sončne elektrarne in naših izračunov (Flego 2013).

	podatki projekta SBS Lavrica	izračunan podatek	razlika v %
prejeto sončno obsevanje	1000,24 kwh/m <sup>2</sup>	1041,86 kwh/m <sup>2</sup>	+4,2
površina sončne elektrarne	1704 m <sup>2</sup>	2012 m <sup>2</sup>	+15,3
nameščena moč	324,51 kwp	321,89 kwp	-0,8
strošek	540.000 €	534.352 €	-1,1
predvidena letna proizvodnja energije	275.900 kwh	338.463 kwh	+18,5
predvidena letna proizvodnja na kWp	952 kWh/kWp	1041 kWh/kWp	+8,6
povračilo	9 let začetna in 14 let s kreditom	12 let in 3 meseci	+26,7/-14

Slika 2: Zemljevid primernosti objektov za postavitve sončnih elektrarn v naselju Lavrica. ►



Pri analizi obstoječega objekta za izračun niso vzel dejanskega sončnega obsevanja, temveč privzet strojniški podatek, ki se od rezultatov našega modela razlikuje za 4,2 %. Na prvi pogled to ni veliko, a je podatek o obsevanju tako pomemben, da je 40 kWh/m<sup>2</sup> lahko tudi velikost ene kategorije pri razvrščanju primernosti za postavitev. Ta razlika v obsevanju se odrazi pri kategorijah predvidene letne proizvodnje energije ter letne proizvodnje na kWp, saj sta obe precenjeni. Ocena za nameščeno moč in strošek sta bila v modelu zelo natančno določena. Na to je odločilno vplivala večja učinkovitost že nameščenih sončnih celic ter hkrati manjša površina strehe, ki je bila pokrita. Ravno obratno je veljalo za podatke, iz katerih je izhajal model, kar je izničilo razliko.

## 6 Natančnost in uporabnost podatkov solarnega zemljevida

Primerjava izračunanih podatkov s podatki že nameščene sončne elektrarne, je pokazala uporabnost naših izračunov, kljub pomanjkljivim podatkom in kompleksnosti izračuna. Pri pomembnih kategorijah je model presenetljivo natančno ocenil rezultate (preglednica 3).

Glavne omejitve pri razvoju modela so bile:

- nenatančnost pridobljenih vstopnih podatkov, saj smo imeli podatke le za stavbe, ki so imele privzeto ravne strehe;
- neupoštevanje senčenja dreves in strešnih elementov;
- premalo postavljenih sončnih elektrarn za primerjavo z modelom in s tem boljšo preverbo izračunov.

Dobre strani modela pa so:

- natančnost uporabe orodja *ArcMap Solar Analyst*,
- zanesljivost,
- hitrost izračuna,
- primernost objave rezultatov modela na spletu, saj so dobljene vrednosti zelo razumljive. Razumljivost poveča uporabnost tovrstnih informacij za širšo javnost, s čimer lahko krepimo ozaveščenost uporabe čiste energije. Prav tako pa so rezultati lahko privlačni za potencialne investitorje.

## 7 Sklep

Rezultati, ki smo jih pridobili z predstavljeno metodo, so pokazali, da je postavitev sistemov sončnih celic možna in ekonomična za večino streh v naselju Lavrica (77 %). Strehe, ki so se izkazale za neprimerne, so imele bodisi zelo slabo orientacijo površine same strehe (proti vzhodu ali zahodu), bodisi ležijo v senčni legi na severnih, vzhodnih in zahodnih dvignjenih območjih.

Glavna težava metode je njena natančnost. Zaradi tehničnih in podatkovnih omejitev sta bila pri ocenjevanju obsevanja strehe izpuščena zelo pomembna faktorja: naklona strehe proti soncu in zakritje delov neba v časovnem okviru enega leta, znotraj katerega sonce seva najdlje in najmočneje. Kljub omejitvam je primerjava z obstoječo sončno elektrarno pokazala spodbudne rezultate.

Rezultati modela kažejo praktične in razumljive informacije o izkoristku sončne energije za lažje odločanje za gradnjo novih sončnih elektrarn.

## 8 Viri in literatura

Bas, L. 2010: The Effect of Array Tilt Angle on Energy Output. CivicSolar. Medmrežje: <http://www.civicsolar.com/resource/effect-array-tilt-angle-energy-output/> (12. 4. 2013).

Digitalni model višin 5 m × 5 m. Podatkovni sloj, Geodetska uprava Republike Slovenije. Ljubljana, 2011.

- Določanje višine podpor električni energiji proizvedeni iz OVE in SPTE in višine podpor v letu 2013. Borzen. 2013. Medmrežje: [http://www.borzen.si/si/cp/Shared\\_Documents/Podpore\\_slo.pdf](http://www.borzen.si/si/cp/Shared_Documents/Podpore_slo.pdf) (22. 1. 2013).
- Flego, T. 2013: Ponudba »PV« elektrarne za poslovno upravno stavbo SBS PE Lavrica. Ustni vir (11. 5. 2012). Godovič.
- Highman, K. 2011. Bristol Sunshine: An Analysis of Rooftop Solar Mapping Techniques & Outputs. Medmrežje: [http://www.bristol.gov.uk/sites/default/files/documents/environment/climate\\_change/5%20Bristol%20Sunshine%20-%20An%20Analysis%20of%20Rooftop%20Solar%20Mapping.pdf](http://www.bristol.gov.uk/sites/default/files/documents/environment/climate_change/5%20Bristol%20Sunshine%20-%20An%20Analysis%20of%20Rooftop%20Solar%20Mapping.pdf) (12. 12. 2013).
- How to Find the kWp and Efficiency Rating for any Solar Panel. Solar Facts and Advice. 2013. Medmrežje: <http://www.solar-facts-and-advice.com/kWp.html> (15. 4. 2013).
- Izpust CO<sub>2</sub> v gospodinjstvu. Energo Optimum. 2009. Medmrežje: [http://gospodinjstva.energo-optimum.eu/go/1194/Izpust\\_CO2\\_v\\_gospodinjstvu.html](http://gospodinjstva.energo-optimum.eu/go/1194/Izpust_CO2_v_gospodinjstvu.html) (2. 4. 2012).
- Jayakumar, P. 2009: Solar Energy Resource Assessment Handbook. Medmrežje: <http://recap.apctt.org/Docs/SOLAR.pdf> (12. 1. 2013).
- Kastelec, D., Rakovec, J., Zakšek, K. 2007: Sončna energija v Sloveniji. Ljubljana.
- Klärle, M., Ludwig, D., Lanig, S. 2012: SUN-AREA Standortanalyse für Photovoltaik-Anlagen durch hochauflösende Sensoren in der Fernerkundung Entwicklung eines Solarpotenzial-Dachkatasters. Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur, Fachschule Osnabrück. Medmrežje: [http://www.al.fh-osnabrueck.de/uploads/media/Broschuere\\_SunArea.pdf](http://www.al.fh-osnabrueck.de/uploads/media/Broschuere_SunArea.pdf) (1. 12. 2012).
- Naselja – grafični podatki. Podatkovni sloj, Geodetska uprava Republike Slovenije. Ljubljana, 2013. Podatki katastra stavb. Podatkovni sloj, Geodetska uprava Republike Slovenije. Ljubljana, 2013.
- Set Sončne Celice, Razsmernik, Montažni Sistem. TERSUS. 2013. Medmrežje: <http://www.soncna-elektrarna.net/solarni-sistemi-izdelki-podrobno.asp?id=216> (13. 4. 2013).
- Solar Boston Map. Boston, 2007. Medmrežje: [http://gis.cityofboston.gov/solarboston/\\_\\_\\_](http://gis.cityofboston.gov/solarboston/___) (6. 4. 2012).
- What is the energy payback for PV? The National Renewable Energy Laboratory. Washington, 2004. Medmrežje: <http://www.nrel.gov/docs/fy05osti/37322.pdf> (2. 2. 2013).



## PROCESNA VERIGA ZA SAMODEJNO OBDELAVO OPTIČNIH SATELITSKIH POSNETKOV V SKORAJ REALNEM ČASU

**dr. Krištof Oštir, Aleš Marsetič, Peter Pehani**

Center odličnosti Vesolje, znanost in tehnologije in Inštitut za antropološke in prostorske študije, Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti  
kristof@zrc-sazu.si, ales.marsetic@zrc-sazu.si, peter.pehani@zrc-sazu.si

**dr. Matej Perše**

Center odličnosti Vesolje, znanost in tehnologije in Sinergise d. o. o.  
matej.perse@sinergise.si

**dr. Klemen Zakšek**

Center odličnosti Vesolje, znanost in tehnologije in Inštitut za geofiziko, Univerza v Hamburgu  
klemen.zaksek@zmaw.de

**dr. Janez Zaletelj**

Center odličnosti Vesolje, znanost in tehnologije in Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani  
janez.zaletelj@ldos.fe.uni-lj.si

**dr. Tomaž Rodič**

Center odličnosti Vesolje, znanost in tehnologije in Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani  
tomaz.rodic@space.si

UDK: 528.7

### IZVLEČEK

**Procesna veriga za samodejno obdelavo optičnih satelitskih posnetkov v skoraj realnem času**

Na Centru odličnosti Vesolje, znanost in tehnologije smo razvili verigo za samodejno obdelavo satelitskih posnetkov, ki izvaja vse korake obdelave od tako imenovanega kalibriranega surovega optičnega posnetka do obdelanih posnetkov in produktov, dostopnih prek spleta. Veriga obsega: modul za samodejno ortorektifikacijo posnetkov z uporabo fizičnega modela senzorja ob podpori algoritma za samodejno določitev oslonilnih točk, modul za samodejne radiometrične popravke, ki deluje na podlagi modela anizotropne osvetlitve, ter module za samodejni izračun enostavnih izdelkov (vegetacijskega indeksa NDVI, njegovih sprememb in zemljevid sprememb). Razvoj verige je potekal na posnetkih satelita RapidEye. Trenutno dodajamo podporo drugim senzorjem (WorldView-2, SPOT 6, Pleiades, THEOS, lasten satelit).

### KLJUČNE BESEDE

samodejna obdelava satelitskih posnetkov, geometrični popravki, ortorektifikacija, radiometrični popravki, spletno kartiranje, opazovanje Zemlje

### ABSTRACT

**Automatic near real-time optical satellite data processing chain**

The Slovenian Centre of Excellence for Space Sciences and Technologies (Space-SI) has developed and implemented a fully automatic image processing chain that performs all processing steps from sensor-corrected (Level 1) optical satellite images to web-delivered map-ready images and products. The chain includes: a module for automatic image orthorectification based on a physical sensor model and supported by an



*algorithm for automatic extraction of ground control points; a module for automatic radiometric corrections that is implemented on the basis of an anisotropic illumination model; and modules for generation of low level products (vegetation index NDVI, changes of NDVI, and change detection). The chain was originally developed for RapidEye images, currently support to other sensors (WorldView-2, SPOT 6, Pleiades, THEOS, own satellite system) is being implemented.*

**KEY WORDS**

*automatic satellite image processing, geometric corrections, orthorectification, radiometric corrections, web mapping, Earth observation*

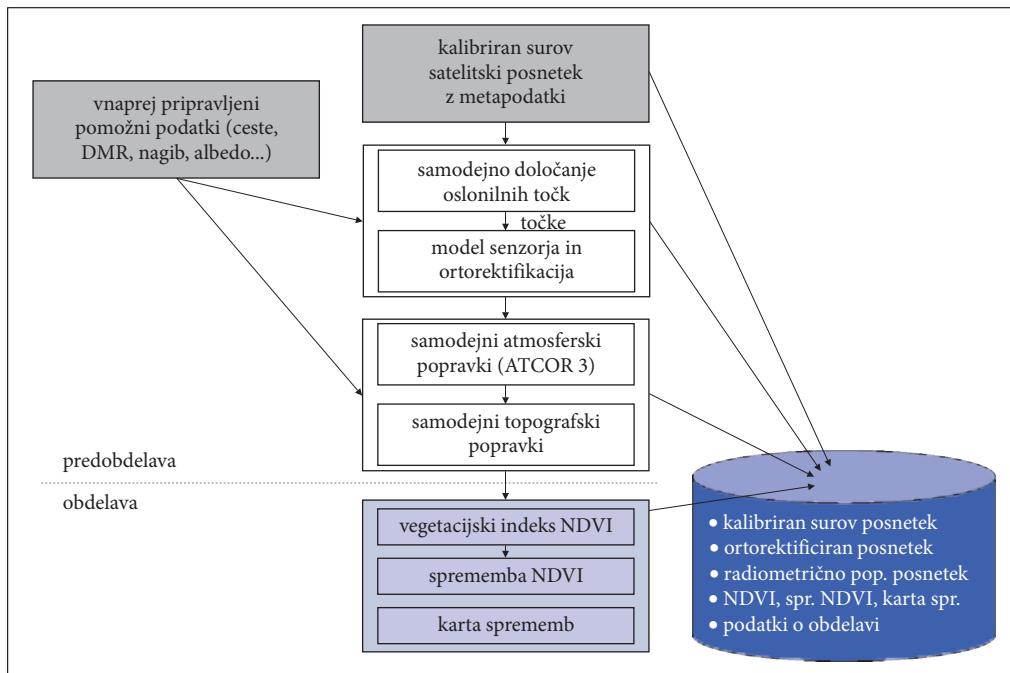
## 1 Uvod

Rast količine satelitskih posnetkov, njihova dostopnost in sposobnost ponavljajočih opazovanj iste ga območja večjih razsežnosti odpirajo nove možnosti za uporabo posnetkov v inovativnih aplikacijah. Po drugi strani pa sta za večino končnih uporabnikov zapletenost in počasnost obdelave satelitskih posnetkov (pre)veliki oviri pri njihovi vsakodnevni uporabi.

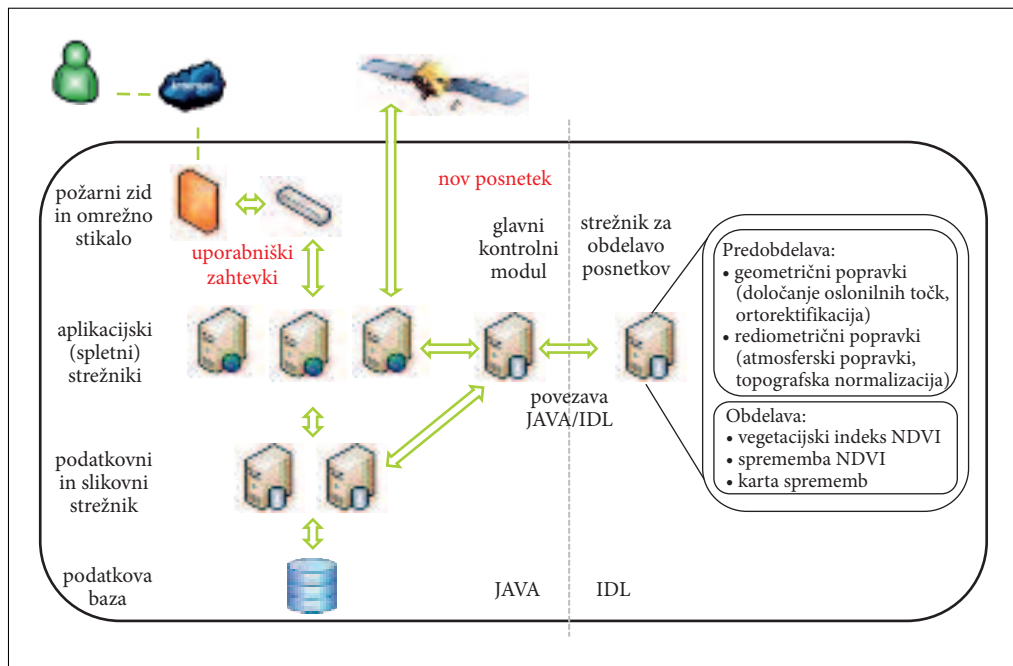
V Centru odličnosti Vesolje, znanost in tehnologije (Vesolje-SI) smo storili prve korake k zmanjšanju opisanega razkoraka med prodirajočo satelitsko tehnologijo in končnim ekspertnim uporabnikom. V dobrih treh letih smo razvili in implementirali verigo za samodejno obdelavo optičnih satelitskih posnetkov, ki izvede vse korake od tako imenovanih kalibriranih surovih (angl. *Level 1*) optičnih posnetkov do tematskih izdelkov, dostopnih preko spleta. Celotna procesna veriga, ki podpira posnetke sistema *RapidEye* ločljivosti 6,5 m za območje Slovenije z okolico, deluje popolnoma samodejno, brez posredovanja operaterja.

Procesna veriga Vesolje-SI (slika 1) je sestavljena iz več samodejnih in samostojnih korakov, ki so enaki kot pri ročni obdelavi ter se delijo v predobdelavo in obdelavo. Pri samodejni predobdelavi najprej opravimo geometrične popravke, s katerimi popravimo položaj celic (pikslov), nato pa radiometrične popravke, s katerimi popravimo vrednosti celic. V fazi samodejne obdelave izdelujemo tematske izdelke, ki so namenjeni končnim uporabnikom. Iz vhodnega posnetka tako nastane več končnih izdelkov (slika 1), ki se skupaj s parametri obdelave shranijo v podatkovno bazo. Na koncu procesne verige več povezanih servisov dostavlja podatke do končnih uporabnikov v obliki spletnega zemljevida.

Posamezni koraki (pred)obdelave so bili pripravljene kot neodvisni moduli v programskih jezikih IDL in C++. Opisani so v naslednjih poglavjih.



Slika 1: Poteka delovanja procesne verige Vesolje-SI. Več dela je bilo posvečenega korakom predobdelave (geometrične in radiometrične) kot razvoju izdelkov, saj je natančna predobdelava predpogoj za vse tematske izdelke.



Slika 2: Zgradba sistema.

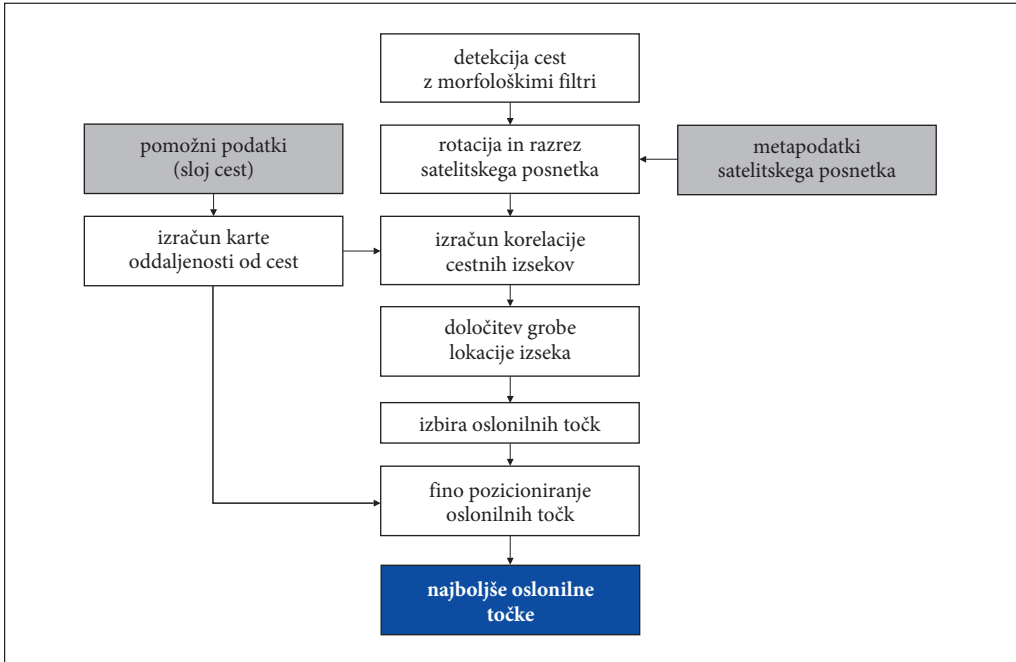
## 2 Samodejni geometrični popravki

Ta modul odpravi oziroma zmanjša geometrične napake na izvornem posnetku ter izdela ortorektificiran posnetek. Najpogostejša dejavnika, ki pripomoreta k nastanku geometričnih napak, sta učinek premaknjenosti reliefa in geometrija snemanja ob zajemu posnetka.

Modul deluje v dveh samodejnih korakih: najprej se določijo oslonilne točke (poglavje 3), nato sledi še ortorektifikacija posnetka na podlagi fizičnega modela senzorja (poglavje 4). Modul je zelo pomemben, saj so rezultati celotne procesne verige odvisni od natančnosti rezultata. Brez popravka geometričnih napak je satelitski posnetek namreč praktično neuporaben za kartiranje ali analizo z orodji geografskih informacijskih sistemov (GIS).

## 3 Samodejno določanje oslonilnih točk

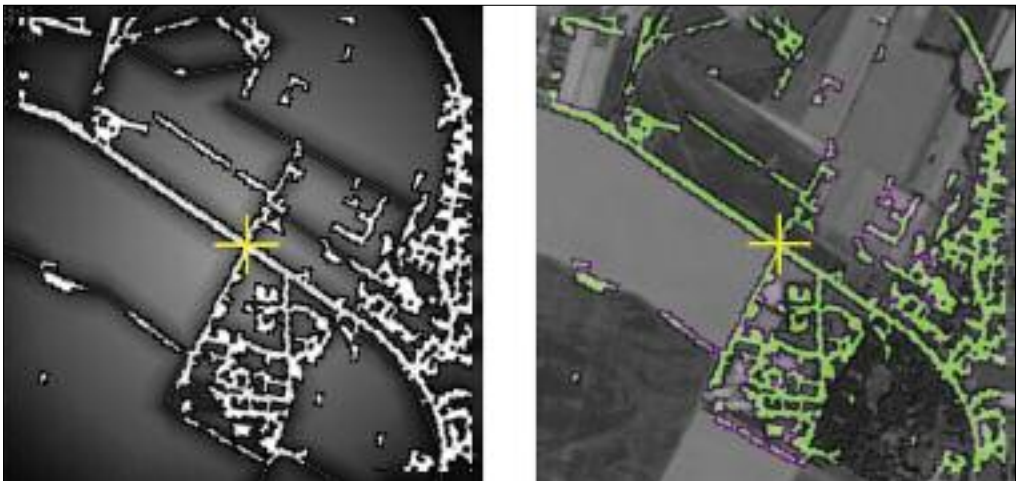
Samodejno določanje oslonilnih točk na podlagi slikovne primerjave med vhodnim in že ortorektificiranim satelitskim ali letalskim posnetkom je zahteven izziv, saj v praksi med zajemom vhodnega in referenčnega posnetka preteče dalj časa ali pa sta zajeta z različnimi senzorji (Le Moigne, Netanyahu in Eastman 2011). Dolgotrajna testiranja določitve oslonilnih točk s pomočjo slikovne primerjave (korelacije) niso prinesla zadovoljivega rezultata, zato uporabljena samodejna metoda določanja oslonilnih točk (Zaletelj, Burnik in Tasič 2013) temelji na digitalnih slojih cestnega omrežja. Ceste so namreč stabilne strukture na zemeljskem površju, ki se redko spreminjajo, njihov položaj je dobro določen, poleg tega so dobro vidne na satelitskih posnetkih in jih je mogoče zaznati z razmeroma preprostimi algoritmi obdelave slik. Za referenčno cestno omrežje smo privzeli nacionalne digitalne podatke z zelo dobro



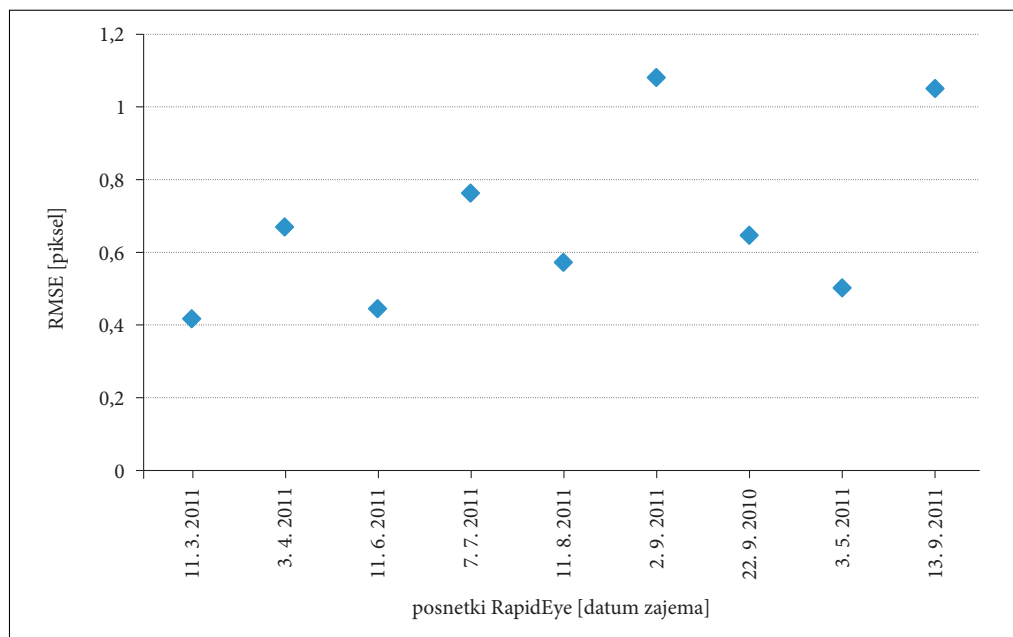
Slika 3: Diagram poteka modula za samodejno določanje oslonilnih točk.

položajno natančnostjo (deloma < 1 m, deloma 1–5 m). Za sosednje države smo jih dopolnili s prosto dostopnimi podatki organizacije *OpenStreetMap* z neznano natančnostjo.

Ker satelitski posnetek pokriva veliko območje, za njegovo poravnavo ne uporabljamo globalnega prileganja, temveč posamezne izseke poravnavamo lokalno. Algoritem najprej z morfološkim opera-



Slika 4: Primer izbrane oslonilne točke (rumeni križec). V ozadju sloj razdalj od cestnega omrežja (levo) oziroma digitalni ortofoto (desno).



Slika 5: Povprečna kvadratna napaka položaja oslonilnih točk, izračunana za 100 točk na posnetek.

torjem *top-hat*, ki zaznava svetle linije, na posnetku zazna ceste. Nato rezultat obrne za kot, ki je izračunan iz metapodatkov posnetka. Sledi poravnava po izsekih v treh korakih. V prvem koraku izvede grobo določitev translacijskih parametrov izseka z minimiziranjem odstopanja med slikami izsekov cest in referenčno sliko cestnega omrežja. V drugem koraku se popravijo izseki, ki v prvem niso bili uspešno grobo locirani. V zadnjem koraku pa določimo kandidate za končne oslonilne točke, ki so ponavadi izbrane na križiščih cest, ter izvedemo njihovo natančno lociranje s pomočjo minimizacije oddaljenosti zaznanih cestnih celic od dejanske mreže cest. Končni rezultat tega modula je seznam samodejno generiranih oslonilnih točk, ki za posamezno slikovno koordinato satelitskega posnetka podajajo njeno natančno prostorsko koordinato.

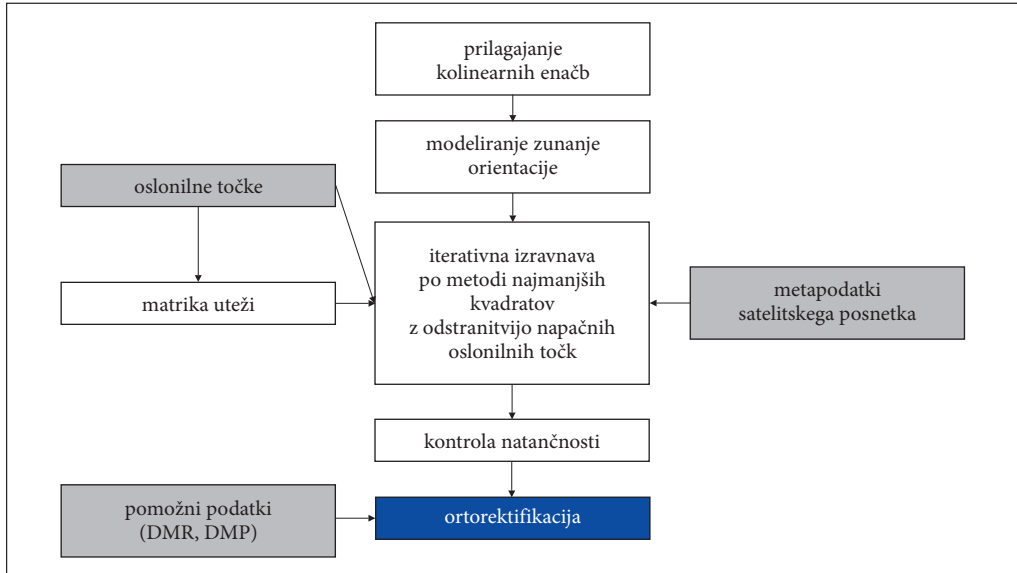
Skupna povprečna kvadratna napaka (angl. *root-mean-square error* – RMSE) na 8 satelitskih posnetkih *RapidEye* (po 100 oslonilnih točk na vsaki) je bila 0,63 celice.

Predlagana metoda je robustna, saj ni občutljiva na nenatančnosti pri detekciji cest (na primer manjkajoči deli cest, preveč zaznane ceste zaradi podobnih objektov na posnetku). Groba poravnava je zanesljiva povsod, kjer je na voljo dovolj gost sloj cestnega omrežja.

## 4 Geometrični model in ortorektifikacija

V implementiranem modulu poteka rektifikacija oziroma umeščanje v želeni koordinatni sistem v dveh stopnjah: prva vključuje geometrično modeliranje (korekcijo), druga pa izdela ortorektificiran posnetek v nacionalnem koordinatnem sistemu D48GK (glej sliko 7).

V prvi stopnji modula je bil definiran splošen fizični model senzorja, ki lahko podpira različne polnoslikovne (angl. *full-frame*) in vzdolžne (angl. *pushbroom*) optične skenerje (slika 6). Izdelani model deluje podobno kot model opisan v Poli (2005), vendar vsebuje več sprememb in poenostavitev. Zvezo med sistemom kamere (skenerja) in prostorskim sistemom predstavljajo modificirane kolinearne



Slika 6: Potek modula za samodejno geometrično modeliranje in ortorektifikacijo.

enačbe. Zaradi zapletene geometrije snemanja vzdolžnih skenerjev uporablja geometrični model kar 24 parametrov zunanje orientacije. Enostavnejši polnoslikovni model jih potrebuje le 6. Zaradi daljšega časa zajema posnetka (vsaka vrstica se zajame posebej) se model vzdolžnega skenerja modelira s polinomskimi funkcijami, ki so odvisne od časa. Med obdelavo se satelitova tirnica razdeli na dva segmenta. Za vsak segment se parametre zunanje orientacije modelira s svojo polinomsko funkcijo drugega reda. Zveznost tirnice, kjer se oba segmenta združita, se zagotovi z odvodi polinomskih funkcij.

Začetne približke neznanih parametrov se izračuna iz metapodatkov satelitskega posnetka. Ti vstopijo v geometrični model, kjer z oslonilnimi točkami iz predhodnega modula prek izravnave dobimo natančen položaj in rotacije satelita v času zajema posnetka. Oslonilne točke pred iterativno izravnavo popravimo zaradi sistematičnih napak, ki nastanejo zaradi ukrivljenosti Zemlje in atmosfere refrakcije.

Zelo pomemben korak je iskanje grobih napak, katerih vir so manj točno določene oslonilne točke. Med več preizkušenimi metodami za njihovo določanje in odstranitev je najboljše rezultate dala kombinacija metode RANSAC, ki odstrani točke z večjimi napakami, z metodo robustne ocene, ki nabor točk še dodatno optimira.

Rezultati testov štirih posnetkov *RapidEye* so prikazani v preglednici 1. Skupna povprečna kvadratna napaka oslonilnih točk je blizu 0,7 celice, medtem ko je napaka neodvisnih kontrolnih točk manj kot ena celica. Natančnosti so skoraj tako dobre tudi, ko v izravnavi uporabimo vse točke, kar kaže na dobro delovanje modula za samodejno detekcijo točk.

Robustnost geometričnega modela zagotavlja veliko iterativnih korakov in kontrol. Kljub temu je robustnost še vedno velik izziv pri zagotovitvi popolne samodejnosti postopka. Drug izziv je uvedba neodvisne kontrole rezultatov modela in ortorektificiranih posnetkov.

Ortorektifikacijo polnoslikovnega in vzdolžnega senzorja modul izvede z indirektno metodo. Premaknjenost reliefa popravlja za vsako celico posebej. Za izračun pravilne lokacije celice znotraj ortorektificiranega posnetka uporablja ocenjene parametre zunanje orientacije in državni digitalni model reliefa (DMR) s prostorsko ločljivostjo 12,5 m.



Slika 7: Primerjava izseka posnetka RapidEye (Drava med hidroelektrarnama Ožbalt in Fala) pred ortorektifikacijo (levo) in po njej (desno). Na popravljenem posnetku sta vidna zasuk in premik reliefa.

Preglednica 1: Povprečna kvadratna napaka (RMSE) oslonilnih točk (OT) in kontrolnih točk (KT) za štiri posnetke RapidEye. Z odstranitvijo točk z grobimi napakami (desni del preglednice) se natančnost rezultatov večinoma poveča.

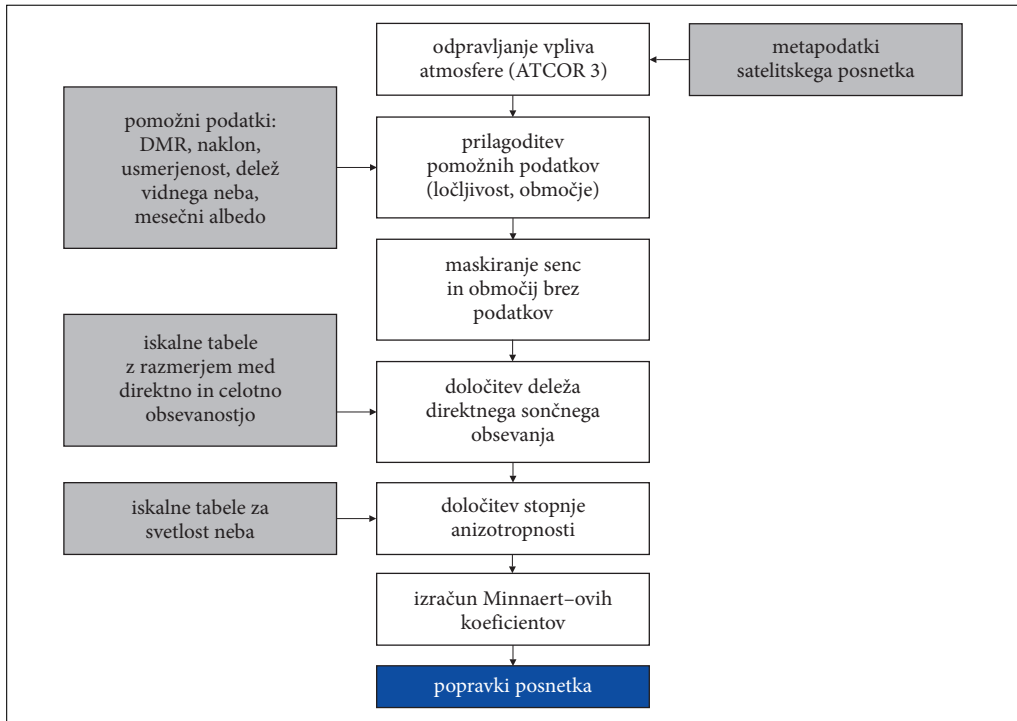
RapidEye	vse točke			odstanev točk z grobimi napakami z RANSAC in Robustno oceno		
	število točk	OT RMSE	KT RMSE	število točk	OT RMSE	KT RMSE
11. 3. 2011	212	0,90	0,72	193	0,79	0,70
11. 6. 2011	228	0,75	0,92	209	0,67	0,97
7. 7. 2011	303	0,84	0,93	204	0,75	0,92
2. 9. 2011	126	0,99	0,95	114	0,75	0,66

## 5 Samodejni radiometrični popravki

V procesni verigi Vesolje-SI posnetke radiometrično popravljamo v dveh korakih: atmosferski popravi in topografska normalizacija. Za odpravo atmosferskih vplivov uporabljamo zunanjo programsko opremo ATCOR švicarskega podjetja *ReSe Applications Schläpfer*. Za topografsko normalizacijo pa uporabljamo lasten algoritem (slika 8).

V procesu topografske normalizacije z digitalnim modelom reliefa odpravljamo psevdo-geomorfološke napake, ki so inherentna posledica oblike terena ter kota in časa opazovanja (Liang 2005; Oštir 2006). S tem popravkom dosežemo učinek izenačitve odboja prisojnih in osojnih leg ter »izravnave« naklona. Topografsko normaliziran posnetek pridobi videz sploščenega, dvorazsežnega, enakomerno obsijanega površja.

Prejeto sončno obsevanost neke točke površja definiramo kot vsoto direktne (odvisna od geometrije Sonce–površje Zemlje), difuzne (odvisna od deleža vidnega neba) in od odbite obsevanosti (odvi-



Slika 8: Diagram poteka modula za samodejne radiometrične popravke.

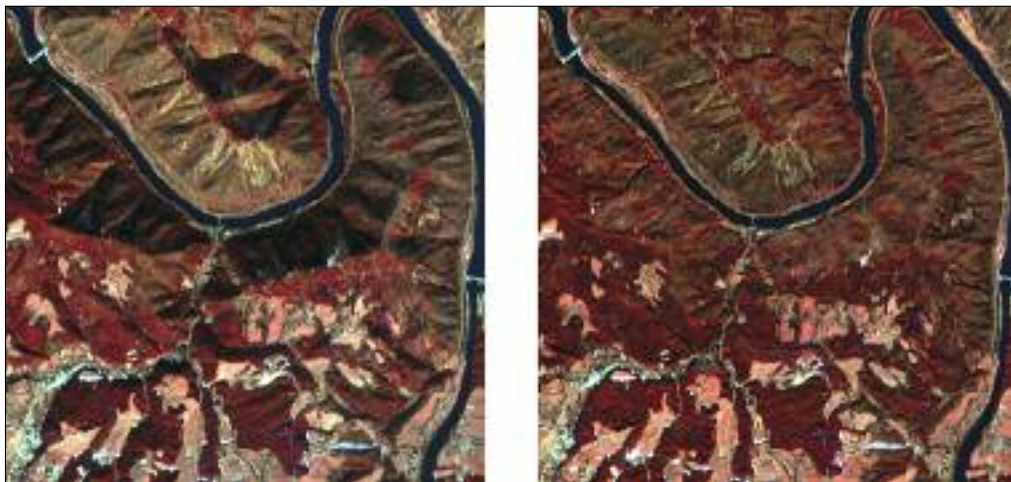
sna od albeda). Za določitev vsote moramo najprej poznati razmerje med direktno in difuzno svetlobo. Le-to lahko za vnaprej znane razmere v atmosferi določimo s simulacijami (na primer s programom MODTRAN). Razmerje je odvisno od valovne dolžine, nadmorske višine, zenitnega kota sonca in razmer v atmosferi. Da bi pokrili to raznolikost, smo pripravili tako imenovane iskalne tabele (angl. *look-up table*), v katerih so izračunani podatki za vsakih 1000 m po nadmorski višini, vsakih 15° po zenitnem kotu in vsak 1 nm po valovni dolžini. Glede na letni čas smo izbrali enega od standardnih modelov atmosfere.

Vnaprej smo pripravili tudi delež vidnega neba in sicer za izotropno ter tudi za anizotropno difuzno osvetljenost. Anizotropnost smo definirali kot eksponentno funkcijo oddaljenosti od najsvetlejša točka na nebu – Sonca, kjer smo določili še položaj Sonca na nebu ter delež osvetljenosti najtemnejšega dela neba glede na Sonce (Zakšek in sodelavci 2012). Ker je anizotropnost odvisna od atmosferskih razmer, smo vnaprej predvideli 53 različnih modelov. Najustreznejši model je izbran med normalizacijo na podlagi najmanjše korelacije med izračunano osvetljenostjo in rezultati normalizacije na kalibracijskem območju.

Območij senc nismo maskirali z geometričnimi postopki, temveč na podlagi analize histograma. Za tak algoritem smo se odločili zato, ker je ločljivost sistema *RapidEye* mnogo boljša od ločljivosti razpoložljivega digitalnega modela reliefa. Za osnovo smo vzeli bližnji infrardeči kanal in izvedli Otsujevo analizo (Otsu 1979), ki poda mejo med sencami in ostalimi območji. Tovrstna analiza je problematična v primeru kalnih voda, ki imajo dokaj podoben spektralni odziv kot sence.

Testi na posnetkih *RapidEye* so pokazali radiometrične izboljšave na območju senc, ki prekašajo izboljšave s klasičnimi topografskimi normalizacijami, temelječimi na tako imenovani kosinusni metodi (slika 9).





Slika 9: Primerjava izseka posnetka RapidEye v lažnih barvah pred topografsko normalizacijo (levo) in po njej (desno). Na popravljenem posnetku je vpliv topografije vidno zmanjšan, površje dobi sploščen videz.

## 6 Tematski izdelki in storitve za končne uporabnike

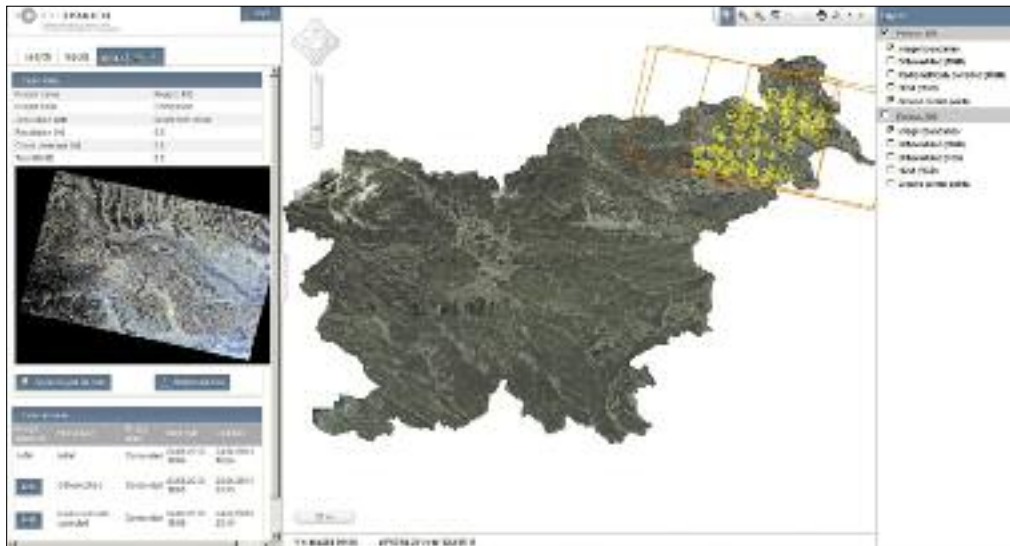
Bistvo obdelave satelitskih posnetkov je priprava izdelkov za interpretacijo pri končnih uporabnikih. V procesni verigi samodejno generiramo normiran diferencialni vegetacijski indeks (NDVI) (slika 10).

Na zahtevo administratorja veriga lahko izdela še spremembo NDVI, ki je razlika dveh zaporednih NDVI-jev istega območja, ter zemljevid sprememb, kjer so označene večje spremembe površja med dvema posnetkoma (Veljanovski 2008).

Vsi izdelki so takoj po obdelavi na voljo končnim uporabnikom prek spletne aplikacije (slika 11). Aplikacija omogoča prikazovanje rastrskih podlag ter iskanje po različnih parametrih. Omogoča tudi prenos izdelkov skupaj s podatki o obdelavi.



Slika 10: Samodejno izračunan normiran diferencialni vegetacijski indeks (NDVI).



Slika 11: Uporabniški pregledovalnik s sklopom za attribute (levo) in za kartografski del.

## 7 Sklep

Popolno samodejna obdelava satelitskih posnetkov je želja vsakega uporabnika daljinsko zaznanih podatkov. V centru odličnosti Vesolje-SI smo z razvojem procesne verige za samodejno obdelavo optičnih satelitskih posnetkov naredili prve korake za uresničitev te želje. Pri razvoju verige je bilo več dela posvečenega korakom predobdelave (geometrične in radiometrične) kot pa izdelavi tematskih izdelkov, saj so prvi podlaga za druge. Prototip je prilagojen posnetkom sensorja *RapidEye*. Trenutno razvijamo podporo drugim vzdolžnim optičnim sensorjem (*WorldView-2*, *Pleiades*, *SPOT 6*, *THEOS*) ter polnoslikovnemu sensorju malega satelita, ki ga razvija Vesolje-SI.

Možnosti za nadgradnjo verige je še več, na primer izostritev večspektralnih posnetkov (angl. *pan-sharpening*), mozaičenje posnetkov, izdelava visoko specializiranih izdelkov (na primer za zavarovalnice, civilno zaščito, kmetijstvo). Načrtujemo tudi širjenje podpore drugim državam in koordinatnim sistemom. S satelitskimi izdelki hitro dostopnimi prek spletne aplikacije, bodo lahko uporabniki sprejeli podatke tako v pisarni kot na terenu, kar jim bo omogočilo hitro odločanje na podlagi najnovejših podatkov.

*Zahvala: Center odličnosti Vesolje, znanost in tehnologije je operacija, ki jo delno financirata Evropska unija, Evropski sklad za regionalni razvoj, ter Ministrstvo za izobraževanje, znanost, kulturo in šport Republike Slovenije.*

## 8 Viri in literatura

- Le Moigne, J., Netanyahu, N. S., Eastman, R. D. 2011: Image Registration for Remote Sensing. Cambridge.
- Liang, S. 2005: Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces. New Jersey.
- Oštir, K. 2006: Daljinsko zaznavanje. Ljubljana.
- Otsu, N. 1979: A threshold selection method from gray-level histograms. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 9-1.

- Poli, D. 2005: Modelling of Spaceborne Linear Array Sensors. Doktorsko delo, ETH Zürich. Zürich.
- Veljanovski, T. 2008: The problem of false (non-intrinsic) changes in pixel-based change detection on Landsat imagery. Geodetski vestnik 52-3. Ljubljana.
- Zakšek, K., Pehani, P., Oštir, K., Kokalj, Ž., Pöler, E. 2012: Hill-shading based on anisotropic diffuse illumination. Symposium GIS Ostrava 2012: Surface Models for Geosciences. Ostrava.
- Zaletelj, J., Burnik, U., Tasič, J. F. 2013: Registration of satellite images based on road network map. 8th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA 2013). Trst.

# SPLETNI SISTEM ZGODNJEGA OPOZARJANJA NA POVEČANO NEVARNOST PROŽENJA ZEMELJSKIH PLAZOV – REZULTATI PROJEKTA MASPREM

*dr. Marko Komac, Jasna Šinigoj*

*Geološki zavod Slovenije*

*marko.komac@geo-zs.si, jasna.sinigoj@geo-zs.si*

UDK: 551.435.62:005.334(497.4)

## IZVLEČEK

### **Spletni sistem zgodnjega opozarjanja na povečano nevarnost proženja zemeljskih plazov – rezultati projekta Masprem**

Glavni namen projekta Masprem je bil izdelati sistem zgodnjega opozarjanja, ki vsaj enkrat dnevno prek spletne aplikacije opozarja prebivalstvo, da bo/je ob napovedanih/dejanskih preseženih mejnih vrednostih padavin na določenih območjih nevarnost proženja zemeljskih plazov povečana. Območja nevarnosti v merilu 1 : 250.000 so bila za vso Slovenijo določena na podlagi združitve informacij treh modelov: verjetnosti nastajanja zemeljskih plazov, napovedanih padavin iz modela Aladin-SI in ocenjenih mejnih sprožilnih količin padavin za različne kamninske tipe. Identično zasnovano, le bolj natančno napoved v merilu 1 : 25.000 smo izdelali tudi za območja petih slovenskih občin. Sistem je trenutno v fazi ocenjevanja napovedi glede na dejanske pojave zemeljskih plazov.

## KLJUČNE BESEDE

*zemeljski plazovi, zgodnje opozarjanje, dinamičen sistem napovedi, padavine, Slovenija*

## ABSTRACT

### **Web system for early warning due to increased landslide hazard – results of Masprem project**

The main goal of the Masprem project was the creation of early warning system that would at least once per day inform/warn citizens about possible exceeding precipitation values which could result in higher landslide hazard for given areas. These hazard areas, forecasted for the whole Slovenia at scale 1:250,000 were predicted based on combining the following data: landslide susceptibility model, Aladin-SI precipitation model, and landslide triggering precipitation values for specific rock type. Identical forecast, yet with a higher resolution (1:25,000), was created for the test areas of five Slovenian municipalities. The system is in the evaluation phase where predictions are tested against actual landslide events.

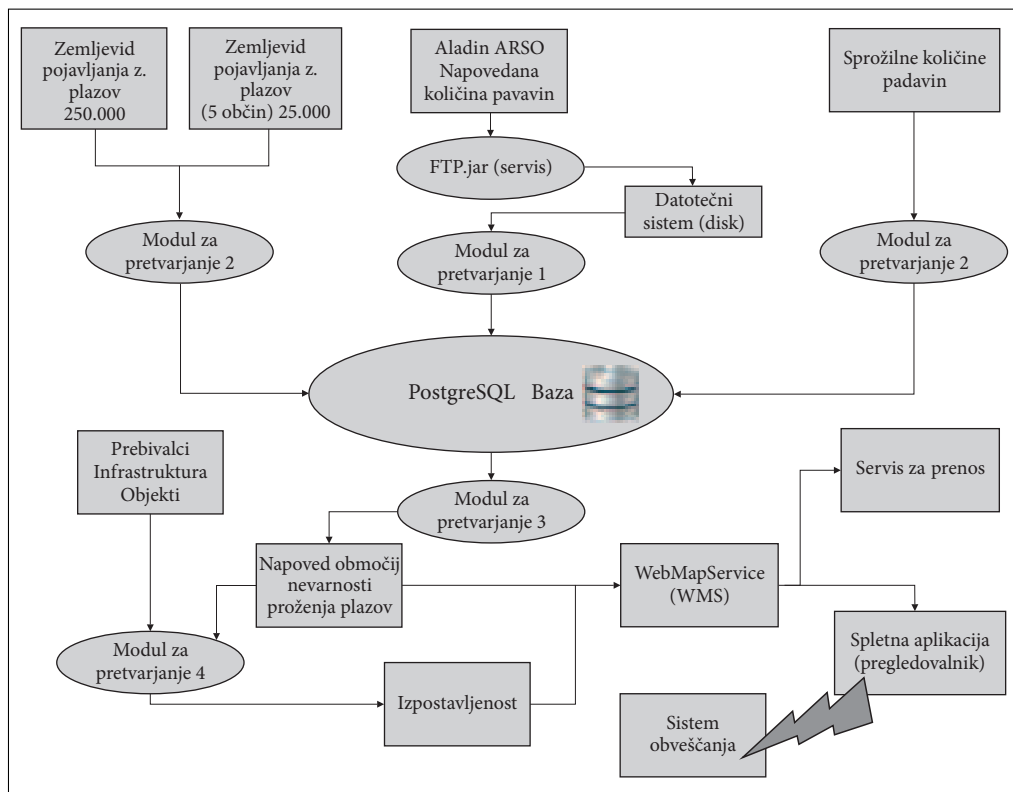
## KEY WORDS

*landslides, early warning, dynamic forecasting system, precipitation, Slovenia*

## 1 Uvod

Tako kot drugod po svetu so tudi v Sloveniji padavine eden izmed glavnih sprožitvenih dejavnikov za pojavljanje zemeljskih plazov. Še posebej zaradi geološke zgradbe, razgibanega reliefa ter vplivov različnih podnebnih in vremenskih tipov je vse bolj treba razumeti povezave med količino padavin in pojavi zemeljskih plazov. Za natančno napovedovanje in opozarjanje pred zemeljskimi plazovi je treba poznati čim bolj natančne padavinske razmere, ki odločilno vplivajo na porušitev stabilnosti v pobočju. V zadnjih 20-ih letih so v Sloveniji intenzivne padavine povzročile veliko nevšečnosti in terjale velike materialno škodo, žal v nekaterih primerih tudi smrtne žrtve.

Zavedajoč se te problematike je Uprava Republike Slovenije za zaščito in reševanje (URSZR) naročila izdelavo sistema opozarjanja na povečano nevarnost proženja zemeljskih plazov (Masprem – MASni PREMiki). Sistem temelji na treh tipih vhodnih dejavnikov z različnimi dinamikami spremenljivosti: (1) verjetnost nastajanja zemeljskih plazov, (2) napoved padavin in (3) mejne sprožilne količine padavin za različne kamninske tipe. Zaradi relativne statičnosti geoloških podatkov, vsaj z vidika človekovega razumevanja časa, so tudi podatki o verjetnosti nastajanja zemeljskih plazov in mejnih sprožilnih količinah padavin z vidika kamninskih tipov nespremenljivi. Privzeta (pogojna) nespremenljivost teh dveh dejavnikov poenostavi zasnovano napovedi nevarnosti proženja zemeljskih plazov, saj je z istega vidika zelo spremenljiv zgolj tretji dejavnik – napovedana količina padavin. Dinamični model zgodnjega opozarjanja ob nevarnosti proženja zemeljskih plazov v odvisnosti od napovedane količine padavin je tako



Slika 1: Model zgodnjega opozarjanja ob nevarnosti proženja zemeljskih plazov v odvisnosti od napovedane količine padavin (ZP – zemeljski plaz).

sestavljen iz dveh statičnih dejavnikov in enega dinamičnega. Določitev vrednosti vsakega od vhodnih podatkov je temeljila na obsežnih raziskavah (Bavec, Butkovič in Komac 2005; Komac 2005, 2006; Komac in Ribičič 2006; Komac s sod. 2011; Bavec s sod. 2012; Jemec Auflič in Komac 2013; Medmrežje 1; Medmrežje 2). Slika 1 prikazuje model zgodnjega opozarjanja ob nevarnosti proženja zemeljskih plazov v odvisnosti od napovedane količine padavin.

## 2 Metodologija in tehnična zasnova sistema

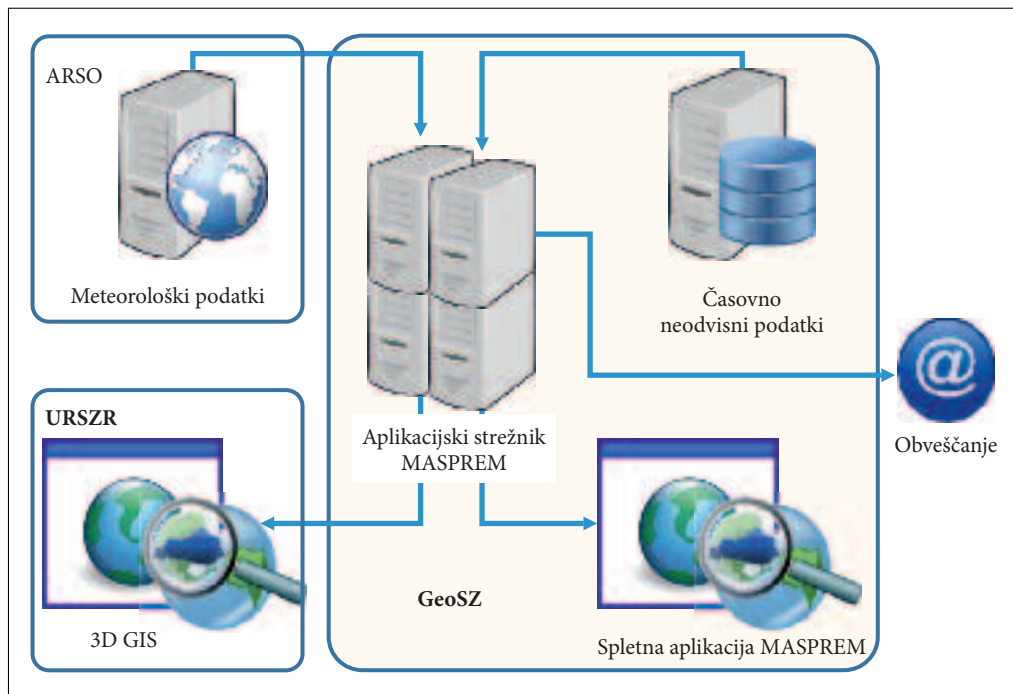
Ta, zelo obsežen projekt je bil sestavljen iz štirih, vsebinsko in tehnično prepletajočih se sklopov. Sklopu A je osredotočen v pridobivanje, pripravo in/ali izdelavo vhodnih podatkov; sklop B je sestavljen iz razvoja samega modela za zgodnje opozarjanje ob nevarnosti proženja zemeljskih plazov v odvisnosti od napovedane količine padavin. Sklop C vsebuje implementacijo sistema zgodnjega opozarjanja, sklop Č pa je usmerjen v postavitev spletne aplikacije.

Sklop A smo usmerili v pripravo časovno neodvisnih podatkov (statičnega dejavnika verjetnosti nastajanja zemeljskih plazov), pridobitev podatkov o prostorskem pojavljanju zemeljskih plazov ter v reambulacijo modela verjetnosti pojavljanja zemeljskih plazov za območje Slovenije v merilu 1 : 250.000 (po Komacu 2005) in za območje petih izbranih občin v merilu 1 : 25.000 (po Bavcu in sod. 2005; Komac 2005).

Glavnino aktivnosti v sklopu B smo posvetili analizam dveh dejavnikov, vezanih na padavine: statičnega dejavnika ocene mejnih sprožilnih količin padavin za različne kamninske tipe ter dinamičnega dejavnika napovedane količine padavin, katerih vir je bil padavinski model Aladin-SI (Medmrežje 1). Pri prvem dejavniku smo analizirali frekvenco prostorskega pojavljanja zemeljskih plazov na enoto površine v odvisnosti od geoloških (litoloških) lastnosti ter od količin padavin: maksimalnih 24-urnih in maksimalnih 48-urnih padavin s povratno dobo 100 let. V analize smo vključili tudi vpliv kumulativne količine predhodnih padavin za več obdobj (2, 5, 10, 15, 20, 25 in 30 predhodnih dni) kot enega ključnih dejavnikov sprožilne količine padavin na dan sprožitve zemeljskega plazov. Model napovedane količine padavin (Aladin-SI; Medmrežje 1 in 2) izračunavajo dvakrat dnevno za naslednjih 72 ur s periodo treh ur.

Sklop C smo usmerili v izdelavo modulov za vsakodnevni prenos/pridobivanje podatkov, za izračunavanje posameznih delov napovedi, njihovo združevanje s postopkom modeliranja nevarnosti proženja zemeljskih plazov v odvisnosti od napovedanih količin padavin, za izvoz in distribucijo podatkov/povezavo na 3D GIS ter njihov končni prikaz v obliki rastrske podobe. Podatki o napovedanih količinah padavin so bili največji izziv z vidika prenosa podatkov med strežniki. Le-te posebni modul za dnevni prenos podatkov prepiše s strežnika Agencije Republike Slovenije za okolje na strežnik Geološkega zavida Slovenije ter jih pretvori in shrani v bazo kot rastrski sloj. Prek algoritma, ki določa povezavo med napovedanimi količinami padavin, sprožilnimi količinami padavin in verjetnostjo pojavljanja zemeljskih plazov, je nato izračunana nevarnost proženja zemeljskih plazov v odvisnosti od napovedane količine padavin z natančnostjo 50 krat 50 m<sup>2</sup>. Model nevarnosti proženja plazov se posodablja dvakrat dnevno, ob osmi uri zjutraj ter ob osemnajsti uri popoldan (v prihodnje naj bi se posodabljal še pogosteje). Končni rezultat modela nevarnosti proženja zemeljskih plazov v odvisnosti od napovedane količine padavin je pretvorjen iz numeričnega dela v opisnega, ki je uporabniku prikazan v obliki 6-stopenjske lestvice nevarnosti, katere razredi si sledijo od zanemarljive (vrednost 0), zelo nizke (1), nizke (2), srednje (3), visoke (4), do zelo visoke nevarnosti (5). Za obveščanje model posplošimo in prikažemo na ravni občin. Če je katero koli območje razvrščeno v razred nizke nevarnosti ali višje, sistem prek elektronskega obvestila (e-pošte) obvesti pristojne o povečani nevarnosti.

V okviru sklopa Č smo izvedli postavitev spletne aplikacije za zgodnje opozarjanje ob nevarnosti proženja zemeljskih plazov v odvisnosti od napovedanih količin padavin. Dejavnosti v tem sklopu so bile sestavljene iz: systemske analize (določitev uporabnikov, njihovih potreb ter rešitev in opredelitev funkcionalnih zahtev za aplikacijo), zasnove spletnega informacijskega sistema (določitev strojne in programske opreme, računalniške mreže in baze podatkov), njegove izdelave (razvoj aplikacije in nje-



Slika 2: Shema delovanja sistema Masprem.

no testiranje) in postavitve (kodiranje, programiranje) ter iz vzdrževanja (zbiranje podatkov o ustrežnosti, primernosti in uporabnosti spletne aplikacije ter njeno izpopolnjevanje/dopolnjevanje).

Sistem Masprem smo izdelali z odprtokodnimi programskimi rešitvami *PostgreSQL*, *PostGIS*, *GDAL* in *MapServer*, napisan pa je v programskem jeziku Java. Shema celotnega sistema je prikazana na sliki 2.

Spletno GIS aplikacijo, ki ima pomembno vlogo pri prenosu rezultatov h končnim uporabnikom, sestavljajo trije deli. Predstavitveni del omogoča uporabniku poizvedovanje po informacijah. Prek spletnega brskalnika uporabnik dostopa do pregledovalnika prostorskih geoloških podatkov in pošlje zahtevo po željeni informaciji. Operativni del poganja pregledovalnike ter obdeluje povpraševanja in odgovore na ta povpraševanja. Zahteva, ki jo pošlje uporabnik, prispe do spletnega strežnika, kjer jo krmilnik posreduje do operativnega ArcGIS strežnika. Ta poišče pot do podatkovnega ali datotečnega strežnika, ki posreduje odgovor na poslano zahtevo. Prvi strežnik operativnega dela omenjenega GIS-a temelji na ESRI programski opremi *ArcGIS server 9.3 SP1* (Medmrežje 3), ki omogoča ustvarjanje, upravljanje in distribucijo GIS storitev prek spleta za podporo namiznih, mobilnih in spletnih aplikacij. Drugi strežnik operativnega dela predstavlja *Microsoftov Windows Server 2008 R2 Standard (x64) SP0*, na katerem je delujoča spletna GIS aplikacija, ki je izdelana v programskem okolju *Microsoft Visual Studio 2008 SP1*. Poleg delujoče aplikacije je na Windows strežniku naložen še IIS (*Internet Information Services 7.5*), ki uporabnikom omogoča izvajanje zahtev.

### 3 Rezultati in diskusija

Sistem zgodnjega opozarjanja Masprem je operativen od septembra 2013. Modul za prenos podatkov dvakrat dnevno samodejno prenese podatke o napovedi padavin, izdelane z modelom Aladin-SI

(Medmrežje 1 in 2) na strežnik Geološkega zavoda Slovenije. Na tej podlagi se modelira nevarnost proženja zemeljskih plazov, ki je prikazana na spletni aplikaciji. S strežnikom *MapServer* se prenese v 3D GIS URSZR v obliki zemljevida zgodnjega opozarjanja (WMS odprtokodni standard). Od 9. 9. 2013 do 23. 3. 2014 je sistem 19-krat napovedal povečano verjetnost pojavljanja zemeljskih plazov (preglednica 1). V preglednici so kronološko naštetni vsi dogodki povečane napovedi po datumih in obdobju izračuna (dopoldan ob 8h in popoldan ob 18h). Preglednica podaja za vsak dogodek število občin, ki so bile v posameznem razredu nevarnosti. V preostalih dnevih je bila napoved za celotno Slovenijo zanemarljiva oziroma je bilo celotno območje razvrščeno v razred zelo nizke nevarnosti.

*Preglednica 1: Napovedani dogodki povečane nevarnosti proženja zemeljskih plazov in število izpostavljenih občin na podlagi izračuna v sistemu Masprem.*

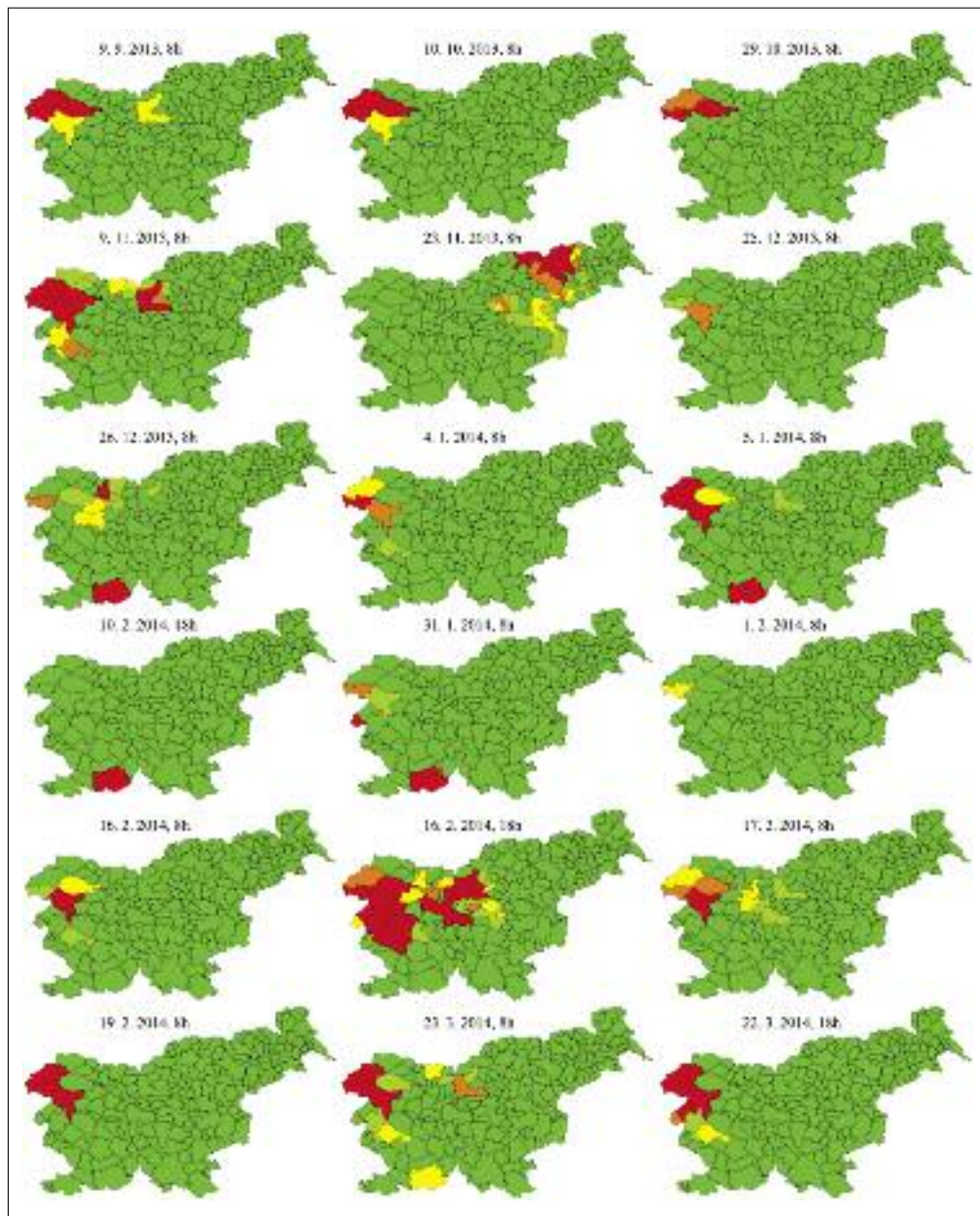
datum in ura napovedi	število občin po razredih nevarnosti				skupno število izpostavljenih občin
	zelo visoka nevarnost	visoka nevarnost	srednja nevarnost	nizka nevarnost	
9. 9. 2013, 8 h	3	–	3	–	6
10. 10. 2013, 8 h	3	–	1	–	4
29. 10. 2013, 8 h	2	1	–	–	3
9. 11. 2013, 8 h	6	2	3	6	17
23. 11. 2013, 8 h	11	6	8	12	37
25. 12. 2013, 8 h	–	1	–	1	2
26. 12. 2013, 8 h	2	1	3	5	11
4. 1. 2014, 8 h	1	1	1	1	4
5. 1. 2014, 8 h	4	–	1	1	6
19. 1. 2014, 8 h	1	–	–	–	1
31. 1. 2014, 8 h	2	1	–	1	4
1. 2. 2014, 8 h	–	–	1	–	1
10. 2. 2014, 18 h	1	–	–	–	1
16. 2. 2014, 8 h	1	–	1	2	4
16. 2. 2014, 18 h	19	3	6	7	35
17. 2. 2014, 8 h	1	2	3	4	10
19. 2. 2014, 8 h	3	–	–	–	3
22. 3. 2014, 18 h	4	1	1	1	7
23. 3. 2014, 8 h	3	1	3	4	11

Slika 3 kaže, da je bila severozahodna Slovenija (občine Bovec, Bohinj, Kobarid in Tolmin) največkrat razvrščena v razrede z največjo nevarnostjo pojavljanja zemeljskih plazov zaradi napovedanih padavin.

Kakovost napovedi preverjamo s pojavi dejansko sproženih zemeljskih plazov ob vsakem padavinskem dogodku. Preverjanje modela bo potekalo do konca leta 2014. Ker je bilo pridobivanje podatkov o zemeljskih plazovih, ki so se sprožili od septembra 2013 (to je v času pisanja tega prispevka), še v teku, podajamo v nadaljevanju primerjavo napovedi nevarnosti proženja zemeljskih plazov in dejanskih pojavov za tri starejše dogodke, za katere smo tudi izračunali model napovedi. Slika 4 prikazuje porazdelitev pojavov zemeljskih plazov ob treh padavinskih dogodkih: 19. 9. 2007, 19. 9. 2010 in 5. 11. 2012. Porazdelitev kaže na napake v modelu napovedi, saj je delež zemeljskih plazov v razredih zanemarljive in zelo nizke nevarnosti previsok. Pomembno je upoštevati dejstvo, da razredi verjetnosti pojavljanja zemeljskih plazov niso enaki razredom nevarnosti pojavljanja zemeljskih plazov zaradi napovedanih padavin.



Vzroki za napako modelov napovedi lahko izvirajo v katerem koli vhodnem podatku: napovedi padavin z modelom Aladin-SI, modelu verjetnosti pojavljanja zemeljskih plazov in v vrednosti sprožilne količine padavin pri posameznih kamninah. Analize slednjih potekajo v Sloveniji intenzivno več let (Komac in Ribičič 2006; Jemec Auflič in Komac 2013) in so vsaj v grobem določene, zato je tako veli-



Slika 3: Prikaz napovedi Masprem za datume v preglednici 1 (manjka dogodek 1. 2. 2014).

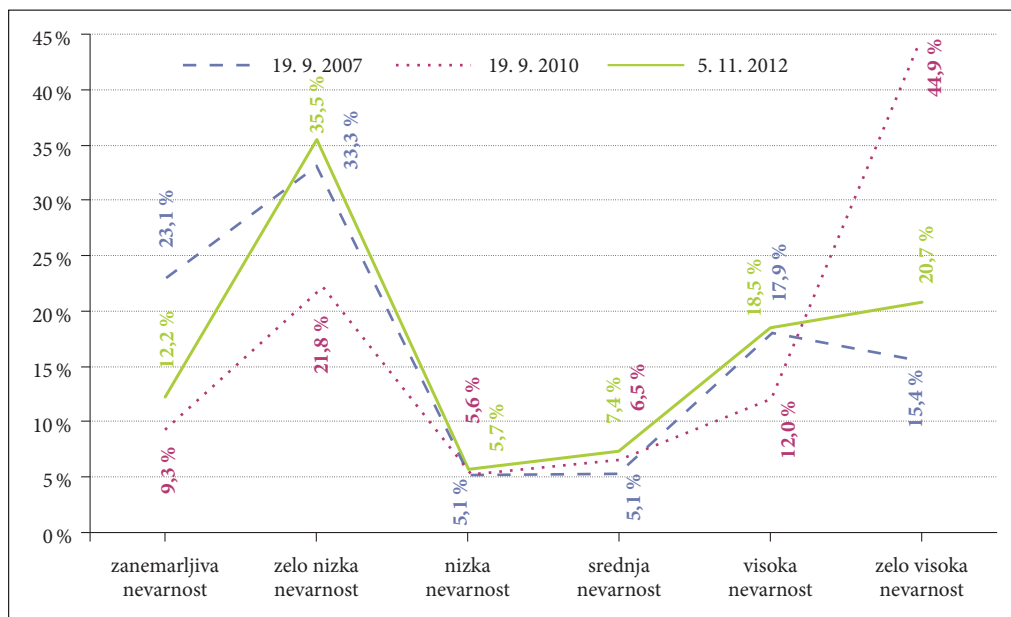
ka napaka, kot je prikazana na sliki 4, malo verjetna, a je še vedno možna. Tudi model verjetnosti pojavljanja zemeljskih plazov je bil večkrat preverjan in nadgrajen (Komac in Ribičič 2006; Komac s sod. 2011). Pregled napovedanih količin padavin po padavinskih postajah, najbližjih pojavom zemeljskih plazov za vse tri dogodke, pokaže, da so bile le-te v povprečju 19. 9. 2007 za 17,4-krat manjše od dejanskih, 19. 9. 2010 zgolj za 1,4-krat manjše in 5. 11. 2012 za 19,3-krat manjše. Odstopanja pojavov zemeljskih plazov od pričakovane naraščajoče porazdelitve zemeljskih plazov od razreda z najmanjšo do razreda z največjo nevarnostjo so za najstarejši in za najmlajši dogodek večja od odstopanj porazdelitve pojavov za dogodek 19. 9. 2010. Glede na to dejstvo je mogoče sklepati, da bi bile lahko napake v napovedanih padavinah modela Aladin-SI glavni krivec za slabšo napoved nevarnosti, a je treba dokazati za to podkrepiti z nadaljnjimi raziskavami.

## 4 Sklep

Prikazali smo uporabnost sistema opozarjanja na povečano nevarnost proženja zemeljskih plazov. Nadaljnja nadgradnja sistema opozarjanja s podatki o poseljenosti in ranljivosti prebivalcev ter lokacijah in vrednosti lastnine bo omogočala oceno njihove izpostavljenosti zaradi zemeljskih plazov, povezava v sistem 3D GIS URSZR pa bo omogočila njeno vsakodnevno uporabo z oprijemljivimi učinki v dejanskih situacijah opozarjanja in ukrepanja.

Sistem Masprem je v fazi testiranja. S podatki o novih plazovih, ki jih pridobivamo od občin, bomo model optimizirali, prav tako pa bomo nenehno izboljševali vhodne podatke.

Zavedamo se, da je kakovost izdelkov iz modela Aladin-SI omejena z nepopolnim opisom razmer, z omejeno prostorsko in časovno ločljivostjo izračuna, še posebej pa z omejeno napovedljivostjo procesov v atmosferi (Pristov s sod. 2012). Tako nameravamo v tesnem sodelovanju z državno meteorološko

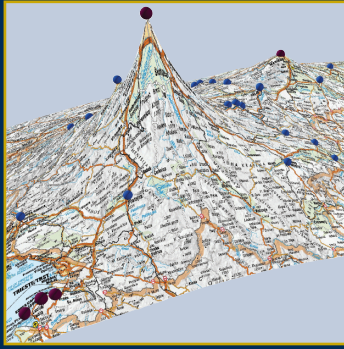


Slika 4: Porazdelitev deležev pojavov zemeljskih plazov glede na razrede nevarnosti proženja zemeljskih plazov v odvisnosti od napovedanih količin padavin (19. 9. 2007 se je sprožilo 39, 19. 9. 2010 216 in 5. 11. 2012 352 zemeljskih plazov).

službo v prihodnosti uporabiti model napovedi meteoroloških količin, ki bo optimalno združeval zelo kratkoročne, kratkoročne in srednjeročne napovedi ter s tem dopolniti in nadgraditi sistem opozarjanja.

## 5 Viri in literatura

- Bavec, M., Budkovič, T., Komac, M. 2005: Geohazard – geološko pogojena nevarnost zaradi procesov pobočnega premikanja. Primer občine Bovec. *Geologija* 48-2. Ljubljana.
- Bavec, M., Čarman, M., Durjava D., Jež, J., Krivic, M., Kumelj, Š., Požar, M., Komac, M., Šinigoj, J., Rižnar, I., Jurkovšek, B., Trajanova, M., Poljak, M., Celarc, B., Demšar, M., Milanič, B., Mahne, M., Otrin, J., Čertalič, S., Štih, J., Hrvation, M. 2012: Izdelava prostorske baze podatkov in spletnega informacijskega sistema geološko pogojenih nevarnosti zaradi procesov pobočnega premikanja, poplavnih, erozijskih kart ter kart snežnih plazov – pilotni projekt. Poročilo, Geološki zavod Slovenije. Ljubljana.
- Jemec Auflič, M., Komac, M. 2013: Rainfall patterns for shallow landsliding in perialpine Slovenia. *Natural Hazards* 67-3. Dordrecht.
- Komac, M. 2005: Verjetnostni model napovedi nevarnih območij glede na premike pobočnih mas – primer občine Bovec. *Geologija* 48-2. Ljubljana.
- Komac, M. 2006: A landslide susceptibility model using the analytical hierarchy process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia. *Geomorphology* 74. Amsterdam.
- Komac, M., Ribičič, M. 2006: Karta verjetnosti pojavljanja plazov v Sloveniji v merilu 1 : 250.000. *Geologija* 49-2. Ljubljana.
- Komac, M., Šinigoj, J., Kumelj, Š., Jemec Auflič, M., Bavec, M., Čarman, M., Hribernik, K., Krivic, M., Požar, M., Podboj, M. 2011: Sistem zgodnjega opozarjanja za primer nevarnosti proženja zemeljskih plazov – MASPREM. Poročilo, Geološki zavod Slovenije. Ljubljana.
- Medmrežje 1: <http://www.meteo.si/> (30. 8. 2013).
- Medmrežje 2: <http://www.arso.gov.si/vreme/napovedi%20in%20podatki/aladin/> (30. 8. 2013).
- Medmrežje 3: <http://www.esri.com> (30. 8. 2013).
- Pristov, N., Cedilnik, J., Jerman, J., Strajnar, B. 2012: Priprava numerične meteorološke napovedi ALADIN-SI. Vetrnica 4. Ljubljana.



ISSN 1855-4954



9 789612 547141

39,00 €