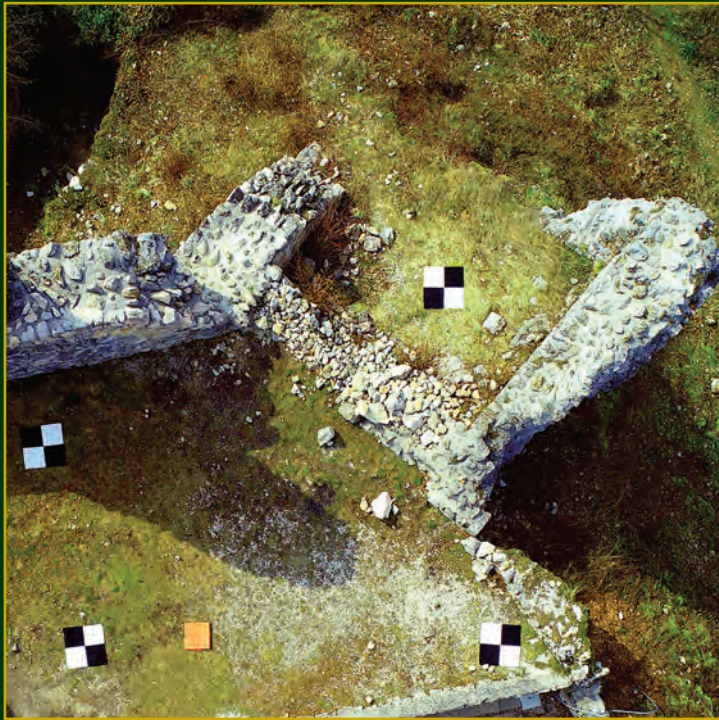


# GIS V SLOVENIJI

# POKRAJINA V VISOKI LOČLJIVOSTI

ROK CIGLIČ  
MATJAŽ GERŠIČ  
DRAGO PERKO  
MATIJA ZORN



14



GIS V SLOVENIJI 14  
POKRAJINA V VISOKI LOČLJIVOSTI





GIS V SLOVENIJI 14

# POKRAJINA V VISOKI LOČLJIVOSTI

*Uredili:*

**Rok Ciglič**  
**Matjaž Geršič**  
**Drago Perko**  
**Matija Zorn**

LJUBLJANA 2018

GIS V SLOVENIJI 14

**POKRAJINA V VISOKI LOČLJIVOSTI**

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

© 2018, Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU

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

*Uredniški odbor:* Mateja Breg Valjavec, Rok Ciglič, Matjaž Geršič, David Hladnik, Žiga Kokalj,  
Marko Krevs, Drago Perko, Tomaž Podobnikar, Blaž Repe, Tomaž Šturm,  
Mihaela Triglav Čekada, Matija Zorn

*Recenzenti:* Mateja Breg Valjavec, Rok Ciglič, Matej Gabrovec, Matjaž Geršič, David Hladnik, Žiga Kokalj,  
Drago Kladnik, Jani Kozina, Marko Krevs, Aleš Marsetič, Drago Perko, Tomaž Podobnikar,  
Blaž Repe, Tomaž Šturm, Jernej Tiran, 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:* Birografika Bori, d. o. o.

*Naklada:* 300 izvodov

Prva izdaja, prvi natis. Prva e-izdaja.

*Naslovnica:*

Daljinsko zaznane posnetke pravilno umestimo v prostor tako, da na površju znotraj posnetka določimo točne prostorske koordinate vsaj za nekaj lokacij. Te, tako imenovane oslonilne točke, jasno označimo, na primer s črno-belimi kvadrati. Na fotografiji, ki jo je posnel brezpilotni letalniki 26. 3. 2018, so prikazane oslonilne točke na Starem gradu nad Kamnikom. Avtor fotografije: Rok Ciglič.

Knjiga je prosto dostopna tudi v elektronski obliki (pdf), ISBN 978-961-254-930-5, COBISS.SI ID= 286121728

<https://zalozba.zrc-sazu.si/p/1530>

<https://doi.org/10.3986/9789610501138>

---

CIP – Kataložni zapis o publikaciji

Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

910.1(082)

528(082)

659.2:004:91(082)



POKRAJINA v visoki ločljivosti / uredili Rok Ciglič... [et al.]. – 1. izd.,

1. natis. – Ljubljana : Založba ZRC, 2018. – (GIS v Sloveniji, ISSN 1855-4954 ; 14)

ISBN 978-961-05-0112-1

1. Ciglič, Rok

296251648

---

---

## VSEBINA

<i>Gregor Rajh, Andrej Gosar</i> Uporaba orodij GIS v analizi magnitude in globine potresov v Sloveniji za potrebe ocenjevanja potresne nevarnosti .....	9
<i>Mauro Hrvatin, Drago Perko</i> Vpliv kamninske podlage na izoblikovanost površja v porečju Lahomnice .....	27
<i>Dimitrij Mlekuž</i> Vzreja modelov višin iz lidarskih podatkov .....	39
<i>Jure Tičar, Miha Čekada</i> Natančnost določanja lege naravnih vrednot v Sloveniji na primeru kraških jam .....	47
<i>Jure Tičar, Drago Perko, Manca Volk Bahun</i> Geodediščina in pokrajinska raznolikost Slovenije .....	57
<i>Mihaela Triglav Čekada</i> Geodetska masna bilanca slovenskih ledenikov iz podatkov laserskega skeniranja .....	75
<i>Aleš Grlj, Andreja Sušnik, Gregor Gregorič, Žiga Kokalj</i> Spletni Sušni uporabniški servis .....	85
<i>Nataša Đurić, Urša Kanjir, Tatjana Veljanovski</i> Analiza časovnih vrst Sentinel-2 za zaznavanje neskladne rabe na trajnih travnikih .....	93
<i>Nika Mesner, Katja Tič, Alen Mangafić, Mihaela Triglav Čekada</i> Samodejna razpoznava zaraščanja na primeru kraških travnikov .....	103
<i>Dušan Petrovič, Ana Petkovšek, Dejan Grigillo</i> Analiziranje stanja opuščene odlagališča odpadkov Ležen z uporabo arhivskih in sedanjih fotogrametričnih podatkov .....	115
<i>Dimitrij Mlekuž</i> Uporaba hiperspektralnih snemanj v arheologiji .....	125
<i>Mateja Breg Valjavec, Blaž Komac</i> Novodobna poselitev hudourniških vršajev in nevarnost drobirskih tokov: primer Zgornjesavske doline .....	139
<i>Samo Drobne, Lavra Borovnik, Mitja Lakner</i> Lokalna območja delovne mobilnosti v Sloveniji .....	153
<i>Simon Koblar, Matej Žebovec</i> Analiza potovalnih vzorcev uporabnikov mestnega potniškega prometa v Ljubljani .....	165
<i>Danijel Ivajnsič, Igor Žiberna</i> Prometne nesreče v občini Maribor ob različnih vremenskih situacijah .....	175
<i>Matjaž Geršič, Rok Ciglič, Drago Perko</i> Pokrajinska in zemljepisnoimenska raznolikost v Sloveniji .....	189





# UPORABA ORODIJ GIS V ANALIZI MAGNITUDE IN GLOBINE POTRESOV V SLOVENIJI ZA POTREBE OCENJEVANJA POTRESNE NEVARNOSTI

**Gregor Rajh**

Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta  
gregor.rajh@ntf.uni-lj.si

**dr. Andrej Gosar**

Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta in Agencija Republike Slovenije za okolje  
andrej.gosar@gov.si

UDK: 550.34(497.4)

659.2:004:91(497.4)

## IZVLEČEK

**Uporaba orodij GIS v analizi magnitude in globine potresov v Sloveniji za potrebe ocenjevanja potresne nevarnosti**

V okviru verjetnostnega ocenjevanja potresne nevarnosti smo analizirali magnitudo in globino žarišč potresov v Sloveniji, in sicer po seizmotektonskih območjih, celicah in prelomnih potresnih izvori. Uporabili smo zgodovinsko-instrumentalni in instrumentalni katalog potresov, prvega za določitev največje opažene magnitude potresa in drugega za oceno seizmogene globine. Uporaba orodja GIS in programskega jezika Python je olajšala analizo geoloških in seizmoloških razmer v Sloveniji ter omogočila vzpostavitev prostorskega odnosa med tektonskimi podatki in seizmičnostjo. Rezultate največje opažene magnitude potresa in seizmogene globine prikazujemo na zemljevidih za seizmotektonska območja, celice in prelomne potresne izvore. Največje magnitude potresov se pojavljajo v zahodni in osrednji Sloveniji, globine potresov pa so v splošnem večje v zahodnem delu Slovenije.

## KLJUČNE BESEDE

seizmotektonska analiza, magnituda potresa, seizmogene globina, prelomni potresni izvor, ocenjevanje potresne nevarnosti, GIS, Python

## ABSTRACT

**Use of GIS tools in magnitude and depth analysis of earthquakes in Slovenia for the purpose of seismic hazard analysis**

For the purpose of seismic hazard analysis in Slovenia we analysed earthquake magnitude and focal depth by seismotectonic areas, grid cells, and fault seismogenic sources. The analysis of maximum observed earthquake magnitude and seismogenic depth was based on historical-instrumental and instrumental earthquake catalogues, respectively. The use has been made of GIS tools and Python programming language, which simplified the analysis of geological and seismological conditions in Slovenia and allowed us to establish a spatial relationship between tectonic data and seismicity. The results of maximum observed earthquake magnitude and seismogenic depth are given on maps for seismotectonic areas, grid cells and fault seismogenic sources. The strongest earthquakes occur in western and central part of Slovenia. Earthquake hypocenters are in general deeper in western Slovenia.

## KEY WORDS

seismotectonic analysis, earthquake magnitude, seismogenic depth, fault seismogenic source, seismic hazard analysis, GIS, Python

## 1 Uvod

V okviru izdelave novega zemljevida potresne nevarnosti smo analizirali magnitudo in globino potresov v Sloveniji. Potresna nevarnost je opredeljena z jakostjo tresenja tal, ki so jo na nekem območju zmožni povzročiti potresi v izbrani povratni dobi in predstavlja izhodišče za analizo potresne ogroženosti. Potresno nevarnost običajno predstavimo z zemljevidi projektnega pospeška tal, ki ga izračunamo z determinističnim ali verjetnostnim pristopom. Verjetnostno ocenjevanje potresne nevarnosti upošteva porazdelitev in učinke potresov različnih magnitud vseh znanih potresnih izvorov na obravnavanem območju (Reiter 1991; McGuire 2004).

Pri verjetnostnem ocenjevanju potresne nevarnosti poleg pretekle seizmičnosti danes velik pomen pripisujemo seizmotektonskim podatkom, ki jih podajamo predvsem v obliki seizmotektonskih območij in prelomnih potresnih izvorov. Izhodišče za opredelitev prelomnih potresnih izvorov predstavljajo aktivni prelomi, ki so bili v Sloveniji v zadnjih letih predmet obsežnih raziskav (Atanackov s sodelavci 2014 in 2015). Rezultati teh raziskav so spodbudili natančnejšo analizo največje opažene magnitude potresa in seizmogene globine na podlagi pretekle seizmičnosti. Največja opažena magnituda potresa je pogojena izključno s preteklo seizmičnostjo in običajno opredeljuje spodnjo mejo največje možne magnitude potresa na določenem območju (Reiter 1991). Pred določanjem največje magnitude potresov, moramo pripraviti katalog potresov s čim daljšim časovnim razponom (na primer zgodovinsko-instrumentalni katalog potresov) in s poenoteno magnitudo. Seizmogena globina predstavlja globinski interval v Zemljini skorji, znotraj katerega se na nekem omejenem območju pojavlja večina potresov (Williams 1996). Za njeno določitev je primernejši instrumentalni katalog potresov s čim bolj točno določenimi lokacijami žarišč potresov. Zanesljivost določitve seizmogene globine lahko zato izboljšamo z merili za izločanje slabše lociranih žarišč potresov iz kataloga (Miller in Furlong 1988). Potresov pogosto ne moremo enoznačno pripisati posameznim prelomom, zato oba parametra določimo glede na prostorski odnos med lokacijami nadžarišč potresov in prostorskimi enotami, oblikovanimi na podlagi tektonskih podatkov (na primer tras prelomnih potresnih izvorov).

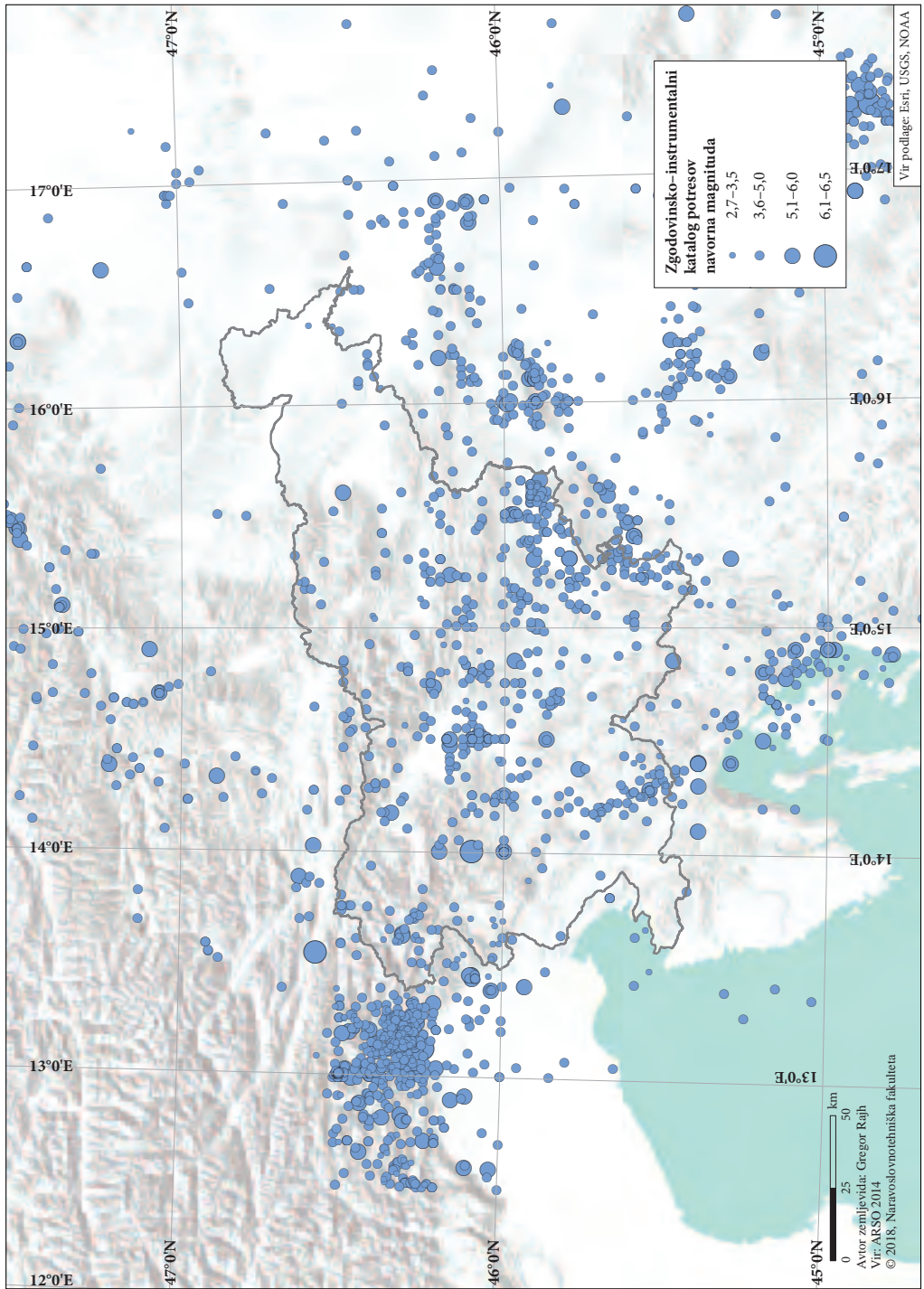
V analizi smo uporabili zgodovinsko-instrumentalni in instrumentalni katalog potresov. Izvedli smo jo z orodjem GIS in programskim jezikom *Python*, ki sta olajšala analizo velikega števila podatkov ter danih geoloških in seizmoloških razmer v Sloveniji. Z izdelavo prelomnih območij smo vzpostavili prostorski odnos med prelomnimi potresnimi izvori in seizmičnostjo ter skupaj s seizmotektonskimi območji analizirali največjo opaženo magnitudo potresov in seizmogeno globino (Rajh s sodelavci 2017). Objektivnost analize seizmogene globine smo izboljšali s tesalacijo obravnavanega območja na kvadrataste celice, ki so omogočile analizo globin potresov, neodvisno od tektonskih podatkov. Pomagali smo si tudi z izrisom globinskih prerezov žarišč potresov.

## 2 Prikaz in priprava vhodnih podatkov

### 2.1 Potresi

Osnova za analizo magnitud in globin žarišč potresov sta dva poenotena kataloga potresov, ki obsegata območje Slovenije s širšo okolico. Poznavanje pretekle seizmičnosti na širšem območju je ključno za ustrezno analizo po prelomnih potresnih izvori, ki segajo izven meja Slovenije. S tem zmanjšamo tudi robni učinek v izračunu končnega zemljevida potresne nevarnosti. Zgodovinsko-instrumentalni katalog potresov (Katalog potresov ... 2014), prikazan na sliki 1, obsega obdobje med letoma 456 in 2013 ter vsebuje 2109 (2009 na prikazanem območju) zgodovinskih in instrumentalno opredeljenih

*Slika 1: Zgodovinsko-instrumentalni katalog potresov s prikazanimi lokacijami nadžarišč in navornimi magnitudami potresov (Katalog potresov ... 2014). ►*



parametrov potresov z navorno magnitudo  $M_W \geq 2,7$ . Najmočnejši potres v zgodovinsko-instrumentalnem katalogu ima  $M_W$  6,5. Ta katalog smo zaradi daljšega časovnega razpona uporabili za določitev največjih opaženih magnitud potresov v posameznih potresnih izvori. Za instrumentalni del kataloga (približno od leta 1900 dalje) so podane tudi globine žarišč potresov, vendar so njihove vrednosti premalo zanesljive za natančnejšo analizo.

Za analizo globin smo uporabili instrumentalni katalog potresov (Katalog potresov ... 2015), prikazan na sliki 2, v katerem so lokacije žarišč potresov določene točneje. Zaradi preglednosti prikazujemo zgolj nadžarišča potresov in njihove globine. Katalog vsebuje 20.831 potresov in obsega obdobje med letoma 2004 in 2014. Najmočnejši potres v katalogu ima  $M_W$  5,2 in najšibkejši pa  $M_W$  1,1. Začetek kataloga potresov sovpada s končano izgradnjo nove državne mreže potresnih opazovalnic, ki je bila predpogoj za točnejše lociranje žarišč potresov. Žarišče najglobljega potresa je na globini 62,8 km, vendar je njegova globina zaradi velike oddaljenosti od najbližje potresne opazovalnice zelo verjetno precenjena, na kar nakazujejo tudi vsa ostala žarišča potresov z globino nad 30 km, ki so izven meja Slovenije. Ocene napak različnih parametrov potresov (na primer magnitudo in globine) so tudi podane v tem katalogu potresov.

Iz instrumentalnega kataloga smo pred analizo globin izločili slabše določena žarišča potresov z uporabo meril, ki smo jih določili na podlagi najmanjšega števila potresnih opazovalnic, ki so potres zaznale, največje azimutne vrzeli med sosednjimi opazovalnicami ter najmanjšega razmerja med oddaljenostjo potresnih opazovalnic od nadžarišča in globino žarišča (razmerje D/H). Preizkusili smo različna merila, izbrane parametre pa podajamo v preglednici 1. Zanje smo se odločili na podlagi največjega števila potresov v pripadajočem podkatalogu in še vedno dovolj strogih parametrov za izločanje slabše določenih žarišč potresov. Tako filtriran podkatalog vsebuje 8174 potresov na celotnem območju prvotnega kataloga, z najglobljim žariščem potresa na 35,1 km. Največ potresov na enoto površine je bilo izločenih na območjih, kjer se je v časovnem obdobju kataloga zgodilo tudi največ potresov (na primer skrajni se verozahodni del Slovenije). Prostorska porazdelitev števila potresov se zato po izločanju ni bistveno spremenila.

*Preglednica 1: Izbrani parametri za izločanje slabše določenih žarišč potresov iz instrumentalnega kataloga.*

število potresnih opazovalnic	$\geq 5$
azimutna vrzel (°)	$\leq 180$
razmerje D/H	$\leq 1,5$

## 2.2 Seizmotektonska območja

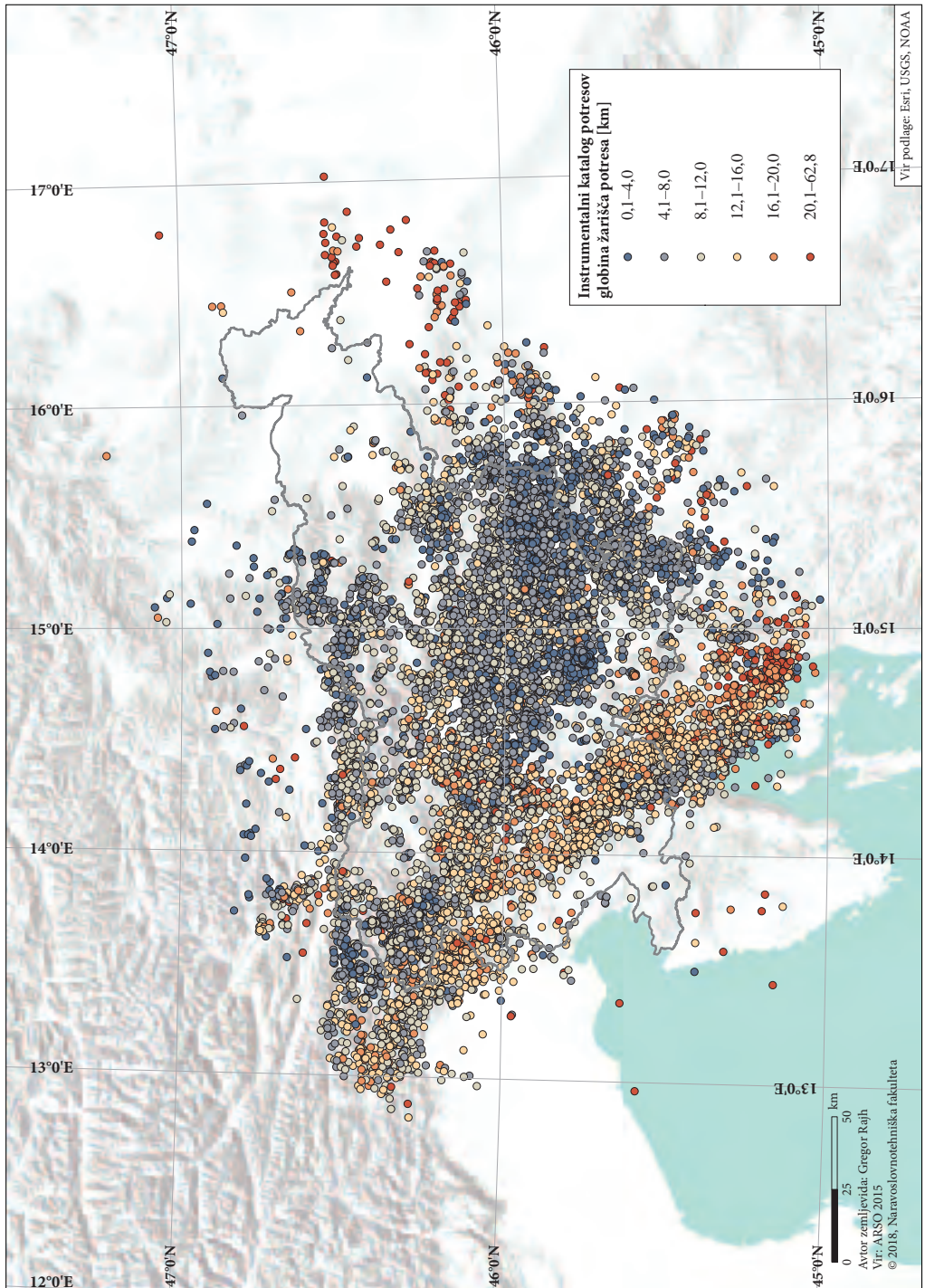
Za pomoč pri določanju parametrov potresnih izvorov ter za prepoznavanje regionalnih sprememb na ozemlju Slovenije in neposredne okolice, smo uporabili seizmotektonska območja, ki smo jih na Agenciji Republike Slovenije za okolje izdelali v okviru mednarodnega projekta BSHAP (Mihaljević s sodelavci 2017). Celoten seizmotektonski model je sestavljen iz 65 seizmotektonskih območij (slika 3), ki pokrivajo Balkanski polotok z okolico, Jadransko morje in večji del Apeninskega polotoka.

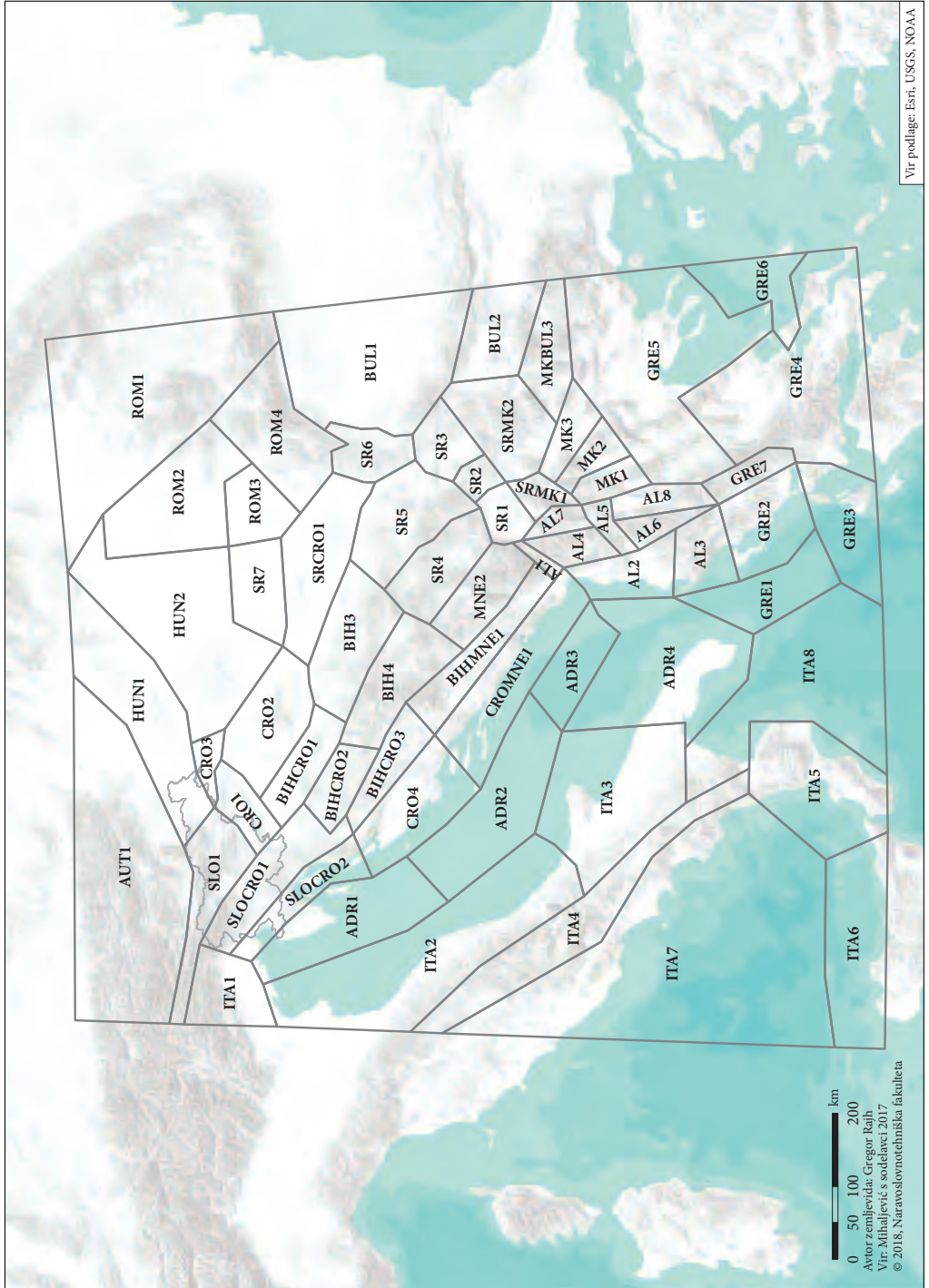
## 2.3 Prelomni potresni izvori in prelomna območja

Prelomni potresni izvori, uporabljeni v analizi, temeljijo na trasah aktivnih prelomov, ki jih je v okviru projekta »Seizmotektonska parametrizacija aktivnih prelomov Slovenije« parametriziral Geološki

*Slika 2: Instrumentalni katalog potresov s prikazanimi lokacijami nadžarišč in globinami žarišč potresov (Katalog potresov ... 2015). ►*

*Slika 3: Seizmotektonska območja, izdelana v projektu BSHAP (Mihaljević s sodelavci 2017). ► (str. 14)*





zavod Slovenije (Atanackov s sodelavci 2014; 2015). Podani so kot linijski sloj (slika 4). Le-ta vsebuje trase 89 prelomnih potresnih izvorov, za katere je bilo na podlagi empiričnih enačb (Wells in Coppersmith 1994) ugotovljeno, da so zmožni generirati potres z navorno magnitudo  $M_w \geq 5,5$ . Parametri prelomnih potresnih izvorov so podani v parametrizacijski preglednici (izvleček v preglednici 2), ki smo jo po opravljeni analizi dopolnili z največjo opaženo magnitudo potresa in seizmogeno globino.

Na območju Slovenije je zaradi številnosti prelomov, zmerne seizmičnosti in ne dovolj velike točnosti določitve žarišč potresov oteženo pripisovanje potresov posameznim prelomom, zato smo trasam prelomnih potresnih izvorov dodali prelomna območja, na podlagi katerih smo vzpostavili prostorski odnos z nadžarišči potresov. V GIS-u smo izdelali prelomna območja, ki so na podlagi testiranj široka 5 km okoli posameznih tras prelomnih potresnih izvorov, prečno na njihovo smer (slika 4). S tem smo vsaj delno upoštevali napako lokacije nadžarišč potresov in zaobjeli globinsko geometrijo prelomov. Preizkusili smo tudi prelomna območja v pasu širine 2,5 km in 10 km okoli trase preloma, ki se niso izkazala kot ustrezna zaradi premajhne pokritosti obravnavanega območja ali prevelikega medsebojnega prekrivanja.

## 2.4 Kvadrataste celice

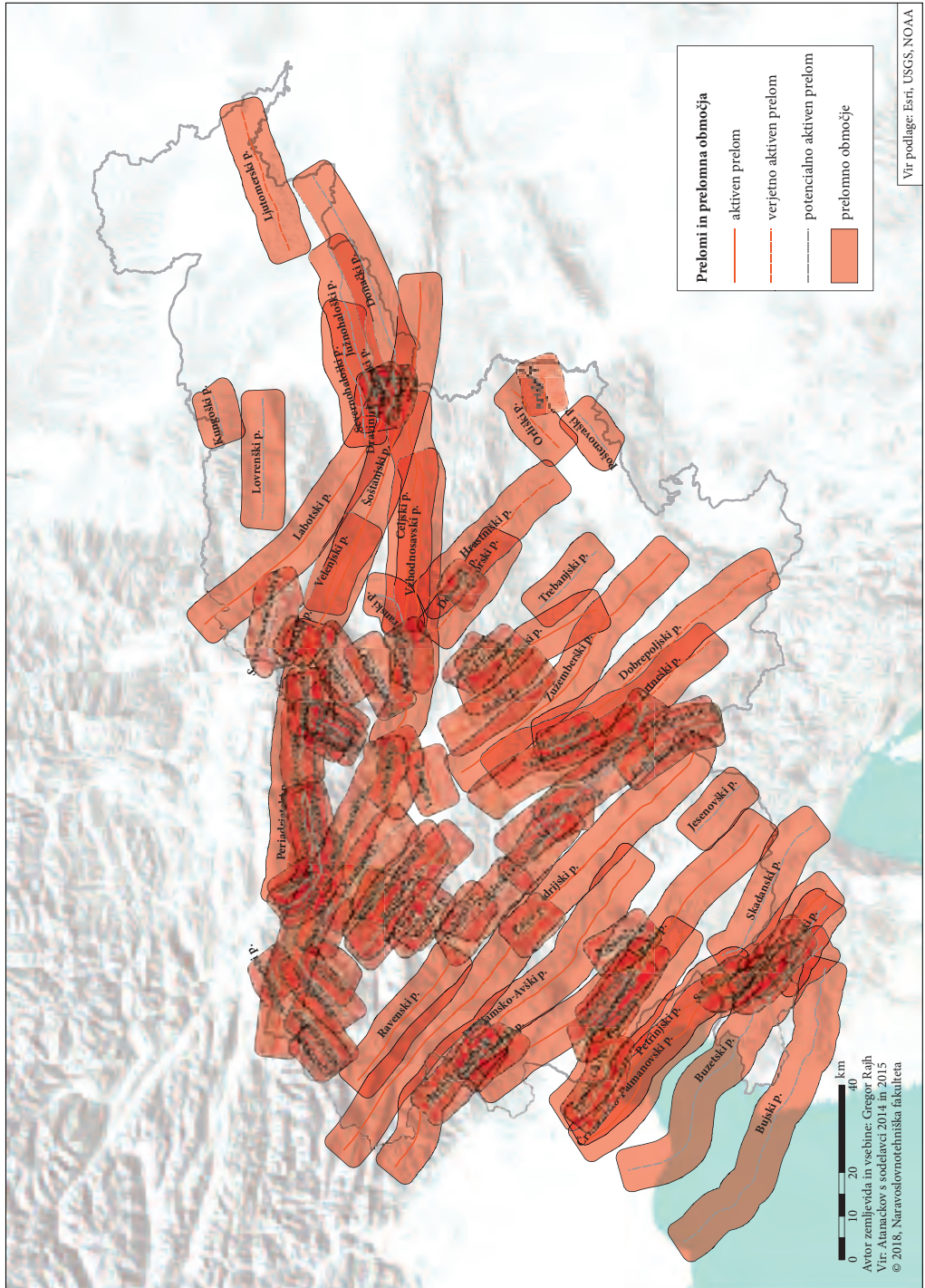
Za boljšo preglednost ter lažje razločevanje med regionalnimi in krajevnimi prostorskimi spremembami globin žarišč potresov smo izvedli tesalacijo obravnavanega območja na kvadrataste celice s stranico dolžine 5 km, ki so omogočile izvedbo analize globin, neodvisno od tektonskih podatkov. Iz analize celic smo izločili območja, znotraj katerih so potresi iz instrumentalnega kataloga redki. Preizkusili smo tudi celice s stranico dolžine 2,5 km.

## 3 Analiza

Največjo opaženo magnitudo potresa in seizmogeno globino smo določili s pomočjo programskega paketa ArcGIS in skriptnega programskega jezika *Python* z razširitvami. Prostorske poizvedbe smo v GIS-u opravili na obeh katalogih potresov in tako vsakemu potresu pripisali pripadajoče seizmotektonsko območje, prelomno območje in celico. Seizmotektonska območja smo zaradi njihove razprostranjenosti lahko pripisali vsem potresom. Nekaterim potresom pa nismo mogli pripisati nobenega prelomnega potresnega izvora, saj so se nahajali izven vseh prelomnih območij. V primeru prekrivanja prelomnih območij smo enemu potresu pripisali več prelomov. Zgodilo se je tudi, da so nekatera prelomna območja ostala brez potresov. Analize največje opažene magnitude potresa po celicah nismo opravili zaradi premajhnega števila potresov znotraj območij posameznih enot.

Za izračun parametrov magnitude in globine žarišč potresov smo napisali programski kodi, s pomočjo katerih smo na podlagi predhodne prostorske analize v GIS-u v vsakem seizmotektonskem območju, prelomnemu območju in celici poiskali največjo ter najmanjšo vrednost opažene magnitude potresa in globine ter 5., 10., 90. in 95. percentil globine potresov. Prav tako smo izračunali razliko globin med največjo in najmanjšo vrednostjo, med 95. in 5. percentilom ter 90. in 10. percentilom in dodali tudi podatek o številu potresov. Z uporabo percentilnih vrednosti globine smo se izognili izstopajočim vrednostim, ki so lahko posledica netočne lokacije žarišč potresov. Z razliko med največjimi in najmanjšimi vrednostmi ter z razliko med percentilnimi vrednostmi smo si pomagali pri opredelitvi potresnih izvorov po globini. Napisali smo tudi programsko kodo za izpis vseh potresov, ki pripadajo trem največjim vrednostim magnitud znotraj posamezne prostorske enote.

*Slika 4: Zemljevid prelomnih potresnih izvorov (po Atanackov s sodelavci 2014; 2015) s pripadajočimi prelomnimi območji. ► (str. 16)*





Preglednica 2: Parametri za izbrane prelomne potresne izvore po Atanackov s sodelavci (2014; 2015).

ime prelomnega potresnega izvora	vrsta	dolžina (km)	azimut (°)	prečni naklon (°)	hitrost premikanja ob prelomu (mm/leto)	največja $M_w$ potresa	aktivnost
Črnokalsko-Palmanovski prelom	nariv	83	315	20	0,20	7,3	aktiven
Hrastniški prelom	desnozmični	40	350	85	0,07	7,0	verjetno aktiven
Idrijski prelom	desnozmični	125	310	85	1,00	7,5	aktiven
Raški prelom	desnozmični	87	315	85	0,70	7,3	aktiven
Ravenski prelom	desnozmični	36	310	80	0,10	6,9	aktiven
Vrhniški prelom	desnozmični	17	310	80	0,05	7,1	potencialno aktiven
Žužemberški prelom	desnozmični	70	315	80	0,5	7,2	aktiven

Izris globinskih prerezov žarišč potresov in pripadajočo prostorsko analizo smo izvedli v celoti v *Pythonu*. Pomagali smo si z nekaterimi moduli oziroma knjižnicami, ki nam olajšajo obdelavo in prikaz prostorskih podatkov. Datoteke v standardnem formatu *shape* smo v proceduro uvozili s pomočjo knjižnice *pyshp*, s katero lahko vse prostorske podatke zapišemo v terke, sezname ali slovarje in nato izvajamo analizo z osnovnimi ukazi oziroma funkcijami, vgrajenimi v *Python*. Neposredno manipulacijo in analizo ravninskih geometrijskih objektov v *Pythonu* nam omogočajo funkcije knjižnice *shapely*, izris zemljevidov pa knjižnica *basemap*, ki je del knjižnice za izrisovanje grafov *matplotlib*. Za transformacije med koordinatnimi sistemi smo uporabili knjižnico *pyproj*.

## 4 Rezultati

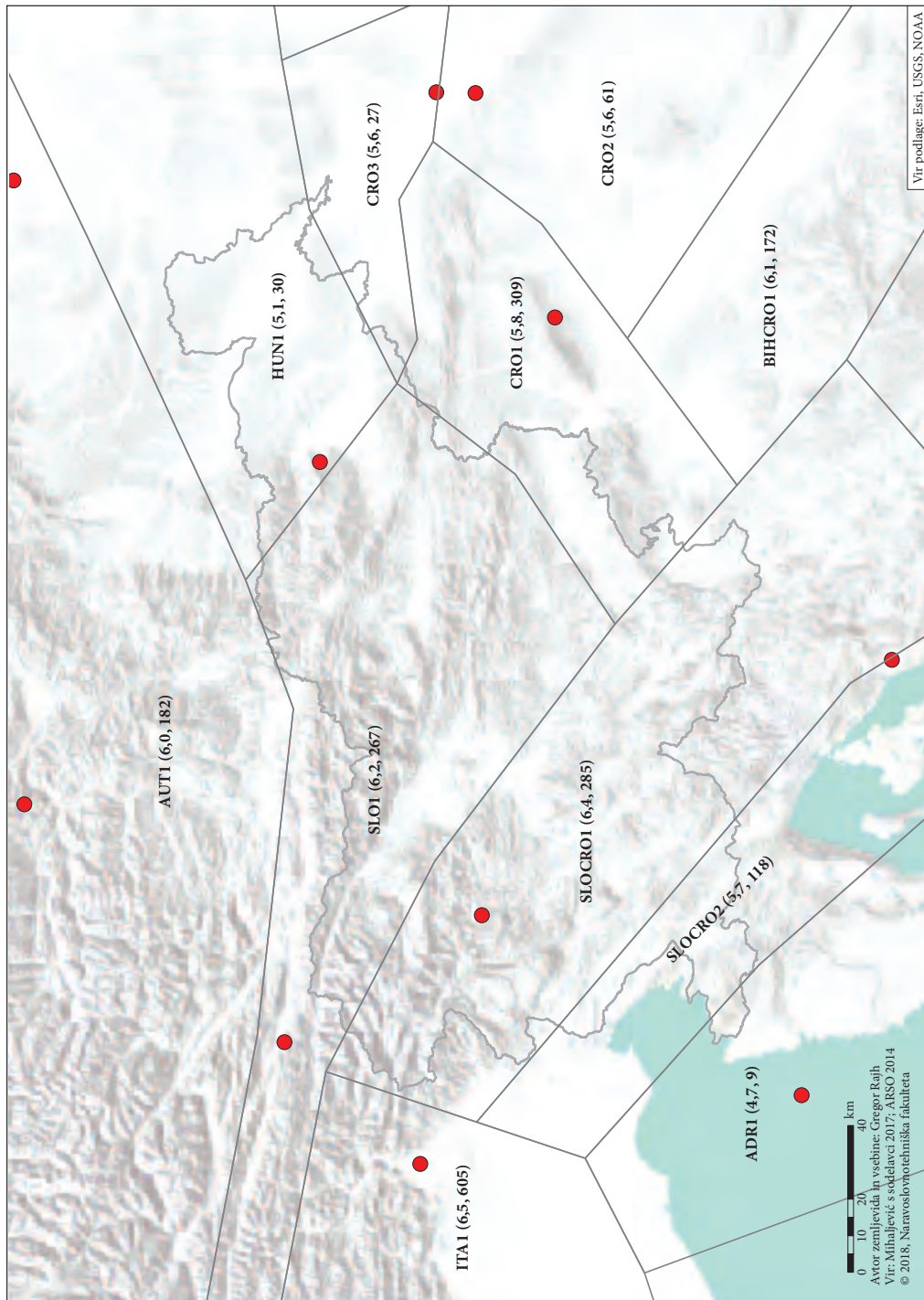
### 4.1 Največja opažena magnituda potresa

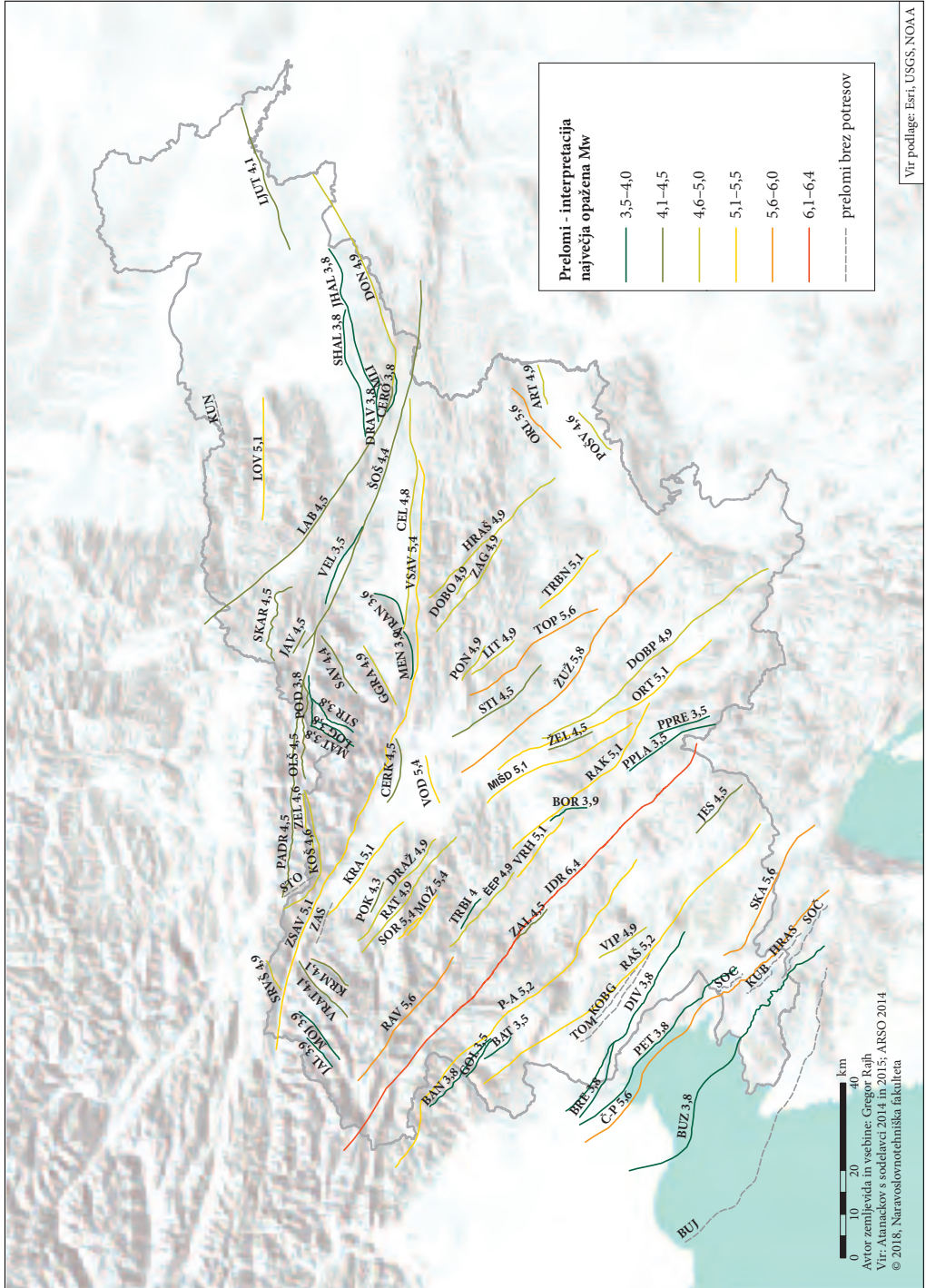
V analizo magnitude smo vključili vsa seizmotektonska območja projekta BSHAP, ki so pokrita s potresi prostorsko obsežnejšega zgodovinsko-instrumentalnega kataloga, za prikaz rezultatov analize pa smo se omejili zgolj na območje prostorsko manj obsežnega instrumentalnega kataloga potresov, ki sega na enajst seizmotektonskih območij. Lokacije potresov, ki pripadajo trem največjim vrednostim magnitude in število potresov zaradi preglednosti prikazujemo le na zemljevidu seizmotektonskih območij. Največja opažena magnituda potresa za posamezna seizmotektonska območja BSHAP je prikazana na sliki 5. Večji del Slovenije pripada območjema SLO1 in SLOCRO1, za kateri je največja opažena magnituda potresa nad  $M_W$  6,0. Vidno je zmanjševanje največje magnitude in hkrati tudi števila potresov v smeri proti severovzhodu in jugozahodu. Največja magnituda potresa na prikazanem ozemlju ( $M_W$  6,5) pripada območju ITA1, najmanjša ( $M_W$  4,7) pa območju ADR1. Za vsako seizmotektonsko območje so prikazane tudi lokacije najmočnejših potresov. Najmočnejši potres seizmotektonskega območja BIHCRO1, ki ni prikazano v celoti, je izven prikazanega območja.

Slika 6 prikazuje rezultate analize največje opažene magnitude potresa po prelomnih potresnih izvorihih za prelomna območja. Prelomni potresni izvori dinarske smeri (severozahod–jugovzhod) dosegajo največje vrednosti magnitude potresa v zahodni in osrednji Sloveniji. Poleg njih se pojavljajo prelomni potresni izvori z največjimi magnitudami potresa enakimi  $M_W$  5,6 in  $M_W$  5,8 v vzhodnem ter jugozahodnem delu Slovenije. Največja magnituda potresa znotraj prelomnih območij je enaka  $M_W$  6,4. Prvotno je bila določena za prelomni območji Čepleskega in Trebijskega preloma (zahodna Slovenija, med Ravenskim in Vrhniškim prelomom). Lokacija za ta potres iz leta 1511 je določena le iz makroseizmičnih raziskav na podlagi redkih zgodovinskih virov in je zato manj zanesljiva. S tega razloga smo glede na literaturo (na primer Fitzko s sodelavci 2005; Bavec s sodelavci 2013) in dolžino prelomnih potresnih izvorov naredili dodatno presojo ter ta potres pripisali izključno Idrijskemu prelomu. Dodatno presojo smo naredili tudi za ostale prelomne potresne izvore, kjer smo poleg literature upoštevali še geometrijo in aktivnost prelomnih potresnih izvorov iz parametrizacijske preglednice (Atanackov s sodelavci 2014; 2015). Vrednosti največje magnitude potresa iz opravljene analize smo popravili le za nekatere izmed njih (Sočerski prelom, Stiški prelom, Zalin prelom). Prikazani so tudi prelomni potresni izvori brez zabeleženih potresov.

Slika 5: Največja opažena navorna magnituda potresa in število potresov za seizmotektonska območja BSHAP (slika 3), s prikazanimi lokacijami najmočnejših potresov (rdeči krogi). ►

Slika 6: Največja opažena navorna magnituda potresa, prikazana po prelomnih potresnih izvorihih za posamezna prelomna območja (slika 4). ► (str. 20)





## 4.2 Seizmogena globina

Za seizmogeno globino smo privzeli vrednost 95. percentila globine potresov. Tudi v tem primeru število potresov zaradi preglednosti prikazujemo zgolj na zemljevidu seizmotektonskih območij (slika 7). Zanesljivost določene seizmogene globine je majhna za območja z manj kot 100 potresi (na primer ADR1, HUN1, CRO3). Za večji del Slovenije seizmogena globina narašča približno v smeri od severovzhoda proti jugozahodu, to je od okoli 14 km za območji SLO1 in CRO1 ter do 21,8 km za območje SLOCRO2. Na istem zemljevidu so podane vrednosti 95. percentila globine potresov po celicah s stranico dolžine 5 km (slika 7). V tem primeru se Slovenija deli na dva dela. Seizmogena globina potresov je bistveno večja v zahodnem delu z vrednostmi do okoli 29 km in ne preseže 20 km v vzhodnem delu Slovenije, kjer se potresi le redko pojavljajo pod globino 16 km. Prikazujemo celice, ki vsebujejo najmanj tri potrese. Celice s stranico dolžine 2,5 km odražajo podobno porazdelitev seizmogene globine, vendar je na območjih z manjšim številom potresov njena vrednost znotraj posamezne celice manj zanesljiva od vrednosti izračuna za večjo celico. Zaradi zgornjih dveh ugotovitev smo se odločili za prikaz rezultatov seizmogene globine le po celicah s stranico 5 km.

Na sliki 8 podajamo rezultate analize seizmogene globine po prelomnih potresnih izvoriščih za posamezna prelomna območja, ki jim skupno pripada 5928 potresov iz podkataloga za izbrano merilo. Največje vrednosti seizmogene globine so na daljših prelomnih območjih v severozahodnem in zahodnem delu Slovenije ter se nadaljujejo proti njenemu jugozahodnemu in deloma južnemu delu. Največja seizmogena globina pripada prelomnemu območju Vrhniškega preloma in je 20,5 km. Večja seizmogena globina na prelomnih območjih v skrajnem severovzhodnem in severnem delu Slovenije je manj zanesljiva zaradi večje oddaljenosti potresnih opazovalnic od žarišč potresov ter majhnega števila potresov v podkatalogu. Razmeroma majhne vrednosti 95. percentila globine, od 8,2 do 9,8 km, zasledimo na prelomnih območjih v skrajnem jugovzhodnem delu Slovenije, ki pripada Krški kotlini in njeni neposredni okolici. Z obarvano prekinjeno črto so prikazani prelomni potresni izvori z manj kot desetimi potresi v pripadajočem prelomnem območju. Prikazani so tudi prelomni potresni izvori brez zabeleženih potresov.

Razlika v globini žarišč potresov med zahodnim in vzhodnim delom Slovenije je dobro vidna tudi na enem izmed izrisanih globinskih prereзов, ki poteka v smeri jugozahod–severovzhod (slika 9). Za izris tega prereza smo uporabili instrumentalni katalog z upoštevanim merilom za izločanje potresov, nanj pa smo projicirali zgolj žarišča potresov, ki so oddaljena do 15 km od trase, v smeri prečno na prerez.

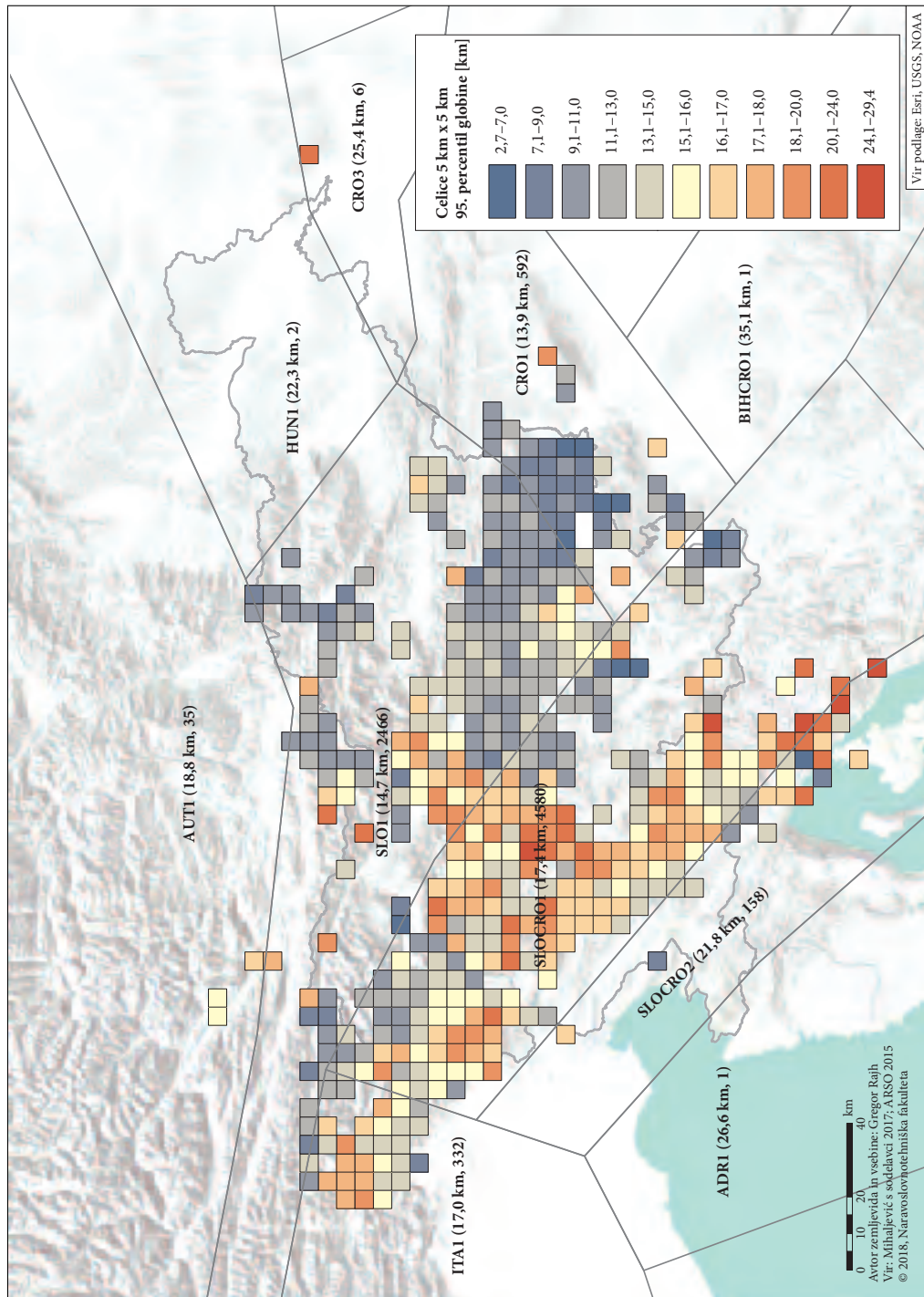
## 5 Sklep

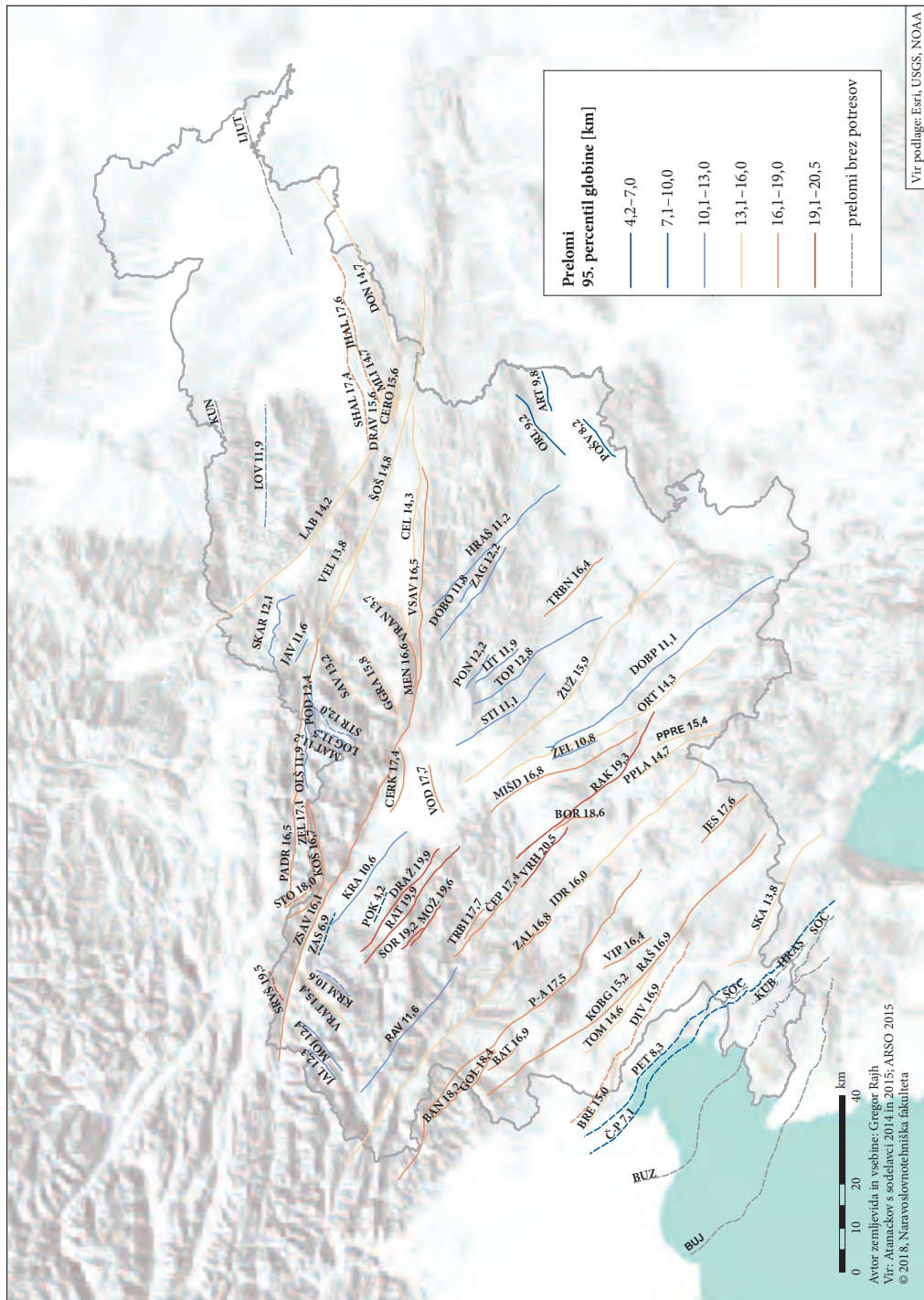
Potresov pogosto ne moremo enoznačno pripisati posameznim prelomom zaradi napak pri lociranju žarišč potresov in negotovosti pri opredeljevanju geometrije prelomov. Prostorska analiza ima zato ključno vlogo v določanju največje opažene magnitude potresa in seizmogene globine. Z orodji GIS in programskim jezikom *Python* smo jo izvedli na podlagi seizmotektonskih območij BSHAP (Mihačević s sodelavci 2017), prelomnih potresnih izvorišč (Atanackov s sodelavci 2014; 2015) in celic ter

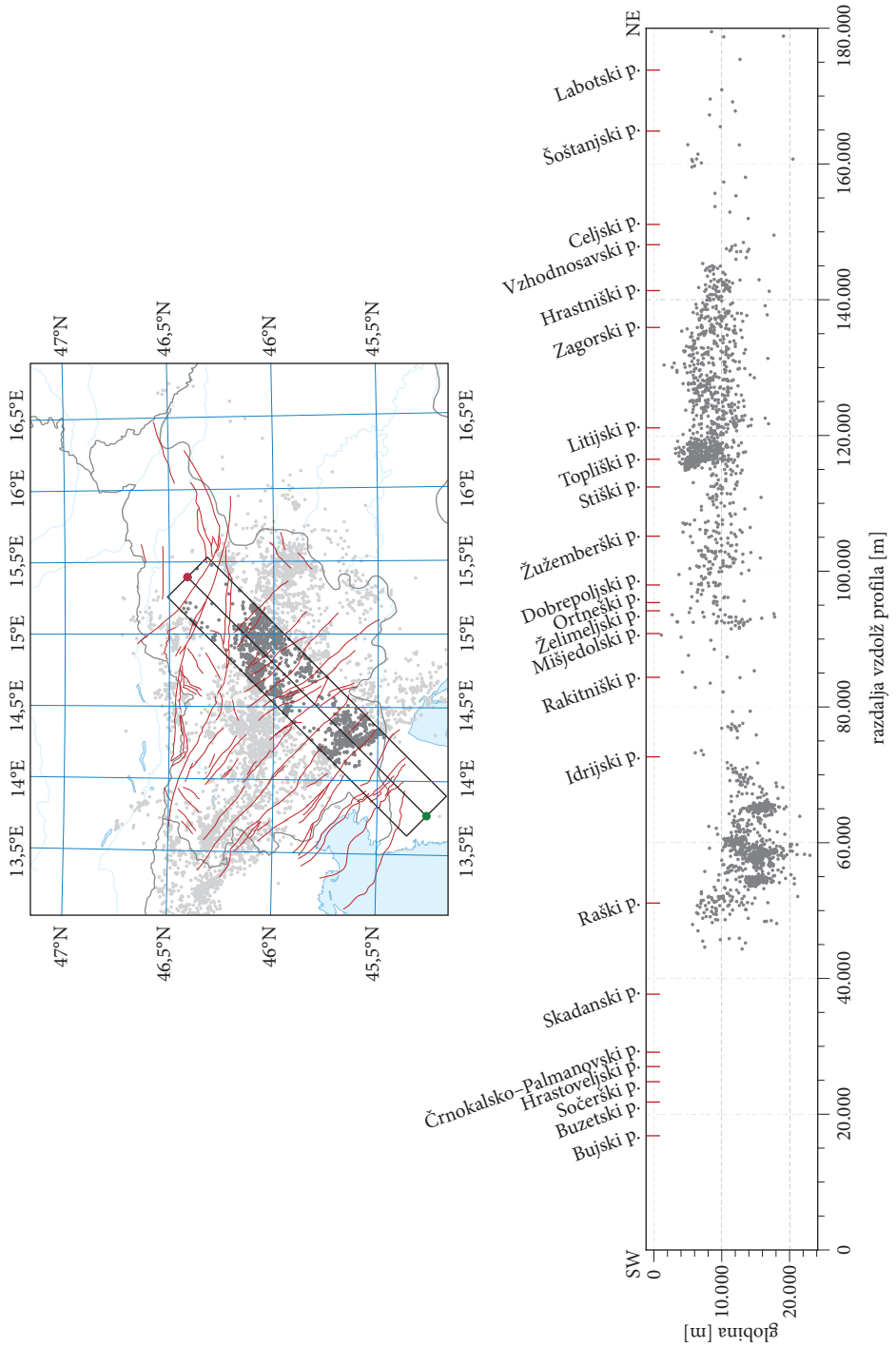
*Slika 7: Vrednost 95. percentila globine žarišč potresov (seizmogena globina) za seizmotektonska območja BSHAP (slika 3) in celice velikosti 5 km, izračunana na podlagi podkataloga za izbrano merilo. Prikazano je tudi število potresov znotraj posameznih seizmotektonskih območij. ► (str. 22)*

*Slika 8: Vrednost 95. percentila globine žarišč potresov (seizmogena globina), prikazana po prelomnih potresnih izvoriščih za posamezna prelomna območja (slika 4) in izračunana na podlagi podkataloga za izbrano merilo. ► (str. 23)*

*Slika 9: Globinski prerez žarišč potresov iz instrumentalnega kataloga z upoštevanjem izbranega merila za izločanje potresov. Potek prereza in vplivno območje sta prikazana na zemljevidu. ► (str. 24)*









dveh katalogov potresov (Katalog potresov ... 2014; 2015). Z opravljeno prostorsko analizo pretekle seizmičnosti smo uspešno opredelili dva ključna parametra za izdelavo seizmološkega modela prelomnih potresnih izvorov v ocenjevanju potresne nevarnosti v Sloveniji – največjo opaženo magnitudo potresa in seizmogeno globino. Ugotovljamo, da se največje magnitude potresov pojavljajo v zahodni in osrednji Sloveniji, globine potresov pa so v splošnem večje v zahodnem delu Slovenije.

## 6 Viri in literatura

- Atanackov, J., Bavec, M., Celarc, B., Jamšek Rupnik, P., Jež, J., Novak, M., Milanič, B. 2014: Seizmotektonska parametrizacija aktivnih prelomov Slovenije: 1. del. Geološki zavod Slovenije. Ljubljana.
- Atanackov, J., Bavec, M., Celarc, B., Jamšek Rupnik, P., Jež, J., Novak, M., Milanič, B. 2015: Seizmotektonska parametrizacija aktivnih prelomov Slovenije: 2. del. Geološki zavod Slovenije. Ljubljana.
- Bavec, M., Atanackov, J., Celarc, B., Hajdas, I., Jamšek Rupnik, P., Jež, J., Kastelic, V., Milanič, B., Novak, M., Skaberne, D., Žibret, G. 2013: Evidence of Idrija fault seismogenic activity during the Late Holocene including the 1511 Mm 6.8 earthquake. *Seismic Hazard, Critical Facilities and Slow Active Faults: Proceedings of the 4th International INQUA Meeting on Paleoseismology, Active Tectonics and Archeoseismology*. Aachen.
- Fitzko, F., Suhadolc, P., Aoudia, A., Panza, G. F. 2005: Constraints on the location and mechanism of the 1511 Western-Slovenia earthquake from active tectonics and modeling of macroseismic data. *Tectonophysics* 404, 1-2. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.05.003>
- Katalog potresov za Slovenijo in okolico od leta 456 do leta 2013. Agencija RS za okolje. Ljubljana, 2014.
- Katalog potresov za Slovenijo in bližnjo okolico od leta 2004 do leta 2014. Agencija RS za okolje. Ljubljana, 2015.
- McGuire, R. K. 2004: *Seismic Hazard and Risk Analysis*. Oakland.
- Mihaljević, J., Zupančič, P., Kuka, N., Kaluđerović, N., Koči, R., Markušić, S., Šalić, R., Dushi, E., Begu, E., Duni, L., Živčić, M., Kovačević, S., Ivančić, I., Kovačević, V., Milutinović, Z., Vakilinezhad, M., Fiket, T., Gülerce, Z. 2017: BSHAP seismic source characterization models for the Western Balkan region. *Bulletin of Earthquake Engineering* 15-10. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0143-5>
- Miller, C. K., Furlong, K. P. 1988: Thermal-mechanical controls on seismicity depth distributions in the San Andreas fault zone. *Geophysical Research Letters* 15-12. DOI: <https://doi.org/10.1029/GL015i012p01429>
- Rajh, G., Zupančič, P., Živčić, M., Gosar, A., Čarman, M. 2017: Analiza največjih magnitud in globin žarišč potresov v Sloveniji za namen ocenjevanja potresne nevarnosti. *Raziskave s področja geodezije in geofizike* 2016. Ljubljana.
- Reiter, L. 1991: *Earthquake Hazard Analysis: Issues and Insights*. New York.
- Wells, D. L., Coppersmith, K. J. 1994: New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America* 84-4.
- Williams, C. F. 1996: Temperature and the seismic/aseismic transition: Observations from the 1992 Landers earthquake. *Geophysical Research Letters* 23-16. DOI: <https://doi.org/10.1029/96GL02066>



# VPLIV KAMNINSKE PODLAGE NA IZOBLIKOVANOST POVRŠJA V POREČJU LAHOMNICE

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

ZRC SAZU, Geografski inštitut Antona Melika

mauro@zrc-sazu.si, drago@zrc-sazu.si

UDK: 911.2:551.43:552(497.43)

## IZVLEČEK

### **Vpliv kamninske podlage na izoblikovanost površja v porečju Lahomnice**

Izoblikovanost površja največ prispeva k raznolikosti slovenskih pokrajin, za katere je značilna tudi velika pestrost reliefnih tipov in oblik. Med dejavniki, ki najbolj vplivajo na izoblikovanost površja, sta predvsem kamninska sestava in tektonska zgradba. Navezanost površja na geološke razmere je v marsikateri pokrajini očitna že na pogled, kvantitativne ocene njune povezanosti pa so redke.

V prispevku smo za porečje Lahomnice v Posavskem hribovju na temelju lidarskega digitalnega modela višin izračunali deset morfolometričnih kazalnikov in digitalizirali del geološke karte Kozjanskega. Z geografskim informacijskim sistemom in statističnimi metodami smo kvantitativno določili stopnjo povezanosti med reliefnimi in različnimi geološkimi kazalniki v porečju ter ugotavljali razlike med porečjem in celo Slovenijo.

## KLJUČNE BESEDE

geografija, površje, morfolometrični kazalnik, geologija, kamninska sestava, Lahomnica, Posavsko hribovje, Slovenija

## ABSTRACT

### **The influence of the rock substrate on surface shape in the Lahomnica basin**

The surface shape contributes the most to the diversity of Slovenian landscapes, which are characterized by a wide variety of relief types and landforms. Among the factors that have the greatest influence on the formation of the surface are the rock types and the tectonic structure. The attachment of the surface to geological conditions is obvious in many landscapes, but the quantitative estimates of their connection are rare.

In the article, ten morphometric indicators were calculated for the Lahomnica River basin in the Sava Hills on the basis of the Lidar digital elevation model and digitized part of the geological map of Kozjansko. With the geographical information system and statistical methods we quantified the degree of connection between the relief and various geological indicators in the basin, as well as the differences between the river basin and entire Slovenia.

## KEY WORDS

geography, surface, morphometric indicator, geology, rock types, Lahomnica River, Sava Hills, Slovenia

## 1 Uvod

Za Slovenijo je značilna velika pestrost reliefnih tipov in oblik, izoblikovanost površja pa je močno odvisna od kamninske sestave in tektonske zgradbe. Kamninska sestava spada med najpomembnejše dejavnike oblikovanja reliefa, saj so različne kamnine različno odporne zoper delovanje zunanjih procesov. Tudi preperevanje se v njih razlikuje glede na vrsto, izdatnost in hitrost. Zaradi večkratnega gubanja in narivanja so geološke razmere še bolj pestre. Zunanji procesi si v tej pestrosti izbirajo različne načine delovanja, lažje in hitreje v manj odpornih kamninah, težje in počasneje v odpornejših kamninah. Te procese označujemo kot izbirne oziroma selektivne (Ilešič 1978).

Izpostavljanje reliefnih razlik, ki so posledica različne kamninske sestave, je sicer pogosto, vendar praviloma le redko presega opisno raven. Šele razvoj računalniške tehnike, geografskih informacijskih sistemov in digitalnih modelov višin v zadnjih dveh desetletjih omogoča pripravo obsežne, kvantitativno zasnovane raziskave.

Nedavna računalniško zasnovana raziskava povezanosti med kamninami in izoblikovanostjo površja je zajela celotno Slovenijo (Hrvatin 2016). Uporabljen digitalni sloj kamnin je temeljil na podatkih Osnovne geološke karte 1 : 100.000 Geološkega zavoda Slovenije, dvajset morfometričnih kazalnikov pa je bilo izračunanih na temelju digitalnega modela višin z ločljivostjo 25 m Geodetske uprave Republike Slovenije. Povezanost je bila izračunana iz pogostnostne porazdelitve skoraj 32,5 milijona celic v slučajnostnih preglednicah s petindvajsetimi vrstami kamnin in sedmimi kvantilnimi razredi dvajsetih morfometričnih kazalnikov. Izračunane vrednosti  $\chi^2$  so v vseh primerih bistveno presegle mejne oziroma teoretične vrednosti, kar pomeni, da je statistična povezanost med kamninami in izoblikovanostjo površja statistično zelo zanesljiva.

V okviru te raziskave pa nas je zanimalo, kakšna je povezanost med kamninami in površjem, če upoštevamo manjše območje in uporabimo natančnejše geološke in morfometrične podatke.

## 2 Porečje Lahomnice

Za testno območje smo izbrali porečje Lahomnice, ki leži v Posavskem hribovju vzhodno od Laškega (slika 1). Meri skoraj natančno 35 km<sup>2</sup> in je reliefno močno razgibano. Nadmorske višine kolebajo od 213 m na sotočju Lahomnice s Savinjo do 834 metrov, kolikor meri Tolsti vrh, ki je najvišja in hkrati skrajna severna točka porečja. Prevladuje rečno-denucacijski relief. Na pobočjih se zaradi spremenljivega naklona in različne kamninske podlage spiranje preperinskega gradiva prepleta s polzenjem in naglimi zdrsi. Ob dolgotrajnih in močnejših padavinah so zlasti območja, ki so zgrajena iz laporovca, izpostavljena usadom (Gabrovec 1990). Radinja je ugotovil, da so zdrsi najpogostejši v bolj razčlenjenem razvodnem in povrhnem svetu ter na pobočjih, kjer so v podlagi kamnine, ki ob preperevanju dajejo največ peščeno-glinastega gradiva. Hkrati je pomembna tudi nizka stopnja diagenoze terciarnih plasti, ki se kaže v manjši nosilnosti ter spremenljivi odpornosti in prepustnosti (Radinja 1974).

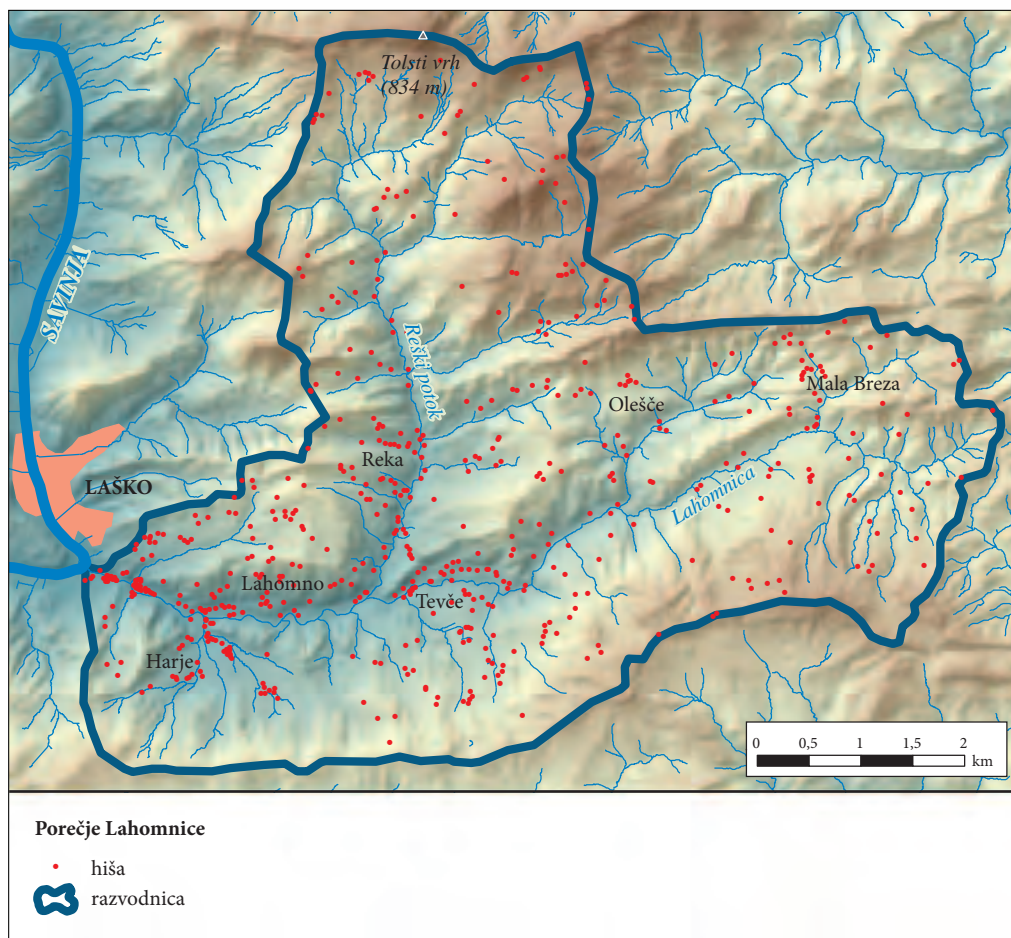
Lahomnica je kratek in šibek potok, ki pa ima razmeroma velik strmec. Povprečni pretok je ocenjen na 0,25 m<sup>3</sup>/s, minimalni na 0,1 m<sup>3</sup>/s, stoletni maksimalni pa na 80 m<sup>3</sup>/s (Kos 2015). Poleg Lahomnice sestavljata rečje še njena desna pritoka Laški in Rečki potok ter levi pritok Stopščica. Vsi našeti vodotoki so v preteklosti poganjali enaindvajset mlinov in tri žage (Gobec Vidali 2007).

Za pokrajino so značilna številna razložena naselja in zaselki, v katerih po podatkih evidence hišnih števil Geodetske uprave Republike Slovenije iz leta 2014 živi okoli 2070 prebivalcev. Več kot 200 prebivalcev imajo le naselja Olešče, Lahomno in Mala Breza, od 100 do 200 pa Tevče, Reka in Harje.

V širšem slovenskem prostoru je porečje Lahomnice najbolj znano po slikovitem slapu Lahomniški sopot (Ramovš 1983; Majcen in Golež 2010) ter po občasnih silovitih neurjih, ki so povzročila največ škode leta 1954 in 1989. Močnemu deževju v maju in na začetku junija 1954 so sledile hude poplave ob spodnjem toku Savinje ter ob vseh njenih pritokih (Kolbezen 1993). Lahomnica je močno poško-

dovala več mlinov in po mnenju Gobec Vidalijeve (2007) so ravno te poškodbe odločilno vplivale na postopen propad mlinarstva v celotnem porečju. Še hujše razdejanje so povzročila neurja julija in avgusta 1989 (slika 2). Najvišji pretok Lahomnice so ocenili na  $170 \text{ m}^3/\text{s}$ , poplavne hudourniške vode pa so uničile vse, kar jim je bilo na poti (Kolbezen 1990). Močno deževje je hkrati sprožilo tudi številne usade in zemeljske plazove. Po podatkih delavcev, ki so popisovali škodo, jih je bilo nad tisoč (Gabrovec 1990; Gabrovec in Brečko 1990). V tem tisočletju je Lahomnica poplavljala avgusta 2005, septembra 2010, novembra 2012 in septembra 2014 (Jurgelj 2016).

Porečje Lahomnice je kamninsko izredno pestro, saj se na majhnem ozemlju pojavlja kar 21 litostratigrafskih enot (slika 3), ki smo jih povzeli po geološki karti Kozjanskega v merilu 1 : 50.000 (Aničič, Ogorelec in Dozet 2004). Tretjino porečja pokriva srednjemiocenski laški lapor, petina pripada oligocenskim in miocenskim govškim plastem peska, peščenjaka in laporovca, desetino površin pa zavzemajo karbonski in permški glinavci in meljevci ter kremenovi peščenjaki in konglomerati. Nekoliko manjše površine zavzemajo še srednjemiocenski apnenčev peščenjak, srednjetriasi skrilavi glinavec ter srednjemiocenski kalkarenit in litotamnijski apnenec (Aničič s sodelavci 2002). Plasti premoga se pojavljajo redko in so jih do leta 1936 izkoriščali samo v Trobnem Dolu (Gobec Vidali 2007).



Slika 1: Porečje Lahomnice.

S tektonskega vidika obsega obravnavano območje del Posavskih gub (slika 4). Gube so sestavljene iz antiklinalno izbočenih kamninskih plasti ter iz sinklinalno usločenih plasti, v reliefu pa se kažejo kot nizi podolžnih slemen in vmesnih podolij, ki se v vzporedniški smeri vlečejo od zahoda proti vzhodu. V porečju Lahonice so od severa proti jugu razvrščene Trojanska antiklinala, Laška sinklinala, Rudniška antiklinala in Planinska sinklinala (Buser 1979).

Testno območje porečja Lahomnice je torej geološko izredno pestro in zato zelo primerno za ugotavljanje navezanosti površja na geološke razmere.

### 3 Metode dela

Geografski informacijski sistem omogoča, da na temelju digitalnega modela višin ugotavljamo geometrične lastnosti ploskev, iz katerih je sestavljeno zemeljsko površje. Hkrati omogoča tudi analizo prostorskega spreminjanja njihovih geometričnih lastnosti, kar predstavlja pomembno objektivno kvantitativno metodo pri preučevanju izoblikovanosti površja (Perko 2002). Podatkovne sloje, ki so izračunani na temelju digitalnega modela višin in predstavljajo različne vidike zemeljskega površja, imenujemo morfometrični kazalniki. Več preglednih predstavitev morfometričnih kazalnikov je na voljo v literaturi (Moore, Grayson in Ladson 1991; Wilson in Gallant 2000; Perko 2007; Pike, Evans in Hengl 2009; Wilson 2012; Hrvatin 2016; Popit s sodelavci 2016).

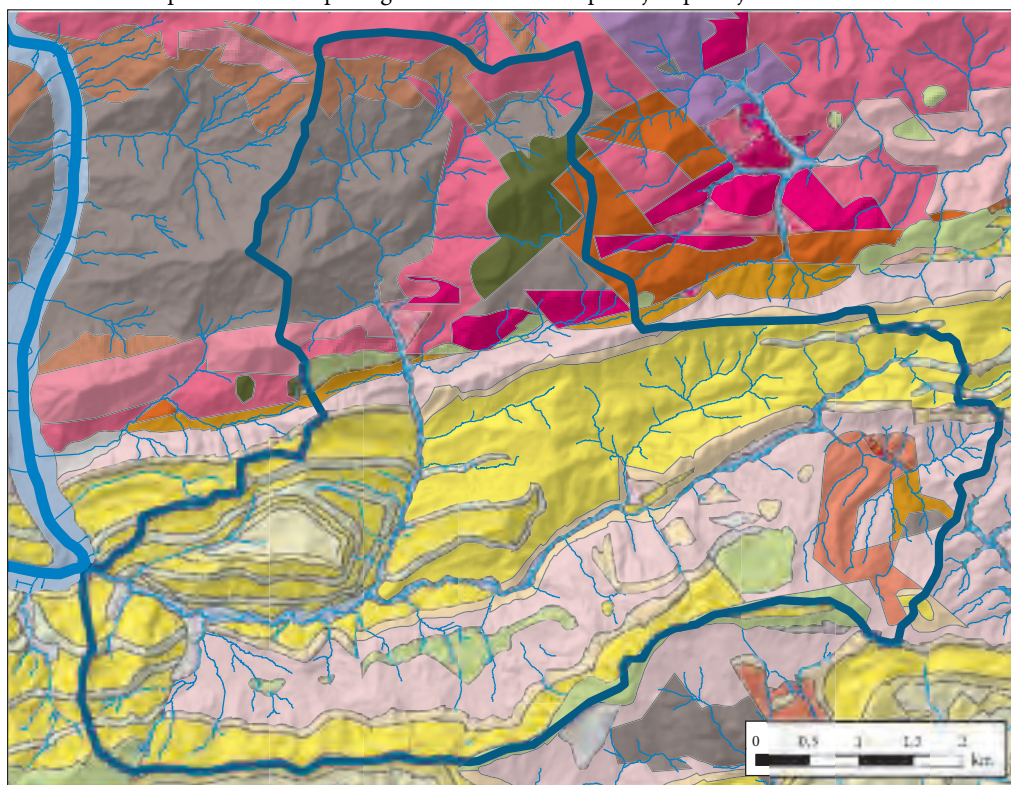
V raziskavi smo upoštevali deset morfometričnih kazalnikov, ki temeljijo na lidarskem digitalnem modelu višin z ločljivostjo enega metra. Pripravili smo jih z različnimi geoinformacijskimi orodji v okviru programa ArcGIS. Pri njihovi izbiri smo pazili, da kar najboljše zajemajo in predstavljajo izoblikovanost


























Slika 2: Posledice hudourniških poplav Lahomnice poleti 1989 pri Marija Gradcu.

Slika 3: Kamninska sestava porečja Lahomnice (vir: Aničić, Ogorelec in Dozet 2004). ►

## Vpliv kamninske podlage na izoblikovanost površja v porečju Lahomnice



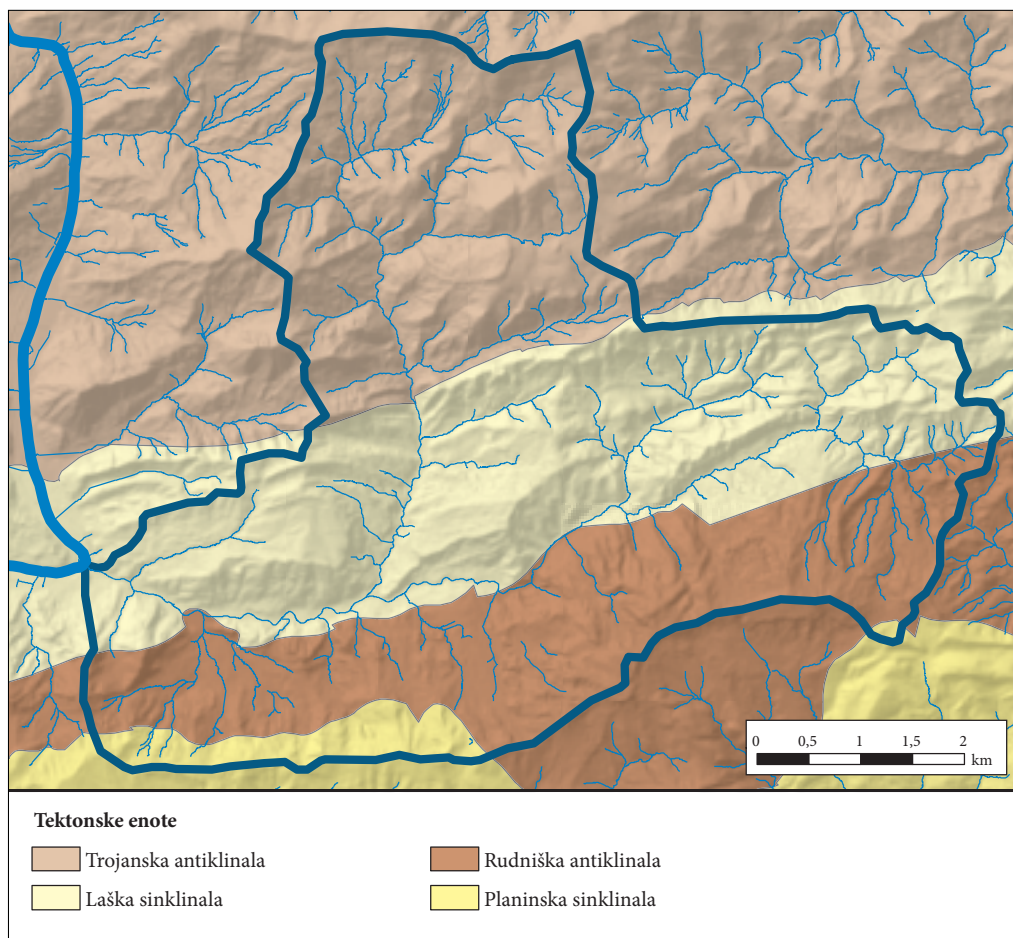
### Litostratigrafske enote

- |   |   |   |   |
|---|---|---|---|
|    | kvartarni prod, pesek, glina  |    | oligocenski andezit, dacit in riolit  |
|  | kvartarni pobočni grušč   |  | oligocenske psevdosoteške plasti (lapor, pesek, glina, prod in peščenjak)           |
|  | kvartarni drobir  |  | zgorjnjetriasni masivni apnec   |
|  | zgornjemiocenski lapor, lapornati apnec, pesek in peščenjak             |  | zgorjnjetriasni masivni dolomit   |
|  | zgornjemiocenski apnenčevo-kremenov konglomerat in peščenjak            |  | srednjetriasni keratofir in keratofirski tuf  |
|  | srednjemiocenski laški lapor  |  | srednjetriasni diabaz in diabazni tuf   |
|  | srednjemiocenski kalkarenit ter lapornati in peščeni apnec              |  | srednjetriasni skrilavi glinavec, apnec, kalkarenit z rožencem in peščenjak         |
|  | srednjemiocenski litotamnijski apnec                                    |  | srednjetriasni masivni dolomit in dolomitni laporvec                                |
|  | srednjemiocenski andezitni in dacitni tuf                               |  | spodnjetriasni dolomit, peščenjak, meljavec, glinavec, apnec in laporvec            |
|  | srednjemiocenski apnenčev peščenjak, konglomerat in litotamnijski apnec |  | srednjepermski peščenjak, glinavec, meljavec in konglomerat                         |
|  | oligocenske in miocenske govške plasti (pesek, peščenjak in laporvec)   |  | karbonski in permski skrilavi glinavec, meljavec, kremenov peščenjak in konglomerat |
|  | oligocenski andezitni in dacitni tuf                                    |   |   |

površja ter da se medsebojno ne podvajajo. Nekatere kazalnike, na primer naklon in različne ukrivljenosti površja, smo izračunali neposredno v okvirih ustreznih programskih modulov, ostale morfometrične kazalnike, na primer topografski pozicijski indeks, pa posredno prek dodatnih, vmesnih podatkovnih slojev. Ker je za reliefno in pokrajinsko raznolikost pomembno prostorsko spreminjanje geometričnih lastnosti ploskev, smo vključili tudi pet kazalnikov, ki predstavljajo standardni odklon temeljnih morfometričnih kazalnikov: višine, naklona, dveh različnih ukrivljenosti površja ter topografskega pozicijskega indeksa.

Upoštevali smo naslednje morfometrične kazalnike:

- višina površja,
- standardni odklon višine površja (slika 5),
- naklon površja,
- standardni odklon naklona površja,
- navpična ukrivljenost površja,
- standardni odklon navpične ukrivljenosti površja,
- vodoravna ukrivljenost površja,



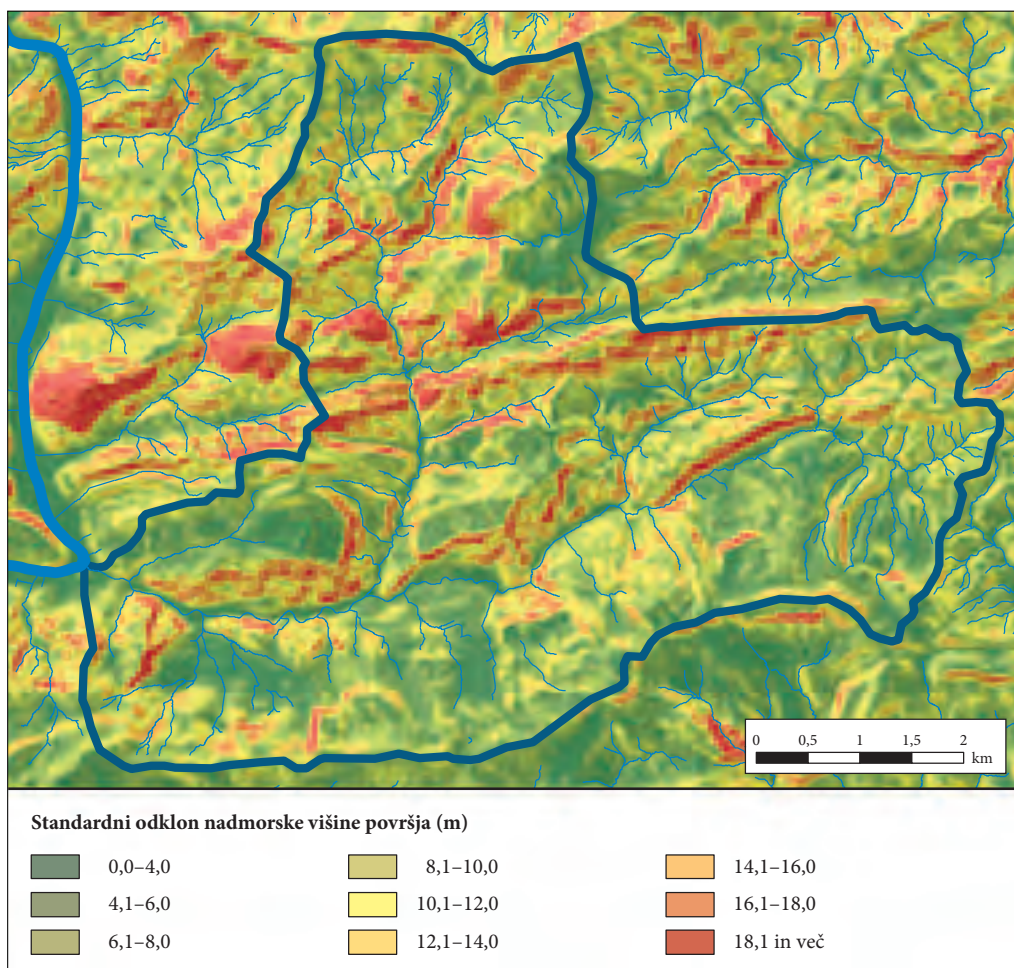
Slika 4: Tektonska zgradba porečja Lahomnice (vir: Buser 1979).



- standardni odklon vodoravne ukrivljenosti površja,
- topografski pozicijski indeks in
- standardni odklon topografskega pozicijskega indeksa.

Različni izračuni povezanosti so najboljši način preučevanja pokrajinskih odnosov. Povezanost med pojavi, ki so izraženi številčno, običajno ugotavljamo z linearno korelacijo in krivuljčnimi korelacijami, ki temeljijo na metodi najmanjših kvadratov. Za določanje povezanosti med pojavoma, od katerih ima prvi opisne in drugi številčne podatke, uporabimo koeficiente povezanosti na temelju korelacijskega razmerja. Povezanost med pojavi, ki so izraženi zgolj opisno, pa ugotavljamo s pomočjo slučajnostnih preglednic ali kontingenčnih tabel. Te nam omogočajo izračunavanje Cramerjevih koeficientov, temelj za izračun pa so frekvence, razvrščene po razredih (Blejec 1976; Perko 2001; Sagadin 2003; Kožuh 2013).

Stopnjo povezanosti med vrstami kamnin in morfometričnimi kazalniki ter stopnjo povezanosti med tektonskimi enotami in morfometričnimi kazalniki smo zato določali s Cramerjevim koeficientom oziroma koeficientom kontingenčne korelacije. Pri vsaki slučajnostni preglednici smo najprej izračunali  $\chi^2$ , s pomočjo katerega smo ugotovili le verjetnost povezanosti. Za tem smo iz njega izračunali še



Slika 5: Morfometrični kazalnik standardni odklon višine površja v porečju Lahomnice.

Cramerjev koeficient, ki kaže na stopnjo povezanosti med obema pojavoma. Večja vrednost koeficienta pomeni večjo povezanost, statistična pomembnost koeficientov povezanosti pa je odvisna tudi od števila enot, ki smo jih upoštevali pri izračunu (Perko 2001).

Za ugotavljanje stopnje povezanosti med kvantitativnimi kamninskimi kazalniki in morfometričnimi sloji smo uporabili Pearsonov koeficient korelacije, ki je najpogosteje uporabljena mera linearne povezanosti dveh številskih spremenljivk. Z njim ugotovimo, ali linearna povezanost med spremenljivkama sploh obstaja, hkrati pa določimo, kako močna je njuna linearna povezanost. Vrednosti koeficienta kolebajo med  $-1$  in  $1$ . Predznak kaže na smer povezave, ki je pozitivna, če z naraščanjem vrednosti prvega pojava naraščajo vrednosti drugega pojava, in negativna, če z naraščanjem vrednosti prvega pojava vrednosti drugega pojava padajo. Posebej je treba poudariti, da Pearsonov koeficient korelacije kaže samo na povezanost dveh spremenljivk, ne pa tudi na vpliv ene spremenljivke na drugo (Sagadin 2003; Kožuh 2013).

## 4 Rezultati

Povezanost med kamninami in površjem oziroma morfometričnimi kazalniki smo najprej določali na temelju slučajnostnih preglednic, v katerih so kamnine nastopale kot imenske oziroma nominalne spremenljivke, morfometrični kazalniki pa so bili razdeljeni na kvantilne razrede. Povezanost izražajo Cramerjevi koeficienti, ki smo jih izračunali iz pogostnostne porazdelitve 34.951.538 celic v slučajnostnih preglednicah z enaindvajsetimi litostratigrafskimi enotami in sedmimi kvantilnimi razredi desetih morfometričnih kazalnikov (preglednica 1). Izračunane vrednosti  $\chi^2$  so v vseh primerih bistveno presegale mejne oziroma teoretične vrednosti, kar pomeni, da je statistična povezanost med kamninami in izoblikovanostjo površja statistično zelo zanesljiva. Geometrična sredina Cramerjevih koeficientov je bila 0,1400. Najvišje vrednosti so dosegli morfometrični kazalniki višina površja (0,3370), standardni odklon višine površja (0,1935) in standardni odklon vodoravne ukrivljenosti površja (0,1711), najnižje vrednosti pa vodoravna ukrivljenost površja (0,0667), navpična ukrivljenost površja (0,0683) in nekoliko presenetljivo naklon površja (0,1249).

Ker so bile izračunane vrednosti Cramerjevih koeficientov nižje od pričakovanj, smo postopek še enkrat ponovili, pred tem pa smo prvotnih enaindvajset litostratigrafskih enot smiselno združili v enajst skupin kamnin. Tudi v tem primeru so izračunane vrednosti  $\chi^2$  v vseh primerih kazale na visoko statistično zanesljivost povezanosti med kamninami in površjem, vrednosti Cramerjevih koeficientov pa so bile še nižje kot v prvem primeru, saj je njihova geometrična sredina dosegla samo 0,1094. Najvišje vrednosti so dosegli morfometrični kazalniki višina površja (0,2936), standardni odklon višine površja (0,1471) in standardni odklon naklona površja (0,1228), najnižje vrednosti pa so dosegli navpična ukrivljenost površja (0,0550), vodoravna ukrivljenost površja (0,0551) in standardni odklon topografskega pozicijskega indeksa (0,0934).

Na koncu tega sklopa smo še ugotavljali, kolikšna je povezanost morfometričnih kazalnikov s štiri tektonskimi enotami, ki se pojavljajo v porečju Lahomnice. Geometrična sredina izračunanih Cramerjevih koeficientov je bila skromnih 0,1111. Najvišje vrednosti so dosegli morfometrični kazalniki višina površja (0,2936), standardni odklon višine površja (0,1471) in standardni odklon naklona površja (0,1228), najnižje vrednosti pa navpična ukrivljenost površja (0,0550), vodoravna ukrivljenost površja (0,0551) in standardni odklon topografskega pozicijskega indeksa (0,0934).

V podobni raziskavi, ki je zajela celotno Slovenijo (Hrvatin 2016), so bile vse izračunane vrednosti Cramerjevih koeficientov bistveno višje, njihova povprečna vrednost oziroma geometrična sredina pa je bila 0,2731. Najvišji Cramerjev koeficient povezanosti kamninske sestave in morfometričnih kazalnikov je bil izračunan pri standardnem odklonu višine površja (0,3671), ki sta mu sledila višina površja (0,3443) in naklon površja (0,3408), najnižji koeficient pa je bil ugotovljen pri višinskem razmerju površja (0,1853), ki sta mu sledila navpična ukrivljenost površja (0,2053) in ukrivljenost površja (0,2174).

Preglednica 1: Cramerjevi koeficienti povezanosti med desetimi morfometričnimi kazalniki ter 21 litostratigrafskimi enotami, 11 skupinami kamnin in 4 enotami tektonske zgradbe.

	21 litostratigrafskih enot	11 skupin kamin	4 enote tektonske zgradbe
višina površja	0,3370	0,2936	0,3107
standardni odklon višine površja	0,1935	0,1471	0,1691
naklon površja	0,1249	0,1002	0,1038
standardni odklon naklona površja	0,1523	0,1228	0,1047
navpična ukrivljenost površja	0,0683	0,0550	0,0672
standardni odklon navpične ukrivljenosti površja	0,1690	0,1138	0,1140
vodoravna ukrivljenost površja	0,0667	0,0551	0,0680
standardni odklon vodoravne ukrivljenosti površja	0,1711	0,1193	0,1210
topografski pozicijski indeks	0,1349	0,1208	0,0760
standardni odklon topografskega pozicijskega indeksa	0,1310	0,0934	0,1044

V nadaljevanju nas je zanimalo, kolikšne stopnje povezanosti lahko pričakujemo, če za posamezne vrste kamnin vnesemo ocenjene vrednosti izbranih kvantitativnih kamninskih kazalnikov, pri morfometričnih kazalnikih pa upoštevamo izvirne vrednosti. V ta namen smo pripravili nabor treh kvantitativnih kamninskih kazalnikov: prostorninske mase, koeficienta prepustnosti in tlačne trdnosti ter jih ustrezno ocenili.

Na temelju ocen izbranih kamninskih kazalnikov smo pripravili tri nove digitalne sloje geografskega informacijskega sistema. V programskem paketu Idrisi smo z ukazom »regres« izračunali Pearsonove korelacijske koeficiente, s katerimi smo v tem primeru merili povezanost kvantitativnih kamninskih kazalnikov in morfometričnih kazalnikov (preglednica 2).

V povprečju smo najvišje Pearsonove korelacijske koeficiente zabeležili ob določanju povezanosti med morfometričnimi kazalniki in tlačno trdnostjo kamnin (geometrična sredina 0,0774). Vrednosti kobilejo od 0,0285 (standardni odklon vodoravne ukrivljenosti površja) do 0,3908 (višina površja). Vrednosti, ki presegajo vsaj 0,1, smo zabeležili pri višini površja, standardnem odklonu višine površja, topografskem pozicijskem indeksu, standardnem odklonu topografskega pozicijskega indeksa in naklonu površja.

Nekoliko nižje Pearsonove korelacijske koeficiente smo v povprečju zabeležili ob določanju povezanosti med morfometričnimi kazalniki in prostorninsko maso kamnin (geometrična sredina 0,0602). Vrednosti so kobilele od 0,0172 (vodoravna ukrivljenost površja) do 0,1951 (standardni odklon višine površja). Vrednosti, ki presegajo vsaj 0,1, smo zabeležili pri standardnem odklonu višine površja, višini površja, standardnem odklonu topografskega pozicijskega indeksa, naklonu površja in topografskem pozicijskem indeksu.

Najnižje Pearsonove korelacijske koeficiente smo v povprečju zabeležili ob določanju povezanosti med morfometričnimi kazalniki in koeficientom prepustnosti kamnin (geometrična sredina 0,0330). Vrednosti so kobilele od 0,0057 (navpična ukrivljenost površja) do 0,3195 (višina površja). Vrednosti, ki presegajo vsaj 0,1, smo zabeležili samo pri višini površja in standardnem odklonu višine površja.

Tudi tokrat so bile v raziskavi, ki je zajela celotno Slovenijo (Hrvatini 2016), vse izračunane vrednosti Pearsonovih korelacijskih koeficientov bistveno višje. Geometrična sredina korelacijskih koeficientov med morfometričnimi kazalniki in prostorninsko maso kamnin ter med morfometričnimi

*Preglednica 2: Pearsonovi korelacijski koeficienti med morfometričnimi kazalniki in kvantitativnimi kamninskimi kazalniki.*

	prostorninska masa	koeficient prepustnosti	tlačna trdnost
višina površja	0,1743	0,3195	0,3908
standardni odklon višine površja	0,1951	0,1228	0,1866
naklon površja	0,1091	0,0626	0,1200
standardni odklon naklona površja	0,0464	-0,0651	0,0458
navpična ukrivljenost površja	0,0214	0,0057	0,0367
standardni odklon navpične ukrivljenosti površja	0,0295	-0,0176	0,0345
vodoravna ukrivljenost površja	0,0172	0,0067	0,0312
standardni odklon vodoravne ukrivljenosti površja	0,0269	-0,0083	0,0285
topografski pozicijski indeks	0,1004	0,0444	0,1357
standardni odklon topografskega pozicijskega indeksa	0,1233	0,0393	0,1258

kazalniki in tlačno trdnostjo kamnin je bila v obeh primerih 0,3194, geometrična sredina korelacijskih koeficientov med morfometričnimi kazalniki in koeficientom prepustnosti kamnin pa je dosegla 0,2125.

## 5 Sklep

Lidarski digitalni model višin z resolucijo 1 m je za celotno Slovenijo dostopen od septembra 2015. Z izredno natančnostjo postavlja nove izzive za bodoče raziskovanje. Največja težava pri tem je prevelika množica podatkov, ki jih tudi sodobni računalniki s kakovostno programsko opremo težko obdelujejo. V naši raziskavi smo morali na primer izračune določenih morfometričnih kazalnikov opustiti, ker jim računalnik in programska oprema nista bila kos. Čeprav smo kot raziskovalno območje izbrali razmeroma majhen pravokotnik s stranicama 8 in 10 km, je to pomenilo, da ob vsakokratnem izračunu računalnik obdeluje najmanj 80 milijonov podatkov.

Morfometrični podatki, ki temeljijo na digitalnem modelu višin so bistveno bolj natančni od preostalih podatkovnih slojev. Tako je tudi v primeru slojev kamninske sestave in tektonske zgradbe. Za večji del države je še vedno najboljši vir podatkov Osnovna geološka karta. Kamninska sestava in tektonska zgradba določenih območij sta le redko podrobneje preučeni. Med redke izjeme prištevamo Kras (Jurkovšek s sodelavci 1996; Jurkovšek 2008), Kozjansko (Aničič, Ogorelec in Dozet 2004) in Idrijsko-Cerkljansko hribovje (Mlakar in Čar 2009).

Razmeroma skromni Cramerjevi koeficienti in Pearsonovi korelacijski koeficienti povezanosti kamnin in površja so do določene mere morda posledica neenake kakovosti obravnavanih podatkov. Vendar je v primeru naše raziskave pomembnejše, da so bili podatki izračunani na temelju velike množice podatkov in da so prav vsi izbrani morfometrični kazalniki pokazali statistično pomembno povezanost s kamninsko sestavo.

Primerjava geometričnih sredin koeficientov povezanosti morfometričnih in litoloških kazalnikov med Slovenijo z večjo površino in manj natančnimi reliefnimi podatki ter porečjem Lahomnice z manjšo površino in bolj natančnimi reliefnimi podatki pokaže, da je povezanost na ravni Slovenije vedno večja od povezanosti na ravni porečja Lahomnice: med morfometričnimi kazalniki in kamninami je dvakrat tolikšna, med morfometričnimi kazalniki in tlačno trdnostjo kamnin štirikrat tolikšna, med

morfometričnimi kazalniki in prostorninsko maso kamnin več kot petkrat tolikšna, med morfometričnimi kazalniki in koeficientom prepustnosti kamnin pa celo več kot šestkrat tolikšna.

Da natančnejši podatki ne prinesejo nujno boljših rezultatov, je pokazala tudi primerjava 100-metrskega in 25-metrskega digitalnega modela višin Slovenije (Hrvat in Perko 2005).

Slovenija ne spada med dežele, kjer je preučevanje razmerja med kamninsko sestavo in izoblikovanostjo površja prav enostavno. Zaradi lege ob stiku tektonskih plošč so kamnine marsikje pretрте, razlomljene, nagubane in narinjene, zato je vpliv kamninske sestave na izoblikovanost površja marsikje manj izrazit in zaradi tega težje prepoznaven. Poleg tega so kamnine zelo razdrobljene na manjše površine, medtem ko bi bilo zaželeno, da vsaka kamnina zaseda dovolj veliko ozemlje. Dodaten močnejši dejavnik so izrazito neenaki deleži kamnin, pri čemer posebej izstopata nizka deleža magmatskih in metamorfnih kamnin.

V prihodnjih raziskavah povezanosti kamninske sestave in površja bi bilo smiselno razvijati različne kvantitativne metode, na primer računalniško simuliranje, analize v okviru geografskega informacijskega sistema, terensko delo pa povezati z različnimi kvantitativnimi meritvami na terenu in v laboratoriju. Koristno bi bilo preveriti uporabnost sistemov za inženirsko-geološko oziroma geomehansko klasifikacijo kamnin (Pantelidis 2009). Za začetek se zdi morda najbolj primeren preizkus geološkega trdnostnega indeksa (*Geological Strength Index*), ki sta ga razvila Marinis in Hoek (2000).

*ZAHVALA: Prispevek temelji na raziskovalnem programu Geografija Slovenije (P6-0101), ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, in raziskovalnem projektu Pokrajinska raznolikost in vroče točke Slovenije (L6-6852), ki sta ga sofinancirali Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije ter Slovenska akademija znanosti in umetnosti.*

## 6 Viri in literatura

- Aničič, B., Ogorelec, B., Dozet, S. 2004: Geološka karta Kozjanskega 1 : 50.000. Geološki zavod Slovenije. Ljubljana.
- Aničič, B., Ogorelec, B., Kralj, P., Mišič, M. 2002: Litološke značilnosti terciarnih plasti na Kozjanskem. *Geologija* 45-1. DOI: <https://doi.org/10.5474/geologija.2002.017>
- Blejec, M. 1976: Statistične metode za ekonomiste. Ljubljana.
- Buser, S. 1979: Tolmač lista Celje. Osnovna geološka karta 1 : 100.000. Zvezni geološki zavod. Beograd.
- Gabrovec, M. 1990: Uporaba digitalnega modela reliefa pri proučevanju usadov na primeru doline Lahomnice. *Geomorfologija in geoeekologija*, 5. znanstveno posvetovanje geomorfologov Jugoslavije. Ljubljana.
- Gabrovec, M., Brečko, V. 1990: Poplave in usadi v dolini Lahomnice. Ujma 4.
- Gobec Vidali, A. 2007: Vodni mlini v porečju Lahomnice. Laški zbornik 2007. Laško.
- Hrvat in Perko, M. 2016: Morfometrične značilnosti površja na različnih kamninah v Sloveniji. Doktorsko delo, Fakulteta za humanistične študije Univerze na Primorskem. Koper.
- Hrvat in Perko, D. 2005: Differences between 100-meter and 25-meter digital elevation models according to types of relief in Slovenia. *Acta geographica Slovenica* 45-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/AGS45101>
- Ilešič, S. 1978: Obča geografija: priročnik za gimnazije in druge srednje šole. Ljubljana.
- Jurgelj, N. 2016: Idejna zasnova regulacije potoka Lahomnica na območju poplavne ogroženosti. Diplomsko delo, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo Univerze v Mariboru. Maribor.
- Jurkovšek, B. 2008: Geološka karta severnega dela Tržaško-Komenske planote 1 : 25.000. Geološki zavod Slovenije. Ljubljana.
- Jurkovšek, B., Toman, M., Ogorelec, B., Šribar, L., Drobne, K., Poljak, M., Šribar, L. 1996: Formacijska geološka karta južnega dela Tržaško-Komenske planote 1 : 50.000. Geološki zavod Slovenije. Ljubljana.

- Kolbezen, M. 1990: Visoke vode v Sloveniji leta 1989. Ujma 4.
- Kolbezen, M. 1993: Velike poplave in povodnji na Slovenskem 3, Povodenj v porečju Savinje junija 1954. Ujma 7.
- Kos, K. 2015: Obnova male hidroelektrarne Tevče. Diplomsko delo, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru. Maribor.
- Kožuh, B. 2013: Knjiga o statistiki. Ljubljana.
- Majcen, T., Golež, M. 2010: Lahomniški sopot. DEDI - digitalna enciklopedija naravne in kulturne dediščine na Slovenskem. Medmrežje: <http://www.dedi.si/dediscina/343-lahomniški-sopot> (17. 5. 2018).
- Marinos, P., Hoek, E. 2000: GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. Geo-Eng2000, an international conference on geotechnical & geological engineering. Melbourne.
- Mlakar, I., Čar, J. 2009: Geološka karta Idrijsko-Cerkljanskega hribovja med Stopnikom in Rovtami 1 : 25.000. Geološki zavod Slovenije. Ljubljana.
- Moore, I. D., Grayson, R. B., Ladson, A. R. 1991: Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. Hydrological Processes 5-1. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>
- Pantelidis, L. 2009: Rock slope stability assessment through rock mass classification systems. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 46-2. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.06.003>
- Perko, D. 2001: Analiza površja Slovenije s stometrskim digitalnim modelom reliefa. Geografija Slovenije 3. Ljubljana.
- Perko, D. 2002: Določanje vodoravne in navpične razgibanosti površja z digitalnim modelom višin. Geografski vestnik 74-2.
- Perko, D. 2007. Morfometrija površja Slovenije. Georitem 3. Ljubljana.
- Pike, R. J., Evans, I. S., Hengl, T. 2009: Geomorphometry: a brief guide. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Amsterdam.
- Popit, T., Supej, B., Kokalj, Ž., Verbovšek, T. 2016: Primerjava metod za geomorfometrične analize hrupavosti površja na primeru Vipavske doline. Geodetski vestnik 60-2. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2016.02.227-240>
- Radinja, D. 1974: Usadi na Sotelskem v pokrajinski luči. Voglajnsko-sotelska Slovenija, 9. zborovanje slovenskih geografov. Ljubljana.
- Ramovš, A. 1983: Slapovi na Slovenskem. Ljubljana.
- Sagadin, J. 2003: Statistične metode za pedagoge. Maribor.
- Wilson, J. P. 2012: Digital terrain modelling. Geomorphology 137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03.012>
- Wilson, J. P., Gallant, J. C. 2000: Digital terrain analysis. Terrain Analysis: Principles and Applications. New York.

## VZREJA MODELOV VIŠIN IZ LIDARSKIH PODATKOV

**dr. Dimitrij Mlekuz**

Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za arheologijo in Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije, Center za preventivno arheologijo  
dmlekuz@gmail.com

UDK: 528.8.044.6

### IZVLEČEK

#### **Vzreja modelov višin iz lidarskih podatkov**

Filtriranje podatkov zračnega laserskega skeniranje je ključen korak pri izdelavi primernih digitalnih modelov višin. To je zapleten postopek, predvsem na območjih z razgibanim reliefom in gostim rastjem. Operater mora izbirati med mnogim neintuitivnimi in med sabo povezanimi parametri. Da bi olajšali ta postopek, smo razvili orodje, ki ga navdihuje proces evolucije in temelji na umetnemu izboru oziroma vzreji digitalnih modelov višin.

### KLJUČNE BESEDE

lidar, oblak točk, digitalni model višin, filtriranje, evolucija, genski algoritmi, vzreja

### ABSTRACT

#### **Breeding elevation models from LiDAR data**

Filtering the airborne laser scanning data is a key step in producing suitable digital elevation models. This is a challenging task, especially for areas with complex relief or areas covered with dense vegetation. There are many interconnected and non-intuitive parameters to choose from. To tackle this problem, we developed a tool, inspired by evolutionary process and based on an idea of artificial selection (or breeding) of digital elevation models.

### KEY WORDS

lidar, pointcloud, digital elevation models, filtering, evolution, genetic algorithms, breeding

## 1 Uvod

Zračno lasersko skeniranje (ZLS) površja (tudi LiDAR, *Light Detection and Ranging*) je metoda daljinskega zaznavanja, s katero je moč zelo natančno izmeriti Zemljino površje. Zaradi svoje natančnosti in možnosti opazovanja površja pod vegetacijskim pokrovom ponuja veliko možnosti za različne aplikacije, kot sta na primer prepoznavanje arheoloških sledi v pokrajini ter razumevanje geomorfoloških ali antropogenih procesov, ki so pokrajino preoblikovali.

Meritve, ki jih prinaša ZLS, omogočajo ustvarjanje natančnih modelov višin, ki modelirajo različne vidike oblikovanosti Zemljinega površja, od digitalnih modelov površja (DMP) do digitalnih modelov terena (DMT). Pri tem je ključen proces filtriranja točk. Filtriranje podatkov zračnega laserskega skeniranja je ključni del izdelave primernih digitalnih modelov višin za različne namene. Ogromne količine podatkov, ki jih prinaša ZLS, zahtevajo zapletene postopke, da iz njih izluščimo relevantne informacije za posamezno aplikacijo. Filtriranje oblaka točk in izdelava digitalnega modela višin je ključni del procesiranja lidarskih podatkov za različne aplikacije in pomembno ali celo ključno vpliva na rezultate analiz.

V arheologiji običajno uporabljamo prirejene digitalne modele terena, torej digitalne modele višin, ki verno sledijo obliki arheoloških sledi na tleh, hkrati pa se želimo znebiti vse nepotrebne navlake, ki otežuje interpretacijo teh sledi. Pri tem so arheološke sledi lahko komajda vidne, majhne grbine in izbokline v tleh, lahko pa gre za ostanke stoječe arhitekture, kot so zidovi in podobno. Izdelava digitalnih modelov višin iz oblaka točk je zato zahteven postopek, predvsem na poraščenih območjih z razgibanim površjem ali s še stoječimi arhitekturnimi ostanki.

## 2 Modeli višin

Oblak lidarskih točk vsebuje točke odbojev na površini rastja, stavb in druge infrastrukture, vej, listov, podrasti in tal. Točke površja predmetov omogočajo izdelavo digitalnega modela površja, medtem ko talni odboji, če do njih seveda pride, podajajo obliko reliefa in omogočajo izdelavo digitalnega modela reliefa.

Ključni del izdelave je filtriranje oblaka točk, kjer izločimo nezaželene odboje. Filtriranje iz oblaka točk izlušči le talne točke, iz katerih interpoliramo model višin. Preveč agresivno filtriranje lahko odstrani tudi »zaželene« točke z informacijami o predmetu preučevanja, premalo agresivno filtriranje pa v digitalni model višin vnaša podatke o predmetih, ki bodisi zakrivajo pojave, ki nas zanimajo, ali v model višin vnašajo nezaželene anomalije.

Za odstranjevanje »neželenih« točk (pri meritvah topografskih lastnosti površja so to vsi odboji, ki ne prihajajo od tal) uporabljamo različne algoritme, ki temeljijo na matematični morfologiji, iterativnem izločanju točk, segmentaciji ali modeliranju reliefa s celotnim oblakom (Meng, Currit in Zhao 2010).

Iz filtriranih točk, torej točk odbojev od tal, s pomočjo interpolacije izdelamo digitalni model višin. Kakovost digitalnih modelov višin je tako močno odvisna od procesa filtriranja, zato je treba poleg izdelkov, kot so modeli površja in višin, vedno operirati tudi s »surovimi podatki« oziroma oblakom točk (Oštir 2007).

Filtriranje je intenzivno področje raziskav, saj še vedno ne obstaja univerzalna tehnika, ki bi bila primerna tako za urbana zemljišča kot gozdove, tako za ravna kot za strma območja.

Programske rešitve za filtriranje oblaka točk temeljijo na različnih algoritmih. Vsem je skupno, da algoritmi zahtevajo množico parametrov, ki določajo delovanje algoritma in vplivajo na to, katere točke so zaželene in katere ne (Meng, Currit in Zhao 2010). Množica različnih kombinacij parametrov je ogromna, zato je v njej težko poiskati najboljšo kombinacijo. Parametri so običajno tudi precej neintuitivni, v smislu, da ni zelo jasnih posledičnih povezav med njihovimi spremembami in rezultatom, torej dobljenim digitalnim modelom višin.



### 3 »Vzreja« modelov višin

Da bi olajšali proces filtriranja in iz oblaka točk izdelali najprimernejši model višin za določeno aplikacijo, smo razvili orodje, ki pomaga pri ugotavljanju najprimernejših parametrov algoritma za filtriranje oblaka točk. Orodje je navdihnjeno s procesom evolucije in temelji na ideji vzreje oziroma umetne selekcije.

Naravni izbor je proces, s katerim postajajo iz generacije v generacijo pogostejše tiste dedne lastnosti organizmov, ki jim dajejo večjo možnost za preživetje in razmnoževanje. Ta proces je eden ključnih mehanizmov evolucije. Proces temelji na dejstvu, da obstaja znotraj vsake populacije organizmov genska raznolikost, ki se odraža v fenotipu, torej fizični zgradbi in vedenju organizmov. Ker imajo organizmi običajno več potomcev, kot jih lahko preživi, bodo preživeli le nekateri, običajno tisti, ki jim njihove dedne lastnosti dajejo prednost pred ostalimi pri izkoriščanju virov za preživetje, izogibanju naravnim sovražnikom in iskanju spolnega partnerja v določenem okolju. Katere lastnosti so »koristne« in katere »škodljive«, določa prav okolje. Naravni izbor deluje na izražene lastnosti (fenotip) organizmov in ne neposredno na njihov genski zapis (genotip). Vendar proces selekcije izbira genski zapis lastnosti, ki dajejo prednost organizmu; ta genski zapis postaja v naslednjih generacijah pogostejši.

Umetni izbor ali umetna selekcija je postopek izboljševanja rastlin ali živali s tem, da izberemo za razmnoževanje samo tiste organizme, ki imajo zaželeno lastnost. Ta proces se imenuje umetna selekcija, ker ljudje (namesto okolja) izbiramo, kateri organizmi se bodo razmnoževali, torej, katere lastnosti so »škodljive« ali »koristne«.

Orodje, ki smo ga razvili, temelji na računalniškem modelu, ki ga je razvil Richard Dawkins v knjigi *The Blind Watchmaker*, da bi ilustriral evolijski proces (Dawkins 1986). Gre za genski program, ki omogoča evolucijo kompleksnih vzorcev in oblik. Model omogoča evolucijo »biomorfov«, virtualnih organizmov, ki so v celoti definirani s svojimi geni. Geni definirajo enostavne kvalitativne parametre, oziroma spremenljivke, kot so višina, širina, razvejanost in število iteracij, ki določajo, kako se bo biomorf izrisal na zaslonu.

Operater z izborom biomorfov usmerja proces evolucije. Izbrani biomorfi služijo kot starši za naslednjo generacijo biomorfov, ki nasledijo rahlo mutirane gene staršev. Postopna sprememba oblike biomorfov je preprost model delovanja evolucije. Vsak biomorf je podoben svojim staršem, toda po nekaj generacijah se oblika organizma lahko drastično razlikuje od prve generacije prednikov. V nekaj generacijah lahko s preprostim izborom zaželenih lastnosti evolviramo zelo kompleksne oblike brez neposrednega spreminjanja in »nastavljanja« posameznih genov (Dawkins 1986, 43–76).

V našem orodju so organizmi ali biomorfi digitalni modeli višin, njihovi geni pa so parametri algoritma za filtriranje oblaka točk. Uporabili smo algoritem *lasground*, ki je del paketa *LAStools* (Isenburg 2018). Orodje načeloma lahko deluje s katerim koli algoritmom. Algoritem *lasground* uporablja šest parametrov, ki določajo kriterije za filtriranje. To so korak (*step*), ki določa resolucijo prve ocene modela višin, izbočenost (*bulge*), zamik (*offset*) in konice (*spike*), ki določajo parametre točk in jih lahko štejemo za talne glede na prvo oceno modela višin, standardna deviacija (*stdev*), ki omejuje velikost ravnih površin, in razgibanost modela višin (*z* razponom kvalitativnih vrednost med (*ultra\_fine*) do (*extra\_coarse*)).

Operater izbira digitalne modele višin glede na primernost za določeno aplikacijo. Katere lastnosti modelov višin so »škodljive« ali »koristne«, je odvisno od odločitve operaterja. Z vzrejo oziroma umetno selekcijo primernih modelov višin v nekaj generacijah evolviramo primeren model višin.

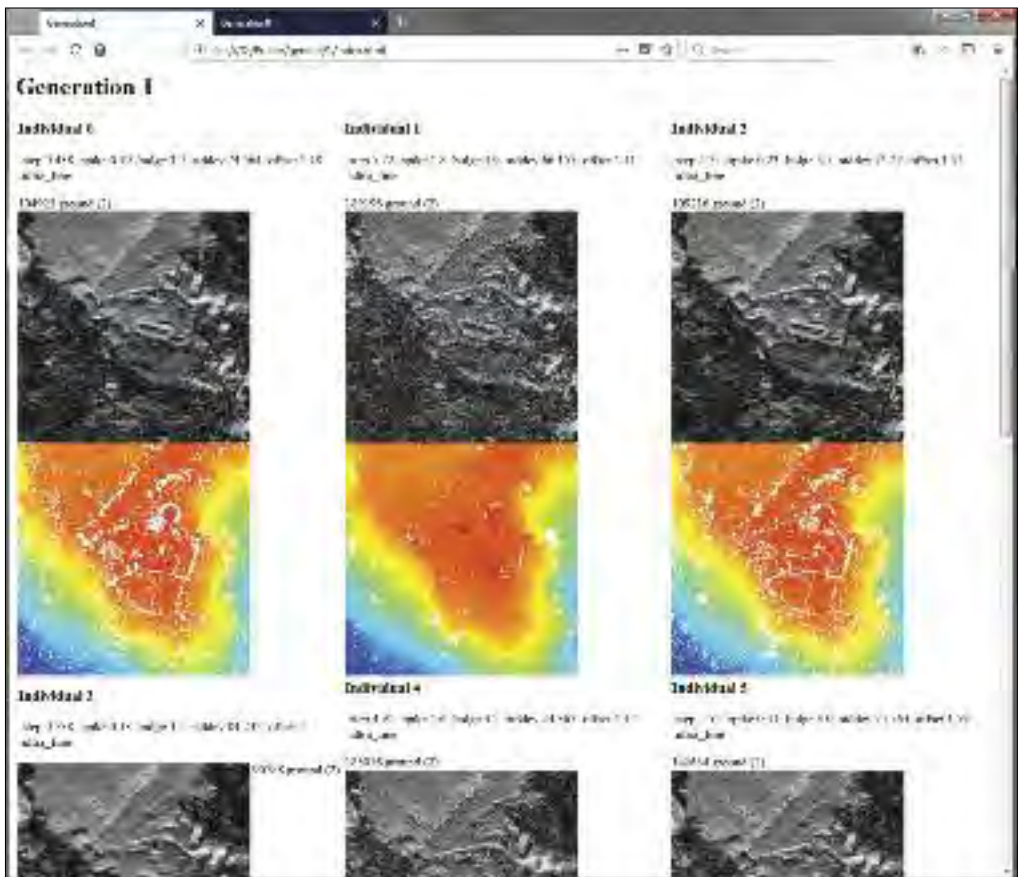
Operater najprej izbere oblak točk testnega območja, ki je podmožica celotnega oblaka točk. Zaradi relativne kompleksnosti selekcijo digitalnih modelov višin opravljamo na manjšem delu oblaka točk, običajno na najbolj problematičnem ali najbolj tipičnem delu študijskega območja. Dobljeni digitalni modeli višin bodo generirani iz tega oblaka točk.

Orodje najprej določi naključne vrednosti genov, torej parametrov za *lasground*, in generira začetno, ničelno generacijo digitalnih modelov višin. Dobljene digitalne modele višin na različne načine

vizualiziramo in jih analiziramo tudi statistično (izračunamo gostoto talnih točk, delež filtriranih točk in podobno), kar pomaga operaterju pri odločitvah, kateri model višin je najprimernejši.

Operater med to populacijo izbere dva digitalna modela, ki opravljata vlogo »staršev« naslednje generacije modelov višin. Geni otrok so spolna kombinacija obeh staršev z nekaj naključnimi mutacijami. Pri spolnem razmnoževanju pridobi potomec genski zapis v polovičnem razmerju od dveh primerkov iste vrste, očeta in matere, zato potomec podeduje kombinacijo lastnosti obeh staršev. V našem primeru potomec dobi vrednost gena od naključno izbranega starša, dodamo pa mu tudi majhno naključno vrednost, ki predstavlja mutacijo (slika 1).

Evolucijo proti zelenemu modelu vodimo z izborom modelov višin, ki imajo zelene lastnosti in njihovo spolno kombinacijo. Po nekaj generacijah lahko »vzredimo« digitalne modele višin, ki vsebujejo vse zelene lastnosti. Ko smo z dobljenim modelom višin zadovoljni, proces zaustavimo. Genotip vzrejenega digitalnega modela višin (torej nabor parametrov s pomočjo katerega smo filtrirali točke zanj) uporabimo kot vrednosti za filtriranje celotnega oblaka točk. Končni model višin nato interpoliramo iz tako filtriranega oblaka točk (slika 3).

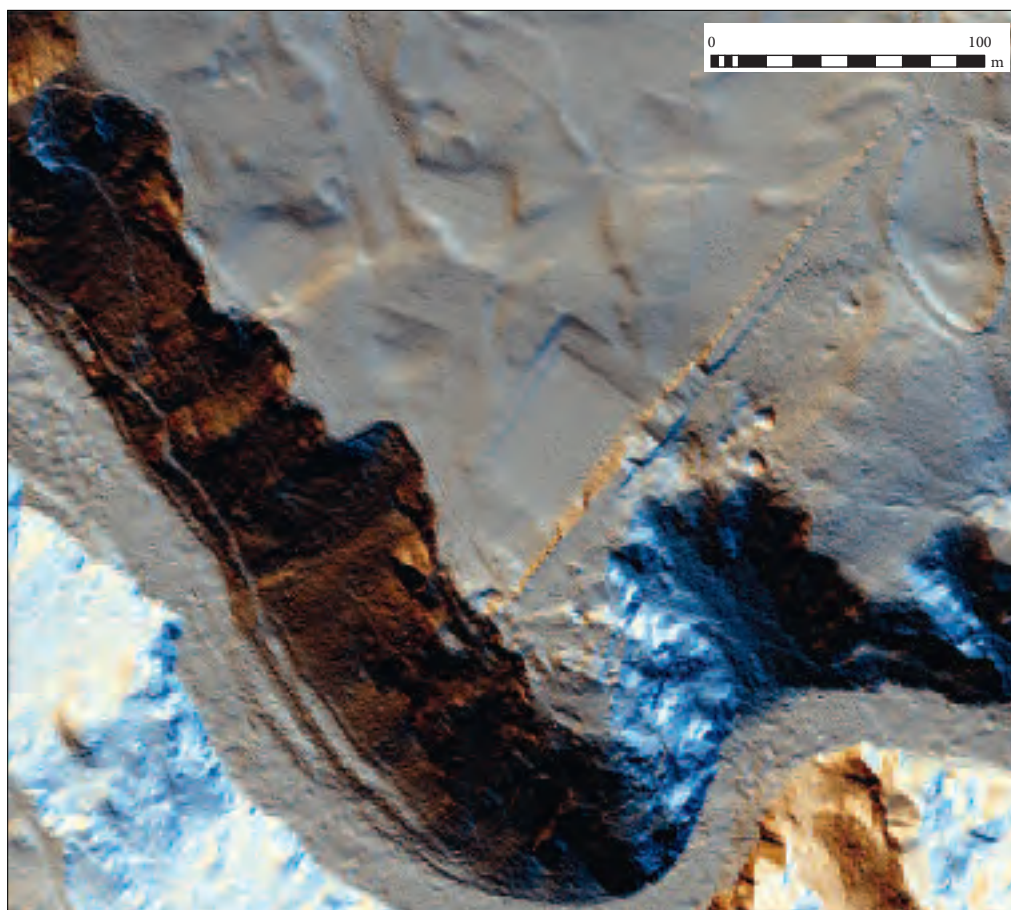


Slika 1: Uporabniški vmesnik orodja. Na zaslonu so prikazani parametri (»genotip«) posameznega modela višin in njegov »fenotip«, torej vizualizacija senčenega reliefa, rastriran oblak točk ter podatki o gostoti in številu talnih točk.

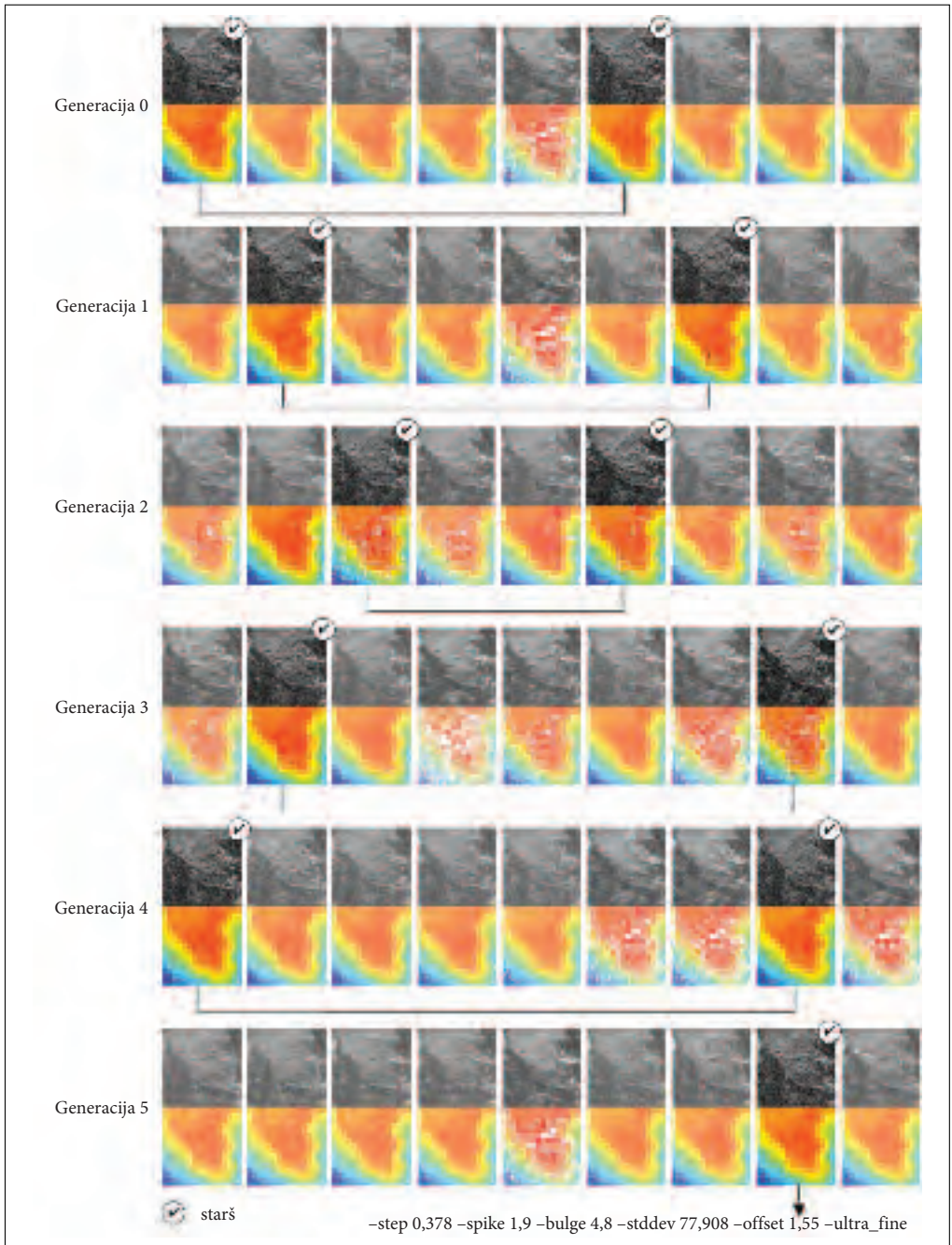
## 4 Primer

Za primer smo izbrali območje gradu Školj v bližini Famelj. Grad stoji na terasi nad sotesko reke Reke. Območje zaznamuje razgibano površje, ki obsega tako zakraselo teraso z vrtačami kot tudi zelo strma pobočja soteske Reke, ki ponekod preidejo v stene. Pobočja so razčlenjena z ozkimi in strmimi skalnimi grebeni. Na robu terase so ruševine gradu, ki jih sestavljajo še nekaj metrov visoki ostanki zidov obzidja, obrambnih stolpov in stavb. Pobočja in dno soteske so gosto prerasle z rastjem, nekaj redkejšega rasti je tudi na območju ruševin. Oblak točk pokriva površino  $0,13 \text{ km}^2$ ; skeniran je z gostoto 18 točk na  $\text{m}^2$ ; povprečna gostota vseh točk (talnih točk in točk rasti) je  $48 \text{ točk}/\text{m}^2$  (slika 2).

Algoritem *lasground* s privzetimi nastavitvami dokaj agresivno filtrira talne točke; talnih točk je le okrog 13 % vsega oblaka točk z gostoto okoli  $6 \text{ točk}/\text{m}^2$ . Predvsem na pobočjih je talnih točk zelo malo; filtriranje izloči predvsem točke ostrih grebenov in strmih sten, tako da teh na digitalnem modelu višin sploh ne moremo prepoznati. Tudi na območju ruševin je veliko izločenih točk, ruševine skorajda niso vidne, prav tako so agresivno filtrirani suhi zidovi na robovih vrtač. Dobljeni model višin je tako precej zmešan, brez ostrih robov in prelomov (slika 2).



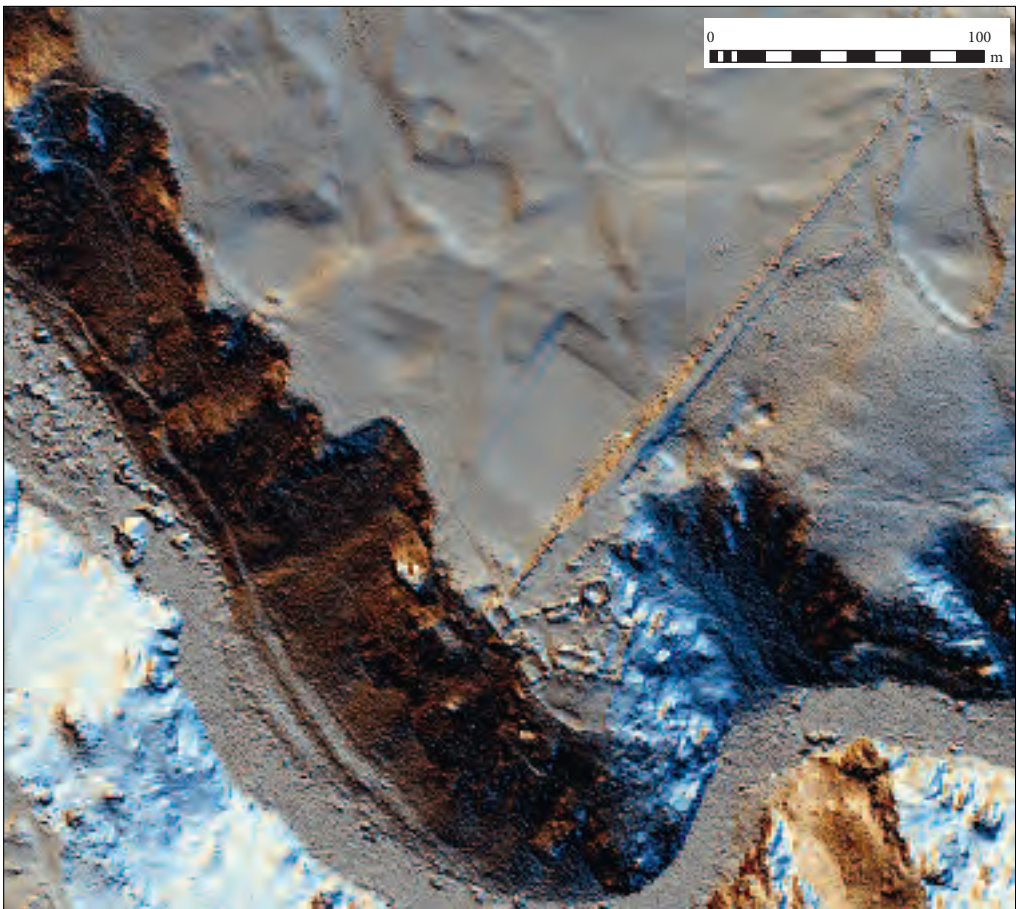
Slika 2: Z več strani senčen model višin študijskega območja gradu Školj pri Famljah je izdelan iz oblaka točk, filtriranega s prednastavljenimi parametri algoritma *lasground* (osnovni model višin).



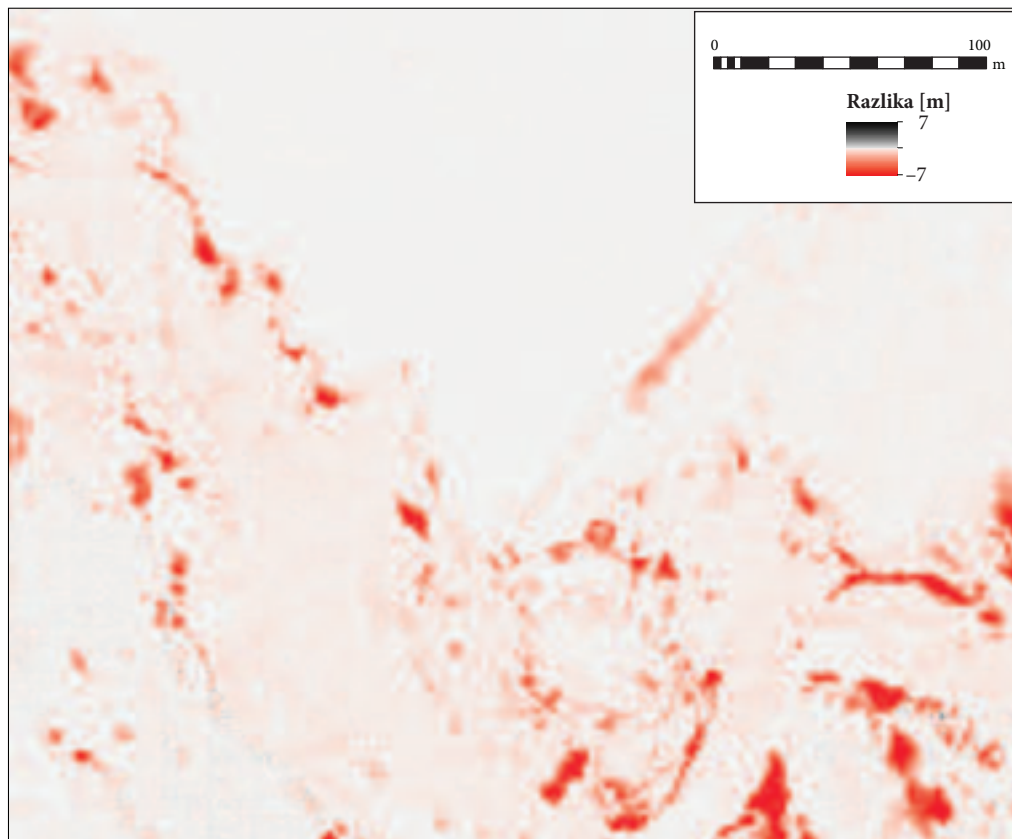
Slika 3: Proces umetne selekcije (»vzreje«) najustreznejšega modela višin študijskega območja. V vsaki generaciji je operater izbral dva najustreznejša modela višin (označena s kljukico), ki sta služila kot starša naslednje generacije. Proces vzreje je operater sklenil po petih generacijah modelov višin.

Izbrali smo testni oblak točk s površino 0,01 km<sup>2</sup>, ki obsega predvsem območje gradu. Generirali smo šest generacij modelov višin. Kriterij za izbor je bila vidnost ruševin in odsotnost anomalij, ki so posledica napačno klasificiranih točk oziroma nizkega rastja na modelu višin. Po šestih generacijah smo parametre najprimernejšega vzrejenega modela višin uporabili za filtriranje celotnega oblaka točk in iz njih intepolirali model višin (slika 3). V vzrejenem oblaku točk je 17 % celotnega oblaka klasificiranega kot talne točke, gostota talnih točk je tako okrog 8 točk/m<sup>2</sup>.

Dobljeni oziroma vzrejeni model višin zelo dobro ohranja točke ruševin, pa tudi grebenov in strmih sten na pobočju soteske (slika 4). Tu so razlike med obema modeloma višin najbolj očitne. Na odprtih površinah severno od gradu razlik skoraj ni (slika 5). Uspešno tudi odstranjuje točke rastja, predvsem na terasi. Na splošno je vzrejeni model višin precej bolj grob. Filtriranje je ponekod premalo agresivno, predvsem na dnu soteske je nekaj ostankov nizkega rastja. V splošnem pa ustreza namenu, torej odlično prikaže zidove ruševin, stene in grebene soteske.



Slika 4: Z več strani senčen model višin študijskega območja gradu Školj pri Famljah je izdelan iz oblaka točk, filtriranega z vzrejenimi parametri. Je rezultat procesa umetne selekcije na sliki 3.



Slika 5: Razlika med modelom višin študijskega območja izdelanim s prednastavljenimi parametri (slika 1) in vzrejenimi parametri (slika 4).

## 5 Sklep

Pričujoče orodje omogoča izbor najprimernejših parametrov za filtriranje oblakov točk iz lidarskih podatkov. S pomočjo evolucijskega algoritma, ki temelji na principih umetne selekcije ali vzreje iz množice generiranih modelov višin, izbiramo tiste z najprimernejšimi lastnostmi in iterativno vodimo proces k željnemu cilju, torej modelu višin, ki je najprimernejši za določeno uporabo.

## 6 Viri in literatura

- Dawkins, R. 1986: The Blind Watchmaker. New York.
- Isenburg, M. 2018: LAStools - efficient LiDAR processing software (version 141017, unlicensed). Medmrežje: <http://rapidlasso.com/LAStools> (24. 1. 2018).
- Meng, X., Currit, N., Zhao, K. 2010: Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data: A review of critical issues. Remote Sensing 2-3. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs2030833>
- Oštir, K. 2007: Daljinsko zaznavanje. Ljubljana.

# NATANČNOST DOLOČANJA LEGE NARAVNIH VREDNOT V SLOVENIJI NA PRIMERU KRAŠKIH JAM

**Jure Tičar**

ZRC SAZU, Geografski inštitut Antona Melika

jure.ticar@zrc-sazu.si

**dr. Miha Čekada**

Jamarska zveza Slovenije

mihacekada@yahoo.com

UDK: 911.2:551.435.84(497.4)

## IZVLEČEK

### **Natančnost določanja lege naravnih vrednot v Sloveniji na primeru kraških jam**

Kraške jame so v Sloveniji pomemben element naravnih vrednot, saj so opredeljene kot naravne vrednote državnega pomena. Podatke o kraških jamah prispevajo jamarji, ki pridobivajo podatke na terenu in jih prek zapisnikov sporočajo v Kataster jam. Danes so v sistemu s skoraj 100-letno zgodovino delovanja zbrani podatki o 12.588 jamah. Kakovost podatkov o jamah se z uvedbo novih tehnologij nenehno izboljšuje, kar je še posebej izrazito na primeru natančnosti lege jam. V raziskavi smo analizirali napake pri določanju lege na podlagi uporabe različnih metod, hitrost uveljavljanja novih tehnologij pri terenskih raziskavah ter izboljšave natančnosti lege jam v zadnjih dveh desetletjih. Zanesljivost podatkov v Katastru jam in Registru naravnih vrednot namreč močno vpliva na njihovo upravljanje in varovanje.

## KLJUČNE BESEDE

topografska karta, GPS, lidar, naravna vrednota, jama, Slovenija

## ABSTRACT

### **The accuracy in locating of natural heritage in Slovenia: the case of karst caves**

Karst caves are one of the most important elements of natural heritage in Slovenia, since they are defined as a natural heritage of national importance. Data about karst caves are collected by cavers during their fieldwork and reported as records to the Cave Registry. Today the system with almost a century of activity, contains the data on 12.588 caves. The quality of data reported to the Cave Registry is constantly improving, especially the accuracy of cave location. This research analyses the errors in determining the cave location based on the use of different methodologies, the advance in implementation of new technologies in fieldwork research and the improvement in accuracy of cave locations within the last two decades. The reliability of the data within Cave Registry and consequently the Natural Heritage Register has a great impact on their management and protection.

## KEY WORDS

topographic map, GPS, lidar, natural heritage, cave, Slovenia

## 1 Uvod

Kraško površje je eden izmed najbolj zastopanih pokrajinskih elementov pokrajine v Sloveniji, saj predstavlja kar 43 % delež vsega površja (Gams 2004). Poleg številnih površinskih prvin so pomembne tudi jame, ki so v Zakonu o varstvu podzemnih jam (2004) opredeljene kot »na naravni način nastali prostor v kamnini, ki je daljši ali globlji od 10 m«. Za jamo se lahko zaradi morfoloških, hidroloških, favnističnih ali drugih posebnosti (na primer arheoloških) določi tudi prostor, ki je krajši od 10 m. Definicija sledi internemu standardu Katastra jam, ki je v veljavi že več desetletij (Navodila za izpolnjevanje ... 2014).

V Zakonu o ohranjanju narave (1999) so naravne vrednote opredeljene kot redek, dragocen, znamenit ali drug naravni pojav oziroma del žive narave, naravno območje ali del naravnega območja, ekosistem, krajina ali oblikovana narava. Na podlagi značilnosti naravnih pojavov in oblik so naravne vrednote razvrščene v deset razredov zvrsti, med katerimi so izpostavljene tudi podzemeljske geomorfološke naravne vrednote (Uredba o zvrsteh ... 2002). Naravne vrednote upravlja upravni organ, pristojen za ohranjanje narave (Zakon o ohranjanju ... 1999).

Jame in brezna so zaradi geomorfoloških, geoloških, hidroloških, zooloških in botaničnih značilnosti eno najpogostejših naravnih vrednot (Hudoklin 2007). Pomemben vidik varovanja kraških jam je njihova opredelitev kot naravne vrednote državnega pomena, ki so v lasti države. Zakon o varstvu podzemnih jam (2004) med drugim opredeljuje varstveni režim, ki jame deli na odprte jame, odrte jame z nadzorovanim vstopom in zaprte jame. Fizične osebe, ki odkrivajo in raziskujejo kraške jame (v nadaljevanju jamarji), morajo opraviti usposabljanje za samostojno jamarsko delovanje in izpit pri Jamarski zvezi Slovenije na podlagi javnega pooblastila. V okviru varstvenega režima tudi prepoveduje in omejuje aktivnosti, škodljive za jame (Zakon o varstvu ... 2004).

V Sloveniji se je organizirano jamarstvo začelo z ustanovitvijo jamarskega društva Anthron v Postojni leta 1889 (Gams 2004). Jamarsko dejavnost so tudi med 1. in 2. svetovno vojno ter po njej ohranjala različna društva in manjše jamarske skupine, ki so se leta 1962 združili v Društvo za raziskovanje jam Slovenije, to pa se je leta 1972 preimenovalo v Jamarsko zvezo Slovenije. Leta 1965 je Jamarska zveza Slovenije aktivno pripomogla k ustanovitvi Mednarodne speleološke zveze, ki ima svoj sedež v Postojni (Lajovic 2018). Danes v okviru Jamarske zveze Slovenije deluje 44 društev, ki združuje okoli 1000 jamarjev iz vse Slovenije. Kot enega izmed glavnih dosežkov slovenskega jamarstva velja izpostaviti Kataster jam, ki je sistem zbiranja in obdelave podatkov o vseh znanih kraških jamah v Sloveniji. V letu 2018 je bilo v Sloveniji v sistemu registriranih 12.588 objektov (Kataster jam 2018). Kataster jam deluje že skoraj sto let, drugo polovico tega časa pa ga pogodbeno vodita Jamarska zveza Slovenije in Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU. Podatke o raziskanih jamah prispevajo posamezni jamarji po jamarskih društvih, ki o svojih odkritjih poročajo na standardiziranih obrazcih. Po recenziji so ti podatki vneseeni v podatkovno bazo, katere izvleček se po zakonu poroča Agenciji Republike Slovenije za okolje.

Med pomembnimi podatki statusa podzemnih jam je tudi opredelitev vhoda v jamo z geografskimi koordinatami (Zakon o varstvu ... 2004). Na podlagi Pravilnika o določitvi in varstvu naravnih vrednot (2004) so meje naravnih vrednot določene v merilu 1 : 5000 kot digitalni sloj GIS v dveh različicah. Prva različica vsebuje podatke o natančnih legah naravnih vrednot, v drugi različici pa so lege naravnih vrednot zaradi njihovega varovanja zaokrožene na 5 kilometrov natančno. V Registru naravnih vrednot je dopustna tudi odprava očitnih napak, če se nadomestijo napačne koordinate lege naravne vrednote z natančnimi in pravilnimi, določenimi z novimi tehničnimi pripomočki, ali pri koordinatah centroidov z upoštevanjem poenotene samodejnega izračuna. Odpravo teh napak izvede pristojno ministrstvo na podlagi strokovnih predlogov organizacij, pristojnih za ohranjanje narave (Zakon o ohranjanju narave 1999).

Pomembno metodološko dopolnitev natančnosti določanja leg kraških jam v Sloveniji je lasersko skeniranje Slovenije, ki je bilo izvedeno v letih 2011, 2014 in 2015 (Triglav Čekada in Bric 2015). Poleg preostalih analiz površja (Andrić in Bonnaci 2014; Breg Valjavec 2014; Kobal s sodelavci 2014; Kolega



in Poklar 2012; Kokalj, Zakšek in Oštir 2013; Novaković s sodelavci 2014; Mihevc 2016; Triglav Čekada, Bric in Mongus 2015; Triglav Čekada 2011) so lidarski podatki primerni tudi za določanje ali popravljanje leg jam (Weishampel s sodelavci 2011; Čekada in Gostinčar 2016). Za lažje iskanje vhodov v jame ali brezna rabimo večjo gostoto laserskih točk (med 5 in 12 točk/m<sup>2</sup>), saj manjša gostota točk ne zaznava manjših vhodov v jame. Pri večjih jamskih vhodih je zadostna količina odbojev najmanj 5 točk/m<sup>2</sup> (Triglav Čekada 2011). Uporaba lidarskih podatkov v jamarstvu močno izboljšuje natančnost podatkov o legah kraških jam (Kasprzak in Sobzyk 2017; Čekada, Gostinčar in Ladišič 2017; Grozić in Kukuljan 2017).

## 2 Metode dela

Pri določanju lege podzemne jame gre dejansko za določitev lege vhoda v jamo, ki je ponavadi razmeroma majhen, v naravi dobro prepoznaven morfološki element. Vhod je z vidika določanja lege točkovni objekt, kjer je za lokacijo v prostoru nujna zgozlj določitev koordinat X in Y, saj je zaradi značnega reliefa znana tudi višina Z). V geodeziji je to vsakdanja naloga, vendar pa so večino jam odkrili, raziskali, izmerili in dokumentirali amaterski jamarji z amatersko opremo. Ovira pri natančnem določanju leg jam v času Jugoslavije je bila predvsem omejena dostopnost topografskih kart.

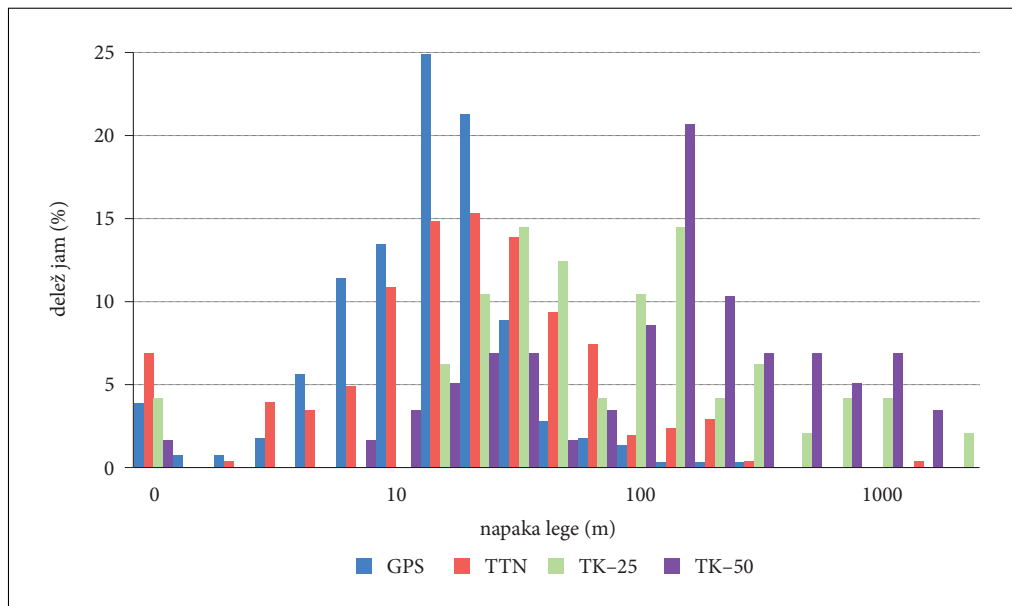
Do 60-ih let 20. stoletja so bili jamarjem dostopni le zemljevidi v merilu 1 : 50.000, pozneje 1 : 25.000, zemljevidi TTN pa so postali dosegljivi (dostopni širši javnosti) šele konec 80-ih let (Čekada in Gostinčar 2016). Leta 2003 so jamarji v Kataster jam oddali prve zapisnike z evidentirano uporabo GPS-a in leta 2016 z evidentirano uporabo lidarja. Temeljni izziv jamarjev je odkrivanje novih jam, pa tudi odkrivanje novih rogov v že znanih jamah, nekoliko manj pa je zanimanja za preverjanje in popravljanje leg znanih jam. V ožjem pomenu besede niti ne gre več za jamarstvo, temveč le za iskanje vhoda. Kadar imajo jamarji na terenu na voljo slabo dokumentacijo, pa je takšno iskanje praviloma dolgočasno.

Temeljno vprašanje vsakega jamarja je, kako zanesljiva je lega jame, določena po posameznem kartografskem viru. V eni od raziskav (Čekada 2013) je bila natančnost lege statistično ocenjena glede na velikost popravka, kadar je bila lega popravljen s pomočjo natančnejšega kartografskega vira v primerjavi s prvotno določeno lego. Izkazalo se je, da je povprečna napaka lege okoli 4 mm na zemljevidu, kar je v primeru uporabe TTN-5 okoli 20 m v naravi. Precej težje pa je določiti natančnost GPS-a, saj je bil to donedavna najnatančnejše orodje, dostopno amaterjem. Z dostopnostjo lidarja pa so tudi jamarji dobili možnost določitve lege vhoda v jamo v takšni natančnosti, ki se šteje za absolutno točno. Natančnost lege jame utegne biti omejena zgozlj z izbiro pravilne točke na vhodu v jamo in ne s samo metodologijo.

V letu 2018 je bilo v Sloveniji registriranih 12.588 jam. Po lidarskih podatkih ima lego določenih 886 jam (7%). Od tega jih je 296 takšnih, kjer je bila že ob registraciji lega določena po lidarju. V raziskavi pa je bila posebna pozornost namenjena 590 jamam, kjer je bila prvotna lega določena po nekem drugem kartografskem viru, naknadno pa popravljen po lidarskih podatkih (Kataster jam 2018).

Ti popravki so bili analizirani glede na prvotni kartografski vir, bodisi na topografske karte ali GPS. Prvotno sta bili ločeno obravnavani kartografski podlagi TTN-5 in TTN-10, vendar se je izkazalo, da je razlika med njima v napaki lege znotraj 15%. Zato sta bili v nadaljnji obdelavi obravnavani kot en tip. Kljub nominalni razliki v merilu je gostota informacij pri obeh tipih zemljevidov primerljiva. Pri obravnavi porazdelitve jam po napaki lege so prikazani štirje glavni tipi glede na vir (slika 1). Zaradi velikega obsega možnih napak lege je skala v x-osi logaritmična. Vrednost  $x = 0$  je obravnavana kot poseben primer, kjer je bila lega sicer ponovno ovrednotena, vendar je jamar ugotovil, da je obstoječa lega ustrezna. V tem primeru je popravek lege obravnavan kot nič.

Nabor popravkov leg za obe topografski karti (TK-25 in TK-50) je relativno skromen (okoli 50 jam), zato je vzorec statistično manj značilen in ima posledično nekoliko večjo napako. Ne glede na to, je razviden trend premikanja vrha porazdelitve proti levi (slika 1): bolj kot je podroben kartografski vir, boljša je natančnost. Pri kartografskih podlagah TK-25 in TK-50 je nakazan dvojni vrh porazdelitve.



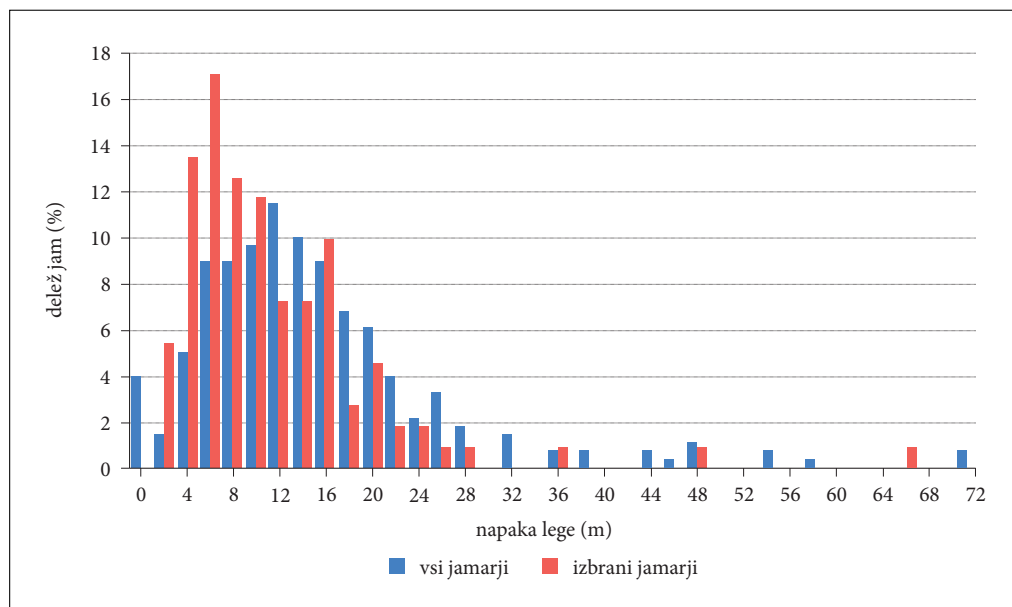
Slika 1: Porazdelitev napake lege za štiri glavne kartografske podlage. Os x je prikazana v logaritemski skali.

Deloma je le-ta posledica majhnosti vzorca, najverjetneje pa je to povezano z drugim vsebinskim razlogom. Eden izmed njih je najverjetneje povezan z načinom delovanja Katastra jam pred 50 in več leti, ko je bil pri določanju lege jam poudarek na opisni legi, koordinate vhoda pa so bile tedaj drugotnega pomena. To dokazuje izrazit rep porazdelitve, kjer je omembe vreden delež napak lege tudi čez 500 m (8 % pri TK-25 in 14 % pri TK-50). Pri kartografskem viru TTN-5/TTN-10 takšne izrazite porazdelitve napak ni več, le dve jami imata napako lege večjo od 200 m. Končni rezultati natančnosti kartografskih virov so zbrani v preglednici 1. Rezultati so skladni z ugotovitvami omenjene raziskave (Čekada 2013), pri čemer je bila tedaj natančnost očitno precenjena še za okoli 20 %.

Dodana vrednost tokratne raziskave je prvo empirično ovrednotenje natančnosti GPS-a. Raziskava ne opredeljuje teoretične natančnosti GPS-a (Moen, Pastor in Cohen 1997; Eckl s sodelavci 2001; Chan s sodelavci 2006), temveč praktično natančnost amaterske uporabe ročnega GPS-a pri jamarskih raziskavah. Porazdelitev napake pri uporabi GPS-a (slika 2) je prikazana na linearni skali, saj zelo velikih napak ni bilo pričakovati. Ločeno je prikazana porazdelitev na celotnem naboru popravkov leg (oranžni stolpci) in popravki, ki jih je prispeval izbrani jamar, Borivoj Ladišič (modri stolpci), eden najbolj produktivnih in natančnih jamarjev v Sloveniji (Čekada, Gostinčar in Ladišič 2017). Porazdelitvi sta si podobni, nekaj pa je tudi razlik. Celotni nabor namreč vključuje prispevke vseh jamarjev, tudi tistih manj izkušenih, katerih natančnost določitve leg je manj zanesljiva. Zaradi tega je vrh porazdelitve ne-

Preglednica 1: Pregled rezultatov natančnosti kartografskih virov.

kartografski vir	GPS	TTN-5/TTN-10	TK-25	TK-50
število primerov	282	202	48	58
povprečna napaka (m)	16	32	160	228
velikost na zemljevidu (mm)	–	5	6,5	4,5



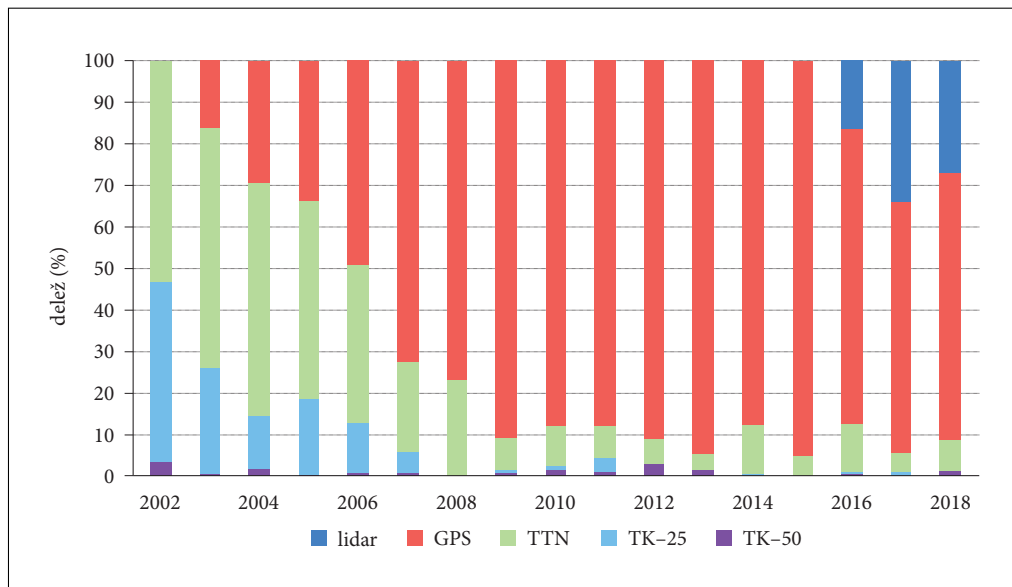
Slika 2: Porazdelitev napake lege pri uporabi GPS-a. Os x je prikazana v linearni skali.

koliko premaknjen, tudi velikih odstopanj je pri celotnem naboru več. Omeniti velja, da je tudi izbrani jamar v dveh primerih pridelal precej večjo napako, kot bi jo glede na celotno porazdelitev pričakovali. Povprečna napaka za celoten nabor je 16 m (preglednica 1), medtem ko pri izbranem jamarju pade na 10 m. Vrh porazdelitve pri njem je 6 m, to je najverjetnejša napaka. Evidentirana desetmeterska napaka pri najbolj izkušenem uporabniku pomeni, da lahko v praksi glede na natančnost meritev metrske koordinate zanemarimo.

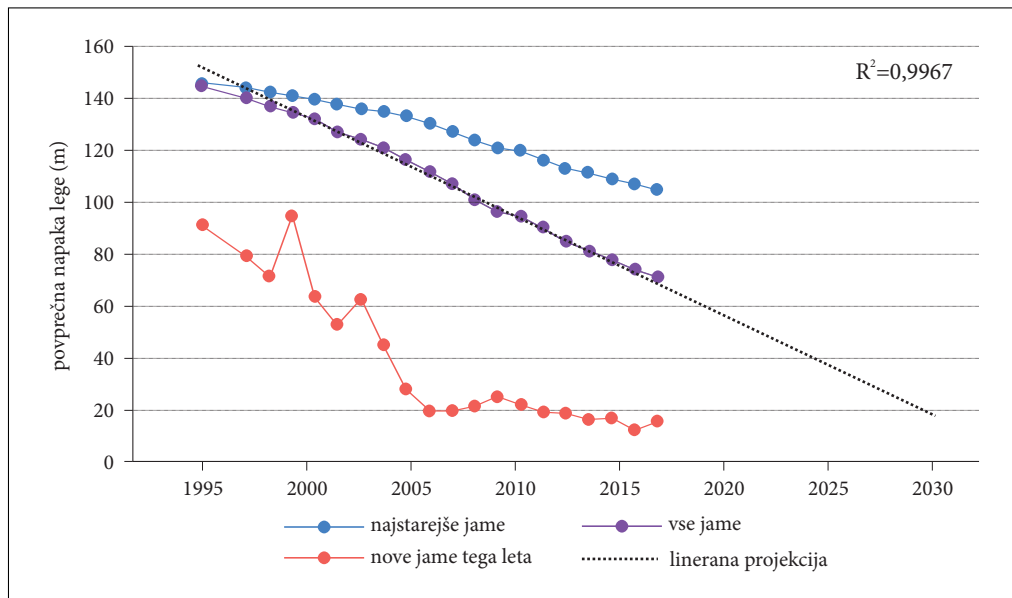
Dosedanja razprava je bila namenjena ovrednotenju metod določanja lege, v nadaljevanju pa predstavljamo uveljavitev različnih metod skozi čas. Kataster jam sicer vsebuje podatke za skoraj stoletno obdobje, vendar smo se v raziskavi osredotočili zgolj na obdobje, ko so bile spremembe v metodologiji določanja lege najbolj izrazite. Pri analizi smo upoštevali pet različnih kartografskih virov med letoma 2002 in 2018 (slika 3). Leto 2002 je bilo namreč zadnje, ko je bilo določevanje lege jam še v celoti odvisno od klasičnih topografskih kart; karte merila TK-25 in TTN so bile v uporabi v približno enakem razmerju. Delež za TK-50 je bil že tedaj zanemarljiv, medtem ko je uporaba TK-25 zamrla v naslednjih nekaj letih, tja do 2007. Delež karte TTN je padal počasneje, v zadnjih letih pa se ustalil pri 5–10 % zvestih uporabnikov. Uveljavljanje GPS-a in s tem povečevanje njegovega deleža pri določanju lege jam je potekalo zelo enakomerno med letoma 2003 in 2009, ko je delež že zajemal 90 %. Ta empirična ocena obenem podaja informacijo o času, potrebnem za uveljavitev posamezne tehnologije med širšo populacijo. Podoben trend se kaže pri uveljavljanju lidarja v zadnjih treh letih. Glede na projekcijo bo lidar izpodrinil GPS do leta 2021. Pri tem je treba upoštevati, da za določen tip jam (majhni vodoravni vhodi) lidar ni primeren, zato bo GPS verjetno zadržal določen delež tudi v prihodnosti.

Dinamika uveljavljanja nove tehnologije je vsota prispevkov posameznikov. Primerjava jamarjev, ki so v zadnjih letih oddali največ zapisnikov v Kataster jam, kaže, da so nekateri lidar prevzeli prej, drugi pozneje, tretji pa še vedno uporabljajo GPS kot poglavitno metodo pri določanju lege jam. Tudi hitrost prevzemanja nove metode lidarja namesto GPS-a se pri uporabnikih razlikuje: nekateri so tako rekoč naenkrat prešli na novo metodo, pri drugih pa je prehod bolj postopen.

V preglednici 1 so ovrednotene pričakovane napake lege glede na uporabljen kartografski vir. Iz rezultatov (slika 3) je tako možno podati oceno povprečne napake za celotno zbirko Katastra jam (slika 4). Predstavljene so ocene za tri skupine jam. Z oranžno črto je prikazan vsakoletni prirastek novoregistriranih jam; vrednost pa je neposredno povezana z razmerjem za posamezno leto iz analize vrst



Slika 3: Vrsta kartografskega vira, uporabljena za določitev lege novih jam med letoma 2002 in 2018.



Slika 4: Povprečna napaka lege jam v Katastru jam.

kartografskega gradiva, uporabljenega za določitev lege novih jam (slika 3). Opustitev starih topografskih kart, predvsem tistih manjšega merila, in vpeljava GPS-a sta povprečno napako lege novoodkritih jam že pred desetimi leti znižali na okoli 20 m. Vpeljava lidarja je to vrednost še nekoliko znižala. Nasprotje novoodkritim jamam pa so tiste jame, ki so bile registrirane pred več kot 20 leti (modra črta). Za analizo smo uporabili vse jame, registrirane pred letom 1995; teh jam je 6600. Zmanjševanje povprečne napake lege je pri teh jamah bistveno počasnejše, saj je vezano na naknadno preverjanje in iskanje leg jam na terenu, obenem pa je teh jam bistveno več od letnega prirastka jam v Katastru jam. Povprečna napaka lege za vse jame (zeleno črta) se umešča med nove in najstarejše jame v Katastru jam. Ob predpostavki, da bo popravljanje leg potekalo z enako dinamiko še naprej, je možno predvideti, da bo povprečna napaka lege celotnega Katastra jam dosegla vrednost GPS-a, to je 20 m, šele med letoma 2030 in 2040.

### 3 Sklep

Raziskavo smo opravili na zbirki podatkov Katastra jam, ki je ena najstarejših zbirk geografskih podatkov v Sloveniji. Kataster jam ni le arhivska zbirka, temveč sistem, ki se stalno dopolnjuje kvantitativno (okoli 400 novih jam letno) in kvalitativno (izboljševanje natančnosti lege jam). Nenazadnje za upravljanje sistema skrbita nacionalna krovna organizacija (Jamarska zveza Slovenije) in znanstvenoraziskovalni inštitut (Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU).

Rezultati raziskave kažejo, da se natančnost določanja leg jam z uvedbo novih metodologij hitro izboljšuje, pri čemer je v Katastru jam še vedno veliko število jam, katerih lege so določene po zemljevidih v merilu 1 : 25.000 ali 1 : 50.000. Primerjava med različnimi metodologijami kaže, da se raven napak pri določanju lege zmanjšuje, a navkljub uvedbi GPS-a te napake v povprečju znašajo 16 m. Že raziskave izkušenega uporabnika GPS-a pa lahko izjemoma vodijo v večje napake (do 70 m). Pri ostalih uporabljenih metodah so napake lege nepričakovano visoke. Popravki podatkov zahtevajo analizo pisne dokumentacije v arhivu in individualno preverbo na terenu, kar pa je v primerih, ko je napaka lege večja od 100 m, izjemno težavno. Pomemben prispevek h kakovosti podatkov v Katastru jam pa izpostavlja tudi dinamiko uveljavljanja novih tehnologij pri terenskem delu.

Vendar so podzemne jame le del zavarovanih naravnih vrednot v Sloveniji. Z uveljavitvijo Registra naravnih vrednot, kjer so shranjeni podatki o naravnih vrednotah, je država pridobila pomembno bazo podatkov, s katerimi upravljajo pristojni upravni organi. Z vidika varovanja naravnih vrednot je namreč nujno, da se register stalno posodablja in izboljšuje kot na primer Kataster jam. Vrednost baze, v katerem so lahko napake tudi nekaj sto metrov, namreč otežuje upravljanje naravnih vrednot na terenu. Terenske izkušnje jamarjev namreč kažejo, da pri varovanju kraških jam ob izvedbi infrastrukturnih projektov ne upoštevajo njihove lege v prostoru (Tičar 2014), oziroma lahko nenatančnost leg kraških jam močno oteži sanacijo onesnaženosti v okolju (Ribeiro in Tičar 2017). V večjih bazah podatkov je natančnost leg med drugim vprašljiva tudi na primeru Registra divjih odlagališč (Matos, Oštir in Kranjc 2012).

Z raziskavo smo na primeru uporabe podatkov Katastra jam pokazali, da je uveljavitev novih tehnologij pri določanju lege naravnih vrednot nujna za njihovo upravljanje.

### 4 Viri in literatura

- Andrić, I., Bonacci, O. 2014: Morphological study of Red lake in Dinaric karst based on terrestrial laser scanning and sonar system. *Acta Carsologica* 43, 2-3. DOI: <https://dx.doi.org/10.3986/ac.v43i2.712>
- Breg Valjavec, M. 2014: Detection of former landfills in gravel plain using geomorphometric analysis and High-Resolution LiDAR DTM. *Acta geographica Slovenica* 54-1. DOI: <https://dx.doi.org/10.3986/AGS54106>

- Chan, W. S., Xu, Y. L., Ding, X. L., Xiong, Y. L., Dai, W. J. 2006: Assessment of dynamic measurement accuracy of GPS in three directions. *Journal of Surveying Engineering* 132-3. DOI: [https://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(2006\)132:3\(108\)](https://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(2006)132:3(108))
- Čekada, M. 2013: Statistical evaluation of cave location precision based on cartographic sources. 16th International Congress of Speleology. Brno.
- Čekada, M., Gostinčar, P. 2016. Uporaba lidarja v jamarstvu. GIS v Sloveniji 13. Ljubljana.
- Čekada, M., Gostinčar, P., Ladišič, B. 2017: Application of lidar data for cave entrance identification. 17th International Congress of Speleology. Sydney.
- Eckl, M. C., Snay, R. A., Soler, T., Cline, M. W., Mader, G. L. 2001: Accuracy of GPS-derived relative positions as a function of interstation distance and observing-session duration. *Journal of Geodesy* 75-12.
- Gams, I. 2004: Kras v Sloveniji v prostoru in času. Ljubljana.
- Grozić, D., Kukuljan, L. 2017: Kad rekognosciranje postane kabinetni rad. *Subterranea Croatica* 15-1.
- Hudoklin, A. 2007: Dolenjske jame kot naravne vrednote. *Dolenjski kras* 5. Novo mesto.
- Lajovic, A. 2018: Zgodovina Jamarske zveze Slovenije. Medmrežje: <https://www.jamarska-zveza.si/index.php/o-nas/zgodovina> (15. 1. 2018).
- Kasprzak, M., Sobczyk A. 2017: Searching for the void: improving cave detection accuracy by multifaceted geophysical survey reconciled with LiDAR DTM. *Zeitschrift für Geomorphologie* 61-2. DOI: [https://dx.doi.org/10.1127/zfg\\_suppl/2017/0327](https://dx.doi.org/10.1127/zfg_suppl/2017/0327)
- Kataster jam 2018. Jamarska zveza Slovenije, Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU. Ljubljana, Postojna.
- Kobal, M., Bertonec, I., Pirotti, F., Kutnar, L. 2014: Lidar processing for defining sinkhole characteristics under dense forest cover: a case in the Dinaric mountains. ISPRS Technical Commission VII Symposium. Istanbul. DOI: <https://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-113-2014>
- Kokalj, Ž., Zakšek, K., Oštir, K. 2013: Visualizations of lidar derived relief models. *Interpreting Archaeological Topography: Airborne Laser Scanning, 3D Data and Ground Observation*. Oxford.
- Kolega, N., Poklar, M. 2012: Morphological analysis of the Slovenian coast with data from lidar and sonar ranging. *Acta geographica Slovenica* 52-1. DOI: <https://dx.doi.org/10.3986/AGS52105>
- Mators, J., Oštir, K., Kranjc, J. 2012: Attractiveness of roads for illegal dumping with regard to regional differences in Slovenia. *Acta geographica Slovenica* 52-2. DOI: <https://dx.doi.org/10.3986/AGS52207>
- Mihevc, A. 2016: Uporaba lidarskih posnetkov v geomorfologiji krasa na primeru brezstropih jam. Srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko. Ljubljana.
- Moen, A. R., Pastor, J., Cohen, Y. 1997: Accuracy of GPS Telemetry Collar Locations with Differential Correction. *Journal of Wildlife Management* 61-2. DOI: <https://dx.doi.org/10.2307/3802612>
- Navodila za izpolnjevanje zapisnikov Katastra jam. Jamarska zveza Slovenije. Ljubljana, 2014.
- Novaković, G., Mlekuž, D., Rozman, L., Lazar, A., Peric, B., Cerkenik, R., Peternelj, K., Erič, M. 2014: New approaches to understanding the world natural and cultural heritage by using 3D technology: UNESCO's Škocjan Caves, Slovenia. *International Journal of Heritage in the Digital Era* 3-4. DOI: <https://dx.doi.org/10.1260/2047-4970.3.4.629>
- Pravilnik o določitvi in varstvu naravnih vrednot. Uradni list Republike Slovenije 110/2004. Ljubljana.
- Ribeiro, D., Tičar, J. 2017: The problematics of cave pollution in Bela krajina. *Natura Sloveniae* 19-1.
- Tičar, J. 2014: Varovanje geomorfološke dediščine na primeru Jame na Grohotih. 3. zborovanje slovenskih geomorfologov. Ljubljana.
- Triglav Čekada, M. 2011: Možnosti uporabe zračnega laserskega skeniranja (LIDAR) za geomorfološke študije. *Geografski vestnik* 83-2.
- Triglav Čekada, M., Bric, V., 2015: Končan je projekt laserskega skeniranja Slovenije. *Geodetski vestnik* 59-3.
- Triglav Čekada, M., Bric, V., Mongus, D. 2015: Napredne analize površja s podatki laserskega skeniranja Slovenije. *Zbornik posveta 43. geodetskega dne*. Ljubljana.
- Uredba o zvrsti naravnih vrednot. Uradni list Republike Slovenije 52/2002. Ljubljana.

Weishampel, J. F., Hightower J. N., Chase, A. F., Chase, D. Z., Patrick R., A. 2011: Detection and morphologic analysis of potential below-canopy cave openings in the karst landscape around the Maya polity of Caracol using airborne LiDAR. *Journal of Cave and Karst Studies* 73-3, DOI: <https://dx.doi.org/10.4311/2010EX0179R1>

Zakon o ohranjanju narave. Uradni list Republike Slovenije 56/1999. Ljubljana.

Zakon o varstvu podzemnih jam. Uradni list Republike Slovenije 2/2004. Ljubljana.





# GEODEDIŠČINA IN POKRAJINSKA RAZNOLIKOST SLOVENIJE

**Jure Tičar, dr. Drago Perko, Manca Volk Bahun**

ZRC SAZU, Geografski inštitut Antona Melika

jure.ticar@zrc-sazu.si, drago@zrc-sazu.si, manca.volk@zrc-sazu.si

UDK: 911.2:551.43(497.4)

## IZVLEČEK

### **Geodediščina in pokrajinska raznolikost Slovenije**

Z veliko pokrajinsko raznolikostjo Slovenije je povezana tudi njena naravna in kulturna dediščina. Register naravnih vrednot Slovenije vključuje tudi številne enote geodediščine, ki so zavarovane kot naravne vrednote državnega ali lokalnega pomena. Med enotami naravne dediščine izrazito prevladujejo jame, ki so z Zakonom o varstvu podzemnih jam prav tako opredeljene kot naravne vrednote državnega pomena. Z uporabo geografskih informacijskih sistemov smo analizirali 13.113 enot geodediščine glede na 9 pokrajinskih tipov, 4 skupine pokrajinskih tipov, nekatere tipe zavarovanih območij ter analizirali povezanost med pokrajinsko raznolikostjo in gostoto geodediščine. Ugotovili smo, da je razmeroma majhna, vendar statistično značilna.

## KLJUČNE BESEDE

geodediščina, pokrajinska raznolikost, pokrajinska vroča točka, pokrajinski tip, GIS, Slovenija

## ABSTRACT

### **Geoheritage and landscape diversity of Slovenia**

Slovenia's high landscape diversity results in its natural and cultural heritage. The Natural Heritage Register of Slovenia includes many geoheritage sites, which are protected as natural heritage of national or local importance. Caves, which are clearly dominant by their number among the natural heritage sites, are also defined as natural heritage of national importance according to the Cave Protection Act. Using geographic information systems we analyzed 13,113 geoheritage sites according to 9 landscape types, 4 groups of landscape types, some types of protected areas and analyzed connection between landscape diversity and density of geoheritage hotspots. We found that the correlation is relatively small, but statistically significant

## KEY WORDS

geoheritage, landscape diversity, landscape hotspots, landscape type, GIS, Slovenia

## 1 Uvod

Slovenija leži na robu Alp, ki so skupaj z jugovzhodno Francijo in južno Skandinavijo najbolj pokrajinsko raznolika območja v Evropi. Po eni izmed študij je Slovenija kljub svoji majhnosti povprečno celo najbolj raznolika evropska država (Ciglič in Perko 2013). Z veliko pokrajinsko raznolikostjo Slovenije je povezana tudi njena bogata naravna in kulturna dediščina oziroma velika geodiverziteteta.

V 90-ih letih 20. stoletja so geologi in geomorfologi z izrazom geodiverziteteta začeli opisovati raznolikost nežive narave. Sodobno dojemanje označuje geodiverziteteta kot raznolikost nežive narave glede na geološke prvine (kamnine, minerali in fosili), geomorfološke prvine (oblike in procesi) in prsti (Gray 2013). Geodiverziteteta je pomemben del geodediščine. Ima pomembno znanstveno, izobraževalno, kulturno ali estetsko vrednost (IUCN 2018).

Glede na razvoj vrednotenja geodediščine po svetu so bile slovenske raziskave izpeljane že razmeroma zgodaj. Prve raziskave so uveljavile preproste numerične metode za določanje pokrajinske privlačnosti (Orožen Adamič 1970). Najbolj sistematične raziskave vrednotenja geodiverziteteta so bile izvedene v Alpah v okolici Blejskega jezera (Erhartič 2010a) in na območju Doline Triglavskih jezer (Erhartič 2012). Nekatere so obravnavale zgolj posamezne geomorfološke ali hidrološke oblike, kot so slapovi (Erhartič 2010b). Najnovejše raziskave so se osredotočile predvsem na Dinarsko gorovje oziroma analizo vročih točk geodiverziteteta v Krajinskem parku Rakov Škocjan (Stepišnik in Repe 2015), zgornji Pivški kotlini (Trenchovska in Stepišnik 2017) in Regijskem parku Škocjanske jame (Stepišnik in Trenchovska 2018). Raziskave dopolnjuje tudi ocena urbane geodiverziteteta in vpliva geomorfoloških prvin pokrajine na razvoj Ljubljane (Tičar s sodelavci 2017).

Nekatere raziskave se osredotočajo tudi na analizo pokrajinske raznolikosti znotraj širših sklenjenih območij. Ena med njimi je pokrajinsko raznolikost Slovenije izračunala z geografskim informacijskim



JURE TIČAR

Slika 1: Pestra in razgibana pokrajina Bovške kotline je primer pokrajinske vroče točke v alpskem gorovju.

sistemom na temelju digitalnih podatkov o reliefu, kamninah in rastlinstvu. Območja z visoko pokrajinsko raznolikostjo je opredelila kot pokrajinske vroče točke (slika 1), območja z nizko pokrajinsko raznolikostjo pa kot pokrajinske mrzle točke (Hrvatini in Perko 2016; Perko in Ciglič 2016; Perko, Ciglič in Hrvatini 2017).

Rezultati tovrstnih analiz se pogosto uporabljajo pri nadaljnji analizi geoturističnega ali izobraževalnega potenciala obravnavanih območij (Stepišnik in Repe 2015; Stepišnik, Ilc Klun in Repe 2017).

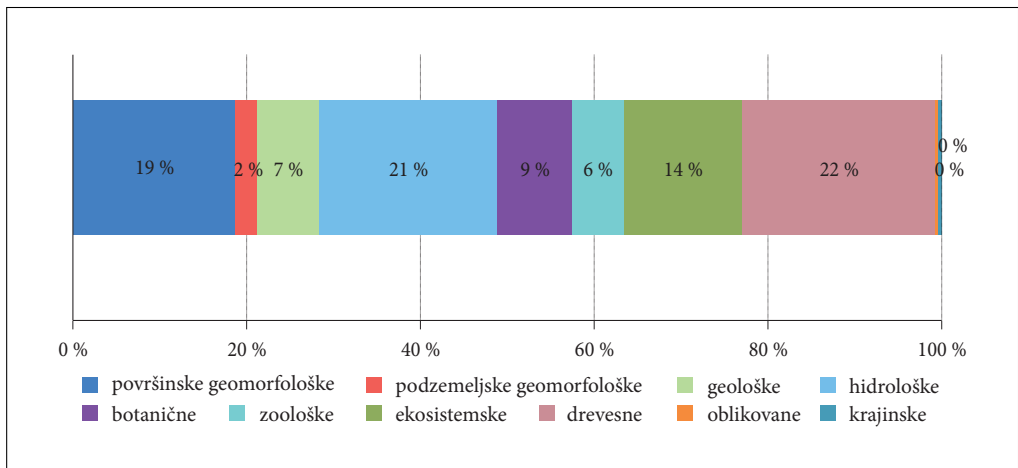
Pomembne prvine pokrajinske raznolikosti so tudi naravne vrednote. V Zakonu o ohranjanju narave (1999) so naravne vrednote opredeljene kot redke, dragocene, znamenite ali drugi naravni pojav oziroma del žive narave, naravno območje ali del naravnega območja, ekosistem, (po)krajina ali oblikovana narava. Z upoštevanjem dodatnih meril se naravnim vrednotam dodeli status naravne vrednote državnega ali lokalnega pomena (Zakon o ohranjanju ... 1999). Naravne vrednote so na podlagi značilnosti naravnih pojavov in oblik razvrščene v deset razredov (slika 2). Med kategorije naravnih vrednot so obenem uvrščeni tudi minerali in fosili (Uredba o zvrsteh ... 2002).

Število naravnih vrednot se nenehno povečuje, predvsem zaradi registracije novih podzemnih jam. Po podatkih Katastra jam (2017) je namreč v Sloveniji registriranih 12.346 podzemnih jam. Podzemne jame so z Zakonom o varstvu podzemnih jam (2004) opredeljene kot naravne vrednote državnega pomena in so v lasti države. Zakon obenem opredeljuje aktivnosti, povezane z uporabo podzemnih jam, ter določa varstvene režime, s katerimi preprečuje škodljive vplive na jamsko okolje. Podzemne jame razvršča med zaprte in odprte jame, slednje pa deli še na odprte jame s prostim vstopom in odprte jame z nadzorovanim vstopom. Izpostavljene so tudi turistične jame (22), ki imajo opredeljene dodatne ukrepe varstva (Zakon o varstvu ... 2004). Čeprav so podzemne jame v prostoru največkrat prikazane kot točkovni objekt z opredeljenim vhodom, pa je območje vpliva nanje površje nad podzemno jamo, v primeru vodnega toka pa porečje voda, ki tečejo v podzemno jamo (Uredba o zvrsteh ... 2002). Poseben status imajo Škocjanske jame, ki so bile zaradi izjemne geomorfološke, hidrološke in biotske raznovrstnosti leta 1986 vpisane na seznam svetovne naravne dediščine UNESCO, leta 1999 pa še na mednarodni Ramsarski seznam mokrišč (Gams 2004).

V Sloveniji delimo zavarovana območja na:

- širša zavarovanja območja (narodni park, regijski park in krajinski park) ter
- ožja zavarovana območja (naravni spomenik, strogi naravni rezervat in naravni rezervat).

V prispevku podrobneje obravnavamo širša zavarovana območja (Zakon o ohranjanju ... 1999). Kot posebna varstvena območja so zaradi habitatov in habitatnih tipov opredeljena še območja Nature 2000



Slika 2: Delež pojavljanja posameznih kategorij naravnih vrednot.

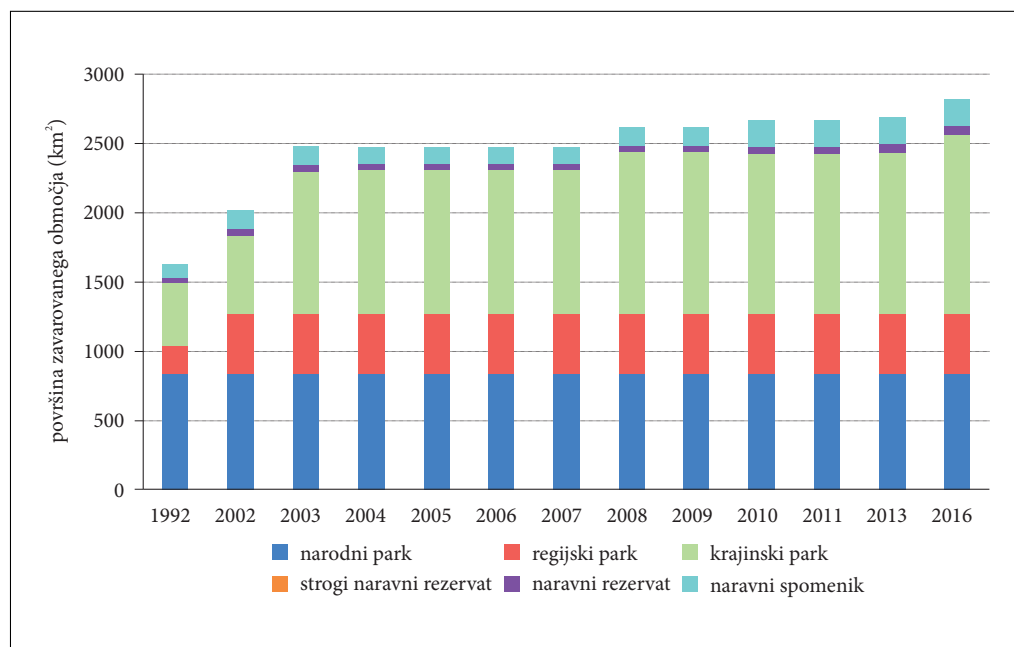
(Berginc, Kremesec Jevšenak in Vidic 2007). V Sloveniji smo ustanovili naslednja zavarovana območja (slika 3):

- 1 narodni park,
- 3 regijske parke,
- 45 krajinskih parkov,
- 1 strogi naravni rezervat,
- 55 naravnih rezervatov in
- 1164 naravnih spomenikov.

Skupna površina vseh 1269 zavarovanih območij meri 2817,11 km<sup>2</sup>, kar je 13,9 % državnega ozemlja. Narodni park zajema površino 839,82 km<sup>2</sup>, regijski parki 429,91 km<sup>2</sup>, krajinski parki 1299,71 km<sup>2</sup>, ostala zaščitena območja pa 247,67 km<sup>2</sup> (Register zavarovanih območij 2016).

V Sloveniji sta bila po letu 2010 ustanovljena dva geoparka kot posebni zaščiteni območji izjemne geodiverzitete: Geopark Karawanken – Karavanke (1067 km<sup>2</sup>) in Geopark Idrija (294 km<sup>2</sup>) (Fajmut Štrucl, Gorjup Kavčič in Režun 2015).

Glavni cilj naše raziskave je bil s pomočjo geografskih informacijskih sistemov določiti prostorsko razporeditev enot posameznih kategorij geodediščine v Sloveniji in gostoto njihovega pojavljanja glede na pokrajinske tipe in tipe zavarovanih območij. Hkrati smo želeli ugotoviti, ali sta njihovo razporeditev in gostoto pojavljanja pozitivno ali negativno povezani. Zato smo izračunali korelacijo med pokrajinsko raznolikostjo in gostoto geodediščine ter preverjali prostorsko prekrivanje med pokrajinskimi vročimi točkami in zgoščenimi jedri posameznih kategorij geodediščine, ki so nekakšne vroče točke geodediščine. Ugotavljali smo tudi, ali značilnosti povezanosti med pokrajinsko raznolikostjo in zgoščenostjo enot geodediščine veljajo za vse njene kategorije, ali pa se razlikujejo po posameznih kategorijah geodediščine. Ugotavljali smo tudi, ali značilnosti povezanosti med pokrajinsko raznolikostjo in zgoščenostjo enot geodediščine veljajo za vse njene kategorije, ali pa se razlikujejo po posameznih kategorijah geodediščine.



Slika 3: Površina zavarovanih območij v Sloveniji med letoma 1992 in 2016.

## 2 Metode dela in podatki

Po podatkih Registra naravnih vrednot (2016) ima v Sloveniji status naravne vrednote 16.115 objektov, od tega je 10.725 podzemnih jam, katerih register se zaradi njihove številčnosti vodi vzporedno. Podzemne jame so obravnavane kot vrednote državnega pomena, med ostalimi naravnimi vrednotami pa jih je 1996 (37,03 %) državnega pomena in 3394 (62,97 %) lokalnega pomena.

Povprečna gostota naravnih vrednot v Sloveniji je 0,29 enote na km<sup>2</sup>, kar pomeni eno naravno vrednoto na 3,23 km<sup>2</sup>. Med naravnimi vrednotami je 2735 objektov (50,74 %), ki so v prostoru prikazani kot točke, 2655 (49,26 %) pa jih ima poleg točke, ki je nosilka identitete, še poligon, ki prostorsko omejuje območje naravne vrednote. Skupna površina vseh poligonov meri 2467,00 km<sup>2</sup>, kar pomeni 12,17 % površine države (Register naravnih vrednot 2016).

V raziskavo smo vključili zgolj točkovne prostorske podatke:

- Register naravnih vrednot z 2735 objekti iz leta 2016 in
- Kataster jam z 12.346 objekti iz leta 2017.

Po predhodni kategorizaciji vrednosti smo iz podatkovnega sloja Registra naravnih vrednot izbrali 767 objektov, ki so bili razvrščeni v kategorije geoloških (156), geomorfoloških (196) ali hidroloških (415) naravnih vrednot in so bili primerni za nadaljnjo analizo razporeditve geodediščine. Iz podatkovnega sloja Registra naravnih vrednot smo izpustili naravne vrednote iz kategorije podzemnih geomorfoloških naravnih vrednot, saj so že vključene v Kataster jam (slika 4).

V raziskavo smo vključili zgolj širša zavarovana območja: 1 naravni park, 3 regijske parke in 45 krajskih parkov.

Z uporabo geografskih informacijskih sistemov smo izračunali gostoto enot naravnih vrednot geodediščine, in to s premičnimi okni v obliki kroga različnih premerov. Najboljše rezultate je dal premer 10 km, zato vsi rezultati veljajo za ta premer.

V prvem delu raziskave smo obravnavali razporeditev naravnih vrednot geodediščine po devetih pokrajinskih tipih oziroma štirih skupinah pokrajinskih tipov iz pokrajinske tipizacije Slovenije (Perko 1998; Perko, Hrvatini in Ciglič 2015):

- alpske pokrajine (alpska gorovja, alpska hribovja, alpske ravnine),
- panonske pokrajine (panonska gričevja, panonske ravnine),
- dinarske pokrajine (dinarske planote, dinarske podolja in ravniki) in
- mediteranske pokrajine (sredozemska gričevja, sredozemske planote).

## 3 Rezultati

Razporeditev naravnih vrednot geodediščine (767) na ravni skupin pokrajinskih tipov je pokazala, da je največ enot v alpskih pokrajinah (49 %), sledijo enote v dinarskih pokrajinah (38 %) ter sredozemskih (8 %) in panonskih pokrajinah (5 %). Za posamezne naravne vrednote smo izračunali njihovo gostoto po tipih in skupinah tipov. Največja gostota naravnih vrednot med skupinami pokrajinskih tipov je v dinarskih pokrajinah (0,05 enote/km<sup>2</sup>), najnižja pa v panonskih pokrajinah (0,01 enote/km<sup>2</sup>). Pri pokrajinskih tipih imajo največjo gostoto alpska gorovja (0,08 enote/km<sup>2</sup>), najmanjšo pa panonske ravnine (0,01 enote/km<sup>2</sup>). Kaže, da na razporeditev naravnih vrednot močno vpliva relief, saj je v goratih in hribovitih predelih razmeroma več naravnih vrednot kot v ravninskih predelih (preglednica 1).

Podzemne jame (12.346) smo obravnavali ločeno od ostalih naravnih vrednot geodediščine. Njihova razporeditev je pokazala, da je največ podzemnih jam v dinarskih pokrajinah (53 %), nato pa v alpskih (29 %), sredozemskih (17 %) in panonskih pokrajinah (1 %). Razporeditev podzemnih jam je v največji meri odvisna od prisotnosti karbonatnih kamnin, ki prevladujejo v skupinah pokrajinskih tipov z največ podzemnimi jamami.

*Preglednica 1: Razporeditev naravnih vrednot geodediščine po 9 pokrajinskih tipih in 4 skupinah pokrajinskih tipov Slovenije.*

	število naravnih vrednot geodediščine	delež (%)	površina (km <sup>2</sup> )	gostota (število enot na km <sup>2</sup> )
<b>alpske pokrajine</b>	<b>377</b>	<b>49</b>	<b>8541</b>	<b>0,04</b>
alpska gorovja	231	30	3062	0,08
alpska hribovja	138	18	4660	0,03
alpske ravnine	8	1	819	0,01
<b>dinarske pokrajine</b>	<b>289</b>	<b>38</b>	<b>5706</b>	<b>0,05</b>
dinarska podolja in ravniki	98	13	1825	0,05
dinarske planote	191	25	3881	0,05
<b>panonske pokrajine</b>	<b>41</b>	<b>5</b>	<b>4292</b>	<b>0,01</b>
panonska gričevja	41	5	2995	0,01
panonske ravnine	0	0	1297	0,00
<b>sredozemske pokrajine</b>	<b>60</b>	<b>8</b>	<b>1734</b>	<b>0,03</b>
sredozemska gričevja	36	5	1061	0,03
sredozemske planote	24	3	673	0,04
<b>skupaj</b>	<b>767</b>	<b>100</b>	<b>20273</b>	<b>0,04</b>

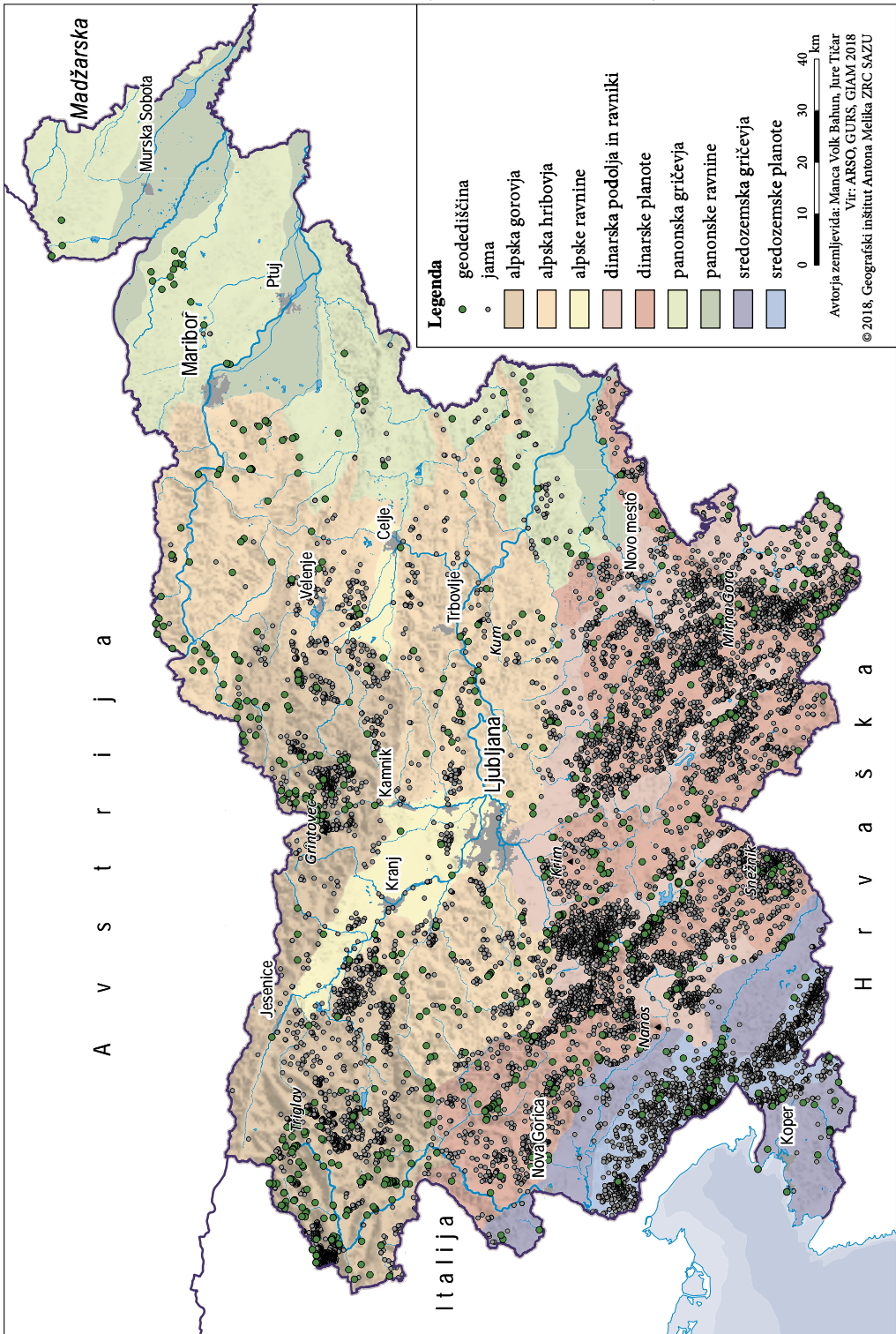
Največja gostota podzemnih jam je pri skupinah pokrajinskih tipov v sredozemskih pokrajinah (1,19 enote/km<sup>2</sup>), najmanjša pa v panonskih pokrajinah (0,02 enote/km<sup>2</sup>). Pri pokrajinskih tipih je največja gostota na sredozemskih planotah (2,79 enote/km<sup>2</sup>), najmanjša pa med panonskimi ravninami (0,02 enote/km<sup>2</sup>). Visoka gostota na sredozemskih planotah je rezultat številčnosti podzemnih jam na klasičnih kraških območjih, kot sta Kras in Podgorski kras, ter v Čičariji in v Podgrajskem podolju. Ker je na panonskih ravninah delež karbonatnih kamnin zanemarljiv, so podzemne jame tam redek geomorfološki pojav (preglednica 2).

Razporeditev naravnih vrednot geodediščine v zavarovanih območjih (slika 6) je pokazala, da je največji delež naravnih vrednot med zavarovanimi območji obsega narodni park (10 %), sledijo krajinski parki (8 %) ter nazadnje regijski parki (4 %). Preostale naravne vrednote so razporejene na ostalem ozemlju Slovenije (78 %). Razporeditev gostote je obenem premosorazmerna s stopnjo zavarovanja območij. Tako je v narodnem parku gostota nekaj več kot 0,09 enote/km<sup>2</sup>, regijskih parkih nekaj manj kot 0,08 enote/km<sup>2</sup>, krajinskih parkih nekaj manj kot 0,05 enote/km<sup>2</sup> ter na ostalih ozemljih Slovenije nekaj nad 0,03 enote/km<sup>2</sup>. Povprečna gostota enot v Sloveniji pa je 0,04 enote/km<sup>2</sup> (slika 5).

Največji delež podzemnih jam med zavarovanimi območji ima narodni park (7 %), sledijo regijski parki (4 %) ter nazadnje krajinski parki (2 %). Preostale naravne vrednote so razporejene na ostalem ozemlju Slovenije (87 %). Delež enot v posamezni kategoriji zavarovanega območja je močno odvisen od prisotnosti karbonatnih kamnin, kar je razvidno iz gostote naravnih vrednot v posameznih obravnavanih območjih. Razporeditev gostote tu ni premosorazmerna s stopnjo zavarovanja območij. Tako je v narodnem parku gostota nekaj več kot 1,06 enote/km<sup>2</sup>, regijskih parkih nekaj več kot 1,13 enote/km<sup>2</sup>, krajinskih parkih nekaj manj kot 0,23 enote/km<sup>2</sup> ter na ostalih ozemljih Slovenije nekaj nad 0,61 enote/km<sup>2</sup>. Povprečna gostota podzemnih jam v Sloveniji je 0,61 enote/km<sup>2</sup> (slika 7). Visoka vrednost gostote podzemnih jam v narodnem parku je posledica prisotnosti visokogorskega krasa, visoka vrednost gostote

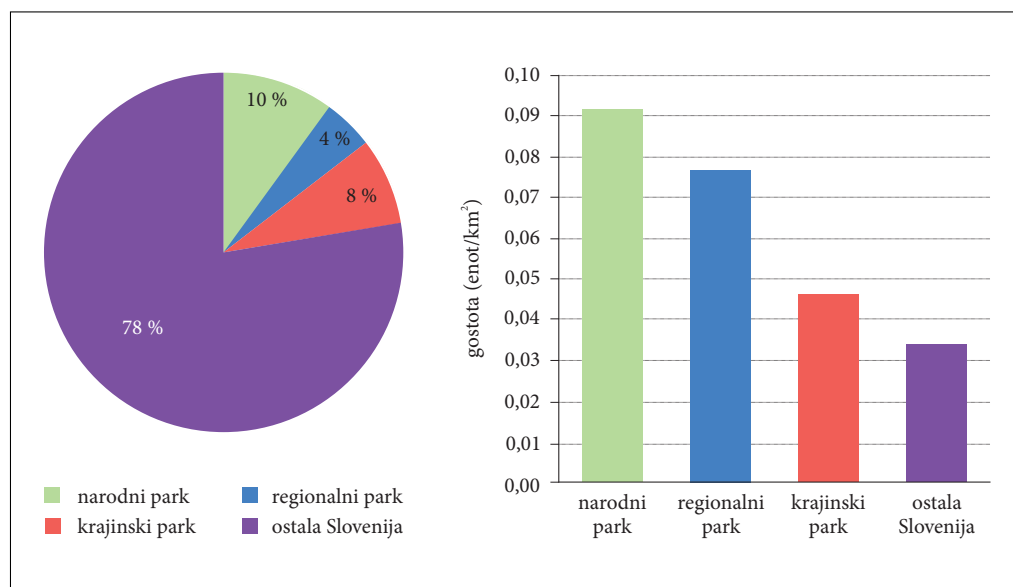
*Slika 4: Razporeditev naravnih vrednot geodediščine skupaj s podzemnimi jamami v Sloveniji glede na pokrajinske tipe. ►*

# Geodediščina in pokrajinska raznolikost Slovenije



Preglednica 2: Razporeditev podzemnih jam po 9 pokrajinskih tipih in 4 skupinah pokrajinskih tipov Slovenije.

	število podzemnih jam	delež (%)	površina (km <sup>2</sup> )	gostota (število enot na km <sup>2</sup> )
<b>alpske pokrajine</b>	<b>3624</b>	<b>29</b>	<b>8541</b>	<b>0,42</b>
alpska gorovja	2793	23	3062	0,91
alpska hribovja	718	6	4660	0,15
alpske ravnine	113	1	819	0,14
<b>dinarske pokrajine</b>	<b>6558</b>	<b>53</b>	<b>5706</b>	<b>1,15</b>
dinarska podolja in ravniki	1993	16	1825	1,09
dinarske planote	4565	37	3881	1,18
<b>panonske pokrajine</b>	<b>96</b>	<b>1</b>	<b>4292</b>	<b>0,02</b>
panonska gričevja	94	1	2995	0,03
panonske ravnine	2	0	1297	0,00
<b>sredozemske pokrajine</b>	<b>2068</b>	<b>17</b>	<b>1734</b>	<b>1,19</b>
sredozemska gričevja	188	2	1061	0,18
sredozemske planote	1880	15	673	2,79
<b>skupaj</b>	<b>12346</b>	<b>100</b>	<b>20273</b>	<b>0,61</b>

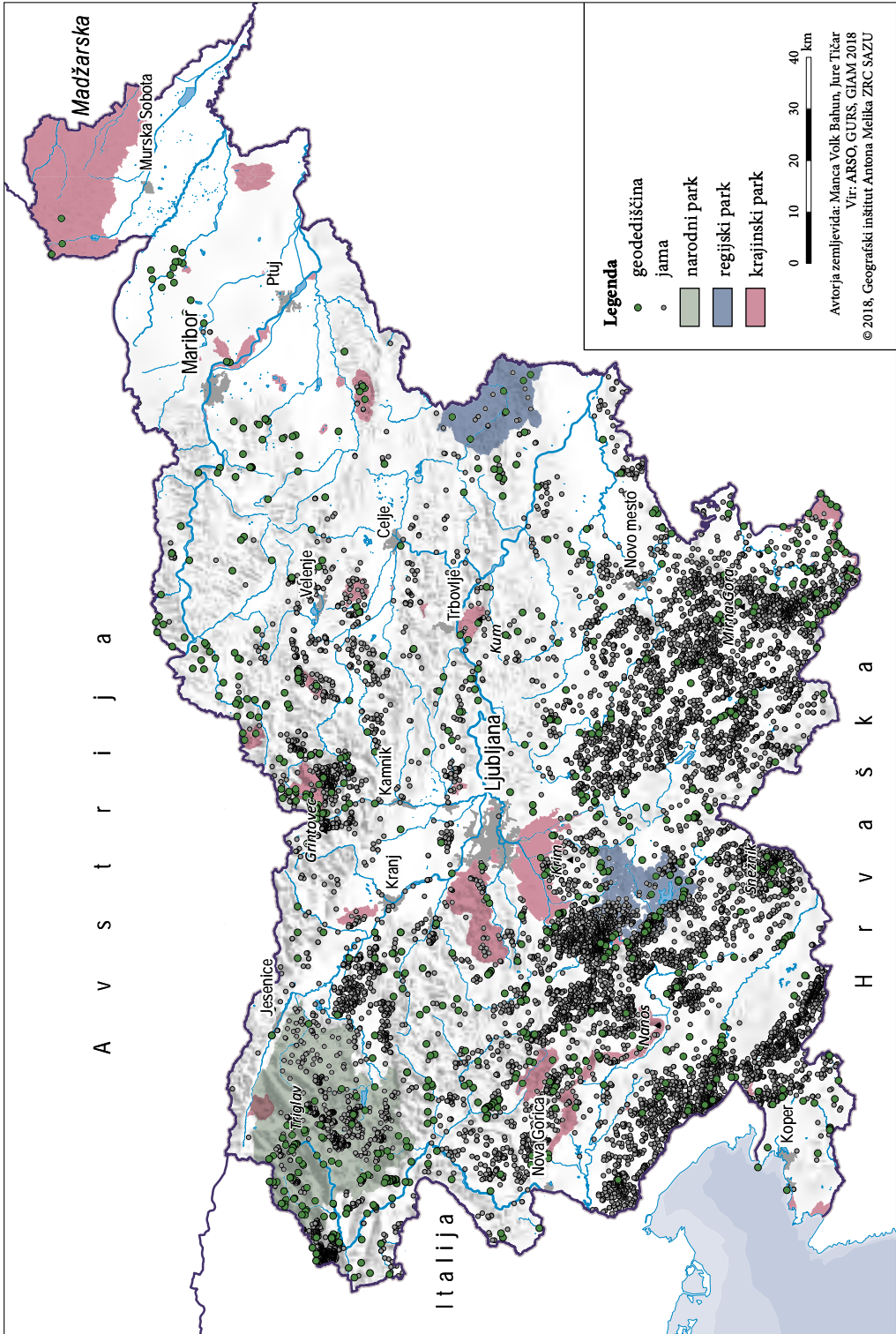


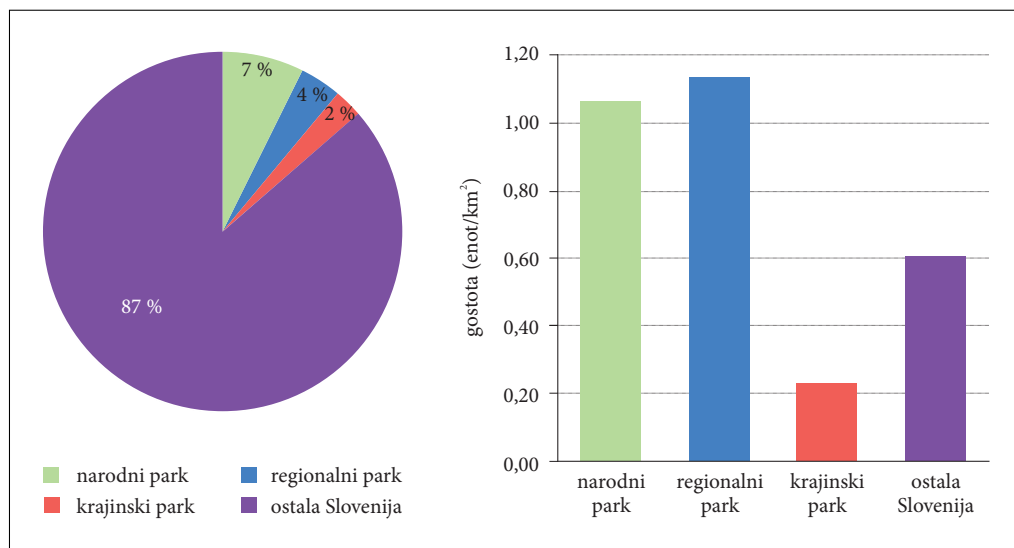
Slika 5: Razporeditev naravnih vrednot geodediščine v zavarovanih območjih Slovenije.

Slika 6: Razporeditev naravnih vrednot geodediščine skupaj s podzemnimi jamami v Sloveniji glede na zavarovana območja. ►



# Geodediščina in pokrajinska raznolikost Slovenije





Slika 7: Razporeditev podzemnih jam v zavarovanih območjih Slovenije.

v regionalnih parkih pa je povezana z visokim deležem zakraselih območij v dveh od treh regionalnih parkov.

Prostorska razporeditev naravnih vrednot geodediščine na ravni Slovenije je bila izvedena na podlagi gostote pojavljanja posamezne kategorije naravnih vrednot. Gostota točk naravnih vrednot geodediščine je največja na zahodu Slovenije, kjer so izpostavljena območja zgornjega Posočja, okolice Idrije, Škocjanskih jam, Snežnika ter kraške Ljubljaniče, večja gostota naravnih vrednot geodediščine v vzhodni Sloveniji pa je značilna predvsem za Kamniško-Savinjske Alpe, Koroške, okolico Kočevja, Belo krajino in Slovenske Gorice (slika 8).

Obraunavane naravne vrednote geodediščine so bile pri kategorizaciji razdeljene na geološke (156), geomorfološke (196) in hidrološke (415). Med naravnimi vrednotami geodediščine prevladujejo hidrološke, ki zajemajo kar 54 % vseh naravnih vrednot geodediščine, sledijo pa geomorfološke (26 %) in geološke (20 %). Naravne vrednote hidrološke geodediščine (415) sestavlja 13 različnih kategorij, med katerimi je tudi več različnih vrst izvirov. Najpogostejši so slapovi (157), kraški izviri (118), izviri (63) ter izviri mineralne vode (22) in ponori (22). Največ naravnih vrednot hidrološke geodediščine je v okolici Tolmina in Idrije, izstopajo pa še območja kraške Ljubljaniče, Snežnika, Logarske doline in Bele krajine (slika 9).

Naravne vrednote geomorfološke geodediščine (196) so med vsemi naravnimi vrednotami geodediščine najbolj raznovrstne, saj jih sestavlja kar 27 različnih kategorij. Med najbolj pogostimi so skalni osamelci (46), naravna okna (22), naravni mostovi (19), balvani (17) in spodmoli (15). Najbolj so zgoščene na območju Logarske doline, zgornjega Posočja, Trnovskega gozda, porečja reke Reke, Rakovega Škocjana in kraškega roba. Panonske in dinarske pokrajine so skoraj povsem brez naravnih vrednot geodediščine te kategorije (slika 10).

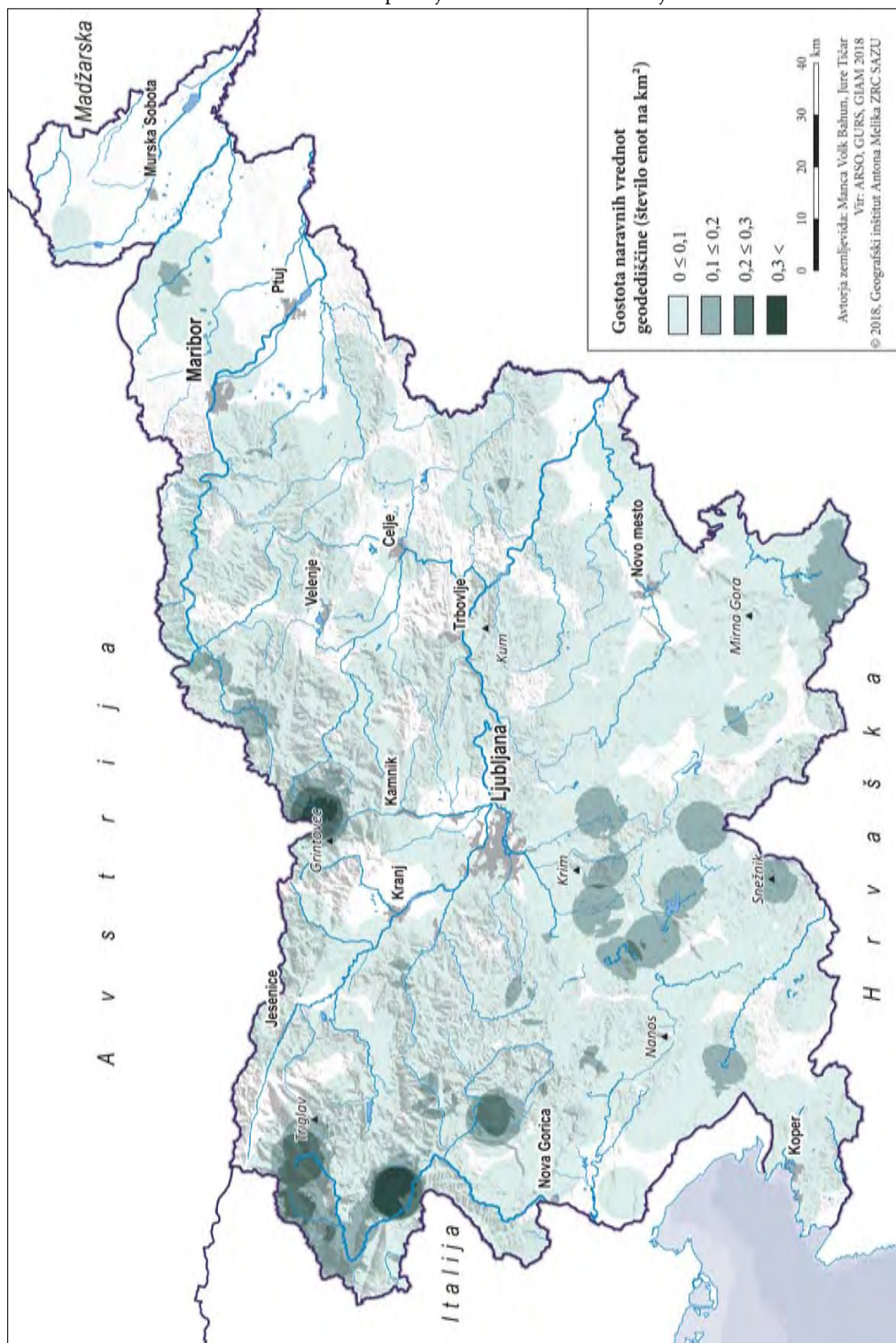
Naravne vrednote geološke geodediščine (156) so med najmanj raznovrstnimi, saj jih sestavljajo zgolj 4 kategorije. Najpogostejša so nahajališča mineralov (81), nahajališča fosilov (71), geološke gube (3)

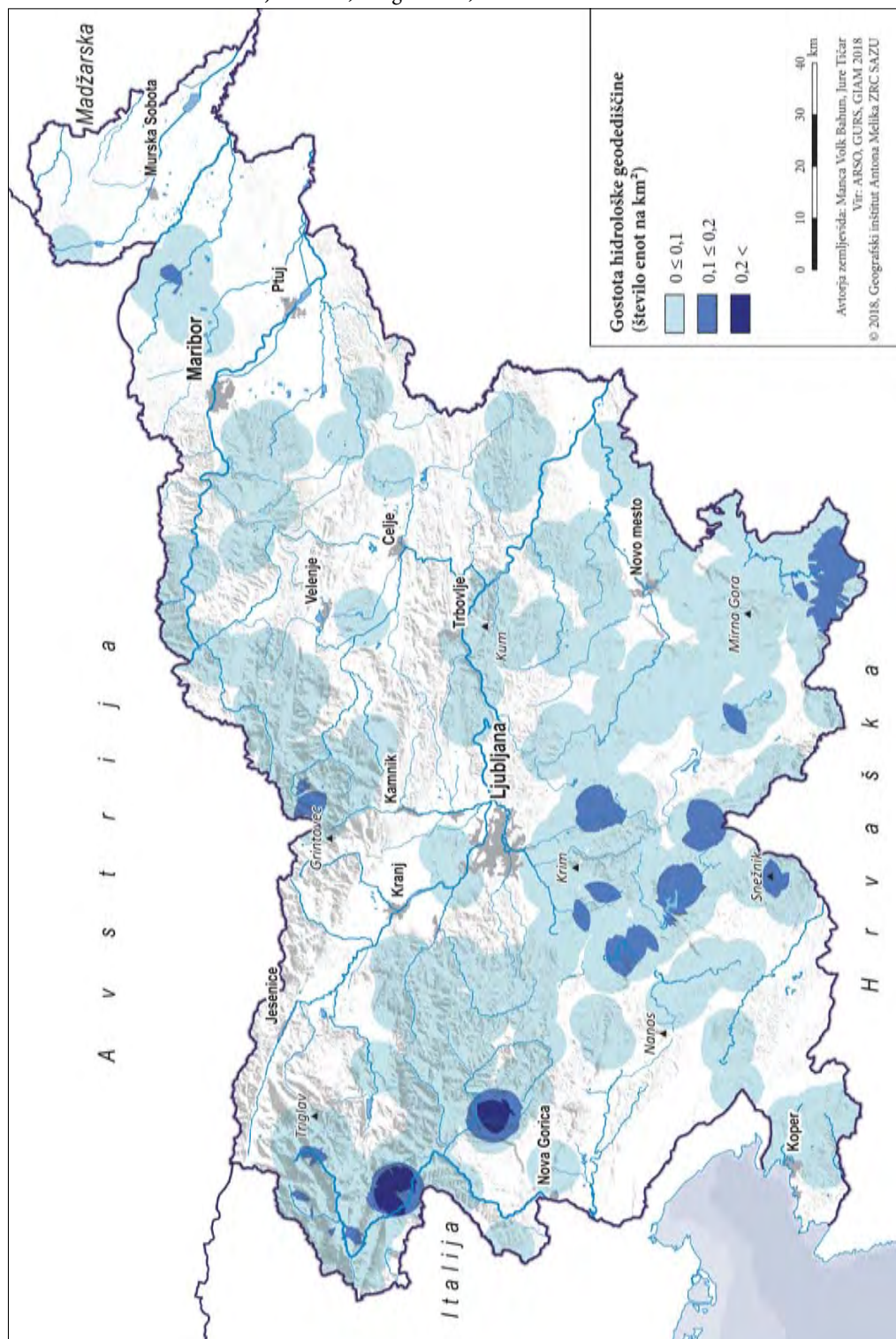
Slika 8: Gostota naravnih vrednot geodediščine v Sloveniji. ►

Slika 9: Gostota naravnih vrednot hidrološke geodediščine v Sloveniji. ► (str. 68)

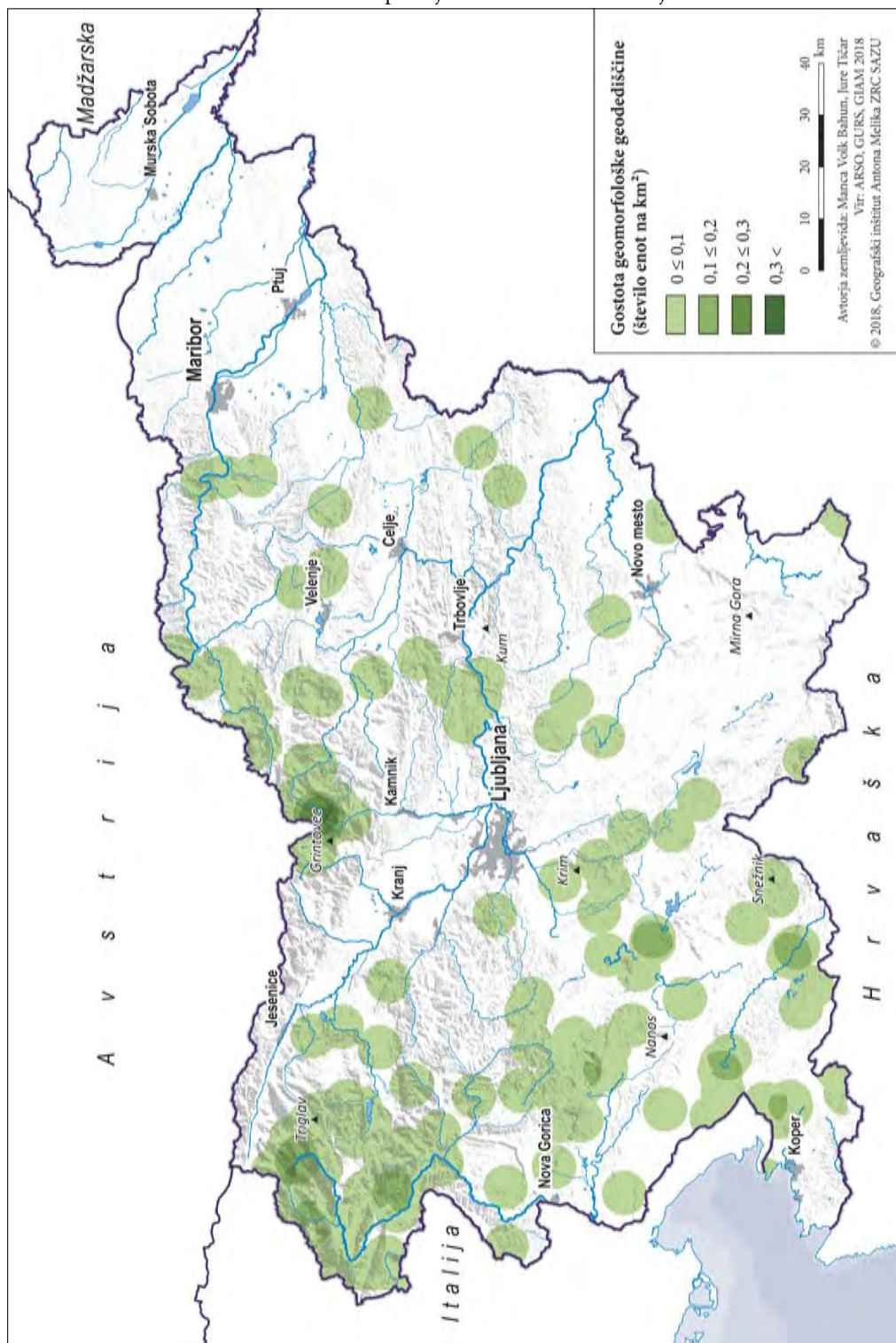
Slika 10: Gostota naravnih vrednot geomorfološke geodediščine v Sloveniji. ► (str. 69)

# Geodetična in pokrajinska raznolikost Slovenije





# Geodetična in pokrajinska raznolikost Slovenije

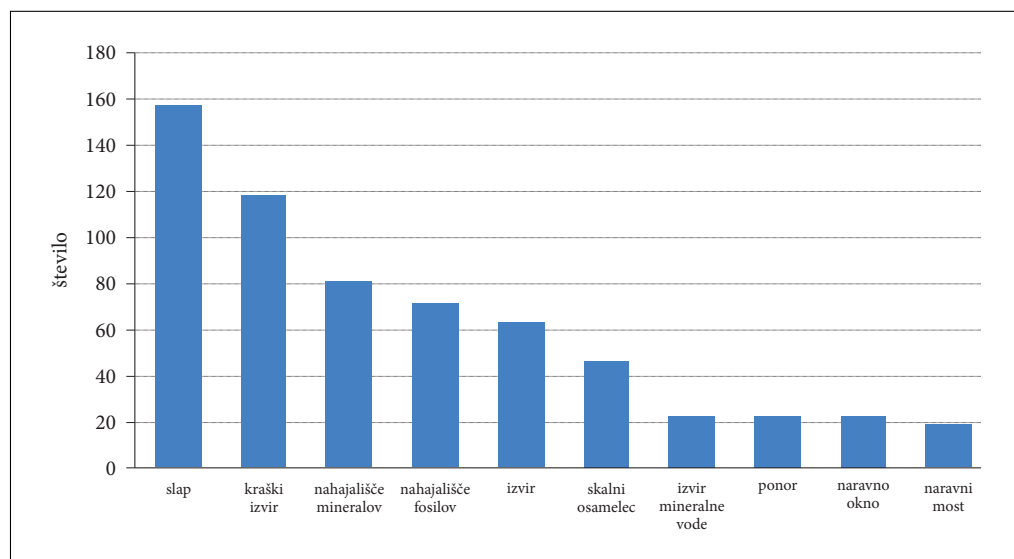


in fumarole (1). Največ naravnih vrednot geološke geodediščine je v okolici Mangarta, Jesenic, Sežane, na Koroškem in na Pohorju (slika 11).

Na podlagi vzorca 767 naravnih vrednot geodediščine smo opredelili tudi najbolj tipične naravne vrednote v Sloveniji. Med temi je kar 5 enot naravnih vrednot hidrološke geodediščine, 3 enote naravnih vrednot geomorfološke naravne dediščine in 2 enoti naravnih vrednot geološke geodediščine (slika 12). Najbolj tipični naravni vrednoti geodediščine sta slap (157) in kraški izvir (118). Sledijo jima nahajališče mineralov (81) in nahajališče fosilov (71) ter izvir (63). Pod petdesetimi enotami so skalni osamelec (46), izvir mineralne vode (22), ponor (22), naravno okno (22) ter naravni most (19). Če pa bi k tem naravnim vrednotam geodediščine prišteli še podzemne jame, bi bile le-te daleč najbolj zastopana enota naravnih vrednot geodediščine.

Kot posebno kategorijo naravne vrednote smo zaradi številčnosti (12.346) obravnavali še podzemne jame. Njihova razporeditev je v največji meri povezana s prisotnostjo in vrsto karbonatnih kamnin. Največja gostota podzemnih jam je na območju visokogorskega krasa Kanina in Rombona, kjer je raziskanih tudi sedem od osmih podzemnih jam v Sloveniji, globljih od 1000 m. Podzemne jame so pogoste tudi na območju visokogorskega krasa Dleskovške planote, kjer je raziskana ena izmed podzemnih jam, globljih od 1000 m (Kataster jam 2017). Velika gostota podzemnih jam je tudi na območjih Notranjske, še posebej med Pivško kotlino, Cerknjskim poljem, Planinskim poljem in izviri Ljubljance. Velika gostota podzemnih jam je tudi na Krasu, še posebej v okolici Sežane, kjer so jamarji iskali tok podzemne reke Reke, ter v Matarskem podolju, kjer so ponori iz Brkinov izoblikovali številne slepe doline. Velika gostota podzemnih jam je še med Komno in Triglavom, v okolici Snežnika, na Poljanski gori ter v Kočevskem rogu. Panonske ravnine, panonska gričevja, alpske ravnine in sredozemska gričevja z majhnim deležem karbonatnih kamnin pa podzemnih jam skoraj nimajo (slika 13).

Pri preučitvi povezanosti smo ugotovili, da so vsi koeficienti povezanosti nizki, t-test pri  $\alpha = 0,01$  pa pokaže, da so vseeno vsi statistično pomembni in da s tveganjem 0,01 lahko sklepamo, da je med pokrajinsko raznolikostjo in gostoto enot naravnih vrednot geodediščine značilna povezanost. Gostota

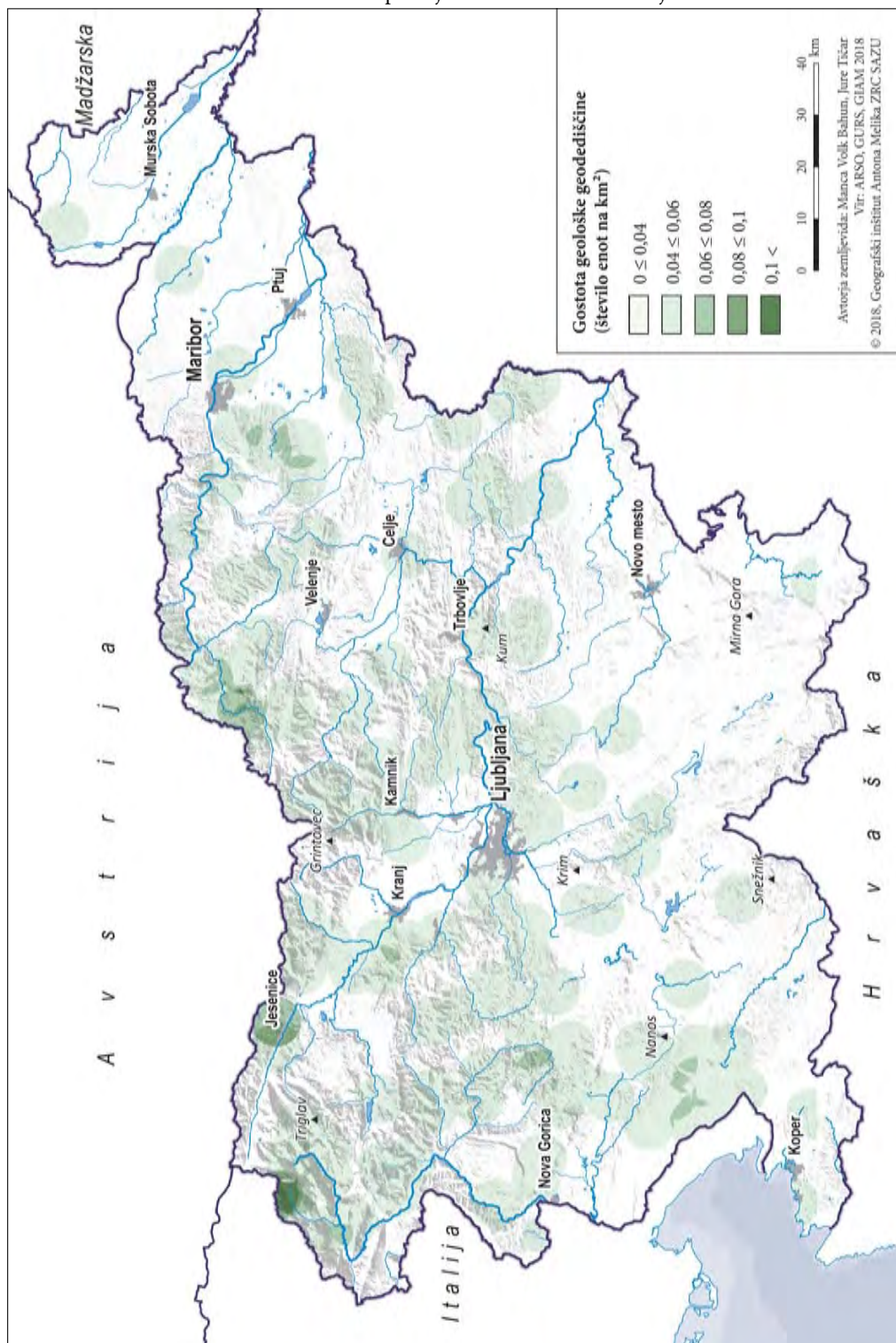


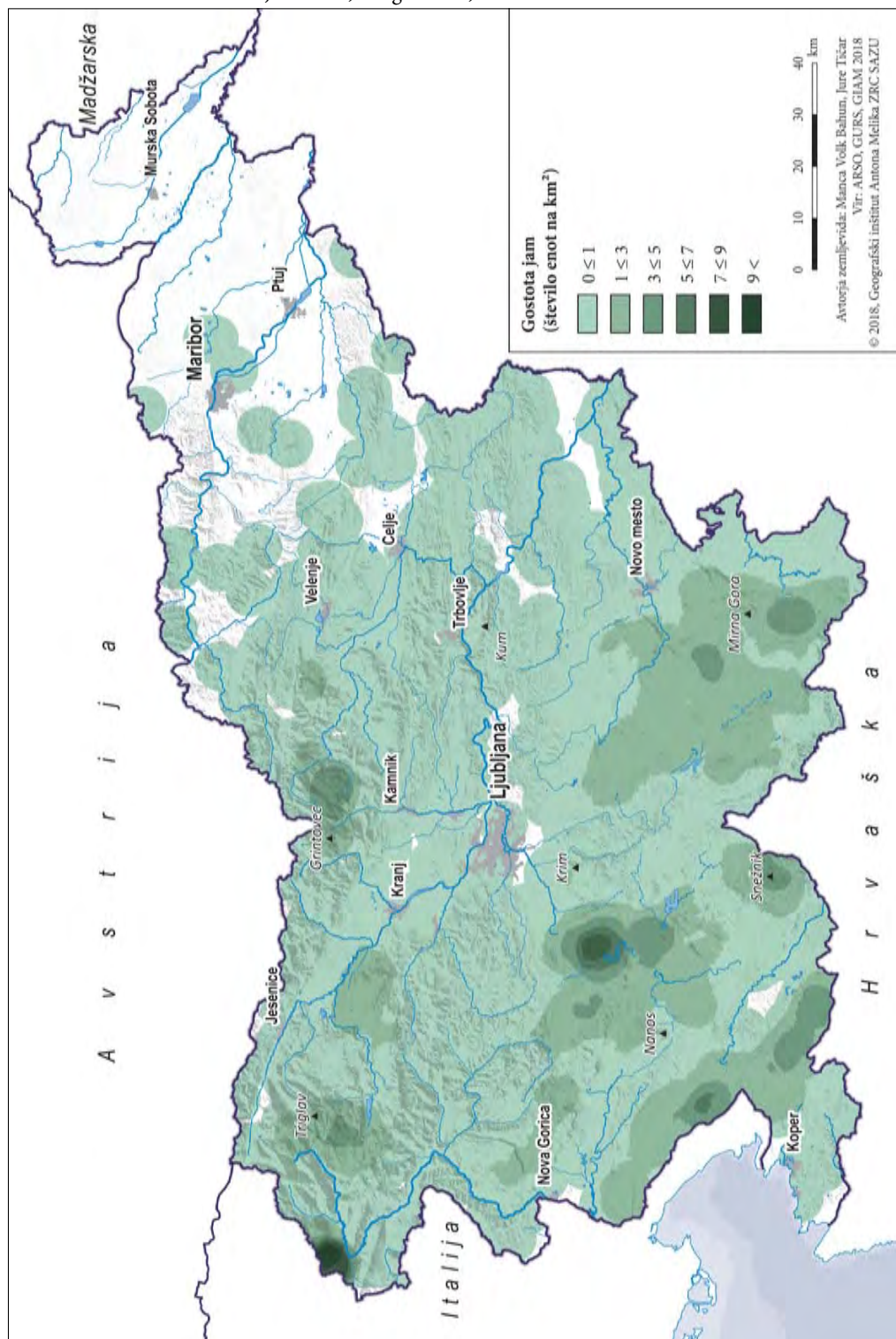
Slika 12: Deset najbolj tipičnih naravnih vrednot geodediščine v Sloveniji.

Slika 11: Gostota naravnih vrednot geološke geodediščine v Sloveniji. ►

Slika 13: Gostota podzemnih jam v Sloveniji. ► (str. 72)

# Geodetična in pokrajinska raznolikost Slovenije







naravnih vrednot geomorfološke in geološke geodediščine sta s pokrajinsko raznolikostjo povezani pozitivno, kar pomeni, da lahko ob večji pokrajinski raznolikosti pričakujemo tudi večjo gostoto teh dveh kategorij naravnih vrednot geodediščine. Gostota naravnih vrednot hidrološke geodediščine in gostota podzemnih jam pa sta povezani negativno, kar pomeni, da lahko ob večji pokrajinski raznolikosti pričakujemo manjšo gostoto teh dveh kategorij naravnih vrednot geodediščine.

Najvišja vrednost Pearsonovega koeficienta korelacije je med pokrajinsko raznolikostjo in gostoto podzemnih jam. Če upoštevamo celotno območje Slovenije, je njegova vrednost  $-0,1347$ , če pa izločimo območja brez podzemnih jam, pa  $-0,2178$ , kar je dve tretjini več. Razlog za negativno povezanost med pokrajinsko raznolikostjo in gostoto podzemnih jam je dejstvo, da je največ podzemnih jam v dinarskih in sredozemskih planotah, za katere je značilna nizka povprečna pokrajinska raznolikost. Vroče točke podzemnih jam so zato pogosto navezane na pokrajinske mrzle točke.

## 4 Sklep

S pomočjo geografskih informacijskih sistemov lahko ugotovimo temeljne značilnosti prostorske razporeditve enot posameznih kategorij naravnih vrednot geodediščine in gostote njihovega pojavljanja glede na pokrajinske tipe in tipe zavarovanih območij. Največ naravnih vrednot geodediščine in podzemnih jam je v alpskih in dinarskih pokrajinah, kjer je tudi njihova največja zgostitev. Pri podzemnih jamah se večja zgostitev pojavlja še na sredozemskih planotah. Na razporeditev naravnih vrednot geodediščine močno vpliva relief, na razporeditev podzemnih jam pa delež karbonatnih kamnin. Gostota naravnih vrednot geodediščine je prav tako povezana s stopnjo zavarovanja območij, medtem ko to ni značilno za podzemne jame. Med naravnimi vrednotami geodediščine prevladujejo predvsem naravne vrednote hidrološke geodediščine, medtem ko so naravne vrednote geomorfološke geodediščine med najbolj raznovrstnimi.

Obenem lahko odgovorimo tudi na vprašanje, ali in kako sta pokrajinska raznolikost in gostota enot naravnih vrednot geodediščine v Sloveniji povezani. Rezultati raziskave torej kažejo, da na splošno na območjih pokrajinskih vročih točk lahko pričakujemo več naravnih vrednot geološke in geomorfološke geodediščine ter manj naravnih vrednot hidrološke geodediščine in podzemnih jam.

*ZAHVALA: Prispevek temelji na raziskovalnem projektu Pokrajinska raznolikost in vroče točke Slovenije (L6-6852), ki sta ga sofinancirali Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije ter Slovenska akademija znanosti in umetnosti.*

## 5 Viri in literatura

- Berginc, M., Kremesec Jevšenak, J., Vidic, J. 2007: Sistem varstva narave v Sloveniji. Ljubljana.
- Ciglič, R., Perko, D. 2013: Europe's landscape hotspots. *Acta geographica Slovenica* 53-1. Ljubljana. DOI: <https://doi.org/10.3986/AGS53106>
- Erhartič, B. 2010a: Conserving geoheritage in Slovenia through geomorphosite mapping. Mapping geoheritage, Laussane.
- Erhartič, B. 2010b: Geomorphosite assessment. *Acta geographica Slovenica* 50-2. DOI: <https://doi.org/10.3986/AGS50206>
- Erhartič, B. 2012: Geomorfološka dediščina v Dolini Triglavskih jezer. Ljubljana.
- Fajmut Štrucl, S., Gorjup Kavčič, M., Režun, B. 2015: Naravne vrednote in geoparki. UNESCO forum. Koper.
- Gams, I. 2004: Kras v Sloveniji v prostoru in času. Ljubljana.
- Gray, M. 2013: Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature. Chichester.

- IUCN 2018: Geoheritage. Medmrežje: <https://www.iucn.org/theme/protected-areas/wcpa/what-we-do/geoheritage> (4. 2. 2018)
- Hrvatín, M., Perko, D. 2016: Morfometrične razlike med pokrajinskimi vročimi in mrzlimi točkami. GIS v Sloveniji 13. Ljubljana.
- Kataster jam. Jamarska zveza Slovenije. Ljubljana, 2017.
- Orožen Adamič, M. 1970: Kako naj vrednotimo pokrajino? Proteus 33-4.
- Perko, D. 1998: Regionalizacija Slovenije. Acta geographica Slovenica 38.
- Perko, D., Ciglič, R. 2016: Določanje pokrajinskih vročih in mrzlih točk iz pokrajinskih tipizacij Slovenije. GIS v Sloveniji 13. Ljubljana.
- Perko, D., Ciglič, R., Hrvatín, M. 2017: Determination of landscape hotspots of Slovenia. Acta geographica Slovenica 57-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/AGS.4618>
- Perko, D., Hrvatín, M., Ciglič, R. 2015: A methodology for natural landscape typification of Slovenia. Acta geographica Slovenica 55-2. DOI: <https://doi.org/10.3986/AGS.1938>
- Register naravnih vrednot. Agencija Republike Slovenije za okolje. Ljubljana, 2016.
- Register zavarovanih območij. Agencija Republike Slovenije za okolje. Ljubljana, 2016.
- Stepišnik, U., Ilc Klun, M., Repe, B. 2017: Vrednotenje izobraževalnega potenciala geodiverzitete na primeru Cerkniškega polja. Dela 47. DOI: <https://doi.org/10.4312/dela.47.1.5-39>
- Stepišnik, U., Repe, B. 2015: Identification of geodiversity hotspots on example of the Rakov Škocjan Landscape Park. Dela 44. DOI: <https://doi.org/10.4312/dela.44.1.45-62>
- Stepišnik, U., Trenchovska, A. 2018: A new quantitative model for comprehensive geodiversity evaluation: the Škocjan Caves Regional Park, Slovenia. Geoheritage 9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12371-017-0216-5>
- Tičar, J., Komac, B., Zorn, M., Ferk, M., Hrvatín, M., Ciglič, R. 2017: From urban geodiversity to geo heritage: the case of Ljubljana (Slovenia). Quaestiones Geographicae 36-3. DOI: <https://doi.org/10.1515/quageo-2017-0023>
- Trenchovska, A., Stepišnik, U. 2017: The quantitative geodiversity model applied on upper Pivka karst, Slovenia. Mednarodna konferenca »Geodiversity, geoheritage and geotourism in karst areas«. Zagreb.
- Uredba o zvrsteh naravnih vrednot. Uradni list Republike Slovenije 52/2002. Ljubljana.
- Zakon o ohranjanju narave. Uradni list Republike Slovenije 56/1999. Ljubljana.
- Zakon o varstvu podzemnih jam. Uradni list Republike Slovenije 2/2004. Ljubljana.

# GEODETSKA MASNA BILANCA SLOVENSКИH LEDENIKOV IZ PODATKOV LASERSKEGA SKENIRANJA

**dr. Mihaela Triglav Čekada**

*Geodetski inštitut Slovenije in Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
mihaela.triglav@gis.si*

UDK: 528.8.044.6: 551.324(234.323.6)

## IZVLEČEK

### **Geodetska masna bilanca slovenskih ledenikov iz podatkov laserskega skeniranja**

*Za lažje preučevanje, koliko snega je na ledenik padlo v redilni dobi ter koliko snega in ledu je v talilni dobi izginilo, se uporablja količina, imenovana masna bilanca ledenika. Spremljanje masne bilance pove ali se bo ledenik ohranil (če je ta dolgoročno pozitivna) ali bo izginil (če je ta dolgoročno negativna). V analizi smo uporabili tri zbirke aerolaserskih podatkov, ki pokrivajo območji Triglavskega ledenika in Ledenika pod Skuto. Izračunali smo poletno specifično masno bilanco za leto 2012 ter neto specifično masno bilanco za obdobje 2012–2014.*

## KLJUČNE BESEDE

*geodetska masna bilanca, aerolasersko skeniranje (lidar), Triglavski ledenik, Ledenik pod Skuto*

## ABSTRACT

### **Geodetic mass balance of Slovenian glaciers based on aerial laser scanning**

*In order to examine how much snow has fallen onto the glacier in the accumulation period and how much snow and ice has melted in the melting period a quantity called the mass balance is used. The mass balance tells us whether the glacier will be preserved (if it is positive in the long run) or will disappear (if negative in the long term). In the study three sets of aerial laser scanning data (lidar) were used for the area of the Triglav Glacier and the Skuta Glacier in Slovenia. Calculated were the summer specific mass balances for the year 2012 and the net specific mass balance for the period 2012–2014.*

## KEY WORDS

*geodetic mass balance, aerial laser scanning (lidar), Triglav glacier, Skuta glacier*

## 1 Uvod

Pri preučevanju odziva ledenikov na podnebne spremembe in vplive ledenikov na hidrološki sistem ni dovolj poznati zgolj geometrijske značilnosti rasti ali zmanjševanja ledenikov izraženih z dolžinskimi spremembami, spremembami površine ali s spremembami v prostornini ledenika. Poznati moramo tudi spremembe v masi ledenika. Zmanjševanje mase ledenika lahko namreč neposredno povežemo z meteorološkimi parametri, ki opisujejo, koliko padavin je na ledenik padlo v določenem časovnem obdobju (Benn in Evans 2010). Tako lahko ugotovimo, koliko mase padavin se je na ledeniku obdržalo in koliko jo je odteklo oziroma izhlapelo iz ledenika. Sprememba v masi ledenika je opisana s količino, imenovano masna bilanca ledenika, ki jo bomo podrobno opisali v naslednjem poglavju. Pri večjih ledenikih (večjih od 50 ha) je masna bilanca ledenika zelo pomembna za preučevanje hidroloških razmer, saj če ledenik izgublja veliko mase v talilni dobi, bo njegova masa blažila učinke poletne suše v dolini. Pri ledeniških pokrovi nad oceani pa odtekla voda dviguje globalno višino svetovnih morij.

Spremembo v masi ledenika oziroma masno bilanco lahko merimo neposredno, imenovano tudi glaciološko, ter posredno, imenovano tudi geodetsko. Ker geodetska masna bilanca temelji na izmerjeni spremembi prostornine, jo imenujejo tudi prostorninska masna bilanca (Thibert s sodelavci 2008; Zemp s sodelavci 2010; Fischer 2011). Spremembe v masi ledenih gmot lahko merimo tudi gravimetrično, kjer s pomočjo spremembe v težnem pospešku pred izgubo mase in po izgubi mase lahko določimo spremembo v skupni masi ledene gmote v danem časovnem obdobju (Benn in Evans 2010). Za ledenike alpskega tipa se večinoma uporablja glaciološko in geodetsko metodo izmere.

Pri neposredni glaciološki metodi izmere na določenih točkah na ledeniku izkopljemo luknje, kjer izmerimo debelino različnih plasti v ledeniku (sneg, firn, led v različnih stopnjah kristalizacije) in gostoto posamezne plasti. Istočasno na točki izmere postavimo palice, ki služijo za preučevanje tanjšanja ali debeljenja ledenika. S pomočjo podatka o debelini in gostoti določene plasti izračunajo maso te plasti v ledeniku. Z večkratnimi meritvami, razporejenimi skozi celotno ledeniško leto (čas med koncem prve in koncem druge talilne sezone), lahko izračunajo, koliko mase je na ledenik padlo v obliki snega, ter koliko jo je izhlapelo oziroma odteklo. Neposredno glaciološko masno bilanco merijo po svetu na izbranem številu ledenikov – na 33 ledenikih meritve potekajo prek 40 let (Thibert s sodelavci 2008). Spremembe v prostorninah ledenikov pa merijo po vsem svetu na veliko večjem številu ledenikov. Te lahko služijo kot osnova za izračun geodetske masne bilance, ki jo lahko izračunamo s pomočjo ocenjene vrednosti gostot izginulih mas iz ledenika in znanih sprememb v prostornini ledenika. Potencial za izračun geodetskih masnih bilanc imajo zato vsi ledeniki, na katerih spremljajo vsaj enega od geometrijskih parametrov spreminjanja ledenika. V naši soseščini, na primer v Italiji spremljajo geometrijske parametre ledenikov (dolžina ledenika ali površina ledenika) na vsaj 100 ledenikih, v Avstriji pa na vsaj 150 ledenikih (Triglav Čekada s sodelavci 2012; Triglav Čekada, Zorn in Colucci 2014). Tudi umikanje naših dveh ledeniških ostankov, Triglavskega ledenika in Ledenika pod Skuto, merijo sodelavci Geografskega inštituta Antona Melika ZRC SAZU neprekinjeno že vse od leta 1946 (Gabrovec s sodelavci 2014). Arhivski posnetki so omogočili rekonstrukcijo površin Triglavskega ledenika še dlje v preteklost, vsaj do leta 1897 (Triglav Čekada, Zorn in Colucci 2014). Za Triglavski ledenik smo ocenili tudi spremembe v prostornini ledenika za obdobje od leta 1976 do 2011. Uporabili smo empirično formulo, ki omogoča izračun prostornine iz znanih površin ledenika (Triglav Čekada in Gabrovec 2013).

Namen članka je s pomočjo treh zbirk podatkov laserskega skeniranja določiti spremembo v prostornini in geodetski masni bilanci Triglavskega ledenika in Ledenika pod Skuto. Prvi dve zbirki laserskih podatkov prikazujeta ledenika na začetku in koncu iste talilne dobe (leto 2012). Tretja zbirka, podatki laserskega skeniranja Slovenije, pa ju prikazuje konec talilne dobe leta 2014.

## 2 Masna bilanca ledenika

Masna bilanca nam pove, za koliko se je zmanjšala ali povečala masa določenega ledenika v preučevanem obdobju. V nadaljevanju opisani izrazi in definicije so povzeti po Bennu in Evansu (2010) ter Fischerju (2011). Za osnovno preučevano obdobje lahko uporabimo eno ledeniško leto (obdobje med dvema koncema talilnih dob) ali eno koledarsko leto. Lahko pa jo izračunamo tudi za daljše časovno obdobje, za katero imamo podatke o spremembah prostornine.

**Masna bilanca** (enačba 1) je zmnožek spremembe prostornine  $\Delta V$  in gostote mase  $\rho$  v preučevanem obdobju:

$$B = \Delta V \cdot \rho \quad [1]$$

Če uporabimo koledarsko ali ledeniško leto to masno bilanco imenujemo **neto masna bilanca**. Neto masna bilanca je v resnici razlika med **zimsko masno bilanco** in **poletno masno bilanco**, kjer prva opisuje, koliko mase je ledenik pridobil v redilni dobi, druga pa, koliko mase je ledenik izgubil v talilni dobi.

Gostota, ki jo uporabimo v izračunu, ni enotna, saj je odvisna od tega, ali so se stalile plasti snega, firna ali različnih tipov ledeniškega ledu. Pretvorbo snega v led lahko enostavno opišemo s postopkom, kjer se sneg vse bolj stiska in se iz njega iztisnejo zračni mehurčki. V snegu je zračnih mehurčkov mnogo, v ledeniškem ledu pa so zelo stisnjeni, kar se odraža v veliko večji gostoti ledeniškega ledu od gostote snega. Tako ima novo zapadli sneg gostoto 50–200 kg/m<sup>3</sup>, firn, ki opisuje sneg, ki je preživel vsaj eno talilno obdobje, ima gostoto 400–830 kg/m<sup>3</sup>, ledeniški led pa 830–917 kg/m<sup>3</sup>, kjer slednja gostota predstavlja čisti kristalni led (Benn in Evans 2010, 32). Za primerjavo zapišimo še splošno znano gostoto vode 1000 kg/m<sup>3</sup>. Ko računamo geodetsko masno bilanco, velikokrat vzamemo za celotno prostornino enotno gostoto; tako največkrat uporabijo pri večjih ledenikih alpskega tipa povprečno vrednost okoli 850 kg/m<sup>3</sup>, saj predpostavijo, da se tali tudi del ledu (Zemp s sodelavci 2010; Fischer 2011). V primeru Triglavskega ledenika in Ledenika pod Skuto pa moramo vzeti nižjo gostoto, saj se v njiju nahaja še zelo malo ledeniškega ledu. Ledeniška ostanka sta večinoma pokrita s firnom iz preteklih let, ki se tali ali pa na novo nastaja zaradi snežnih zim. V takšnih primerih govorimo le o nastajanju novega ali izginjanju starega firna. Thibert s sodelavci (2008) podajajo 600 kg/m<sup>3</sup> za gostoto firna, merjenega v poletno-jesenskih mesecih. Vendar te gostote za naša ledenika ne moremo kar privzeti, saj v alpskih razmerah ta gostota predstavlja firn v globini okoli 15 m, gostota v globini okoli 5 m pa je le 500 kg/m<sup>3</sup> (Schwerzmann s sodelavci 2006).

Masno bilanco moramo na večjih ledenikih gledati ločeno po višinskih pasovih, saj je na zgornjem delu ledenika, torej nekje nad snežno mejo, kjer se ledenik debeli, ta pozitivna, na spodnjem delu, torej pod snežno mejo, pa je negativna. To pomeni, da se na tem delu stali več mase, kot je v redilni dobi ledenik na tem mestu pridobil. Takšno masno bilanco, opredeljeno s površino ( $A$ ) na kateri jo merimo, imenujemo **specifična masna bilanca** (enačba 2):

$$b_a = B/A = \Delta h \cdot A \cdot \rho / A \quad [2]$$

Pri specifični masni bilanci razliko prostornine izračunamo za isto površino, kot jo uporabimo v analizi. Ker je razlika površine enaka zmnožku površine in višine snega/ledu ( $\Delta h$ ), nam po krajšanju ostane le  $b_a = \Delta h \cdot \rho$ .

Če je specifična masna bilanca na zgornjem in na spodnjem delu ledenika negativna, je tudi povprečna specifična masna bilanca negativna in v takšnem primeru lahko pričakujemo izginotje ledenika. Če je specifična masna bilanca v zgornjem delu ledenika pozitivna v spodnjem pa negativna, se bo ledenik ohranil, v kolikor je delež iz zgornjega dela ledenika večji, kar se bo pokazalo v pozitivni povprečni specifični masni bilanci.

Slovenska ledenika sta danes premajhna, da bi na njih masno bilanco računali po višinskih pasovih, računamo jo lahko glede na celotno površino ledenika. Ko pa masno bilanco delimo s celotno površino ledenika, govorimo o **povprečni specifični masni bilanci**.

Ker je količina odtekle vode pri velikih ledenikih zelo pomembna za hidrološki režim porečja, je enota, v kateri opisujemo masno bilanco ledenika, višina stolpca odtekle vode, ki ga opišemo z metri vodnega ekvivalenta (m w.e.) ledenika v določenem obdobju. Povprečno specifično masno bilanco v enotah višina vodnega ekvivalenta dobimo, ko specifično masno bilanco delimo z gostoto vode (enačba 3):

$$b = b_a / \rho_{vode} = \Delta h \cdot \rho / \rho_{vode} \quad [3]$$

S povprečno specifično masno bilanco lahko opišemo skupni prirastek ali izgubo mase na ledeniku v daljšem časovnem obdobju. Za lažjo primerjavo pa velikokrat tako dobljeno povprečno specifično masno bilanco delimo s številom let med dvema meritvama in tako dobimo letno (neto) povprečno specifično masno bilanco. V tem primeru podamo rezultat v enotah metri vodnega ekvivalenta na leto (m w.e. a<sup>-1</sup>). Enota je neposredno primerljiva z izmero količine padavin, ki jo prikazujemo v milimetrih vodnega stolpca, kar odgovarja litru padle vode na m<sup>2</sup>.

### 3 Opis vhodnih podatkov

Najnatančnejše izmere prostorninskih sprememb na ledenikih lahko pridobimo iz laserskih skeniranj. Za Triglavski ledenik in Ledenik pod Skuto imamo na voljo tri aerolaserska snemanja (preglednica 1). Prvi dve snemanji sta bili izvedeni leta 2012 v okviru mednarodnega projekta Naravne nesreče brez meja (2014). Površje je bilo posneto z laserskim skenerjem *Riegl LM5600*, ki uporablja valovno dolžino 1550 nm. Povprečna gostota laserskih točk je bila 8 točk/m<sup>2</sup>, višina leta pa 700 m nad tlemi. Pri drugem snemanju se je nad ledenikoma izvedel dodaten, nižji prelet na višini 200 m, da se je na vodnatem snegu zgostilo število odbojev. Vodnat sneg se namreč v valovni dolžini laserja obnaša kot voda, kar pomeni, da se iz njega nazaj na sprejemnik vrnejo le redki odboji. Če znižamo višino leta nad tlemi, s tem povečamo delež vrnjenih odbojev tudi z zasneženega območja. Drugo snemanje je bilo izvedeno le nekaj dni za prvim jesenskim sneženjem v visokogorju, katerega tanka plast je v času snemanja še ostala v osojnih legah. Hkrati z obema laserskima snemanjema je bilo izvedeno tudi aerofotografiranje (Triglav Čekada s sodelavci 2013).

Tretje snemanje je bilo izvedeno v okviru državnega laserskega skeniranja Slovenije, katerega rezultati so prosto dostopni (medmrežje 1). Lasersko skeniranje se je večinoma izvajalo v pomladnih neolistanih mesecih, le visokogorje je bilo posneto v poletnih mesecih, da bi bilo posnetega čim manj snega. Ker pa je bilo poletje 2014 zelo deževno in hladno, se je sneg ohranil še dolgo v poletje. Podatki so bili posneti z laserskim skenerjem *Riegl LMS-Q780* z valovno dolžino 1064 nm in višino leta 1000 m nad tlemi. Območji, kjer se nahajata ledenika (snemalna bloka 37 in 31), sta bili posneti z gostoto 5 točk/m<sup>2</sup> (Triglav Čekada in Bric 2015).

Prvi dve snemanji nam omogočata izračun poletne specifične masne bilance, kombiniranje drugega in tretjega snemanja pa omogoča izračun neto povprečne specifične masne bilance za obdobje 2012–2014. Predvsem za Ledenik pod Skuto je to kar prava neto povprečna specifična masna bilanca, saj sta bili obe snemanji izvedeni skoraj ob koncu talilne dobe: sredi septembra 2012 in konec avgusta 2014. Za Triglavski ledenik pa to ne velja, ker je bil v okviru laserskega skeniranja Slovenije posnet že v začetku avgusta 2014 in zato ne prikazuje konca talilne dobe (preglednica 1).

Iz oblakov laserskih točk smo najprej izdelali digitalne modele površja, ki prikazujejo gola tla, kjer ni snega in zasneženo površino, kje sneg je. Takšen digitalni model površja je v primeru laserskega skeniranja Slovenije, kar izdelek digitalnega modela reliefa. Uporabljeni digitalni modeli površja imajo velikost celice 1 m × 1 m. Digitalne modele površja smo uporabili za izračun in prikaz višinskih in prostorninskih razlik.

Preglednica 1: Datumi laserskih snemanj na Triglavskem ledeniku in Ledeniku pod Skuto.

snemanje	stanje	Triglavski ledenik	Ledenik pod Skuto
1	konec redilne dobe 2012	18. 5. 2012	15. 5. 2012
2	konec talilne dobe 2012	18. 9. 2012	18. 9. 2012
3	sredina/konec talilne dobe 2014	8. 8. 2014	29. 8. 2014

Preglednica 2: Površine Triglavskega ledenika in Ledenika pod Skuto v letih 2012, 2014 in 2016 (odebeljene so površine, ki smo jih uporabili za izračun masne bilance).

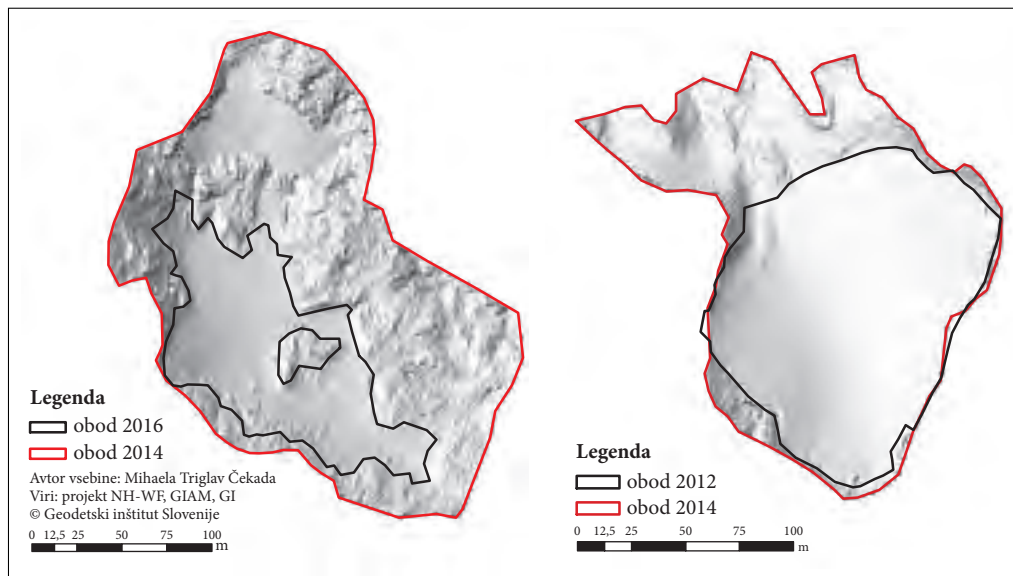
snemanje	površina ledenika	Triglavski ledenik	Ledenik pod Skuto
1	konec taline dobe 2012	0,6 ha	1,4 ha
2	konec taline dobe 2014	3,6 ha	2,1 ha
3	konec talilne dobe 2016	1,0 ha	1,6 ha

Da bi bile vrednosti primerljive z zapisi v literaturi (na primer Carturan s sodelavci 2016) smo računali specifično masno bilanco, ki je opredeljena s površino ledenika. Ker v obeh primerih obravnavamo leti z obilo snega, v prvem primeru konec redilne dobe maja 2012 in v drugem konec talilne dobe leta 2014, smo se odločili, da masno bilanco izračunamo za dve površini in ugotovimo, ali dobimo primerljive rezultate. Uporabili smo **majhno površino** ( $A_1$ ), saj sta oba ledenika velika okoli 1 ha (Triglavski ledenik leta 2016 in Ledenik pod Skuto leta 2012), torej velikosti, ki so blizu realni velikosti samih ledeniških ostankov. **Velika površina** ( $A_2$ ) pa je predstavljala kontrolno površino, ki nam je povedala, kakšna je razlika v prostornini na širšem območju ledenika in okolice. Za veliko površino smo vzeli stanji obeh ledenikov, ko sta bila večja od 2 ha (za oba leto 2014) (odebeljene vrednosti v preglednici 2). Vrednosti iz preglednice 2 so povzete po meritvah, ki smo jih izvedli na Geodetskem inštitutu Slovenije v sodelovanju z Geografskim inštitutom Antona Melika ZRC SAZU in podatkih dostopnih v Pavšek (2016). Tako izbrane obode ledenikov smo uporabili za izračun prostorninske spremembe med dvema digitalnima modeloma površja ter za prikaz višinskih razlik (sliki 2 in 3).

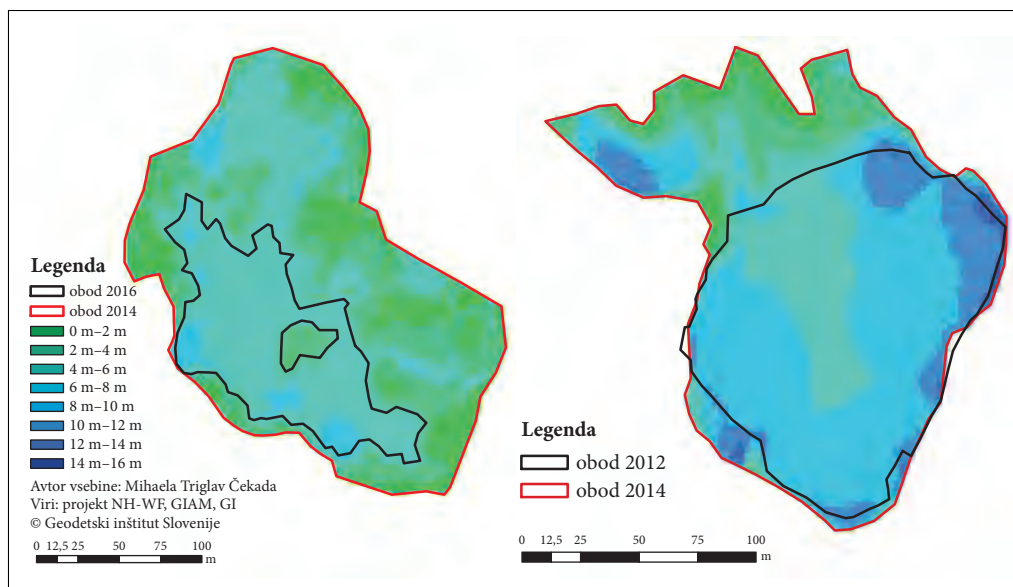
#### 4 Geodetska masna bilanca Triglavskega ledenika in Ledenika pod Skuto

Pri izračunu specifične masne bilance omejimo območje na katerem jo računamo s površino ledenika. Prva je mala preučevana površina  $A_1$ : 1,0 ha leta 2016 za Triglavski ledenik in 1,4 ha leta 2012 za Ledenik pod Skuto. Mala preučevana površina je približek najmanjših površin obeh ledenikov. Druga površina je velika preučevana površina  $A_2$ , ki kaže stanje ledenikov leta 2014, ko je bilo izvedeno lasersko skeniranje Slovenije: 3,6 ha za Triglavski ledenik in 2,1 ha za Ledenik pod Skuto. Velika površina prikazuje ledenika in okoliški snežišči v letu z veliko količino snežnih padavin v redilni dobi. Mali in veliki površini sta prikazani na sliki 1. Na prikazanem digitalnem modelu površja iz septembra 2012 hitro razpoznamo zasnežene dele reliefa, ker so gladki.

Iz slike 2 in preglednice 3 vidimo, da je povprečna debelina firna za malo preučevano površino na Triglavskem ledeniku med majem in septembrom 2012 enaka 7,5 m, na Ledeniku pod Skuto pa 8,9 m. Podobne debeline firna so izmerjene za obdobje 2012–2014. Zato moramo za gostoto firna uporabiti debelino oziroma globino med 5 m in 10 m. Schwerzmann s sodelavci (2006) pišejo, da je na globini 5 metrov gostota firna  $500 \text{ kg/m}^3$ , na globini 10 m pa  $550 \text{ kg/m}^3$ . Ker smo podobne debeline snega imeli ob koncu talilne dobe 2014 (slika 3), smo za izračun obeh masnih bilanc uporabili to gostoto. Ker mala

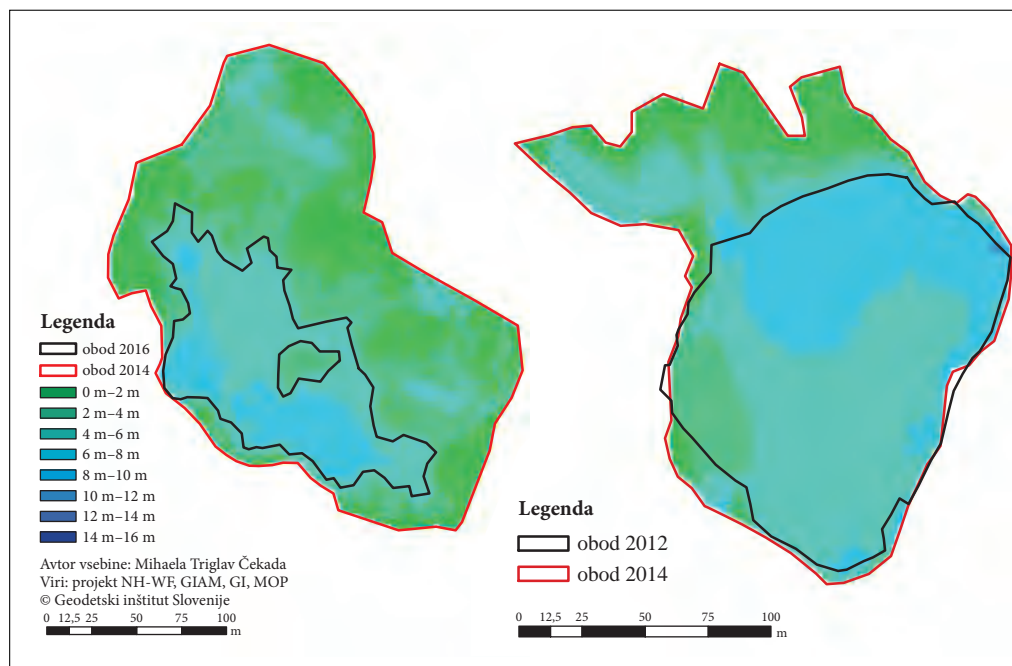


Slika 1: Digitalna modela površja iz septembra 2012: levo Triglavski ledenik, desno Ledenik pod Skuto. Zunanji obod (rdeča črta) prikazuje veliko površino, notranja črna črta pa majhno površino (vir podatkov: Naravne nesreče ... 2014).



Slika 2: Spremembe v višini snega na Triglavskem ledeniku (levo) in Ledeniku pod Skuto (desno) iz razlike DMR-jev maj–september 2012.





Slika 3: Spremembe v višini snega na Triglavskem ledeniku (levo) in Ledeniku pod Skuto (desno) med septembrom 2012 in septembrom 2014.

preučevana površina prikazuje ožje območje ledeniških ostankov oziroma približek najmanjše površine ledenikov, jo lahko obravnavamo kot površino, ki prikazuje prava ledenika. Zato smo v preglednici 3 tudi izračunali specifično masno bilanco le za to malo površino.

Žal ti dve masni bilanci nista primerljivi med seboj, saj prva predstavlja poletno specifično masno bilanco, ne vemo pa, kako visoko je bila površina snega konec talilne dobe leta 2011, da bi lahko izračunali še neto specifično masno bilanco za leto 2012, torej masno bilanco za eno ledeniško leto. Neto masno bilanco za obdobje 2012–2014 moramo še deliti z dva (dve leti), da dobimo letno neto specifično masno bilanco, torej zapisano v metrih vodnega ekvivalenta na leto. Za obdobje 2012–2014 je letna neto specifična masna bilanca za Triglavski ledenik  $1,95 \text{ m w.e. a}^{-1}$  in za Ledenik pod Skuto  $1,9 \text{ m w.e. a}^{-1}$ . Obdobje med letom 2012 in 2014 je obdobje ohranjanja naših dveh ledenikov (Pavšek 2016; Triglav Čekada 2018), kar nam pokaže tudi masna bilanca, ki je pozitivna. Poletna specifična masna bilanca leta 2012 pa je negativna, saj sta v tem letu ledenika ponovno obsegala skoraj svojo najmanjšo površino.

Dolgoročni trendi letnih specifičnih masnih bilanc za Alpe kažejo negativni trend. Huss (2012; 2013) v obdobju 2000–2010 ugotavlja vrednost letne specifične masne bilance  $-0,99 \text{ m w.e.a}^{-1}$ . Hagg s sodelavci (2012) za skupino petih manjših ledenikov v Bavarskih Alpah ugotavljajo v obdobju 1999–2009 letno specifično masno bilanco med  $-0,9$  in  $-0,5 \text{ m w.e.a}^{-1}$ . Huss, Dhulst in Bauder (2015) za avstrijske in italijanske Alpe v obdobju 2010–2015 ugotavljajo letno specifično masno bilanco okoli  $-1,0 \text{ m w.e.a}^{-1}$  ter za švicarske Alpe  $-0,8 \text{ m w.e.a}^{-1}$ . Ker je naša letna specifična masna bilanca izračunana zgolj za dveletno obdobje (2012–2014), ki je bilo ugodno za ohranjanje obeh ledenikov, torej s pozitivno specifično masno bilanco, našega rezultata z omenjenimi raziskavami ne moremo neposredno primerjati. Carturan s sodelavci (2016) za izbrane italijanske ledenike v obdobju 2004–2013 ugotavljajo letno specifično masno bilanco med  $-1,79$  in  $-0,76 \text{ m w.e.a}^{-1}$ , vendar se na njihovih grafih tudi vidi, da je leta 2013 specifična masna bilanca pričela rasti, kar se v splošnem sklada z našimi izračuni.

Preglednica 3: Prostorninske razlike in povprečne debeline v obdobju maj–september 2012 in obdobju 2012–2014 za malo preučevano površino  $A_1$  (1,0 ha za Triglavski ledenik in 1,4 ha za Ledenik pod Skuto) in veliko preučevano površino  $A_2$  (3,6 ha za Triglavski ledenik in 2,1 ha za Ledenik pod Skuto). Za malo preučevano površino ( $A_1$ ) je izračunana še masna bilanca v enotah metri vodnega ekvivalenta (m w.e.).

	prostorninska razlika za malo površino ( $A_1$ ) (m <sup>3</sup> )	povprečna debelina za $A_1$ (m)	prostorninska razlika za veliko površino ( $A_2$ ) (m <sup>3</sup> )	povprečna debelina za $A_2$ (m)	masna bilanca za $A_1$ (m w.e.)
september– maj 2012 (poletna specifična masna bilanca)					
Triglavski ledenik	-75.290	7,5	-214.910	6,0	-3,8
Ledenik pod Skuto	-124.540	8,9	-173.510	8,2	-4,5
obdobje 2012–2014 (neto specifična masna bilanca 2012–2014)					
Triglavski ledenik	76.910	7,7	167.000	4,6	3,9
Ledenik pod Skuto	107.100	7,6	140.440	6,6	3,8

## 5 Sklep

Članek predstavlja prvi poizkus izračuna specifične geodetske masne bilance za Triglavski ledenik in Ledenik pod Skuto. Predstavili smo izračun na najpodrobnejših podatkih (laserskih podatkih), ki so na voljo. Da bomo sam princip masne bilance lažje razumeli in bodo podatki postali primerljivi z raziskavami, kjer masno bilanco preučujejo v daljših časovnih obdobjih, jo bomo morali v prihodnjem izračunati za daljšo časovno obdobje. Geodetske in fotogrametrične meritve površja Triglavskega ledenika, ki jih imamo izdelane vsaj na vsaki dve leti od leta 1999 do danes, lahko predstavljajo osnovo za izračun neto specifične masne bilance Triglavskega ledenika za skoraj 20-letno obdobje. Za preračun masnih bilanc Triglavskega ledenika še dlje v preteklost ter izračun masnih bilanc Ledenika pod Skuto, pa bomo morali uporabiti empirične formule. Le izračun zaporedja več letnih specifičnih masnih bilanc bo omogočil primerjavo z meteorološkimi podatki.

*ZAHVALA: Raziskava je bila opravljena v okviru temeljnega raziskovalnega projekta J2-8176, ki ga sofinancira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije. Zahvaljujem se vsem sodelavcem Geografskega inštituta Antona Melika ZRC SAZU in Geodetskega inštituta Slovenije, ki so sodelovali v terenskih izmerah ledenikov.*

## 6 Viri in literatura

- Benn, D. I., Evans, D. J. A. 2010: *Glaciers and Glaciation*. London, New York.
- Carturan, L., Baroni, C., Brunetti, M., Carton, A., Fontana, G. D., Salvatore, M. C., Zanoner, T., Zuecco, G. 2016: Analysis of the mass balance time series of glaciers in the Italian Alps. *The Cryosphere* 10. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-10-695-2016>
- Fischer, A. 2011: Comparison of direct and geodetic mass balances on a multi-annual time scale. *The Cryosphere* 5. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-5-107-2011>
- Gabrovec, M., Hrvatina, M., Komac, B., Ortar, J., Pavšek, M., Topole, M., Triglav Čekada, M., Zorn, M. 2014: Triglavski ledenik. *Geografija Slovenije* 30. Ljubljana.

- Hagg, W., Mayer, C., Mayr, E., Heilig, A. 2012: Climate and glacier fluctuations in the Bavarian Alps in the past 120 years. *Erdkunde* 66. DOI: <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2012.02.03>
- Huss, M. 2012: Extrapolating glacier mass balance to the mountain-range scale: the European Alps 1900–2100. *The Cryosphere* 6. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-6-713-2012>
- Huss, M. 2013: Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change. *The Cryosphere* 7. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-7-877-2013>
- Huss, M., Dhulst, L., Bauder, A. 2015: New long-term mass-balance series for the Swiss Alps. *Journal of Glaciology* 61-227. DOI: <https://doi.org/10.3189/2015JoG15J015>
- Medmrežje 1: [http://gis.arso.gov.si/evode/profile.aspx?id=atlas\\_voda\\_Lidar@Arso](http://gis.arso.gov.si/evode/profile.aspx?id=atlas_voda_Lidar@Arso) (12. 3. 2018).
- Naravne nesreče brez meja, 2014. Medmrežje: <https://giam.zrc-sazu.si/sl/programi-in-projekti/naravne-nesrece-brez-meja#v> (12. 3. 2018).
- Pavšek, M. 2016: Ledenik pod Skuto. Medmrežje: <http://www.dedi.si/dediscina/60-ledenik-pod-skuto> (12. 3. 2018).
- Schwerzmann, A., Funk, M., Blatter, H., Lüthi, M., Schwikowski, M., Palmer, A. 2006: A method to reconstruct past accumulation rates in alpine firn regions: A study on Fiescherhorn, Swiss Alps. *Journal of Geophysical Research* 111. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005JF000283>
- Thibert, E., Blanc, R., Vincent, C., Eckert, N. 2008: Glaciological and volumetric mass-balance measurements: error analysis over 51 years for Glacier de Sarnes, French Alps. *Journal of glaciology* 54-186. DOI: <https://doi.org/10.3189/002214308785837093>
- Triglav Čekada, M. 2018: Ledeniki na kartah vojaške izmere avstro-ogrske monarhije. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2017. Ljubljana.
- Triglav Čekada, M., Bric, V. 2015: Končan je projekt laserskega skeniranja Slovenije. *Geodetski vestnik* 59-3.
- Triglav Čekada, M., Bric, V., Klanjšček, M., Barborič, B., Pavšek, M. 2013: Zračno lasersko skeniranje zasneženega površja. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2012. Ljubljana.
- Triglav Čekada, M., Gabrovec, M., 2013: Documentation of Triglav glacier, Slovenia, using non-metric panoramic images. *Annals of Glaciology* 54-62. DOI: <https://doi.org/10.3189/2013AoG62A095>
- Triglav Čekada, M., Zorn, M., Colucci, R. R. 2014: Površina Kaninskih in Triglavskega ledenika od leta 1893, določena na podlagi arhivskih posnetkov ter aerolaserskih podatkov. *Geodetski vestnik* 58-2. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2014.02.274-313>
- Triglav Čekada, M., Zorn, M., Kaufmann, V., Lieb, G. K. 2012: Merjenje malih alpskih ledenikov: primeri iz Slovenije in Avstrije. *Geodetski vestnik* 56-3. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2012.03.462-481>
- Zemp, M., Jansson, P., Holmlund, P., Gärtner-Roer, J., Koblet, T., Three, P., Haeberli, W. 2010: Reanalysis of multi-temporal aerial images of Storglaciären, Sweden (1959-99) - Part 2: Comparison of glaciological and volumetric mass balance. *The Cryosphere* 4. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-4-345-2010>



## SPLETNI SUŠNI UPORABNIŠKI SERVIS

**Aleš Grlj**

Center odličnosti Vesolje, znanost in tehnologije  
grlj.ales@space.si

**dr. Andreja Sušnik, dr. Gregor Gregorič**

Agencija Republike Slovenije za okolje  
andreja.susnik@gov.si, gregor.gregoric@gov.si

**dr. Žiga Kokalj**

ZRC SAZU, Inštitut za antropološke in prostorske študije in Center odličnosti Vesolje, znanost in tehnologije  
ziga.kokalj@zrc-sazu.si

UDK: 004.5:551.577.38

### IZVLEČEK

#### **Spletni Sušni uporabniški servis**

V prihodnosti lahko na območju Slovenije in Podonavja pričakujemo večjo pogostost suš ter močnejše negativne učinke. V skladu s tem trendom se moramo na ta pojav in njegove posledice bolje pripraviti. V prispevku predstavljamo projekt DriDanube in enega od izdelkov projekta, Sušni uporabniški servis. Gre za spletno orodje za prikaz in analizo prostorskih podatkov, ki se nanašajo na sušo. Namen orodja je nadgraditev sistemov za spremljanje suše v porečju Donave s cilji blaženja posledic suše in pripravljajna potencialnih uporabnikov na pravočasno ukrepanje.

### KLJUČNE BESEDE

suša, uporabniški vmesnik, satelitski podatki

### ABSTRACT

#### **Drought User Service**

In the future, more frequent droughts and stronger negative effects can be expected in the territory of Slovenia and the Danube region. In line with this trend, we need to better prepare for this phenomenon and its impacts. In this paper we present the DriDanube project and more specifically one of the project's products, Drought User Service from its design to the implementation. Drought User Service is a web-based tool for the viewing and analysis of drought related spatial datasets. The purpose of the tool is to upgrade the systems for monitoring the drought in the Danube river basin with the goals of mitigating the effects of drought and preparing potential users for a timely reaction.

### KEY WORDS

drought, user interface, satellite data

## 1 Uvod

V Sloveniji in tudi širše, na območju Podonavja, je v zadnjem desetletju opazen trend povečevanja pogostosti in jakosti suš, zaradi česar postaja suša eden glavnih izzivov na področju upravljanja z vodnimi viri na tem območju (Sušnik in Gregorič 2008; 2017; Brenčič 2012; Oblišar 2012; Dolinar s sodelavci 2014). Kljub škodi, ki jo povzroča predvsem v ranljivih gospodarskih sektorjih kot so kmetijstvo, energetika, vodni promet in vodooskrba, pa je ocenjevanje posledic suše ter upravljanje z njo v regiji še vedno nezadostno. Sledenje suši marsikje ni sistematično in nima vključenih poenotenih metod za oceno jakosti suše, njenih posledic in tveganj zanjo. Podatki o ocenah škode ob sušnih dogodkih so med državami v regiji slabo dostopni in razpršeni saj jih države (tudi regije in občine) zbirajo ločeno, podatki pa niso vedno javno objavljeni. Prav tako je na tem področju pomanjkljivo sodelovanje med političnimi odločevalci, hidrološkimi in meteorološkimi službami ter raziskovalnimi ustanovami. Posledično je slabše zastavljena politika upravljanja in odzivanja na sušo.

Omenjene težave sledenja in upravljanja s sušo ima namen preseči projekt transnacionalnega programa Podonavje (*Danube Transnational Programme*) Tveganje za sušo v podonavski regiji (*Drought Risk in the Danube Region – DriDanube*), ki je podprt s strani Evropskega sklada za regionalni razvoj (ERDF). Projekt se izvaja v porečju reke Donave in obsega ozemlja 14 držav s skupno 80 milijoni prebivalcev. V drugo največje porečje v Evropi sodi tudi Slovenija s kar 75 % površine svojega ozemlja. Glavni namen projekta je povečanje odpornosti celotne družbe na pojav suše v Podonavju in sicer z uporabo najnovejše tehnologije pri sledenju in napovedovanju suše ter z razvojem strategije odziva na sušo in posledično boljšim sodelovanjem med odgovornimi ustanovami ter glavnimi odločevalci.

Poleg pregleda obstoječih postopkov bomo izdelali enotno metodologijo za ocenjevanje tveganja za sušo in oceno vpliva suše, izdelali algoritem za napovedovanje suše ter vzpostavili nacionalne poročevalske mreže. Na podlagi strategije se načrtujejo pilotne akcije za testiranje vzpostavljenih sistemov in izboljšanje odločevalskih postopkov ukrepanja ter krepitev regionalnih in nacionalnih zmožnosti za odziv v primeru suše z izobraževanjem deležnikov.

V nadaljevanju prispevka je opisana zasnova, zmožnosti in razvoj Sušnega uporabniškega servisa (*Drought User Service – DUS*), ki bo združeval omenjene aktivnosti in jih približal uporabnikom. Sušni uporabniški servis je sistem, ki bo omogočal natančen in učinkovit vpogled v stanje suše, oceno za tveganje in napoved ter s tem nadzor celotnega porečja Donave. Trenutno vključuje pregledovalnik posrednih kazalnikov suše, ki temeljijo na satelitskih podatkih in/ali matematičnih modelih. Končna različica storitve bo olajšala delovanje pristojnih služb tako na področju spremljanja, napovedovanja in ocenjevanja učinkov suš kot tudi ukrepanja in pomoči ob suši.

## 2 Predhodne raziskave in razvoj

Razvoj Sušnega uporabniškega servisa je potekal po vnaprej zastavljenem načrtu, v grobem sestavljenem iz treh zaporednih faz, pri čemer so nas najprej zanimala mnenja in zahteve potencialnih uporabnikov. Ta smo zbirali z zasnovanim spletnim anketnim vprašalnikom na podlagi 35 vprašanj, ki se nanašajo na osnovne informacije o uporabniku, informacije o uporabi in izkušnjah z delom s podatki opazovanja Zemlje, vprašanja o sestavnih delih načrtovanega sistema, orodjih in uporabi (analizah) podatkov. Za izdelavo in analizo ankete smo uporabili spletno orodje *LimeSurvey*, vprašalnik pa smo posredovali vsem projektnim partnerjem in drugim potencialnim uporabnikom, med katerimi so državne hidrološke in meteorološke službe, okoljske agencije, mednarodne in nevladne organizacije, raziskovalne ustanove ter vlade.

Odzvalo se je 47 ustanov iz 10 evropskih držav, analizirani rezultati pa so bili prevedeni v prioriteto lestvico zahtev po metodi MoSCoW (*Must have, Should have, Could have, Won't have*), pri kateri so zahteve razdeljene v štiri kategorije (Bittner in Spence 2004):

- Zahteve, ki morajo biti nujno upoštevane: so ključne zahteve, od katerih je odvisna uspešnost projekta. Vse zahteve te kategorije morajo biti upoštevane, čeprav jih lahko prestavimo v nižjo kategorijo.
- Zahteve, ki so potrebne za optimalno delovanje: so pomembne, ne pa tudi nujne za doseg rezultata. Običajno te zahteve niso tako časovno kritične kot nujne zahteve, kljub temu, da so (lahko) enako pomembne.
- Zahteve, ki bodo vključene, če čas in investicija to dopuščata: so zaželeni niso pa nujne. Običajno pripomorejo k izboljšanju uporabniške izkušnje in so izvedene, ko in če to dopuščajo viri in čas.
- Zahteve, ki v tej fazi ne bodo upoštevane: so v tej fazi prepoznane kot najmanj kritične ali celo kot neprimerne in jih običajno vključimo v poznejših izvedbah.

Iz rezultatov ankete smo oblikovali 18 zahtev, od tega štiri splošne, vezane na dostopnost servisa in podpora uporabnikom. Šest zahtev se nanaša na prikazovane podatke, njihovo kakovost, časovno ločljivost, podlage in dopolnilne podatke. Zahtev glede uporabnosti je osem, nanašajo pa se na načine interakcije uporabnika s servisom (Hasenauer s sodelavci 2017).

Rezultati ankete so bili osnova za oblikovanje tehnične rešitve servisa. Sušni uporabniški servis je izveden s kombinacijo sodobnih orodij in tehnologij za razvoj spletnih aplikacij. Za oblikovanje grafičnega vmesnika smo uporabili označevalni jezik *HTML5* in kaskadne stilske podloge *CSS3*. Servis je napisan v programskem jeziku *JavaScript* (*EcmaScript 2015*), za razvoj pa smo uporabili ogrodje *Aurelia*. Uporaba spletnih zemljevidov je omogočena preko knjižnice *OpenLayers 4.6.4*, za prikazovanje s sušo povezanih podatkov pa skrbi platforma *MapServer 7.0.7*, s katero smo omogočili lasten spletni kartografski servis (*Web Map Service – WMS*). Z uporabljenimi tehnologijami smo zagotovili potencialne razširitve servisa in dolgoročno združljivost z ostalimi spletnimi tehnologijami. Vse uporabljene tehnologije so prosto dostopne, s čimer smo se izognili kupovanju licenc ter zagotovili brezplačen dostop za uporabnike. Poleg tega imajo uporabljena programska orodja in tehnologije širok krog uporabnikov ter se aktivno razvijajo in posodablajo v skladu s sodobnimi trendi.

### 3 Podatki

Spletni vmesnik omogoča prikazovanje treh tipov podatkov. Prvi tip je kartografska podlaga, pri čemer ima uporabnik na voljo tri možnosti: *Google Maps* (Google 2018), *OpenStreet Map* (OSM 2018) ter mozaik satelitskih posnetkov *Sentinel 2*, ki ga zagotavlja podjetje *EOX GmbH* (EOX 2017). Drugi tip so vektorski sloji meja na različnih ravneh NUTS za države porečja Donave (Eurostat 2018). Zadnji tip so rastrski podatkovni sloji za preučevanje suše v različni časovni in prostorski ločljivosti, ki jih zagotavljajo različne inštitucije in ki so osnova za nadgradnjo sistema z opozarjanjem na možno sušo ter analizo njenega stanja in posledic (preglednica 1).

Poleg navedenih podatkov bodo v nadaljevanju v pregledovalnik vključeni še podatki, ki bodo razviti oziroma izdelani v sklopu projekta in bodo omogočali prikaz stanja suše ter z njo povezanih pojavov. Sistem je zasnovan modularno ter omogoča hitro in preprosto vključevanje novih podatkov, bodisi v aplikacijo samo ali prek spletnih storitev za prikazovanje in prenos geografskih informacij, na primer *WMS*, *WCS*, *WFS* in drugih.

### 4 Zmožnosti servisa

Cilj razvoja je narediti korak naprej od vzpostavitve spletnega pregledovalnika. Sušni uporabniški servis zato že omogoča uporabniku analizo in primerjavo prikazanih podatkov. Omogočeno je prekrivanje več slojev in spreminjanje njihove prosojnosti ter odstiranje izbranega sloja za pregledovanje »nižje-ležečih« slojev. Uporabnik lahko poižveduje po vrednostih posameznih slikovnih točk ali na zaslon izriše ter izvozi graf časovne vrste za izbrano slikovno točko in izbrani časovni interval izbranega produkta (slika 1).

Preglednica 1: Podatki povezani s sušo, vključeni v Sušni uporabniški servis.

ime	opis	prostorska ločljivost	časovna ločljivost	vir
<b>anomalije NDVI</b>	Odstopanja normiranega diferencialnega vegetacijskega indeksa (NDVI) so pokazatelj relativne fotosintetične aktivnosti rasti. Visok NDVI kaže na večjo bujnost in fotosintetično zmogljivost rasti, nizke vrednosti pa izražajo stres oziroma zmanjšanje količine klorofila ali spremembe v notranji strukturi rastlin zaradi venenja. Anomalije prikazujejo odstopanje od dolgotrajnega povprečja. Izračunane so iz podatkov <i>Global Land NDVI</i> , ki temelji na podatkih satelitov <i>SPOT</i> oziroma <i>PROBA-V</i> (Hasenauer s sodelavci 2017).	1 km	10 dni	Technische Universität Wien (TUW 2017a)
<b>anomalije SWI</b>	Kazalnik vode v prsti ( <i>Soil Water Index</i> – SWI) prikazuje dnevne podatke o vlagi v prsti do globine 40 cm. Izračunan je z uporabo modela, ki opisuje proces infiltracije vode, prek izdatka <i>Surface Soil Moisture</i> (SSM). Slednji je izračunan iz produktov naprave <i>Advanced Scatterometer</i> (ASCAT), konstelacije satelitov <i>Meteorological Operational</i> (MetOp). Anomalija SWI je razlika med SWI, izračunanim za določen dan in dolgoročnim povprečjem za ta dan. Uporablja se kot mera za opisovanje primanjkljaja vode v prsti. Za izračun je uporabljeno povprečje za obdobje med letoma 2007 in 2016 (Hasenauer s sodelavci 2017).	1 km, 12,5 km	1 dan	Technische Universität Wien (TUW 2017b)
<b>SWB</b>	Ravnovesje površinske vode ( <i>Surface Water Balance</i> – SWB), ocenjeno s pomočjo simulacij z numeričnim meteorološkim modelom. Simulacije so izvedene z ne-hidrostatičnim modelom v srednjem merilu (NMM) s prostorsko ločljivostjo približno 7 km. Dolgoročno povprečje je izračunano za obdobje med letoma 1979 in 2016 (Roškar in Gregorič 2010; Sušnik s sodelavci 2010).	8 km	10 dni	Agencija RS za Okolje (ARSO 2017a)
<b>SWBSLO</b>	Podobno kot pri SWB; sloj je izračunan s pomočjo prostorske interpolacije vrednosti, izmerjenih na meteoroloških postajah ARSO. Časovni agregat je poljubno dolg, običajno se definira sušno obdobje v primeru pojava kmetijske suše. Sloj prostorsko obsega samo območje Slovenije v relativno visoki prostorski ločljivosti (primer: Sušnik in Valher 2014).	100 m	3 meseci	Agencija RS za Okolje (ARSO 2017b)
<b>VEGCON1</b>	Relativno stanje rasti ( <i>Relative Vegetation condition</i> ) je tedenski produkt, izdelan iz podatkov senzorja <i>MODIS</i> za prikaz vpliva suše na rastje. Produkt <i>VegCon1</i> je optimiran za prikaz vpliva pomanjkanja vode na kmetijske pridelke in travinje (Hasenauer s sodelavci 2017).	7,5 km	7 dni	Global Change Research Institute CAS (Czech Globe 2017a)
<b>VEGCON2</b>	Enako kot pri <i>VegCon1</i> , le da je produkt optimiran za vse tipe pokrovnosti tal (Hasenauer s sodelavci 2017).	7,5 km	7 dni	Global Change Research Institute CAS (Czech Globe 2017b)





Slika 1: Grafčni vmesnik Sušnega uporabniškega servisa.

Uporabniki lahko podatke tudi prenesejo na osebni računalnik ter na njih opravljajo analize v lokalnih geografskih informacijskih sistemih (GIS). Ob izbiri objekta vektorskega sloja se prikažejo zapisi atributne tabele tega objekta. Posamezni podatkovni sloji so opremljeni z opisom, v katerem so kratko podane osnovne informacije in metoda izdelave. Obširnejši opisi so dostopni iz aplikacije ter natančno opisujejo namen, uporabnost in metodo izdelave podatkovnega sloja. Podane so tudi tehnične informacije in podatki o kakovosti produkta.

## 5 Sklep

Svetovni splet dandanes spreminja malodane vsak segment tako prostega časa kot profesionalnih aktivnosti. Spremenil, ali bolje rečeno zлил se je tudi z geografskimi informacijskimi sistemi, s čimer je nastal novi križanec – spletni GIS. Velika večina uporabnikov interneta že uporablja to tehnologijo, čeprav se malokdo tega dejansko zaveda. Uporabljamo jo na primer med navigacijo s pametnim telefonom ali iskanjem prenočišča (Hojati 2014).

Podobno kot spremembe, le da bolj negativne, zaznavamo učinke suše. Le-ta se na primer odraža v zmanjšanih količinah kmetijskih pridelkov in posledično njihovih višjih cenah, oteženi oskrbi prebivalstva z vodo, zmanjšani transportni kapaciteti rek ali zmanjšani dostopnosti vode za hladilne sisteme in okrnjenih samočistilnih zmogljivostih okolja (Types ... 2018). V prihodnosti lahko na območju Slovenije in Podonavja pričakujemo večjo pogostost suš in njene močnejše negativne učinke (Sušnik s sodelavci 2017).

Namen projekta *DriDanube* je med drugim izkoristiti spremembe, ki jih prinaša tehnologija za blaženje sprememb in težav povezanih s sušo. Sistem, ki ga razvijamo, bo povečal količino novih in izboljšal dostopnost do obstoječih podatkov, ki se uporabljajo pri napovedovanju ter obvladovanju suše in njenih učinkov. Odgovornim deležnikom bo v kombinaciji s predhodnimi raziskavami (Ceglar s sodelavci 2012) in orodji omogočil načrtovanje učinkovitejših vzvodov, prostorskih posegov in praks upravljanja v porečju Donave. Na drugi strani bo Uporabniški servis kot orodje služil končnim uporabnikom, kot so na primer kmetje, za sprejemanje odločitev in ukrepanje na terenu. Glavnina podatkov servisa pokriva celotno Podonavje, zaradi njihove narave (večinoma satelitski podatki) pa imajo velike zmožnosti širitve. To odpira pristojnim službam različnih regij in držav možnost nove ravni sodelovanja v enem večjih porečju v Evropi.

## 6 Viri in literatura

- ARSO, 2017a: SWB, prostorski podatek. Agencija Republike Slovenije za okolje. Ljubljana.
- ARSO, 2017b: SWBSLO, prostorski podatek. Agencija Republike Slovenije za okolje. Ljubljana.
- Bittner, K., Spence, I. 2004: Use Case Modeling. Boston.
- Brenčič, M. 2012: Modeliranje pojavljanja suše na območju Slovenije od začetka 19. stoletja dalje. 23. Mišičev vodarski dan.
- Ceglar, A., Medved-Cvikl, B., Kajfež-Bogataj, L., Honzak, L., Kobal, M., Eler, K. 2012: Razvoj sistema za spremljanje suš: Od statičnih do porazdeljenih spletnih zemljevidov. Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2011–2012. Ljubljana.
- CzechGlobe, 2017a: VEGCON1, prostorski podatek. Global Change Research Institute CAS. Brno.
- CzechGlobe, 2017b: VEGCON2, prostorski podatek. Global Change Research Institute CAS. Brno.
- Dolar, M., Vertačnik, G., Bertalančič, R., Dvoršek, D., Nadbath, M., Gartner, D., Klančar, M., Boljka, L., Lanjšček, M., Kolarič, D. 2014: Podnebne spremembe v Sloveniji: Podnebne podlage za pripravo ocene tveganj in priložnosti, ki jih podnebne spremembe prinašajo za Slovenijo, 1. poročilo (različica 2). Agencija Republike Slovenije za okolje. Ljubljana. Medmrežje: [www.mop.gov.si/fileadmin/](http://www.mop.gov.si/fileadmin/)

- mop.gov.si/pageuploads/podrocja/podnebne\_spremembe/porocilo\_podnebne\_spremembe1\_2.pdf (13. 2. 2018).
- EOX, 2017: Sentinel 2 Cloudless. Medmrežje: <https://eox.at/2017/08/sentinel-2-global-cloudless-mosaic/> (13. 2. 2018).
- Eurostat, 2018. NUTS. Medmrežje: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/reference-data/administrative-units-statistical-units/nuts> (13. 2. 2018).
- Google, 2018: Google Map. Medmrežje: <https://www.google.si/maps/> (13. 2. 2018).
- Hasenauer, S., Mistelbauer, T., Kokalj, Ž., Grlj, A., Hochströger, S., Bucur, A., Bartošová, L. 2017: User Requirements Document including design of interactive user interface Version 1.0. Elaborat. EODC, SPACE-SI, TU Wien. Dunaj.
- Hojati, M. 2014: What is the difference between Web GIS and Internet GIS? Medmrežje: <https://www.gi-slounge.com/difference-web-gis-internet-gis/> (13. 2. 2018).
- Oblišar, G. 2012: Značilnosti strategij prilagajanja kmetijstva podnebnim spremembam. Diplomski projekt, Oddelek za agronomijo, Biotehniška fakulteta Univerze v Ljubljani. Ljubljana. Medmrežje: [www.digitalna-knjiznica.bf.uni-lj.si/du1\\_oblisar\\_gal.pdf](http://www.digitalna-knjiznica.bf.uni-lj.si/du1_oblisar_gal.pdf) (13. 2. 2018).
- OSM, 2018: OpenStreetMap. Medmrežje: <https://www.openstreetmap.org/> (13. 2. 2018).
- Roškar, J., Gregorič, G. 2010: Application of NWP models in drought monitoring. Proceedings of the BALWOIS Conference. Ohrid.
- Sušnik, A., Valher, A. 2013: Od mokre pomladi do sušnega poletja 2013. Ujma 28.
- Sušnik, A., Gregorič, G. 2008: Trendi ranljivosti na kmetijsko sušo. 19. Mišičev vodarski dan.
- Sušnik, A., Gregorič, G. 2017: Kmetijska suša v 21. stoletju v Sloveniji. 28. Mišičev vodarski dan.
- Sušnik, A., Gregorič, G., Oblišar, G., Žun, M. 2017: Novi pristopi pri sledenju suše v Podonavju – mednarodni projekt DriDanube. Ujma 31.
- Sušnik, A., Pogarčar, T., Gregorič, G., Roškar, J., Ceglar, A. 2010: Establishment of agricultural drought monitoring at different spatial scales in southeastern Europe. Acta agriculturae Slovenica 95-3. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10014-010-0015-z>
- TUW, 2017a: NDVI, prostorski podatek. Technische Universität Wien. Dunaj.
- TUW, 2017b: SWI, prostorski podatek. Technische Universität Wien. Dunaj.
- Types of drought impacts, 2018. National Drought Mitigation Center, University of Nebraska. Medmrežje: <http://drought.unl.edu/DroughtforKids/HowDoesDroughtAffectOurLives/TypesofDroughtImpacts.aspx> (13. 2. 2018).



# ANALIZA ČASOVNIH VRST SENTINEL-2 ZA ZAZNAVANJE NESKLADNE RABE NA TRAJNIH TRAVNIKIH

**Nataša Đurić, Urša Kanjir**

Center odličnosti Vesolje-SI

natasadzuric@space.si, ursa.kanjir@zrc-sazu.si

**dr. Tatjana Veljanovski**

ZRC SAZU, Inštitut za antropološke in prostorske študije

tatjana.veljanovski@zrc-sazu.si

UDK: 528.7:712.252

## IZVLEČEK

### **Analiza časovnih vrst Sentinel-2 za zaznavanje neskladne rabe na trajnih travnikih**

V prispevku obravnavamo zmožnosti interpretacije masovnih satelitskih podatkov za prepoznavanje neupravičene rabe na primeru trajnih travnikov. Prepoznati želimo znake oranja ali druge trajnejše spremembe oziroma anomalije v pokrovnosti travnika. Pri analizi smo se osredotočili na triletno časovno serijo satelitskih posnetkov Sentinel-2. Vzorec izbranih trajnih travnikov smo analizirali s tremi pristopi: z metodo časovnih vrst BFAST Monitor, s standardnim odklonom časovne vrste ter z analizo časovnih profilov. S slednjima dvema metodama smo, poleg same uporabnosti za odkrivanje nepravilnosti, preverili zanesljivost prve metode, saj je lahko ta pri kratki časovni vrsti podatkov omejena. Anomalije se v primeru analize BFAST Monitor kažejo kot odkloni od zgodovinskega trenda, pri časovnih profilih pa je ta pokazatelj padec vrednosti NDVI ter povečan standardni odklon. Dobljeni rezultati kažejo na uporabnost podatkov Sentinel-2 in primernost metodologije analize časovnih vrst za odkrivanje neupravičene rabe trajnih travnikov.

## KLJUČNE BESEDE

optični satelitski posnetki, Sentinel-2, BFAST Monitor, trajni travnik, skupna kmetijska politika (SKP), časovni profil rastlinstva, rastna doba, kmetijstvo

## ABSTRACT

### **Analysis of Sentinel-2 time series for detection of ineligible use in permanent meadows**

In this paper, we are dealing with the ability to interpret mass satellite data for identification of unjustified uses of permanent meadows. We want to identify ploughing or other permanent changes or anomalies in the grassland land cover. For the analysis, we focused on the three-year time series of Sentinel-2 satellite images. These were analysed on a sample of selected permanent meadows using three different approaches: BFAST Monitor time series method, the standard deviation of time series and the analysis of time profiles. With the latter two methods, in addition to test their ability to detect irregularities, we also validated the first method since it can be limited while dealing with short time series. The anomalies while using BFAST Monitor method are seen as a deviation from the historical trend, in time profiles as a drop of the NDVI values and as an increase of standard deviation. The results indicate usefulness of Sentinel-2 data and suitability of the time series analysis methodology to detect unjustified use of permanent meadows.

## KEY WORDS

optical satellite images, Sentinel-2, BFAST Monitor, permanent meadow, common agricultural policy (CAP), vegetation time profile, growing season, agriculture

## 1 Uvod

Evropska skupna kmetijska politika (SKP) se je že pred petimi desetletji oblikovala z namenom, da v Evropi zagotovi prehransko varnost ter pri tem kar najbolj podpre kmete in kmetijske dejavnosti držav članic. SKP se preko reform odziva na gospodarske, okoljske in druge izzive, s katerimi se sooča Evropa v različnih obdobjih. Z zadnjo, aktualno reformo skupne kmetijske politike za čas po letu 2020, so načrtovane posodobitve nekaterih postopkov SKP, kot na primer postopek za podporo integralnega sistema kontrole in spremljanje rabe kmetijskih zemljišč (angl. *Integrated Administration and Control System*, IACS) (Devos s sodelavci 2017). Med drugim je cilj te reforme tudi pospeševanje uporabe podatkov iz vesolja, v prvi vrsti podatkov Sentinel-1 in 2 programa Kopernik ter storitev DIAS (angl. *Copernicus Data and Information Access Service*). Glavni namen pa je posodobitev postopka kontrole upravičene rabe kmetijskih zemljišč, katere del se trenutno izvaja na izbranem vzorcu kmetijskih površin v sklopu postopka kontrole z daljinskim zaznavanjem (angl. *Control with Remote Sensing*, CwRS). Visokoločljivi satelitski posnetki, na katerih kontrola sloni, ponujajo ažuren lokacijski vpogled in deloma zmanjšujejo število terenskih ogledov, še vedno pa vsi primeri kontrole na podlagi interpretacije teh posnetkov niso rešeni. Nova reforma prihaja nasproti z vpeljavo možnosti, da se čim več terenskih pregledov lahko nadomesti s sistemom rednega monitorin-ga na podlagi razpoložljivih in prosto dostopnih podatkov Sentinel-1 in 2 (Devos s sodelavci 2017).

Plačilne agencije, ki izvajajo kontrolo rabe kmetijskih zemljišč (pri nas to nalogo opravlja Agenci-ja Republike Slovenije za kmetijske trge in razvoj podeželja, ARSKTRP), morajo v postopku kontrole odločiti o skladnosti prijav kmetov, kot tudi o ustreznosti kmetijskih aktivnosti na zemljišču. Ob tem se lahko opredelijo do tega, ali upravljanje zemljišča izpolnjuje zahteve sheme za izplačilo subvencij. Plačilna agencija torej lahko sprejme pravilne odločitve, če razpolaga z informacijami o realizirani kmetij-ski praksi na ravni parcele, in prav to naj bi v prihodnje zagotavljali iz analize časovnih vrst posnetkov Sentinel. Trenutno poteka razprava v smeri opredelitve tako imenovanega »sistema semaforja«, pro-cesa označevanja stanja ustreznosti in upravičenosti kmetijske rabe in/ali prakse za vsako kmetijsko zemljišče z barvno opozorilno lestvico (Devos s sodelavci 2017). Tak sistem predstavlja rešitev za pod-poro pisarniški presoji o nadaljnjih ukrepih in končni odločitvi v letu prijave subvencije (npr. sprejemljivo, problematično, potrebna je kontrola na terenu, ni mogoče opredeliti), zagotovili pa naj bi ga na osnovi spremljanja celoletnega vegetacijskega razvoja opazovane rabe kmetijskega zemljišča na podatkih Sentinel. Glavni cilj vpeljave opisanega sistema je optimizirati postopek preverjanja o us-treznosti upravljanja zemljišča, predvsem zmanjšati obseg terenskih kontrol ter pregled razširiti iz vzorčnega preverjanja na vse kmetijske površine v državi.

Sateliti Sentinel zajemajo posnetke površja Zemlje z visoko časovno ločljivostjo (to je z obhodom na nekaj dni). To omogoča, da procese na Zemljinem površju preučujemo zvezno in v daljšem časov-nem obdobju (na primer v celotni rastni dobi). Osnovni princip delovanja obravnave časovnih vrst je, da proučujemo časovno zloženko (gosto zaporedje) satelitskih posnetkov ali iz njih izvedenih bio-fi-zikalnih produktov skozi čas. Pregled časovnih vrst podaja analizo pretekle in trenutne dinamike na Zemljinem površju ter omogoča njuno primerjavo.

Cilj naše študije je z analizo časovnih vrst satelitskih posnetkov Sentinel-2 ugotoviti morebitne ne-pravilnosti v upravljanju ter znake neupravičene (neskladne) rabe trajnih travnikov v eni rastni sezoni. Interpretacijski ključ metodologije zajema dejanske rabe kmetijskih in gozdnih zemljišč trajni travnik definira kot površino poraslo s travo, deteljami in drugimi krmnimi rastlinami, ki se jo redno kosi oziroma pase, kot tudi površino, ki ni v kolobarju in se ne orje (Interpretacijski ključ 2013). Ukrepi kmetijske politike narekujejo, da se na trajnih travnikih lahko izvaja zgolj košnja (ta je tudi časovno opredeljena in omejena). Zato smo pri analizah zaznavanja nepravilnosti in neskladnosti rabe pozorni predvsem na znake oranja ali druge trajnejše spremembe v pokrovnosti. Trajne spremembe v pokrov-nosti so lahko posledica biotskih ali abiotskih dejavnikov in jih moramo v postopku obravnavati smiselno. Metodologijo smo zasnovali tako, da lahko dobljeni rezultati služijo kot opozorilni sloj neupravičene rabe v nadaljnjih kontrolnih postopkih plačilne agencije ARSKTRP.

## 2 Učno območje in priprava podatkov

### 2.1 Učno območje

Naše učno območje je v okolici Miklavža na Dravskem polju in obsega list temeljnega topografskega načrta TTN I2726 (slika 2). Na izbranem listu je obilica zemljišč, ki se po podatkovnem sloju rabe tal Ministrstva za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano (MKGP) uvrščajo v kategorijo rabe trajni travnik (oznaka: 1300) z različnimi kmetijskimi praksami vzdrževanja (intenzivni travnik, ekstenzivni travnik, pašnik) ter imajo različne velikosti in obliko.

### 2.2 Satelitski posnetki

Pri analizi smo uporabili vse razpoložljive posnetke senzorja Sentinel-2 (S-2) za obravnavano študijsko območje in sicer v rastnih sezonah 2015 (ko so bili prvi posnetki S-2A javno dostopni), 2016 in 2017 (ko se je senzorju S-2A pridružil tudi senzor S-2B). Posnetki so zajeti v zaporedju na 5–10 dni. Uporabili smo štiri spektralne kanale (moder, zelen, rdeč in infrardeč) vsakega dostopnega posnetka v izvorni ločljivosti 10 m. Oblačne posnetke smo izločili iz obdelave. Skupno število posnetkov skozi vsa tri leta in končno število obravnavanih posnetkov prikazuje preglednica 1.

Na vseh zbranih satelitskih posnetkih Sentinel-2 smo v naslednjem koraku izračunali normirani diferencialni vegetacijski indeks (NDVI), ki je relativno in posredno merilo količine fotosintetske biomase oziroma rastne vitalnosti.

*Preglednica 1: Skupno število razpoložljivih in uporabljenih brezoblačnih posnetkov za list TTN I2726 po posameznih letih.*

leto	2015	2016	2017	skupaj
razpoložljivi posnetki	4	17	25	46
brezoblačni (uporabljeni) posnetki	3	13	24	40

### 2.3 Vektorski sloj trajnih travnikov

Pred pričetkom študije smo pripravili vektorski sloj poligonov trajnih travnikov, primeren za analize na podatkih S-2. Upoštevali smo, da gre za trajne travnike, ki so glede na stanje na zadnjem sloju rabe tal iz leta 2016 (kot tudi glede na stanje starejših slojev rabe) zagotovo trajni travniki. V vzorec trajnih travnikov smo nadalje vključili le trajne travnike, katerih površina je večja od 1000 m<sup>2</sup>. Končna velikost učnega vzorca je 93 poligonov trajnih travnikov.

## 3 Analiza časovnih vrst razvoja trajnega travnika

### 3.1 Referenčno stanje ter fenologija trajnega travnika v rastni sezoni

Opazovanje razvoja in življenjskega cikla rastja ter vedenje o periodičnih procesih in vzrokih za njihovo pojavljanje omogočajo razumevanje in zaznavanje anomalij v rastnem ciklu. Pred začetkom analiz smo v ta namen z vizualno interpretacijo časovnega grafa in časovne vrste vegetacijskega indeksa NDVI preučili referenčno stanje ter značilen razvoj ravnega cikla trajnega travnika v eni rastni sezoni.

Slika 1 prikazuje trajni travnik brez nepravilnosti in s pričakovano razvojno krivuljo v rastni sezoni 2017. Temno zeleni odtenki predstavljajo visoke vrednosti NDVI (> 0,5, navadno nad 0,6) ter aktivno



Slika 1: Rastni cikel pravilno vzdrževanega trajnega travnika (poligon z modrim obodom) v rastni sezoni 2017, prikazan na slojih vegetacijskega indeksa NDVI posnetkov Sentinel-2 zajetih v različnih časih. Temno zeleni odtenki predstavljajo visoke vrednosti NDVI ter aktivno rastje, rdeči pa nižje vrednosti NDVI in manj aktivno ali neaktivno rastje.

rastje, rdeči pa nižje ( $< 0,4$ ) in lahko pomenijo motnje v razvoju zaradi biotskih (na primer močna suša) ali abiotskih dejavnikov (na primer oranje, neobdelano zemljišče). Bež odtenki prav tako predstavljajo razmeroma visoke vrednosti NDVI in so navadno odraz mladega rastja ali posledica košenj ter blage suše. Iz slike 1 je razvidno, da trajni travnik skozi celotno rastno sezono ohranja visoke vrednosti indeksa NDVI ter da ne opazimo sledi oranaj v začetku, sredini ali koncu rastne sezone. Tak rastni cikel predstavlja referenčno (izhodiščno) stanje za nadaljnje analize ugotavljanja morebitnih odstopanj.

### 3.2 Opazovanje trenda in odstopanj s programskim orodjem BFAST Monitor

Za preučevanje travnatih površin smo uporabili metodologijo obdelovanja časovnih vrst *Breaks For Additive Season and Trend (BFAST) Monitor* (Verbesselt s sodelavci 2012), ki smo jo prilagodili za obdelavo optičnih satelitskih posnetkov Sentinel-2. Metoda deluje tako, da računa trend na podatkih časovne



vrste posnetkov (podatki za pretekle rastne sezone ali leta) in opazuje odstopanje od trenda na vrednostih posnetkov v času opazovanja. Kot podatkovni sloj za analize smo uporabili sloje vegetacijskega indeksa NDVI. Vsaka sprememba NDVI na posameznem posnetku je posledica dogajanja na obravnavanem območju. Iz tega lahko pridobimo podatke o položaju in času nastalih sprememb. Prednosti analiziranja travnatih površin s časovnimi vrstami so, da z njimi lahko zaznamo dinamične (kratko- in dolgoročne) procese, prav tako pa tudi magnitudo oziroma velikost teh sprememb. Relevantno analizo časovnih vrst je mogoče izvesti le ob zadostnem številu razpoložljivih in uporabnih podatkov (dolgi časovni vrsti satelitskih posnetkov) za obravnavano območje. Rezultati časovnih vrst so prikazani na posameznem pikslu (točkovno) v obliki časovnih grafov ali rastrsko (površinsko), kar pomeni, da dobimo jasen vizualni vpogled v morebitne spremembe na celotnem obravnavanem območju.

### 3.3 (Relativni) standardni odklon časovne vrste

V primerjavi z analizo časovnih vrst na osnovi določevanja trendov in odstopanj (poglavje 3.1) pri tem pristopu za posamezen piksel na posnetkih oziroma slojih vegetacijskega indeksa NDVI izračunamo običajni (in relativni) standardni odklon (Asam s sodelavci 2015), po celotni časovni vrsti. Končni rezultat je rastrski sloj vrednosti standardnega odklona. Tak sloj služi kot osnova za nadaljnje preverjanje morebitne neupravičene rabe v rastni sezoni in primerjavo z uradno prijavo lastnika kmetijskega zemljišča.

### 3.4 Časovni grafi

Metoda časovnih grafov temelji na obravnavi časovne razvojne krivulje posameznega poligona trajnega travnika, ki je v tem primeru osnovna enota opazovanja. Za posamezen poligon za vsak čas posnetka izračunamo srednjo vrednost (povprečje) in standardni odklon vrednosti pikselov v poligonu (Veljanovski s sodelavci 2016). Časovni grafi omogočajo vpogled v rastni cikel trajnega travnika v rastni sezoni (ali dlje) in tako učinkovito prepoznavanje morebitnih odstopanj od pričakovanega poteka (slika 1). Ta pristop dopolnjuje analize posnetkov s časovnimi vrstami v točkah 3.2 in 3.3 ter služi kot dodatna kontrola.

## 4 Rezultati in validacija

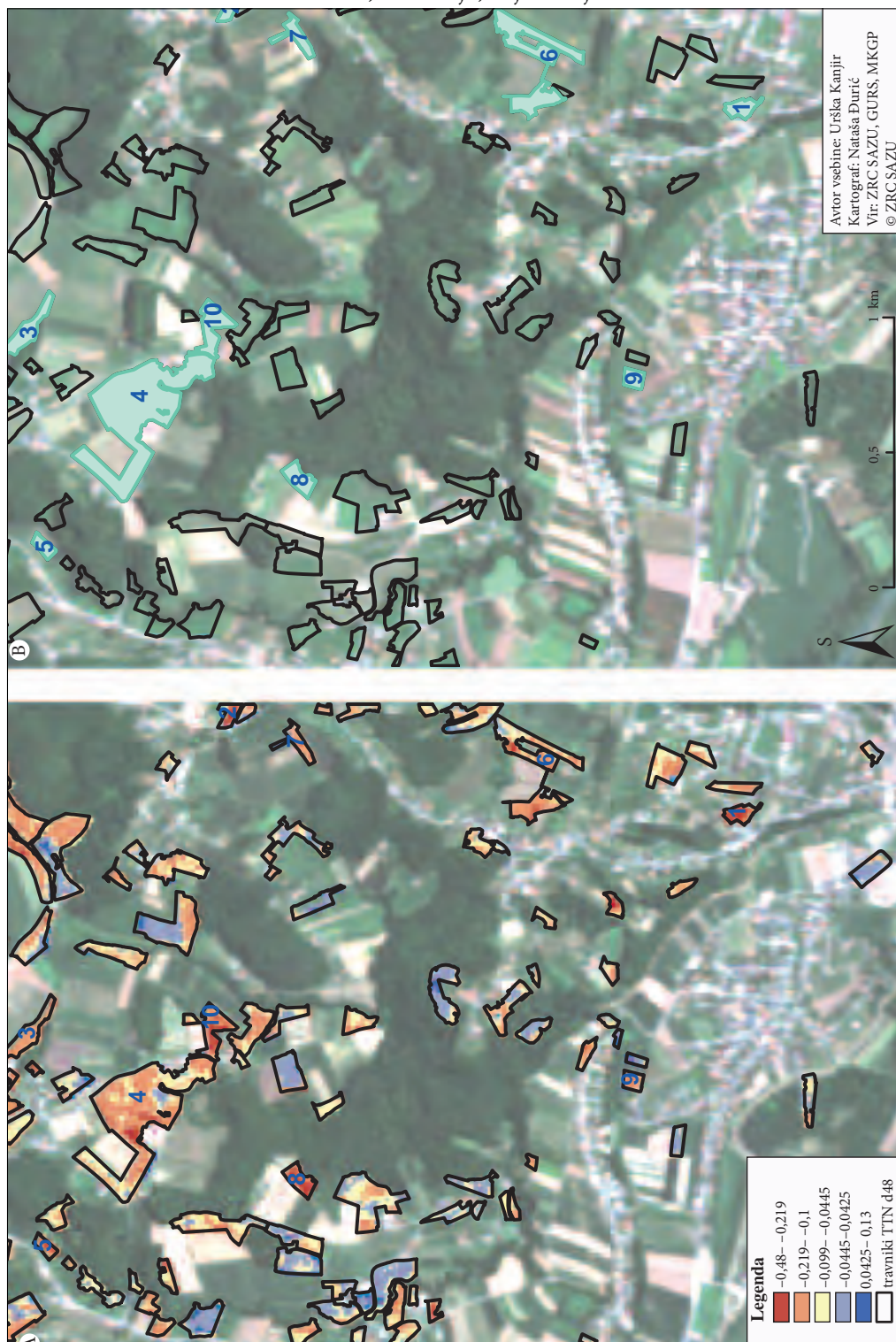
### 4.1 Učinkovitost analiz časovnih vrst satelitskih posnetkov

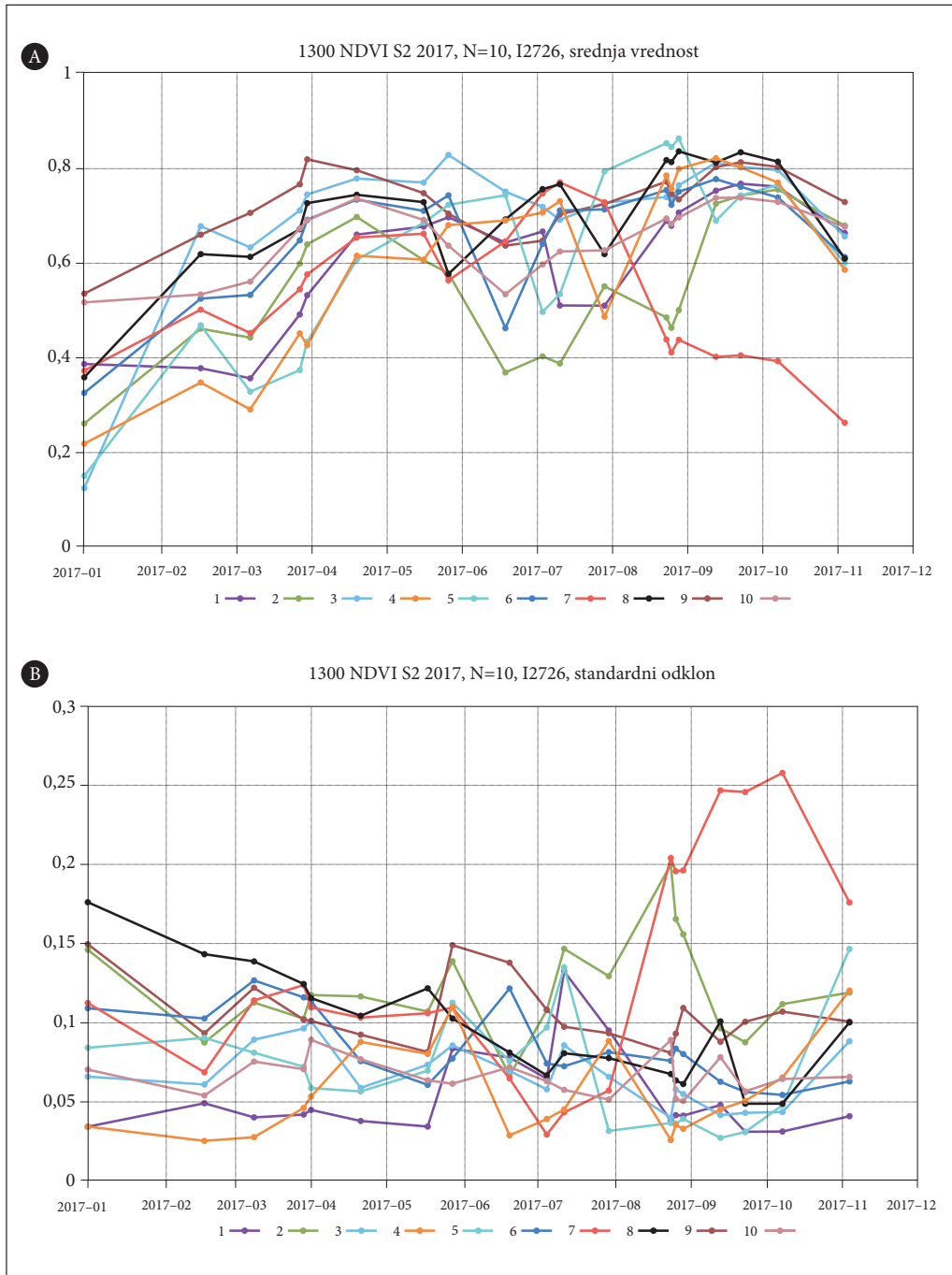
Z analizo časovnih vrst na osnovi določanja trendov in odstopanj smo v prvem koraku pridobili sloj magnitude sprememb (slika 2a). Iz sloja poligonov trajnega travnika smo nato glede na magnitudo spremembe izbrali deset poligonov za podrobnejši pregled (slika 2b). To so poligoni z največjo negativno magnitudo, ki bi lahko pomenila spremembo v letni fenologiji trajnega travnika. Razvojno krivuljo izbranih poligonov smo nadalje predstavili s časovnimi grafi.

Časovni graf izbranih desetih poligonov prikazujeta slika 3a (srednja vrednost) in slika 3b (standardni odklon).

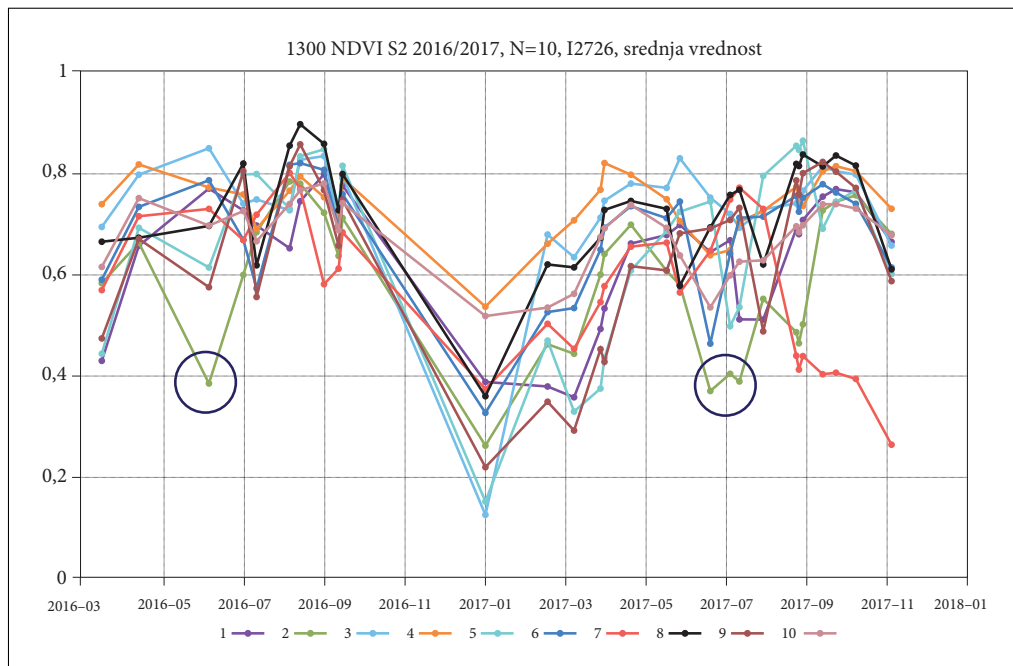
Pri interpretaciji časovnih grafov moramo upoštevati, da sta srednja vrednost in standardni odklon izračunana iz vseh pikselov v poligonu, zato so lahko vrednosti NDVI kljub nepravilnosti (neupravičeni rabi) znotraj poligona še vedno visoke. Časovni graf standardnega odklona vrednosti omogoča zaznavanje odstopanj v delih poligona. Ker smo uporabili zgolj brezoblačne posnetke, so nizke vrednosti

*Slika 2: Sloj magnitude sprememb (levo), pridobljen z analizo časovnih vrst, ter vektorski sloj izbranih 10 poligonov trajnih travnikov, ki so bili nadalje obravnavani še z analizo časovnih grafov. ► (str. 98)*

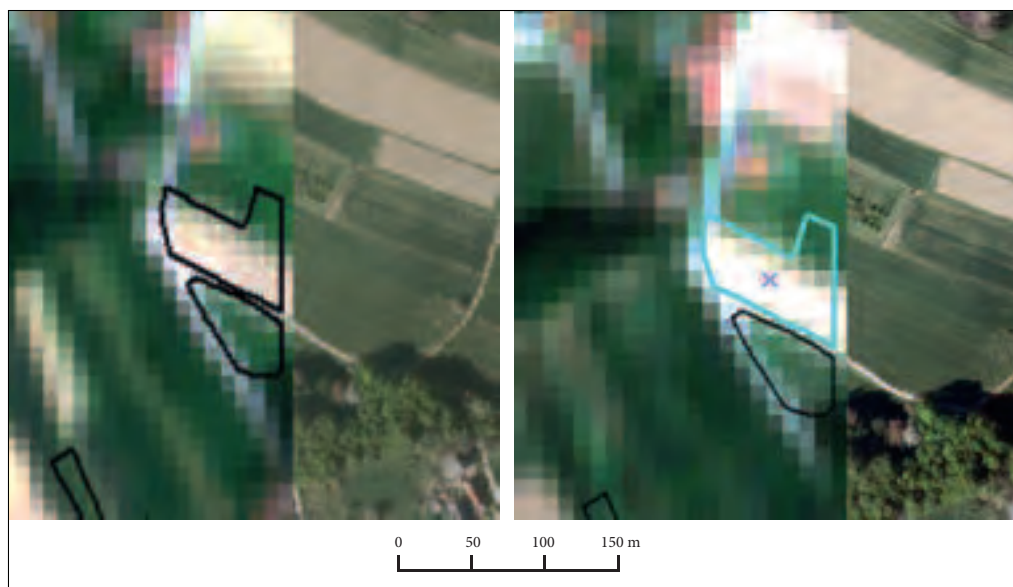




Slika 3: Časovna grafa izbranih desetih poligonov trajnega travnika, izbranih glede na vrednost magnitude sprememb na sliki 2a, za rastno sezono 2017 (a) srednje vrednosti, (b) standardni odkloni.



Slika 4: Časovni graf srednje vrednosti izbranih desetih poligonov trajnega travnika na listu temeljnega topografskega načrta TTN I2726, izbranih glede na vrednost magnitude sprememb na sliki 2 levo, za rasti sezoni 2016 in 2017.



Slika 5: Vizualna interpretacija satelitskega posnetka Sentinel-2, ki razkrije morebitno neskladje med prijavljeno rabo (trajni travnik) in stanjem v naravi.

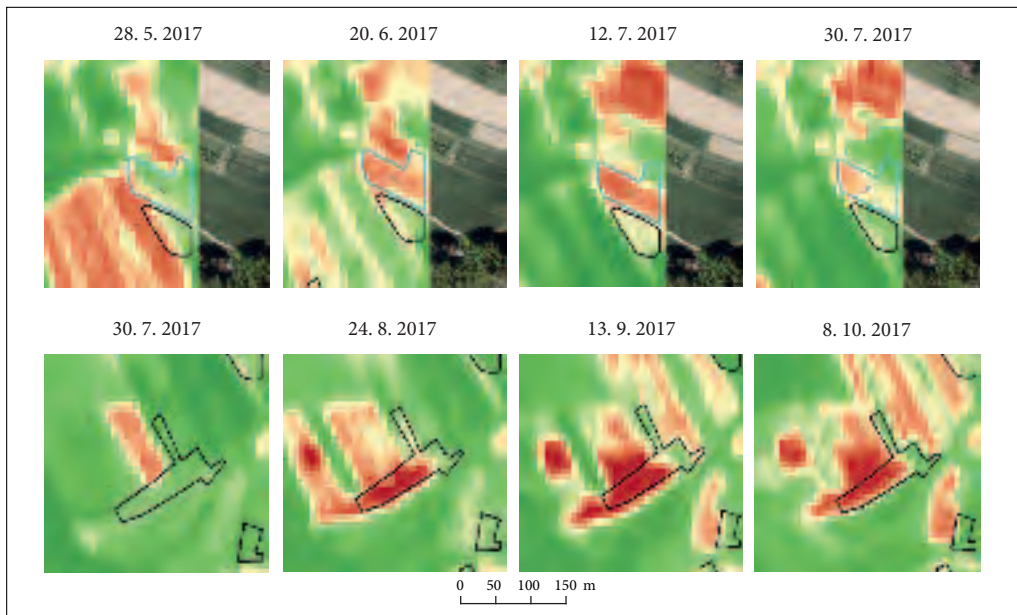
NDVI zanesljiva informacija o morebitni nepravilnosti. Odstopanje od referenčnega ravnega cikla trajnega travnika lahko na sliki 3a zaznamo v primeru poligonov številka 2 in 7, saj se srednja vrednost NDVI spusti pod mejo 0,4 (empirično izbrana vrednost meje aktivnega rasti). Ker imamo na voljo tudi posnetke iz leta 2016, preverimo, ali so se odstopanja pojavila že v prejšnji rastni sezoni (slika 4).

Na sliki 4 se osredotočimo na časovno krivuljo poligona številka 2 (obkroženo z modro), ki ima izrazit padeč vrednosti NDVI tako v rastni sezoni 2016 kot 2017. Vrednosti so v območju empirične meje, ki loči vegetacijsko aktivne površine od neaktivnih (gola tla, pozidano). Pomagamo si še z vizualno interpretacijo satelitskih posnetkov Sentinel-2 (slika 5), ki v problematičnih datumih razkrije svetle površine, to je brez ali z malo vegetacije, kar zelo verjetno predstavlja neskladje prijavljene rabe (trajni travnik) in dejanskega stanja v naravi.

Neodvisno od zgoraj omenjenih rezultatov smo za rastno sezono 2017 izračunali tudi rastrski sloj standardnega odklona in rastrski sloj relativnega standardnega odklona. Sloja prikazujeta prostorsko-časovno variabilnost v opazovani rastni sezoni na obravnavanem pikslu in učinkovito kažeta na stopnjo spremenljivosti. Magnituda spremembe je sicer večja pri izračunu običajnega standardnega odklona, vendar oba izračuna podajata primerljiv vpogled v stanje sprememb.

## 4.2 Validacija

Z izbranimi pristopi analize časovnih vrst smo odstopanja v rastni sezoni 2017 zaznali na dveh poligonih trajnega travnika (številka 2 in 7). Pravilnost pridobljenih rezultatov smo nato preverili z rezultati kontrol Agencije Republike Slovenije za kmetijske trge in razvoj podeželja (ARSKTRP). Rezultati kontrole so potrdili, da sta bili na poligonu številka 2 prisotni rabi trajni travnik (1300) in 1100 (njiva), na poligonu številka 7 pa je bila raba trajni travnik (1300) prijavljena samo na polovici poligona. Na sliki 6 kot dodatno (vizualno) utemeljitev dobljenih rezultatov naših analiz podajamo prikaz zaznanih odstopanj od pričakovane fenologije trajnega travnika na teh dveh poligonih.



Slika 6: Prikaz odstopanj v razvoju trajnih travnikov (zgoraj poligon številka 2, spodaj poligon številka 7) na posnetkih Sentinel-2, na katerih smo zaznali morebitno neskladje rabe.

## 5 Sklep

Študija časovnih vrst satelitskih posnetkov omogoča analizo stanja in sprememb v prostoru, s tem pa prispeva k prepoznavanju in razumevanju prostorskih in časovnih vzorcev sprememb kot tudi njihove lokacije, obsega, vrste, pogostosti, intenzitete, smeri pojavljanja ter trendov. V prispevku smo predstavili različne možnosti analize satelitskih posnetkov Sentinel-2 za zaznavanje odstopanj v fenologiji trajnega travnika v eni rastni sezoni ter pokazali, da so rezultati analiz časovnih vrst lahko učinkovit pokazatelj neupravičene rabe na tovrstnih kmetijskih površinah. Na izbranem učnem vzorcu poligonov trajnega travnika smo preizkusili tri različne pristope določitve morebitnih nepravilnosti v rastni sezoni. Ugotavljamo, da metodologija opazovanja trenda in odstopanj s programskim orodjem BFAST Monitor zaradi prekratke časovne vrste poda precenjeno napoved, na katerih poligonih naj bi se zgodila večja sprememba rabe. Dokler časovna vrsta ni dovolj gosta in dolga, je zato rezultate tega pristopa treba dopoljevati s pregledom rastnih krivulj (časovnih grafov), določenih na pikslih posameznega poligona. Obenem pa so rezultati izračuna običajnega in relativnega standardnega odklona prav tako zanesljivi pokazatelji pri določevanju neupravičene rabe, pri čemer moramo standardni odklon določiti po koncu rastne sezone. Ocenjujemo, da so opisani postopki analize časovnih vrst primerna izbira pri analizi podatkov Sentinel ter da so posnetki Sentinel-2 primeren vir informacij za podporo spremljanja površin trajnih travnikov v sklopu sistema dodeljevanja subvencij.

*ZAHVALA: Raziskava je bila opravljena v okviru Ciljnega raziskovalnega projekta V2-1620, ki sta ga sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije in Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano iz državnega proračuna. Raziskava je bila deloma podprta tudi s strani raziskovalnega programa številka (P6-0079), ki ga sofinancira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna, ter projekta APPLAUSE (Urban Initiative Actions, EU/EC European Regional Development Fund) in projekta DriDanube (EU/EC European Regional Development Fund).*

## 6 Viri in literatura

- Asam, S., Klein, D., Dech, S. 2015: Estimation of grassland use intensities based on high spatial resolution LAI time series. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-7/W3. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-285-2015>
- Devos, W., Fasbender, D., Lemoine, G., Loudjani, P., Milenov, P., Wirnhardt, C. 2017: Discussion document on the introduction of monitoring to substitute OTSC. Supporting non-paper DS/CDP/2017/03 revising R2014/809. DOI: <https://doi.org/10.2760/258531>
- Interpretacijski ključ 2013. Podroben opis metodologije zajema dejanske rabe kmetijskih in gozdnih zemljišč. Medmrežje: [http://rkg.gov.si/GERK/documents/RABA\\_IntKljuc\\_20131009.pdf](http://rkg.gov.si/GERK/documents/RABA_IntKljuc_20131009.pdf) (11. 1. 2018).
- Veljanovski, T., Marsetič, A., Čotar, K., Oštir, K. 2016: Opazovanje motenj v gozdovih s satelitskimi posnetki nizke prostorske ločljivosti. Digitalni podatki, GIS v Sloveniji 13. Ljubljana.
- Verbesselt, J., Zeileis, A., Herold, M. 2012: Near real-time disturbance detection using satellite image time series. Remote Sensing of Environment 123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.022>

# SAMODEJNA RAZPOZNAVA ZARAŠČANJA NA PRIMERU KRAŠKIH TRAVNIKOV

*mag. Nika Mesner, Katja Tič, Alen Mangafič, dr. Mihaela Triglav Čekada*

*Geodetski inštitut Slovenije*

*nika.mesner@gis.si, katja.tic@gis.si, alen.mangafic@gis.si, mihaela.triglav@gis.si*

UDK: 528.7:633.2.033(497.4)

## IZVLEČEK

### **Samodejna razpoznavna zaraščanja na primeru kraških travnikov**

Zaraščanje kmetijskih zemljišč in posledično njihovo opuščanje predstavlja resen problem v Sloveniji. Identifikacija zaraščanja je zelo pomembna tako z vidika vzpostavitve trajnega sistema spremljanja zaraščanja kot tudi za oceno upravičenosti do kmetijskih subvencij z namenom zmanjšanja stopnje opuščenih zemljišč. V Sloveniji se zaraščanje vodi v evidenci dejanske rabe kmetijskih in gozdnih zemljišč, ki ima dve pomanjkljivosti za ta namen uporabe. Prvič, metodologija zajema se je z leti spreminjala in zato podatki niso primerni za trajno spremljanje zaraščenosti in drugič, metoda zajema z ročno fotointerpretacijo ortofotov je zelo zahtevna in časovno potratna. V tem prispevku predlagamo časovno neodvisno metodologijo identifikacije zaraščanja, ki temelji na avtomatski objektno usmerjeni analizi ortofotov in višinskih podatkov.

## KLJUČNE BESEDE

*zaraščanje kmetijskih zemljišč, kraški travnik, avtomatska klasifikacija ortofotov, objektno usmerjena analiza, digitalni model višin*

## ABSTRACT

### **Automatic recognition of overgrowth of agricultural land in the Karst region**

Overgrowth of agricultural land and consequently its abandonment is becoming a serious problem in Slovenia. Identification of overgrowth is very important for establishment of permanent monitoring of the overgrowth in the first place and for evaluation of agricultural policy with the aim of reducing the rate of abandonment land. Traditionally monitoring of overgrowth is based on agricultural and forest land use data, which has two main disadvantages. Firstly, data based on different versions of methodology are inappropriate for permanent monitoring and secondly overgrowth photointerpretation of orthophotos time series is very complex and time demanding. Therefore, we propose a time independent methodology based on automatic object-based image analysis of orthophotos and height data.

## KEY WORDS

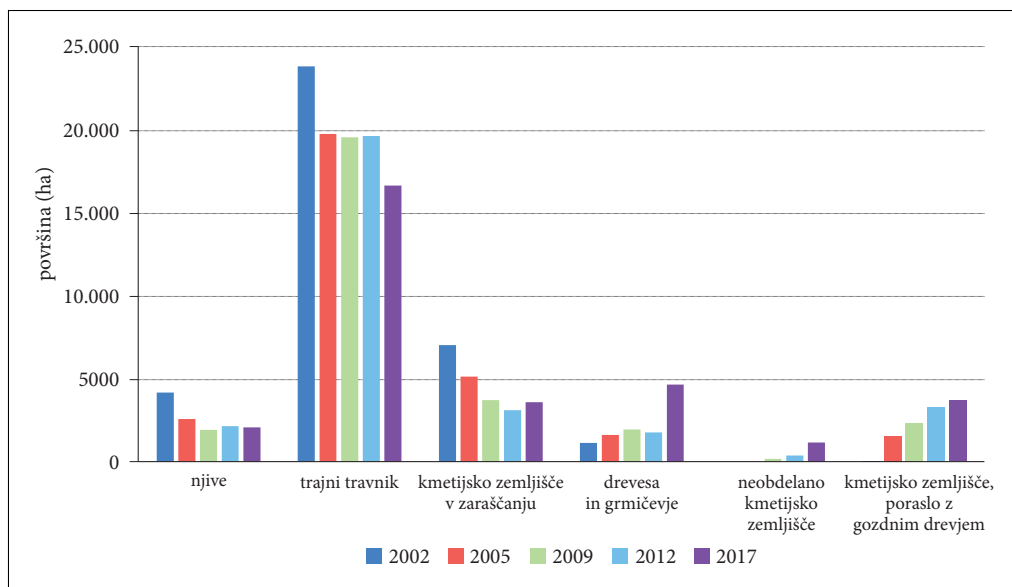
*overgrowth of agriculture land, carst pasture, automatic orthophoto classification, segmentation, digital elevation model*

## 1 Uvod

Varovanje kmetijskih zemljišč, samooskrba s prehrano in trajno varovanje naravne in kulturne dediščine so aktualne problematike, s katerimi se ukvarjajo tako evropski kot nacionalni programi. Med skupnimi cilji teh programov je tudi cilj prispevati k zmanjšanju površin, ki se zaraščajo oziroma opuščajo. Spremljanje površin, ki se zaraščajo je zelo pomembno tako z vidika vzpostavitve trajnega sistema spremljanja zaraščanja kot tudi za oceno upravičenosti do različnih ukrepov kmetijske politike, na primer kmetijskih subvencij (Zakon o kmetijstvu 2008). Ti ukrepi so usmerjeni predvsem v ohranjanje živinoreje na travinju na območjih z omejenimi dejavniki, kamor spada tudi Kras, na katerem smo testirali metodologijo opisano v prispevku.

Podatki o zaraščenih kmetijskih zemljiščih se vodijo v evidenci dejanske rabe kmetijskih in gozdnih zemljišč, ki je namenjena »ugotavljanju dejanskega stanja rabe zemljišč kot pogoja za izvajanje ukrepov kmetijske politike« (Zakon o kmetijstvu 2008). Popolni podatki za celotno državno ozemlje so na voljo od leta 2002 dalje in se letno vzdržujejo na območjih, za katera so razpoložljivi ažurni državni ortofoti (Pravilnik o evidenci ... 2010). Glede na dinamiko cikličnega aerosnemanja Slovenije – CAS, za katerega je pristojna Geodetska uprava Republike Slovenije, se tako vsako leto obnovijo podatki za približno tretjino Slovenije. Evidenca rabe je bila od začetka vzpostavitve deležna metodoloških sprememb kot posledica sprememb izvajanja ukrepov skupne kmetijske politike. Spremembe metodologije med leti zajema so nujne z vidika uporabe podatkov za oceno upravičenosti do kmetijskih subvencij, vendar neprimerne za vrednotenje sprememb rabe zemljišč. To so na primeru spremljanja sprememb na pozidanih in gozdnih zemljiščih dokazali številni avtorji (Arh 2012; Foški 2018; Lisec, Pišek in Drobne 2013; Nastran in Žižek Kulovec 2014). Spremembe metodologije predstavljajo oviro pri spremljanju sprememb rabe zemljišč, saj so lahko posledica spremembe metodologije ali pa dejanske spremembe rabe v naravi.

Na sliki 1 je prikazana analiza podatkov dejanske rabe kmetijskih in gozdnih zemljišč na območju obalno-kraške regije z namenom ocene primernosti podatkov za spremljanje sprememb kmetijskih zemljišč z vidika zaraščanja.



Slika 1: Sprememba površin dejanske rabe v obdobju 2002 in 2017 na območju obalno-kraške regije po podatkih Geodetskega inštituta Slovenije.



Iz slike 1 je razviden trend nenehnega upada površin trajnih travnikov. Površine kmetijskih zemljišč v zaraščanju so se od leta 2002 do leta 2012 zmanjševale, v letu 2017 pa ponovno povečale. Zmanjševanje teh površin ne predstavlja očiščenja, saj so na drugi strani naraščale površine dreves in grmičevja, kmetijska zemljišča porasla z gozdnim drevjem in v zadnjem letu še posebej neobdelana kmetijska zemljišča. Povečanje površin dreves in grmičevja je v veliki meri posledica spremembe metodologije zajema za potrebe uskladitve z gozdarsko rabo. Tudi prirast neobdelanih kmetijskih površin v obdobju 2013–2016 je delno odraz spremembe v metodologiji. Pri vzdrževanju rabe v letu 2013 se je del teh površin uvrščal v kmetijska zemljišča v zaraščanju, z zadnjo spremembo metodologije pa se deloma uvrščajo med neobdelana kmetijska zemljišča. Slika 1 kaže tudi na trajen prirast površin poraslih z gozdnim drevjem, ki je delno posledica vedno bolj generaliziranega zajema. Ocenjujemo, da spremembe podatkov dejanske rabe ne izražajo le dejanskega zaraščanja v naravi, temveč tudi spremembe metodologije zajema med leti in zato niso primerni za vrednotenje dejanskega zaraščanja v naravi.

Ena izmed možnosti za pridobitev podatkov o dejanskem stanju zaraščanja v naravi je avtomatiziran postopek obdelave kombinacije različnih podatkov daljinskega zaznavanja. Če se omejimo samo na slovenske avtorje, lahko omenimo preučevanje planinskih pašnikov v Makedoniji (Mesner s sodelavci 2014), opazovanje motenj v gozdovih na osnovi goste časovne vrste satelitskih posnetkov slabše prostorske ločljivosti (Veljanovski s sodelavci 2016), klasifikacijo različnih vrst drevoja na osnovi satelitskih posnetkov WordView-2 in laserskih podatkov (Verlič s sodelavci 2014) ter preučevanje vpliva suše na vegetacijo (Kokalj s sodelavci 2016; Vertačnik s sodelavci 2017).

Pri identifikaciji zaraščanja predstavlja višinska komponenta ključno vlogo (slika 2), zato v tem prispevku predlagamo določitev različnih stopenj zaraščanja (nizko, srednje in visoko zaraščanje). Z različnimi stopnjami zaraščanja smo poskusili identificirati zemljišča v različnih fazah zaraščanja, kjer nizko zaraščanje predstavlja nekošene travnike, srednje zaraščanje predstavlja travnike z grmičevjem in visoko zaraščanje predstavlja že manjša drevesa in drugo olesenelo vegetacijo. Uporabili smo pristop identifikacije zaraščanja na podlagi alternativnih virov podatkov (optični posnetki in digitalni modeli višin) ter z metodo samodejnega odkrivanja zaraščanja. Rezultati so lahko uporabni na dva načina:

- kot opozorilni sloj sprememb za uporabo v procesu vzdrževanja podatkov s fotointerpretacijo,
- kot vhodni podatek za izračun časovne serije kazalnika zaraščanja kmetijskih zemljišč.



Slika 2: Prikaz zaraščanja: nizka vegetacija (levo), srednje visoka vegetacija (v sredini) in visoka vegetacija (desno).

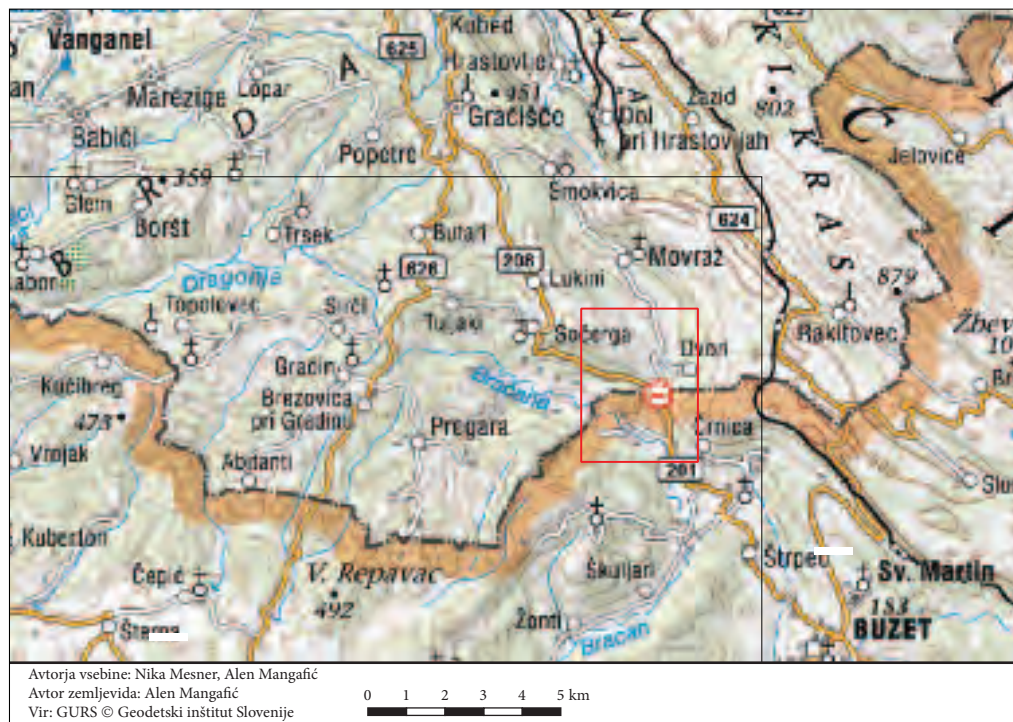
## 2 Študijsko območje in podatki

Študijsko območje je izbrano na Krasu, kjer je opuščanje kmetijske dejavnosti in posledično pojav zaraščanja pogost pojav. Na to kažejo tudi podatki dejanske rabe kmetijskih in gozdnih zemljišč. Spremembe deležev posameznih dejanskih rab med letoma 2012 in 2017 na študijskem območju so podani v preglednici 1.

Med letoma 2012 in 2017 je upadel delež njiv in trajnih travnikov, v porastu pa so kmetijska zemljišča v zaraščanju, drevesa in grmičevje ter kmetijska zemljišča porasla z drevjem. Razloge za ekstenzivno kmetijstvo gre iskati v manj ugodnih naravnih danostih, kar se kaže tudi v opuščanju živinoreje in posledično zaraščanju trajnih travnikov, ki so se tradicionalno uporabljali za pašo živine ali za krmo. Analizo

Preglednica 1: Površine in deleži posameznih vrst dejanskih rab na študijskem območju v letih 2012 in 2017.

vrsta dejanske rabe	2012		2017	
	površina (ha)	delež	površina (ha)	delež
njiva	13,6	2,4%	10,3	1,9%
trajni travnik	98,8	17,5%	68,3	12,4%
kmetijsko zemljišče v zaraščanju	39,2	6,9%	56,2	10,2%
drevesa in grmičevje	7,7	1,4%	20,7	3,7%
kmetijsko zemljišče poraslo z drevjem	13,3	2,4%	26,2	4,7%



Slika 3: Študijsko območje.

smo opravili na območju južno od Kraškega roba, ki obsega 2250 krat 3000 m, ter se razteza vzhodno od naselja Sočerga do Hrvaške meje (slika 3).

Pri izbiri podatkovnih virov za identifikacijo očiščenih in zaraščenih kmetijskih površin smo upoštevali tipologijo obravnavanih sprememb. Pri očiščenju gre za nenadno spremembo in za identifikacijo zadoščata dva niza podatkov o stanju v prostoru (pred in po spremembi). Zaraščanje pa je dolgotrajen proces, zato je za razpoznavanje primernejša uporaba časovne serije podatkov. Poleg tega se zaraščanje na podatkih daljinskega zaznavanja izraža z zelo heterogeno strukturo v primerjavi z vzdrževanimi trajnimi travniki in z višino nad terenom. Na podlagi teh ugotovitev smo v metodologiji uporabili:

- barvne ortofote in barvne infrardeče ortofote s prostorsko ločljivostjo 50 cm za leta 2012, 2014 in 2017,
- digitalni model površja (DMP) za leto 2017,
- aeroposnetke CAS za leta 2011, 2014 in 2017 ter
- digitalni model reliefa z ločljivostjo 1 meter (DMR1) za leto 2011.

Za identifikacijo zaraščanja na podlagi višine nad terenom smo uporabili DMR1 (podatki laserskega skeniranja Slovenije), DMP (podatki CAS za 2017) ter aeroposnetke CAS (podatki CAS za

2011 in 2014). Na podlagi slikovnega ujemanja aeroposnetkov CAS smo izdelali DMP za leti 2011 in 2014.

Poleg podatkov daljinskega zaznavanja smo v postopku uporabili tudi dejansko rabo kmetijskih in gozdnih zemljišč (2012 in 2017). Podatke dejanske rabe zemljišč (2012) smo uporabili za izdelavo maske trajnih travnikov, ki predstavljajo potencialna območja zaraščanja. Podatke dejanske rabe zemljišč (2017) smo uporabili za vrednotenje rezultatov.

### 3 Metodologija izdelave opozorilnega sloja zaraščanja

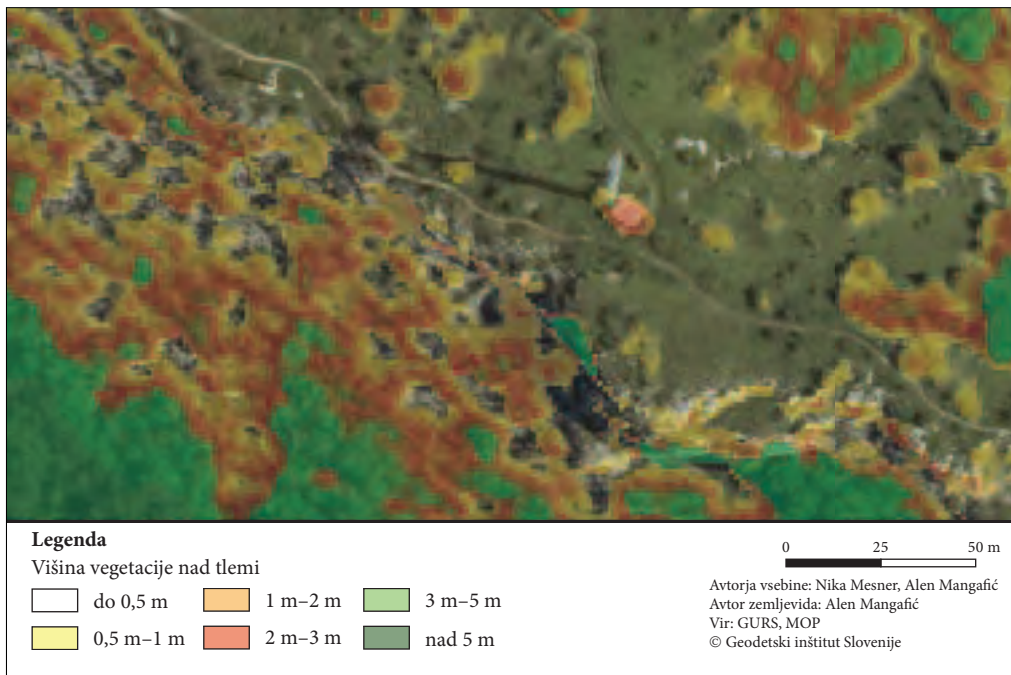
Metodologija razpoznavne zaraščanja in očiščenja kmetijskih zemljišč obsega predobdelavo vhodnih podatkov in samodejno razpoznavo zaraščanja.

#### 3.1 Predobdelava vhodnih podatkov

Predobdelava vhodnih podatkov obsega izdelavo digitalnega modela krošenj (v nadaljevanju DMK) (Šturm s sodelavci 2016) ter rastrskega sloja heterogenosti pokrovnosti tal, ki je določen na podlagi variabilnosti zelenega kanala ortofota. Na študijskem območju vsebuje DMP (izdelek CAS 2017) določene nepravilnosti (manjkajoči podatki na sencah in vodnih površinah), ki smo jih nadomestili z interpolacijo na podlagi okoliških pikslov. DMP smo izdelali z metodo slikovnega ujemanja iz aerofotografij projekta CAS. Za izdelavo DMK, razlika med DMP in DMR1, smo za celotno serijo (2011, 2014, 2017) uporabili DMR1 (2011), saj le-ta temelji na lidarskih podatkih in je bistveno višje (horizontalne in višinske) natančnosti. Za odprt in neporaščen teren je višinska točnost laserskega DMR 15 cm (Triglav Čekada in Bric 2015). Spremembe DMR1 smo v postopku izdelave DMK zanemarili. Pri razpoznavi zaraščanja se spremembe DMR1 lahko izražajo kot lažno identificirana zaraščanja. Pri vrednotenju rezultatov je potrebno posebno pozornost nameniti dejstvu, da so podatki za izdelavo DMK med seboj časovno neusklajeni in različne horizontalne in višinske natančnosti. Na sliki 4 je prikazan primer izdelanega DMK.

Za vrednotene kakovosti izdelanega DMK glede na časovno neusklajenost podatkov DMP in DMR1 ter horizontalno in višinsko natančnost smo podatke grafično prikazali v šestih razredih (slika 4). Na podlagi vizualnega pregleda rezultatov smo identificirali manjše skupine sosednjih pikslov z lažno identificirano višino med 0,5 in 2 m, ki so posledica različne višinske natančnosti DMP in DMR ter lažno identificirane skupine pikslov na območju senc. Na podlagi teh ugotovitev smo usmerili postopke poklasifikacije za samodejno odstranitev lažno identificiranih sprememb, ki so podrobneje opisani v poglavju 2.2.

Za izdelavo rastrskega sloja heterogenosti smo uporabili zeleni kanal barvnega ortofota. Heterogenost posameznega piksla smo določili kot razmerje med standardno deviacijo okoliških sosednjih pikslov in povprečno vrednostjo na obravnavanem območju (slika 5).



Slika 4: Sloj digitalnega modela krošenj na območju zaraščanja.



Slika 5: Izsek sloja heterogenosti z normiranimi vrednostmi (levo). V beli barvi so prikazane zelo heterogene površine, v črni pa zelo homogene.

Kakovost izdelanega sloja heterogenosti smo izvedli z vizualnim pregledom. Ugotovili smo, da je na podlagi sloja heterogenosti možno identificirati tako visoko vegetacijo (gozd in posamezna drevesa) kot tudi zemljišča v začetni fazi zaraščanja, kar se na ortofotu kaže s heterogeno strukturo. Na podlagi vizualnega pregleda smo ocenili, da je sloj heterogenosti primeren za uporabo v postopku samodejne razpoznavne zaraščanja.

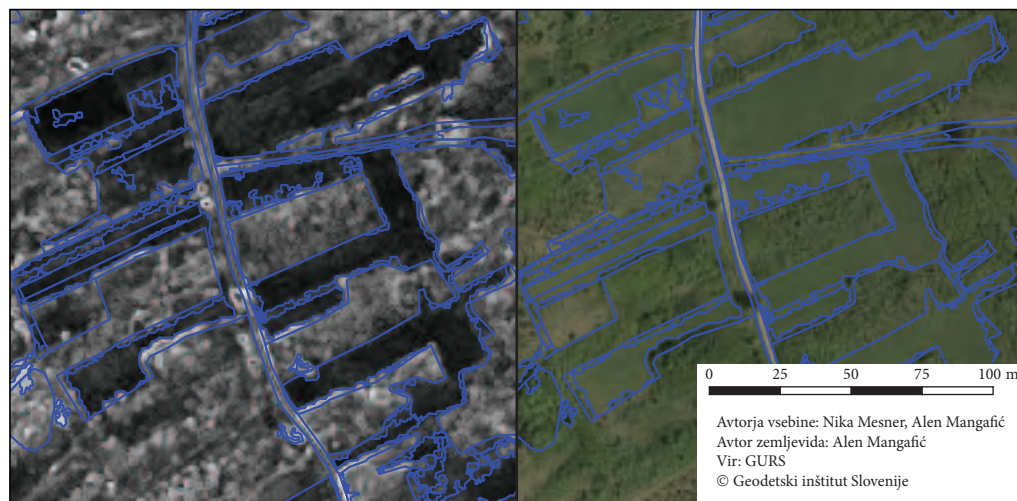
### 3.2 Samodejna razpoznavna zaraščanja kmetijskih zemljišč

Samodejna razpoznavna zaraščanja kmetijskih zemljišč temelji na analizi serije treh ortofotov in podatkov digitalnega modela krošenj. Rezultat razpoznave so identificirane spremembe na trajnih travnikih v naravi glede na evidentirano stanje dejanske rabe iz leta 2012. Trajne travnike iz leta 2012 smo v okviru izvedene analize obravnavali kot začetno stanje. Predmet analize je identifikacija sprememb glede na začetno stanje. Na podlagi zahtevanega minimalnega površinskega kriterija za odkrivanje sprememb z zelo visoko stopnjo podrobnosti (100 m<sup>2</sup>), smo se odločili za uporabo metode objektno usmerjene klasifikacije (Hussain s sodelavci 2013). Pri tem smo uporabili koncept hierarhične mreže segmentov s klasifikacijo na osnovi pravil.

Segmentacijo smo izvedli na maski sloja heterogenosti z algoritmom Contrast Split programa e-Cognition. Algoritem na ravni enega kmetijskega zemljišča v iterativnem postopku združi piksele v skupino homogenih in heterogenih segmentov na podlagi rastrskega sloja heterogenosti. Skupina homogenih segmentov vsebinsko predstavlja potencialna območja vzdrževanih površin, skupina heterogenih pikslov pa potencialna območja zaraščanja. Primer segmentacije je podan na sliki 6.

Skupina heterogenih segmentov je vsebovala tudi sence, zato smo v naslednji fazi segmente izboljšali na podlagi optičnih posnetkov (ortofoto) z uporabo večnivojskega algoritma. Rezultat iterativnega postopka segmentacije na podlagi dveh algoritmov smo uporabili za klasifikacijo segmentov v razrede:

- sence,
- nezaraščene površine,
- visoko zaraščanje,
- srednje visoko zaraščanje in
- nizko zaraščanje.



Slika 6: Primer trajnega travnika s segmentacijo na območju homogenih in heterogenih površin.

Klasifikacijo smo izvedli na osnovi pravil. V razred sence smo uvrstili segmente na podlagi kriterija maksimalnega indeksa senc, v razred nezaraščene površine smo uvrstili segmente s povprečno višino nižjo od 1 m ter nizko vrednostjo sloja heterogenosti. V razred visoko zaraščanje smo uvrstili segmente s povprečno višino višjo od 2 m, srednje visoko zaraščanje z višino med 1 in 2 m ter nizko zaraščanje z višino med 0,5 in 1 m ter visoko vrednostjo sloja heterogenosti. Izdelana metodologija je zasnovana tako, da se lahko izvaja samo na podlagi enega posnetka in evidentiranega stanja dejanske rabe, v kolikor pa je na voljo časovna serija posnetkov, se le-ta uporabi za izboljšanje pravilnosti rezultatov klasifikacije (odstranitev lažno klasificiranih objektov). Uporabili smo posnetke iz let 2012, 2014, 2017, pri čemer smo vsak posnetek klasificirali in v poklasifikaciji uporabili tudi informacije predhodnih posnetkov, ki so na voljo (2014, 2017). Kriterija za identifikacijo lažno klasificiranih sprememb sta:

- tekstura ima negativen trend naraščanja s časom,
- višina ima trend upadanja.

Nato smo odstranili še lažno klasificirane objekte ob robu gozda (dolgi in ozki segmenti) ter majhne spremembe (posamezna drevesa) na podlagi geometričnih in kontekstualnih lastnosti segmentov.

## 4 Analiza rezultatov

Po podatkih dejanske rabe kmetijskih in gozdnih zemljišč je bilo v letu 2012 na študijskem območju 98,8 ha trajnih travnikov. S predlagano metodologijo smo na teh travnikih identificirali 18,7 ha nizkega zaraščanja, 9,2 ha srednje visokega zaraščanja in 6,7 ha visokega zaraščanja (stanje 2017). Skupno se je v obdobju petih let (2012–2017) zaraslo 34,6 ha oziroma 35 % trajnih travnikov. Rezultati identifikacije zaraščanja so prikazani na sliki 7.

Vrednotenje rezultatov smo izvedli z vizualno oceno kakovosti ter z oceno pravilnosti in popolnosti na podlagi referenčnega sloja podatkov. Kot referenčni sloj podatkov smo uporabili evidentirano stanje dejanske rabe (2017), ki je bila določena s fotointerpretacijo na podlagi ortofota (2017). Na podlagi primerjave klasificiranih razredov in referenčnih vrst rabe smo določili popolnost in pravilnost rezultatov.

Na podlagi vizualnega pregleda rezultatov smo ugotovili, da je zaraščanje določeno z visoko stopnjo popolnosti, vendar so prisotne lažne klasifikacije med posameznimi razredi zaraščanja. Pravilno so identificirana zaraščanja, ki so bila v manjši meri vidna že v letu 2012 in so se v obdobju petih let razrasla. Lažno klasificirane površine zaraščanj so prisotne predvsem ob gozdnem robu in kot posledica sence dreves ali zajema gozdnega roba po sredini dreves. Napake ob gozdnem robu se pojavljajo tudi kot posledica nenatančne določitve meje zaraščanja, kar je razlog v uporabi zgolj sloja heterogenosti za določitev meje segmentov in digitalnega modela krošenj, ki je na robu gozda položajno nenatančen. Pri testiranju smo poskusili tudi z odstranitvijo teh napak v fazi poklasifikacije, vendar smo hkrati izgubili tudi identificirana ozka zaraščanja, ki so lahko prisotna med njivami. Primer zaraščanja trajnega travnika v letih 2012–2017 ter identificirane zaraščene površine so prikazani na sliki 8.

Za izračun popolnosti smo uporabili dejansko rabo kmetijskih in gozdnih zemljišč (stanje 2017) kot referenčni sloj podatkov. Stopnjo popolnosti smo izračunali kot delež poligonov dejanske rabe naslednjih kategorij: kmetijsko zemljišče v zaraščanju, drevesa in grmičevje ter kmetijsko zemljišče poraslo z drevesi. Ti so bili s predlagano metodologijo identificirani kot ena izmed vrst zaraščanja. Rezultati so podani v preglednici 2.

Popolnost rezultatov identifikacije sprememb je zelo visoka. S predlaganim postopkom smo uspešno identificirali 96 % kmetijskih zemljišč v zaraščanju, 72 % rabe drevesa in grmičevje ter vsa (100 %) kmetijska zemljišča porasla z drevesi. Identifikacija zemljišč, ki se vodijo kot podrobna vrsta rabe drevesa in grmičevje je nekoliko nižja, ker se pod to vrsto rabe vodijo tudi zemljišča, ki so po geometriji manjša ali so izrazito dolgih in ozkih oblik.

Pravilnost identifikacije zaraščanja smo ocenili na podlagi kombinacije referenčnega sloja podatkov (dejanska raba kmetijskih in gozdnih zemljišč) in vizualnega pregleda lažno klasificiranih zaraščanj.

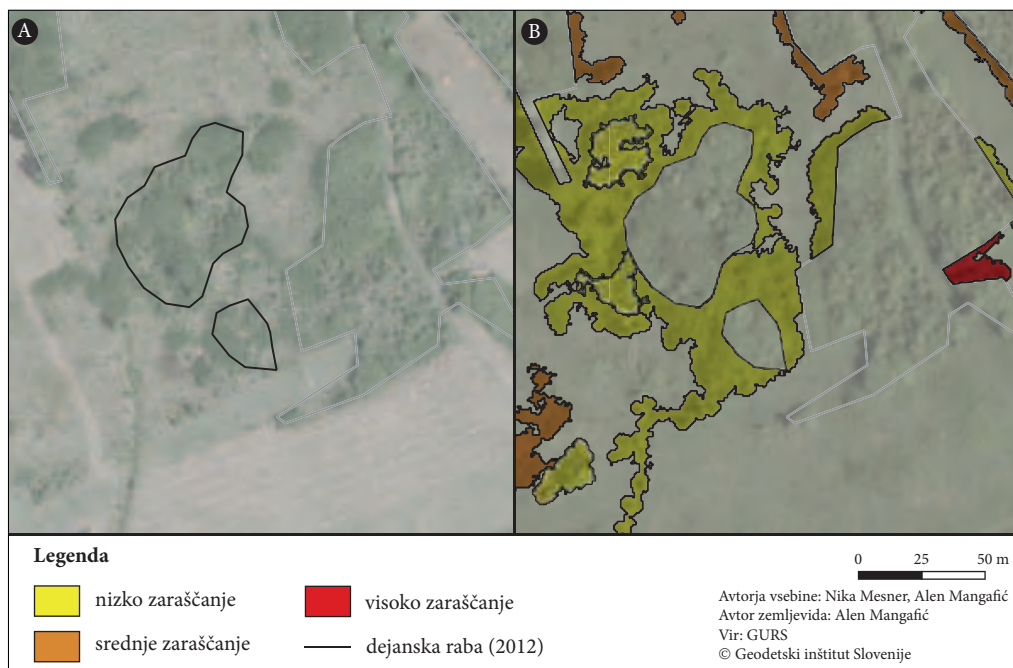


Slika 7: Rezultati identifikacije zaraščenih travnikov. Stanje v naravi in evidentirani trajni travniki v letu 2012 (leva slika) ter stanje v naravi in identificirana zaraščanja na trajnih travnikih v letu 2017 (desna slika).

Preglednica 2: Stopnja popolnosti identifikacije zaraščanja po posameznih vrstah dejanske rabe.

vrsta rabe	število poligonov rabe	število poligonov z identificiranim zaraščanjem	popolnost
kmetijsko zemljišče v zaraščanju	111	107	96 %
drevesa in grmičevje	82	59	72 %
kmetijsko zemljišče poraslo z drevesi	10	10	100 %

Kot pravilno identificirano zaraščanje smo smatrali zemljišče z evidentirano rabo kmetijsko zemljišče v zaraščanju, drevesa in grmičevje ali kmetijsko zemljišče poraslo z drevesi. Tako določena pravilnost identifikacije zaraščanja je zelo nizka in znaša 51 %. Lažno klasificirana zaraščanja so po podatkih dejanske rabe trajni travnik (22 %), njive (18 %) ter druge vrste rabe (9 %). Na podlagi vizualnega pregleda



Slika 8: Primer trajnega travnika v letu 2012 (a) in zaraščenih površin v obdobju 2012–2017 (b).

smo ugotovili, da so se na podlagi referenčnega sloja v skupino lažnih klasifikacij uvrstile tudi pravilno klasificirane zaraščane površine. Gre za skupine dreves ali zaraščanja manjšega obsega na trajnih travnikih in večja odstopanja med evidentirano in dejansko mejo gozdnega roba. Na podlagi vizualnega pregleda menimo, da je izračunana pravilnost identifikacije zaraščanja na podlagi podatkov dejanske rabe kmetijskih in gozdnih zemljišč podcenjena. Za zanesljivo oceno pravilnosti bi bilo treba izdelati referenčni sloj z ročno fotointerpretacijo ali z zajemom na terenu.

## 5 Sklep

Predstavili smo metodologijo identifikacije zaraščanja, ki temelji na avtomatski objektno usmerjeni analizi ortofotov in višinskih podatkih. Metodologijo smo testno preverili na študijskem območju v obalno-kraški regiji, za katero je značilna visoka stopnja zaraščanja. Rezultati kažejo, da je metoda določanja zaraščanja uspešna in primerna tako za spremljanje stopnje zaraščenosti kmetijskih zemljišč kot kazalnika prostorskega razvoja kot tudi za identifikacijo sprememb podatkov dejanske rabe kmetijskih in gozdnih zemljišč. Podatki zaraščanja se lahko uporabijo tudi v procesu vzdrževanja dejanske rabe z namenom usmeritve operaterjev na območja sprememb.

Nadaljnji razvoj metodologije zaraščanja bo usmerjen predvsem v natančnejšo določitev mej segmentov z namenom zmanjšanja lažno klasificiranih segmentov ob gozdnem robu.

*ZAHVALA: Raziskava je bila opravljena v okviru Ciljnega raziskovalnega projekta V2-1620, ki sta ga sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije in Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano iz državnega proračuna.*



## 6 Viri in literatura

- Arh, I. 2012: Spremembe rabe zemljišč v južni in severovzhodni Sloveniji. Diplomaska naloga, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Foški, M. 2018: The (non)usefulness of the Register of Existing Agricultural and Forest Land Use for monitoring the processes in urban areas. *Acta geographica Slovenica* 58-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/AGS.1805>
- Hussain, M., Chen, D., Cheng, A., Wei, H., Stanley, D. 2013: Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.03.006>
- Kokalj, Ž., Žibret, J., Rogelj, P., Muri, B., Iršič Žibert, M., Pehani, P., Oštir, K. 2016: Samodejno prepoznavanje vegetacijskih parametrov iz satelitskih podatkov za monitoring suše. *Digitalni podatki, GIS v Sloveniji* 13. Ljubljana.
- Lisec, A., Pišek, J., Drobne, S. 2013: Suitability analysis of land use records of agricultural and forest land for detecting land use change on the case of the Pomurska Statistical Region. *Acta geographica Slovenica* 53-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/AGS53104>
- Mesner, N., Oven, K., Vidmar, S., Jevšnik, D. 2014: Ocena upravičenosti planinskih pašnikov do kmetijskih subvencij z metodo objektne klasifikacije. *Digitalni prostor, GIS v Sloveniji* 12. Ljubljana.
- Nastran, M., Žižek Kulovec, L. 2014: (Ne)usklajenost uradnih prostorskih evidenc pri ugotavljanju krčitve gozdov v Sloveniji. *Geodetski vestnik* 58-4. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2014.02.314-326>
- Pravilnik o evidenci dejanske rabe kmetijskih in gozdnih zemljišč 2010. Uradni list Republike Slovenije 122/2008, 4/10 in 110/10. Ljubljana.
- Triglav Čekada, M., Bric, V. 2015: Končan je projekt laserskega skeniranja Slovenije. *Geodetski vestnik* 59-3.
- Šturm, T., Pisek, R., Kobler, A., Beguš, J., Matijašič, M. 2016: Možnost uporabe lidarskih podatkov na Zavodu za gozdove Slovenije. *Digitalni podatki, GIS v Sloveniji* 13. Ljubljana.
- Veljanovski, T., Marsetič, A., Čotar, K., Oštir, K. 2016: Opazovanje motenj v gozdovih s satelitskimi posnetki nizke prostorske ločljivosti. *Digitalni podatki, GIS v Sloveniji* 13. Ljubljana.
- Verlič, A., Đurić, N., Kokalj, Ž., Marsetič, A., Simončič, P., Oštir, K. 2014: Tree species classification using WorldView-2 satellite images and laser scanning data in a natural urban forest/Klasifikacija vrsta drveča u prirodnoj urbanoj šumi koristeći WorldView-2 satelitske snimke i lidar. *Šumarski list* 9-10.
- Vertačnik, M., Glavan, M., Kokalj, Ž., Oštir, K., Ferenčak, B., Pintar, M. 2017: Uporaba satelitskih posnetkov za ugotavljanje sušnega stresa na izbrani poljščini v Prekmurju. 28. Mišičev vodarski dan. Zakon o kmetijstvu. Uradni list Republike Slovenije 45/2008, 57/2012, 90/2012, 26/2014, 32/2015 in 27/2017. Ljubljana.



# ANALIZIRANJE STANJA OPUŠČENEGA ODLAGALIŠČA ODPADKOV LEŽEN Z UPORABO ARHIVSKIH IN SEDANJIH FOTOGRAMETRIČNIH PODATKOV

*dr. Dušan Petrovič, dr. Ana Petkovšek, dr. Dejan Grigillo*

*Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo*

*dusan.petrovic@fgg.uni-lj.si, ana.petkovsek@fgg.uni-lj.si, dejan.grigillo@fgg.uni-lj.si*

UDK: 528.7:628.472.2(497.43Ležen)

## IZVLEČEK

### **Analiziranje stanja opuščenega odlagališča odpadkov Ležen z uporabo arhivskih in sedanjih fotogrametričnih podatkov**

Na območju ugrezanja v Šaleški dolini so v preteklosti odlagali različne, tudi nevarne odpadke brez ustrezne dokumentacije in brez ukrepov za zaščito okolja. To odlagališče je treba danes sanirati in prilagoditi veljavni evropski okoljski zakonodaji, kar med drugim zahteva natančno opredelitev lokacije ter izračun prostornine odloženih odpadkov. Prispevek opisuje razpoložljive vire, postopke in uspešnost pridobitve podatkov za primerjavo stanja v obdobju od začetka odlaganja pa do danes na podlagi fotogrametričnih podatkov. Omejena dokumentacija arhivskih podatkov fotogrametričnih snemanj v mnogih primerih zahteva orientacijo in izvednotenje letalskih posnetkov, ki kljub temu omogočajo le omejeno pridobivanje merskih podatkov o spremembah v okolju z zahtevano natančnostjo.

## KLJUČNE BESEDE

*odlagališče Ležen, nevarni odpadki, CAS, aerotriangulacija, ortofoto*

## ABSTRACT

### **Analysing current status of former dumping ground Ležen with use of archive and contemporary photogrammetric products**

In the past different hazardous wastes have been deposited in sinking area in Šaleška valley without adequate documentation and without environmental protection measures. This dumping ground should now be rehabilitated and adapted to existing European environmental legislation, which include the precise definition of the location and the calculation of the volume of deposited waste. The article explains available data sources, procedures and successfulness of deriving data from the photogrammetric images for comparing the area status in the period from the beginning of the disposal to the present day. In many cases the limited documentation of archival data of photogrammetric recordings requires the orientation and stereorestitution of images which enable only limited detection of changes in the environment with the required precision.

## KEY WORDS

*dumping ground Ležen, hazardous waste, CAS, aerotriangulation, orthophoto*

## 1 Uvod

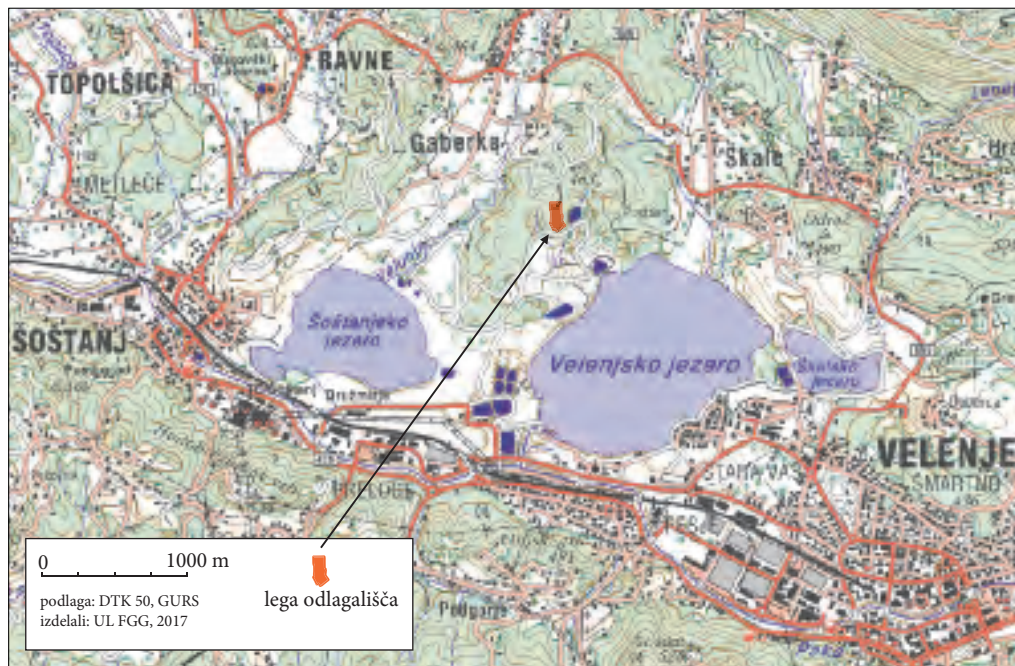
V obdobju hitre industrializacije in nezadostne okoljske ozaveščenosti so se komunalni ter industrijski odpadki odlagali brez ustrezne lokacijske in gradbene dokumentacije, pogosto na manj poseljena območja na zamočvirjenih ali drugače za kmetijsko in drugo rabo manj kakovostnih tleh. Po končanem odlaganju so bila takšna odlagališča praviloma le prekrita s tanjšim slojem prsti in/ali prepuščena naravnemu zaraščanju (VAIRA 2017). Na območjih nekaterih pred desetletji opuščeni odlagališč se danes kažejo negativni vplivi na okolje. Poleg povečane okoljske obremenitve in tveganj za bližnje ali širše okolje, je država Slovenija v skladu z zakonodajo in direktivami Evropske unije (EU) dolžna vsa neustrezna odlagališča urediti in o njih poročati EU (Zakon o varstvu okolja 2006). Med temeljne korake ukrepov sodi natančna opredelitev lokacije opuščeni odlagališč ter izračun prostornine odloženih odpadkov. Do iskanih podatkov lahko pridemo s primerjavo stanja na območju v obdobju od začetka odlaganja pa do danes na podlagi fotogrametričnih podatkov.

Arhivski (zgodovinski) letalski posnetki so izredno pomembni pri proučevanju sprememb površja skozi čas. Ob pravilni uporabi lahko iz njih pridobimo trirazsežnostne (3R) merske podatke ali izdelamo digitalne modele reliefa (DMR) nekdanje pokrajine. DMR nekdanje pokrajine lahko izdelamo tudi iz drugih virov, na primer z interpolacijo plastnic in višinskih točk starih topografskih načrtov (Breg Valjavec 2010; Pacina in Weiss 2011). Spremembe površja ugotovimo z reliefno analizo nekdanje in zdajšnje pokrajine ter njuno medsebojno primerjavo. Ugotovljene spremembe lahko uporabimo tudi za iskanje odlagališč odpadkov (De Wet 2016). Metodološki pristop uporabe 3R modelov za evidentiranje odlagališč odpadkov je podan v Breg Valjavec (2013). Za izdelavo DMR iz letalskih posnetkov se v današnjem času uporabljajo metode slikovnega ujemanja (*image matching*). Kokalj in Veljanovski (2014) sta uporabila arhivske letalske posnetke za izdelavo 3R modela naselja Breginj, porušenega v potresih leta 1976. 3R model, izdelan z metodo struktura iz gibanja (*Structure from Motion, SfM*), je predstavljal prvi približek načrtane digitalne rekonstrukcije naselja. V primerih iskanja odlagališč odpadkov, ki jih lociramo z analizo reliefa, lahko sum o odloženih odpadkih potrdimo z uporabo geofizikalnih metod, med katerimi prevladujejo meritve električne upornosti tal (Breg Valjavec 2014).

Prispevek opisuje uporabo fotogrametričnih podatkov na primeru opuščena odlagališča nevarnih odpadkov Ležen v Šaleški dolini. Spremembe na območju odlagališča smo ocenili s primerjavo aeroposnetkov, DMR-jev in ortofotov iz različnih obdobj od začetka odlaganja odpadkov do danes. Arhivske aeroposnetke med letoma 1975 in 1990 smo orientirali in s tem omogočili njihovo stereopopazovanje ter izdelavo DMR-jev in ortofotov. Leta 1994 smo v Sloveniji začeli sistematično izdelovati ortofote, celotna država je bila z njimi prvič pokrita leta 2001. Od takrat naprej so na voljo tudi podatki o zunanji orientaciji aeroposnetkov in državni ortofoto. Za obravnavano območje so na voljo tudi podatki laserskega skeniranja Slovenije (LSS) iz leta 2014, ki med drugim vključujejo georeferenciran in klasificiran oblak točk (GKOT) ter digitalni model reliefa s prostorsko ločljivostjo 1 m (DMR 1). Naš cilj je bil določitev natančnega položaja nekdanjega odlagališča iz arhivskih fotogrametričnih podatkov in izračun prostornine odloženega materiala s primerjavo med arhivskimi ter podatki sedanjega stanja.

## 2 Opuščeno odlagališče nevarnih odpadkov Ležen

Opuščeno odlagališče nevarnih odpadkov Ležen v Šaleški dolini se nahaja na območju ugreznanja zaradi dejavnosti Premogovnika Velenje, severozahodno od ugrezninskega Velenjskega jezera (slika 1). Ker se odkopavanje lignita v Šaleškem bazenu nadaljuje, se bodo tla odlagališča v naslednjem desetletju dodatno pogreznila za do 6 m (VAIRA 2017). Zato je treba preveriti, ali pričakovani ugrezki in z njimi povezane razpoke, ki predstavljajo potencialne poti širjenja onesnaževal z izcedno vodo, lahko negativno vplivajo na kakovost vode v Velenjskem jezeru. To je v zadnjih letih postalo priljubljeno



Slika 1: Lega odlagališča Ležen v Šaleški dolini (podlaga DTK 50, GURS).

rekreacijsko središče s številnimi vodnimi in obvodnimi športi. Zato je Premogovnik Velenje naročil izdelavo projektne naloge za raziskave, monitoring in pripravo rešitev v povezavi z vplivi opuščenega odlagališča na okolje. Na podlagi raziskav in monitoringa bo Premogovnik Velenje pripravil načrte omejitvenih ukrepov, če se to pokaže za potrebno (VAIRA 2017).

Po dostopnih virih (VAIRA 2017) je odlagališče obratovalo med letoma 1980 in 1986. Uporabljala so ga okoliška industrijska podjetja in ustanove. Na površini 5000 m<sup>2</sup> naj bi bilo po dosegljivih podatkih odloženih 10.000 m<sup>3</sup> odpadkov, med katerimi so tudi nevarne snovi: svinec, arzen, baker, fenoli ter ostanki topil. Večina dokumentacije o odlagališču je bilo izgubljene ali uničene v nesrečah. Ustrezni organi občine Velenje so v času obratovanja odlagališča izdali začasno odločbo za začasno uporabo industrijskega odlagališča v Ležnu. Odpadki so se v obdobju obratovanja odlagališča odlagali skladno s takrat veljavno zakonodajo. Upravljavec odlagališča je po prenehanju obratovanja odpadke prekril z 1 m debelo prekrivko iz glinastih materialov. Odlagališče Ležen v letih 1997 in 1998 ni bilo zajeto v inventarizacijo industrijskih in komunalnih odlagališč, ki ga je izvedlo Ministrstvo za okolje in prostor, v evidencah Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO) se odlagališče Ležen ne vodi in tudi nima upravljavca. Slovenija o njem ni poročala EU (VAIRA 2017).

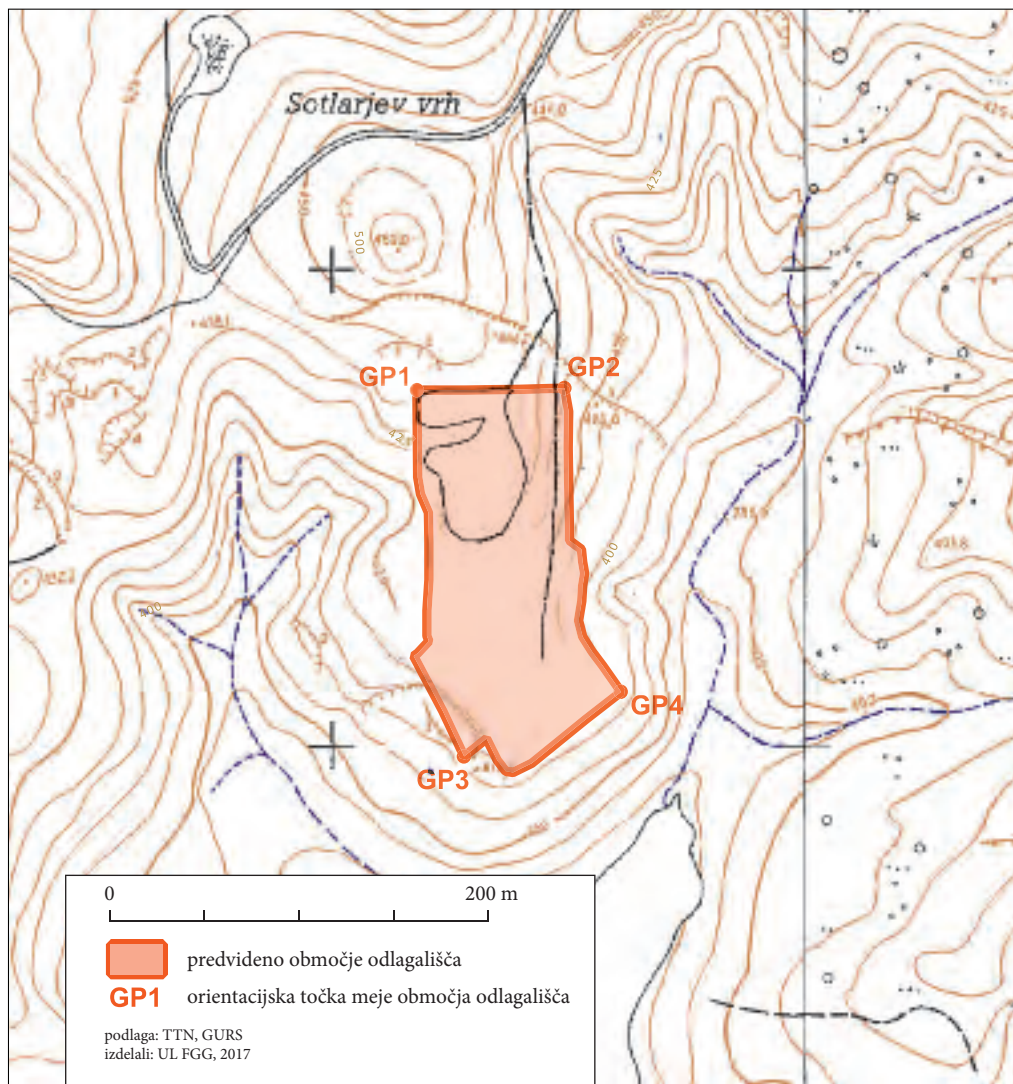
Na podlagi podatkov geodetskega situacijskega načrta Premogovnika Velenje, na katerem so označeni obris ter orientacijske vogalne točke nekdanjega območja odlaganja (GP1–GP4), bi bila površina odlagališča kar 15.000 m<sup>2</sup>, ali trikrat večja od zapisov v uradnih zapisnikih (VAIRA 2017).

### 3 Identifikacija odlagališča na razpoložljivih fotogrametričnih podatkih

Za namen identifikacije in prepoznavne stanja odlagališča smo zbrali in analizirali razpoložljive topografske podlage. Glede na majhno območje obsega odlagališča je podrobnost vseh topografskih kart,

vključno z najpodrobnejšo TTN 5, neustrezna. Še več, ker je bila zadnja obnova listov G2623 in 24 leta 1993, je bilo očitno takratno stanje območja odlagališča še takšno, da topografi pri zajemu podatkov s steoparov niso mogli ustrezno interpretirati morfološke oblike in so na pretežnem delu pustili plastnice prekinjene (slika 2).

Tako smo kot glavni vir za analizo stanja in sprememb uporabili izvirne fotogrametrične podatke, za poznejša obdobja pa tudi državni ortofoto in podatke laserskega skeniranja Slovenije (LSS). Na Geodetski upravi Republike Slovenije (GURS) smo pridobili razpoložljive fotogrametrične podatke za obravnavano območje in sicer so bili na voljo posnetki cikličnega aerosnemanja Slovenije (CAS) in posebnih snemanj za leta 1975, 1979, 1983, 1987, 1990 in 2006 ter državni ortofoto območja za leta 2000,



Slika 2: Območje odlagališča Ležen na osnovi situacijskega načrta Premogovnika Velenje (podlaga TTN 5, izsek iz listov G2623 in 24, GURS).

2005, 2007, 2010, 2014 in 2016. Za modeliranje sedanjega stanja smo uporabili GKOT iz leta 2014. Z osnovno vizualno interpretacijo smo analizirali primernost posameznega izdelka za nadaljnjo analizo, kot je razvidno iz preglednice 1.

V nadaljnji obravnavi smo uporabili tiste podatke, iz katerih smo lahko razbrali zaznane spremembe na območju odlagališča: posnetke snemanj za leta 1979, 1983, 1987, 1990 in 2006 ter podatke LSS za leto 2014.

Za širše območje odlagališča smo na GURS-u pridobili pasove fotogrametričnih posnetkov. Za pas petih posnetkov za leto 2006 smo pridobili celotne podatke izvedene aerotriangulacije (notranja in zunanja orientacija posnetkov). Za starejša snemanja so bili v dokumentaciji GURS-a na voljo le kalibracijski certifikati fotoaparatorov. Pred pridobivanjem merskih podatkov iz starejših snemanj je bilo treba izvesti aerotriangulacijo. Za njeno izvedbo smo na stereoparih snemanja za leto 2006 izmerili 21 oslonilnih točk (OT). OT smo izmerili na stabilnem ozemlju izven ugrezninskega območja. Največjo težavo pri izbiri OT je predstavljalo izbiranje stabilnih objektov, ki so bili vidni tudi na starejših posnetkih in se v vmesnem času niso spremenili. Preglednica 2 prikazuje podatke o aerotriangulaciji. Za vsako leto je navedeno število uporabljenih OT za izvedbo aerotriangulacije in koreni srednjih kvadratnih pogreškov

*Preglednica 1: Razpoložljivi fotogrametrični podatki in izdelki za območje odlagališča Ležen.*

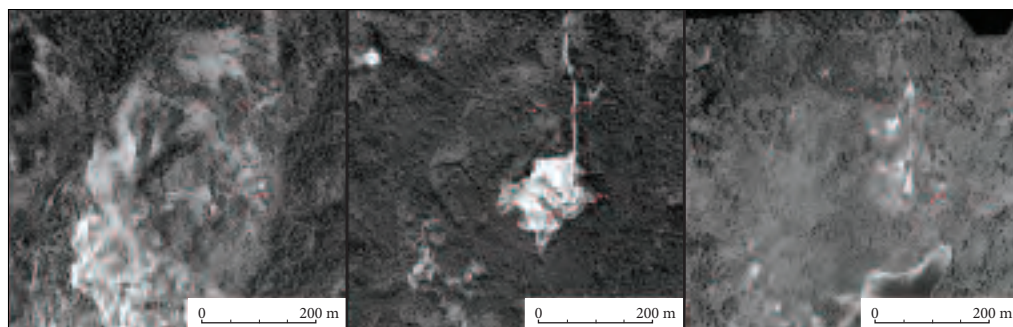
leto	vrsta podatkov	število posnetkov v pasu ali številka lista	komentar
1975	črno beli posnetki	8	pred odlaganjem, vidni plazovi in odlomi kot posledica izkopavanja premoga
1979	črno beli posnetki	5	pred odlaganjem, vidni plazovi in odlomi (zelo podobno kot na posnetkih za leto 1975)
1983	črno beli posnetki	4	lepo vidno odlaganje v južnem delu
1987	črno beli posnetki	6	v južnem delu že vidno zaraščanje, severni del pa na posnetkih manjka
1990	črno beli posnetki	6	zaraščanje, a še vidno odlaganje tako v severnem kot južnem delu
2000	črno beli ortofoto posnetki	G2623, 24	v severnem delu ponovno bolj čisto, začetek izdelave ceste na jugu
2005	črno beli ortofoto posnetki	G2623, 24	precej zaraščeno, na vzhodu vidna vodna površina
2006	barvni posnetki posnetki	5	zelo podobno kot leta 2005, kakšna dodatna pot
2007	barvni ortofoto posnetki	G2623, 24	isto stanje, kot ga prikazujejo posnetki iz leta 2006 (ortofoto posnetek za leto 2007 je bil izdelan iz posnetkov iz leta 2006)
2010	barvni ortofoto posnetki	G0823, 24	brez bistvenih sprememb glede na leti 2006 in 2007
2014	barvni ortofoto posnetki	G0823, 24	precej zredčeno drevje na odlagališču
2014	GKOT	506_137, 138	izjemno lepo vidni lomi, razpoke, najboljše vidno na karti nagibov
2016	barvni ortofoto posnetki	G0823, 24	podrto drevje zahodno od ceste

(*root mean square error, RMSE*) na OT po posameznih koordinatah. V nasprotju s prakso, aerotriangulacije nismo ocenili še na podlagi kontrolnih točk. Zaradi opisanih težav pri iskanju OT, ki bi bile ob tem še enakomerno razporejene po celotnem območju, smo vse točke uporabili kot oslonilne.

*Preglednica 2: Podatki o izvedeni aerotriangulaciji.*

leto	število OT	RMSE(Y) (m)	RMSE(X) (m)	RMSE(Z) (m)
1979	5	0,47	0,41	0,44
1983	8	0,27	0,37	0,61
1987	12	2,25	2,24	4,08
1990	5	0,21	0,16	0,16

Prav pri posnetkih za leto 1987, tik po prenehanju odlaganja odpadkov na deponiji, je bil pas snemanja zelo neugoden. Odlagališče je na skrajnem severnem robu posnetkov, severni deli odlagališča z območjem severno od odlagališča pa v posebnem snemanju leta 1987 sploh niso bili posneti. Tako so posnetki, ki smo jih imeli na voljo, pokrivali le ožji del območja okoli jezera, ki se je zaradi pogrezanja najbolj spreminjalo. Za to območje ni bilo mogoče najti zadovoljivega števila dobro razporejenih OT. Posledično so zato rezultati aerotriangulacije za te posnetke neprimerni za pridobivanje merskih podatkov. Snemanje iz leta 1987 smo tako uporabili le za vizualno interpretacijo s 3R opazovanjem ste-



*Slika 3: Primerjava stanja na območju odlagališča na izdelanih ortofotih za leta 1979, 1983 in 1990 z označenimi orientacijskimi vogalnimi točkami.*



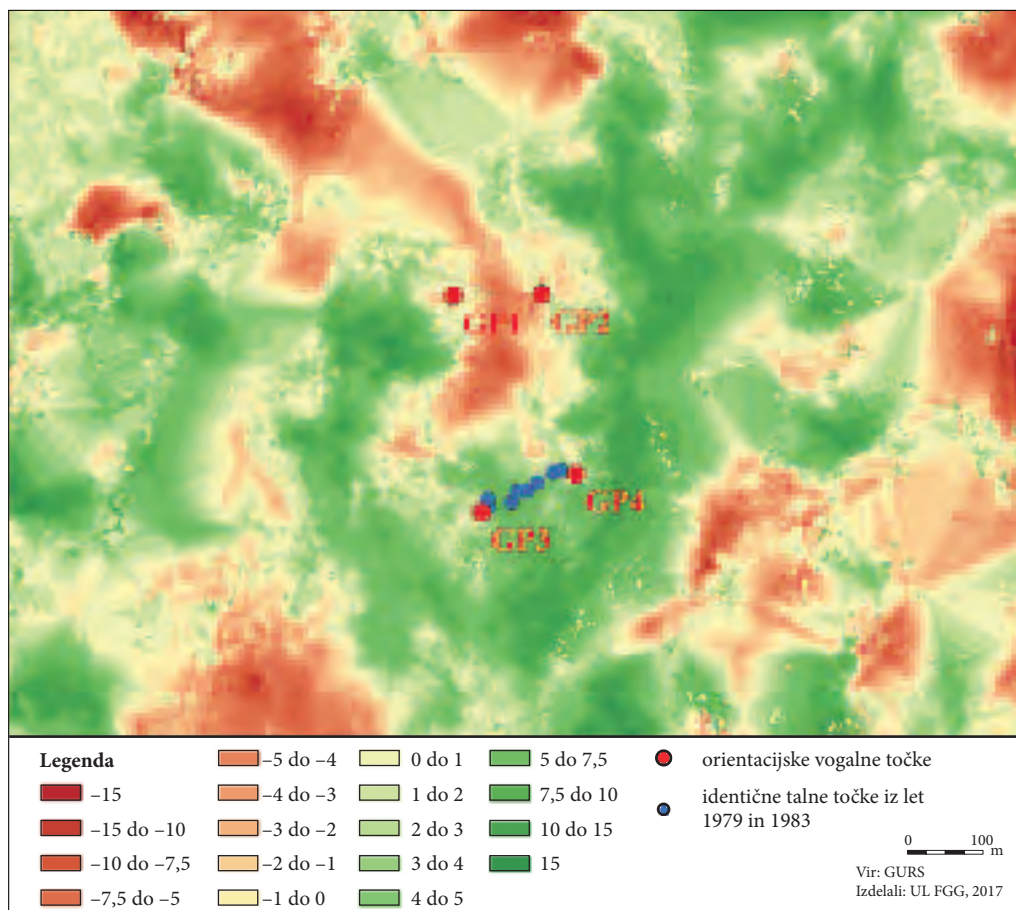
*Slika 4: Primerjava stanja na območju odlagališča na državnih ortofotih za leta 2006 in 2014 ter izdelane karte nagibov iz 2014 z označenimi orientacijskimi vogalnimi točkami.*



reoparov, ki pa so strokovnjakom s področja geotehnike vseeno omogočili prepoznavo nekaterih sprememb na odlagališču. Območja odlagališča tako zanesljivo in natančno ni mogoče določiti iz podatkov nobenega izmed obravnavanih let. Leta 1983 so odlagali zgolj v južni del območja, podatki za leto 1987 pa ne obsegajo severnega dela odlagališča in jih tudi ni mogoče ustrezno orientirati, leta 1990 je bilo območje že prekrito z rastjem. Še najbolj zanesljiva je prepoznavna območja na karti nagibov GKOT, ki pokaže dokaj dobro ujemanje s prikazom območja na situacijskem načrtu Premogovnika Velenje.

Sliki 3 in 4 prikazujeta primerjavo stanja terena na območju opuščenega odlagališča v letih 1979, 1983, 1990, 2006 in 2014. Območje odlagališča je približno omejeno s štirimi orientacijskimi vogalnimi točkami GP1–GP4, ki so prikazane na slikah kot rdeče pike. Za leta 1979, 1983 in 1990 smo s slikovnim ujemanjem in klasifikacijo talnih točk izdelali digitalne modele reliefa, ki smo jih uporabili za izdelavo posameznih ortofotov. Za prikaz stanja v letih 2006 in 2014 so bili uporabljeni državni ortofoti (ortofoto za leto 2007 prikazuje stanje iz leta 2006), podatke o površju pa smo za leto 2014 pridobili iz GKOT in teren prikazali kot karto nagibov.

Spremembe na območju deponije smo skušali ovrednotiti tudi na podlagi izdelanih DMR-jev. Slika 5 prikazuje razliko DMR-jev za leto 1979 in leto 1983 (DMR\_1983 – DMR\_1979). Velike višinske razlike,



Slika 5: Primerjava DMR-jev za leti 1979 in 1983; od DMR-ja za leto 1983 je odštet DMR za leto 1979. Enote v legendi so metri.

prikazane na sliki 5, so v veliki meri posledica različne zaraščenosti območja, kar je razvidno tudi na sliki 3. Predvsem za leto 1983 je bilo iz črnobelih posnetkov CAS z metodami slikovnega ujemanja ter nadaljnjo klasifikacijo točk na talne in netalne točke nemogoče pridobiti zadovoljivo število talnih točk za izdelavo točnega DMR. Klasifikacijo točk smo izvajali samodejno v programu *Socet GXP* ob postopku slikovnega ujemanja. Tudi z uporabo drugih postopkov (na primer *lasground* iz programskega paketa *LAStools*) nismo dobili zadovoljivih rezultatov. Strnjeno rastje je onemogočilo tudi zanesljive ročne meritve zadostnega števila talnih točk. Zaradi tega nadaljnjih analiz (na primer izračuna prostornine) na izdelanih DMR-jih nismo opravili. Na sliki 5 je kljub temu mogoče opaziti nasutje na južnem delu odlagališča. Z merjenjem na stereoparih za leti 1979 in 1983 smo na mestih, kjer je bila v obeh obdobjih prepoznavna talnih točk najbolj zanesljiva (na sliki 5 so prikazane v modri barvi), prepoznali višinske razlike med 3 m in 4 m. Kljub temu pa so izdelani stereopari v kombinaciji z ortofoti omogočili strokovnjakom s področja geotehnike učinkovito vizualno ugotavljanje sprememb na območju odlagališča v času pred, med in po zaključnem odlaganju odpadkov.

## 4 Sklep

Fotogrametrični podatki in izdelki, kot so arhivski posnetki cikličnega aerosnemanja ter posebnih snemanj, državni ortofoto in podatki laserskega skeniranja Slovenije so se za vizualno identifikacijo območja opuščene odlagališča in interpretacijo sprememb izkazali kot primerni. Na obravnavanem primeru so se slabše obnesli za pridobivanje merskih podatkov o legi, količini nasutja in izkopa zemljin. Po končanem odlaganju odpadkov se je na območju razrastlo rastje, ki je onemogočila prepoznavo obsega deponije ter pridobitev zanesljivih podatkov za izdelavo točnih DMR-jev, ki bi jih uporabili za izračun prostornine. Uporabnost arhivskih fotogrametričnih posnetkov za pridobivanje merskih podatkov je odvisna tudi od razpoložljivih tehničnih parametrov opravljenih snemanj, ki za arhivske posnetke niso vedno na razpolago. Izračun aerotriangulacije in posledično izdelava modela reliefa ter ortofota, je za te posnetke zadovoljiva le v primeru nedvoumne prepoznave ustrezno razporejenih stabilnih oslonilnih točk, ki jim lahko na podlagi drugih virov določimo koordinate z ustrezno točnostjo. Kadar ustrezne točnosti ne moremo zagotoviti, teh izdelkov ne moremo uporabiti za pridobitev merskih podatkov, še vedno pa so lahko zelo primerni pri vizualni interpretaciji stanja v določenem času zajema.

Opisan postopek je bil opravljen v okviru izdelave projektne naloge za raziskave in pripravo rešitev v povezavi z vplivi na okolje – Opuščeno odlagališče nevarnih odpadkov Ležen, katero je naročil Premogovnik Velenje d. d., izvedlo pa podjetje VAIRA, inovativni inženiring, d. o. o., Maribor; kot sodelavci smo pri projektni nalogi sodelovali tudi strokovnjaki Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani.

## 5 Viri in literatura

- Breg Valjavec, M. 2010: Digitalni model višin nekdanje pokrajine – primer Logaško polje (leto 1972). Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2009–2010. Ljubljana.
- Breg Valjavec, M. 2013: Nekdanja odlagališča odpadkov v vrtačah in gramoznicah. Geografija Slovenije 26. Ljubljana.
- Breg Valjavec, M. 2014: Study of filled dolines by using 3D stereo image processing and electrical resistivity imaging. International Journal of Speleology 43-1. DOI: <https://doi.org/10.5038/1827-806X.43.1.6>
- De Wet, A. 2016: Discovering and characterizing abandoned waste disposal sites using LIDAR and aerial photography. Environmental and Engineering Geoscience 22-2. DOI: <https://doi.org/10.2113/gsegeosci.22.2.113>

- Kokalj, Ž., Veljanovski, T. 2014: Izdelava 3R modela iz arhivskih letalskih posnetkov za digitalno retrospektivo porušenega Breginja. Digitalni prostor, GIS v Sloveniji 12. Ljubljana.
- Pacina, J., Weiss, L. 2011: Georelief reconstruction and analysis based on historical maps and aerial photographs. Proceedings - Symposium GIS Ostrava 2011. Ostrava.
- VAIRA, inovativni inženiring, d.o.o. 2017: Projektna naloga za raziskave in pripravo rešitev v zvezi z vplivi opuščenega odlagališča nevarnih odpadkov Ležen na okolje, naročnik Premogovnik Velenje d. d., Maribor, 2017.
- Zakon o varstvu okolja. Uradni list Republike Slovenije 39/2006. Ljubljana.



## UPORABA HIPERSPEKTRALNIH SNEMANJ V ARHEOLOGIJI

**dr. Dimitrij Mlekuz**

Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za arheologijo in Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije, Center za preventivno arheologijo  
dmlekuz@gmail.com

UDK: 902:528.8

### IZVLEČEK

#### **Uporaba hiperspektralnih snemanj v arheologiji**

Večina arheoloških najdišč v Sloveniji je v rečnih dolinah, na ravninah, prodnih zasipih in nižinah. Zaradi dolgotrajne rabe prostora jih ne prepoznamo več kot površinske anomalije, kar pa še ne pomeni, da arheološki sledovi niso ohranjeni pod površjem. Preizkusili smo domet hiperspektralnih snemanj za prepoznavanje arheoloških sledov v močno spremenjenih pokrajinah. Ugotovili smo, da hiperspektralna snemanja kljub nekaterim pomanjkljivostim omogočajo detekcijo pokopanih arheoloških sledov; je pa študija pokazala tudi na zaskrbljujoče dejstvo, da je večina arheoloških sledov na območjih, zaznamovanih z intenzivno kmetijsko rabo, močno predelanih ali popolnoma uničenih.

### KLJUČNE BESEDE

arheologija, aeroarheologija, daljinsko zaznavanje, hiperspektralna snemanja, zračno lasersko skeniranje

### ABSTRACT

#### **Application of hyperspectral imagery in archaeology**

A vast majority of archaeological sites in Slovenia are located in river valleys, lowlands and on river terraces. Long history of land use has modified these areas and in many cases destroyed surface traces of archaeological sites. However, they might still be buried under the surface. We have assessed the application and range of hyperspectral imagery for detecting archaeological traces in heavily modified landscapes. Hyperspectral imagery, despite some drawbacks, allow detection of buried archaeological traces. The study also demonstrated, that majority of archaeological traces in such landscapes might already be destroyed.

### KEY WORDS

archaeology, aeroarchaeology, remote sensing, hyperspectral imagery, airborne laser scanning

## 1 Uvod

Opazovanja iz zraka ali aeroarheologija je hiter, neinvaziven in razmeroma poceni način pridobivanja podatkov o arheoloških sledovih v pokrajini.

Aeroarheologija že od dvajsetih let 20. stoletja pomembno prispeva k odkrivanju novih arheoloških najdišč in razumevanju časovne globine pokrajine. Arheološke sledove prepoznamo prek znakov, kot so različne barve tal (barvni znaki, angleško *soilmarks*), razlike v rasti posevkov (rastlinski znaki, *cropmarks*) in senc (topografski znaki, *shadowmarks*), ki lahko kažejo na arheološke sledi pod površjem. Tradicionalna aeroarheologija temelji na opazovanju iz nizko letečega letala in snemanju večinoma poševnih fotografij (Grosman 1998). Njena velika pomanjkljivost je, da opazovanje ni sistematično, saj temelji na sposobnosti opazovalca, da prepozna in fotografira arheološke sledove med letom (*observer directed survey*; glej tudi Verhoven in Sevara 2016).

Aeroarheologija nikoli ni močno vplivala na arheološko prakso pri nas. V Sloveniji, ki ima velik delež gozda, razgibano površje, raznoliko geološko zgradbo in razdrobljeno zemljiško strukturo, je opazovanje arheoloških znakov oteženo.

Prav zaradi velikega deleža gozda se je za izredno uspešno metodo izkazalo zračno lasersko skeniranje (ZLS) (Mlekuž 2009; 2012; 2013; Opitz 2012). Vendar je poglobljena omejitev ZLS-a, da na območjih, ki so intenzivno predelana predvsem z antropogenimi posegi, arheološke sledove, ki nastopajo kot topografske anomalije, ne more zaznati, saj so predelani ali celo uničeni zaradi oranja. Domet ZLS-a je tako omejen predvsem na robna območja, kot so gozdnata hribovja in gričevja. Vendar večino arheoloških najdišč v Sloveniji najdemo v rečnih dolinah, na ravninah, prodnih zasipih, nižinah. Ta območja so že od nekdaj najbolj zanimiva za poljedelstvo, saj omogočajo gibanje in so imela od prazgodovine naprej najbolj gosto in stalno poselitev. Za celostno in sistematično pokrivanje Slovenije tako potrebujemo takšne metode daljinskega zaznavanja, ki omogočajo prepoznavanje arheoloških sledov ne glede na stanje površja. Preizkusili smo domet hiperspektralnih snemanj za zaznavanje arheoloških sledov v Sloveniji in njihov potencial kot komplementarne metode zračnemu laserskemu skeniranju (slika 1).

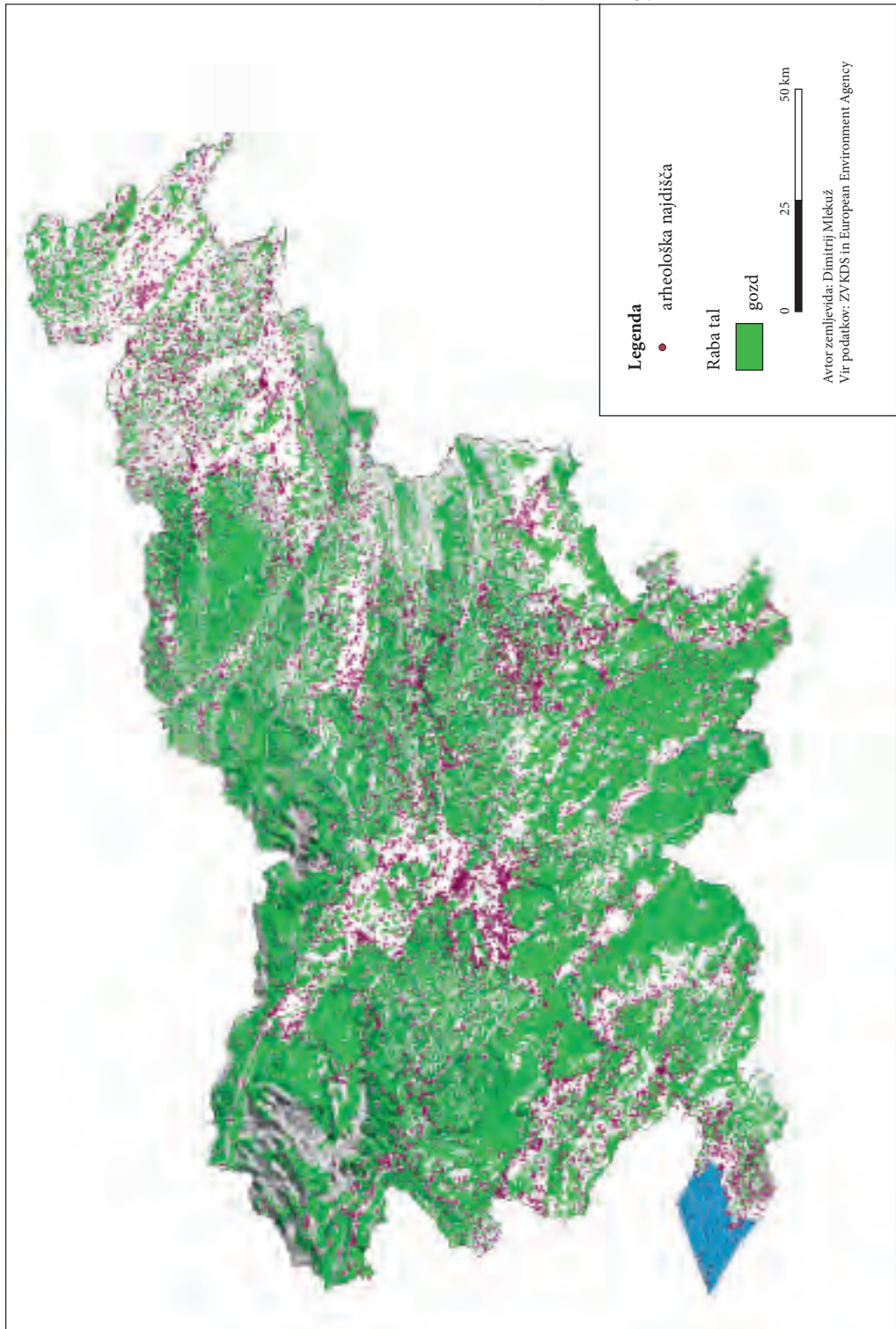
## 2 Hiperspektralna snemanja

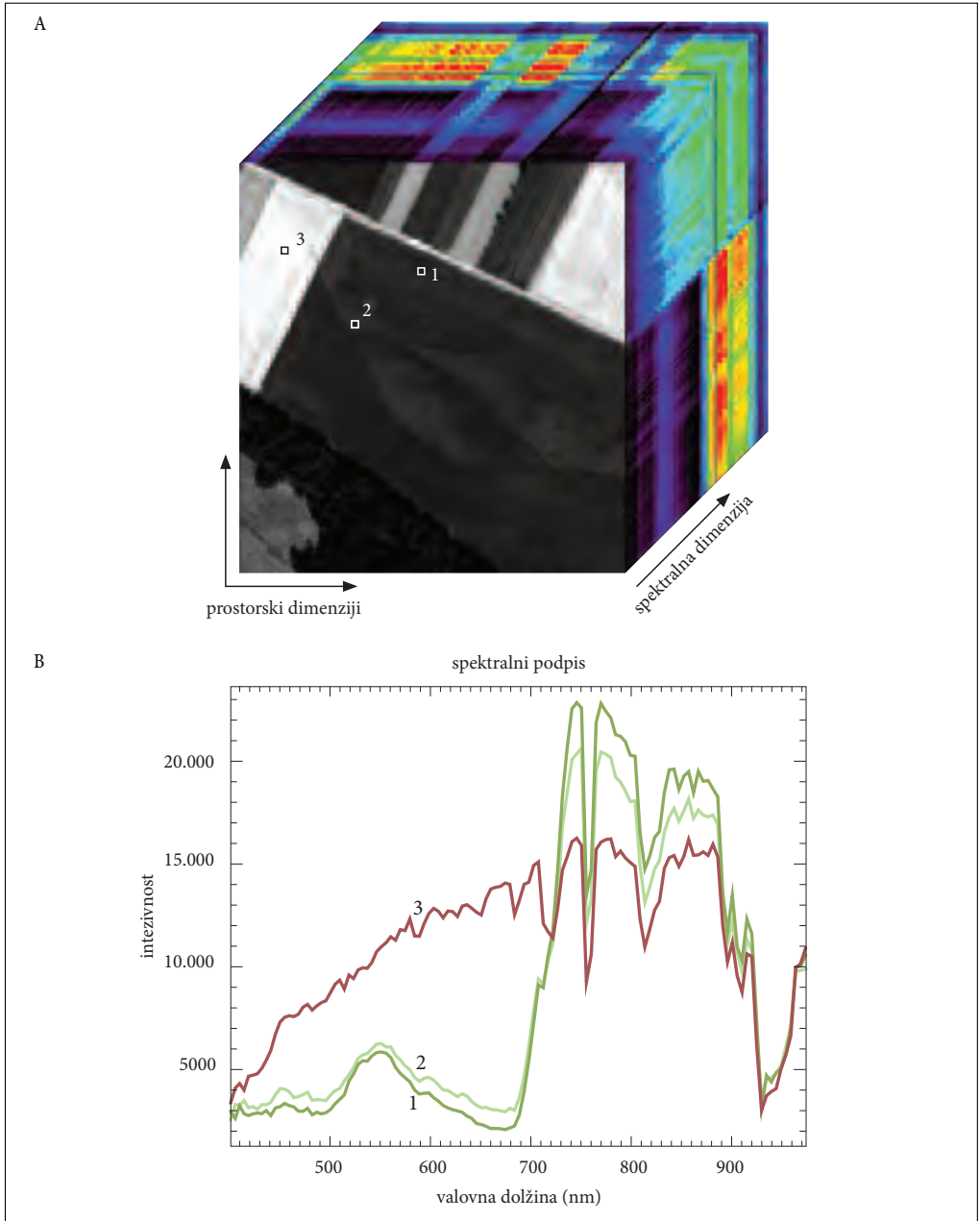
Multispektralno ali večspektralno snemanje je opazovanje pojavov v različnih valovnih dolžinah za pridobivanje informacij o njihovih spektralnih lastnostih ter njihovi distribuciji v prostoru (Oštir 2006). Večspektralni senzorji vzorčijo odbito svetlobo v različnih delih elektromagnetnega spektra in tako lahko razločijo posamezne »spektralne pasove« oziroma »barve« opazovanih pojavov. Hiperspektralna snemanja idejo večspektralnega snemanja pripeljejo do ekstrema. S hiperspektralnim senzorjem vzorčimo elektromagnetni spekter z velikim številom zelo ozkih, le nekaj nanometrov širokih spektralnih pasov. Hiperspektralna snemanja ponujajo tako imenovano hiperspektralno kocko, kjer tretjo dimenzijo predstavlja »spektralni podpis« oziroma vrednost odboja v različnih delih spektra (Borengasser, Hungate in Watkins. 2008, 48–50) (slika 2).

Iz oblike spektralnega podpisa je moč ugotavljati sestavo površja, naj bo to mineralna sestava, vrsta, starost in zdravje rastlinstva (Borengasser, Hungate in Watkins 2008). V arheologiji ne iščemo oziroma ne prepoznavamo posebnih spektralnih podpisov, saj arheološke značilnosti nimajo posebne sestave, temveč nastanejo s preoblikovanjem okolice. Tako na primer jarek, zapolnjen z lokalnim polnilom, od okolice ločita predvsem drugačna tekstura polnila in delež vode v sedimentu. Predvsem vlažnost tal vpliva na rast rastlinstva, kar povzroča lokalne variacije v zdravju in rasti rastlin. Tako pri arheoloških

*Slika 1: Arheološka najdišča Slovenije. Večina arheoloških najdišč leži v odprtih rečnih dolinah, kotlinah in na vznožjih gričevij. Označena so tudi študijska območja, omenjena v članku. ►*

## Uporaba hiperspektralnih snemanj v arheologiji





Slika 2: Hiperspektralna »kocka« (a). Hiperspektralni posnetek zemljskega površja ima poleg prostorskih dimenzij (širina, dolžina) tudi spektralno dimenzijo ali globino. Označeni so slikovni elementi z njihovimi spektralnimi podpisi (b). Temnozelena krivulja (1) kaže spektralni podpis bujnega rastlinstva pozitivnega rastlinskega znaka, svetlozelena (2) manj zdravega rastlinstva, in rjava (3) njive brez rastlinstva. Opazen je velik skok v odboju rastlinstva v bližnjeinfrardečem delu spektra, tako imenovani rdeč rob.



aplikacijah opazujemo predvsem anomalije, torej kontraste, lokalne razlike v spektralnih podpisih potencialnih arheoloških sledov in okolico v pokrajini (Beck 2011; Aqduş, Hanson in Drummond 2012).

Razlike med arheološkimi sledovi in okolico opazujemo predvsem prek posrednih znakov; glavno vlogo pri aeroarheologiji igra odziv rastlinstva na krajevne razlike v teksturi tal in vsebnosti vode (tako imenovani rastlinski znaki), ali pa razlike v barvi tal, ki so posledica različne vlažnosti, teksture ali sestave. Vendar je izraženost kontrasta odvisna od cele vrste faktorjev, kot je tip tal, vrsta posevka, vlažnost prsti in razlike v temperaturi tal. Te faktorje pa dodatno zapletajo antropogeni faktorji, kot sta na primer namakanje in oranje (Beck 2011; Aqduş, Hanson in Drummond 2012).

Glavna prednost hiperspektralnega snemanja je v tem, da je odbiti elektromagnetni spekter vzorčen zelo podrobno, kar pomeni, da imamo o površju mnogo več informacij kot pri običajnih snemanjih. Povečana občutljivost hiperspektralnega snemanja je tako ključna za prepoznavanje razlik v rasti rastlinstva in barvi tal, ki lahko kažejo na arheološke ostaline (Beck 2011).

S tradicionalno aerofotografijo Zemljino površje največkrat opazujemo le v vidnem delu elektromagnetnega spektra, z večspektralnimi in hiperspektralnimi snemanji pa lahko opazujemo površje tudi v nevidnem delu, predvsem v bližnji infrardeči svetlobi. To omogoča opazovanje znakov, ki so v vidnem delu slabše razločljivi. Tak primer je zdravje rastlin. V bližnje infrardečem delu elektromagnetnega spektra ima rastlinstvo močan odboj, kontrast med zdravimi in manj zdravimi rastlinami je najbolj opazen. Razlike v zdravju in rasti rastlin, ki so lahko posledica pokopanih arheoloških sledov, so tako v bližnjem infrardečem delu spektra mnogo bolj razločne kot v vidnem delu elektromagnetnega spektra (Aqduş, Hanson in Drummond 2012) (slika 4).

Vidnost razlik v barvi tal ali v rasti posevkov je tako odvisna od okolja in razmer med snemanjem. To je tudi eden izmed razlogov, zakaj je pri klasični aerofotografiji treba prostor opazovati periodično. Hiperspektralna snemanja odpravljajo del teh pomanjkljivosti, še vedno pa je treba paziti na primerne razmere za snemanje. Omogočajo pa, da isti del površja opazujemo v različnih valovnih dolžinah, poleg tega valovne dolžine delu spektra bližnje in kratkovalovne infrardeče dodajo množico pomembnih informacij, ki omogočajo razločevanje razlik in kontrastov v rastlinstvu in barvi zemlje (Beck 2011).

Poglavitna težava uporabe hiperspektralnih snemanj v arheologiji je v nizki prostorski ločljivosti in geometrijskih popačenjih, ki so posledica lastnosti skenerja (tako imenovani vrstični oziroma *push-broom* skener) in nestabilnosti platforme, na kateri je skener nameščen (Borengasser, Hungate in Watkins 2008). Druga težava je v izjemno velikih količinah podatkov; običajno gre za nekaj sto in več-kratnik količine podatkov kot pri običajni aerofotografiji. Procesiranje hiperspektralnih snemanj zahteva uporabo računsko zahtevnih algoritmov za luščenje relevantnih podatkov iz podob.

### 3 Podatki in procesiranje

Posneli smo štiri testna območja v Sloveniji: Krško polje, Kranjsko polje, Ptujsko polje in Prekmurje v skupni površini okoli 80 km<sup>2</sup>.

Hiperspektralni posnetki so v obliki rastrskih podob snemalnih pasov. Širina snemalnih pasov je okrog 500 m, snemalni pasovi se med sabo prekrivajo okrog 25 %. Prostorska ločljivost posnetkov je okrog 0,5 m, spektralna ločljivost je okoli 5 nm, posnetke sestavlja 122 spektralnih pasov v valovnih dolžinah med 400 in 980 nm, torej med vijoličnim in bližnje infrardečim delom elektromagnetnega spektra.

Prvi korak je radiometrična korekcija podatkov. Radiometrična korekcija zmanjša vpliv ozračja na odbito valovanje, ki ga zazna senzor. Uporabili smo orodje QUAC (*Quick Atmospheric Correction*), ki je del paketa ENVI (Bernstein s sodelavci 2012).

Naslednji korak je izdelava rastlinskih indeksov (Bannari s sodelavci 1995; Traviglia 2006; Aqduş, Hanson in Drummond 2012; Doneus s sodelavci 2014). Za arheologijo so uporabni različni rastlinski indeksi, ki prikazujejo zdravje in kakovost rastlinstva in tako lahko kažejo na prisotnost arheoloških

sledov. Za najbolj učinkovitega se je izkazal normirani diferencialni rastlinski indeks (*Normalised Difference Vegetation Index*, NDVI), ki kaže »zelenost«, torej zdravje in bujnost rastlinstva. Izračunali smo tudi indeks REIP (*Red Edge Inflection Point*), ki ugotavlja, pri kateri valovni dolžini v bližnjem infrardečem delu spektra je točka pregiba rdečega roba. Rdeči rob (ang. *red edge*) je značilnost spektralnega podpisa rastlinstva in je strma sprememba odziva rastlinstva v bližnji infrardeči svetlobi (približno med 690–720 nm). Indeks REIP dobro odseva količino klorofila v rastlinah (Gitelson, Merzlyak in Lichtenthaler 1996; Doneus s sodelavci 2014) in posredno tudi razlike v rasti rastlinstva, ki so lahko posledica pokopanih arheoloških sledov.

Poglavitna težava hiperspektralnih posnetkov je njihova večdimenzionalnost in redundantnost. Podobe v bližnjih spektralnih pasovih so si podobne, skoraj identične, tako je le majhen del informacij pomemben za prepoznavanje arheoloških sledov. Poleg tega podatki vsebujejo tudi veliko šuma. Zato potrebujemo metode, ki učinkovito izkoriščajo večdimenzionalnost hiperspektralnih posnetkov, tako da se poveča izpovednost in informacijska gostota posnetkov. Za zmanjšanje šuma in zmanjšanje dimenzije podatkov smo uporabili transformacijo MNF (*Minimum Noise Fraction*), ki zmanjša zahtevnost za nadaljnje procesiranje (Traviglia 2006; Traviglia 2008; Doneus s sodelavci 2014). Rezultat so rastrski sloji, ki vsebujejo prvih šest komponent z največjo gostoto informacij in najmanj šuma.

## 4 Rezultati

Na hiperspektralnih posnetkih študijskih območij so najpogostejši rastlinski znaki, predvsem pozitivni rastlinski znaki (torej anomalije bujnejšega rastlinstva glede na okolico, ki kaže na jarke in vkope). Glavni razlog za njihovo pogostnost je, da študijska območja ležijo na debelih pleistocenskih prodnatih zasipih, ki jih prekriva le tanka plast prsti. Kamnite strukture so po sposobnosti zadrževanja vode zelo podobne prepustni prodnati podlagi, zato ne ustvarjajo večjega kontrasta v rasti rastlinstva. Najbolje se izražajo tam, kjer je značilnost tik pod površjem in je prst nad njo zelo tanka. Prav zaradi tanke plasti prsti in dolgotrajne zgodovine antropogenih posegov, predvsem kmetijske rabe in oranja, je večina stoječih značilnosti preorana in uničena. Ohranjene so le značilnosti pod ravno oranja, to pa so običajno negativne značilnosti, kot so jarki in različni vkopi.

V Prekmurju se pozitivni rastlinski znaki najpogosteje kažejo kot različne linearne, okrogle ali štirioglate oblike, premera med 5 do 15 m in širine okrog 2 m. Ti znaki se pojavljajo v skupinah in sestavljajo večje skupine oziroma grozde krožnih struktur, na posameznih območjih lahko preštejemo tudi več deset takšnih znakov (slika 3).

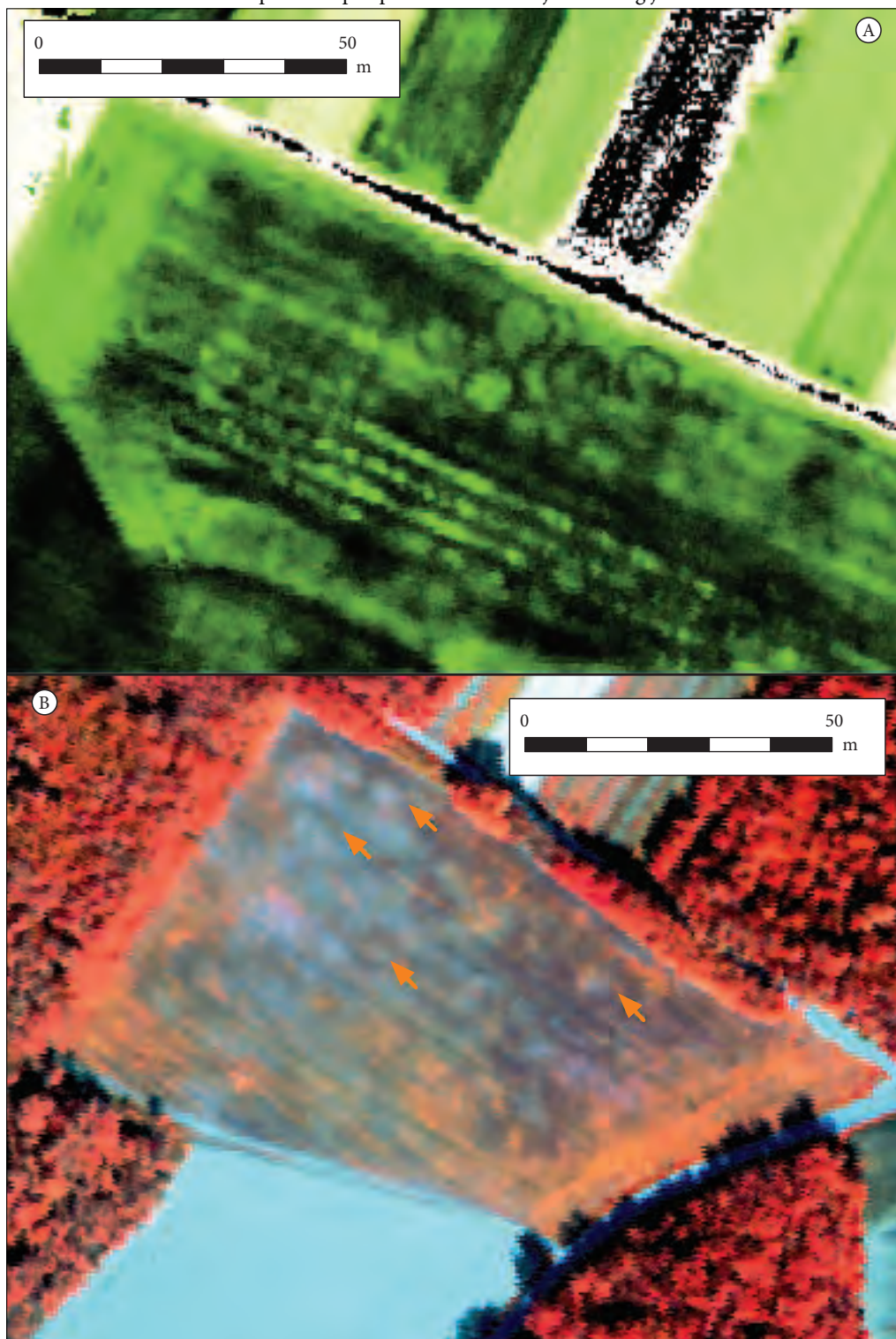
Izkopavanja so pokazala, da so okrogli znaki ostanki obodnih jarkov grobnih gomil iz železne in rimske dobe. Ponekod se pojavljajo tudi jarki, ki omejujejo prostor štirioglate oblike. Grobne gomile, torej pozitivni elementi strukture so popolnoma preorani, ohranjeni so le še negativni elementi, torej jarki, ki segajo pod raven oranja. Okrogli jarki tako dokumentirajo skoraj popolno uničenje gomilnih grobišč.

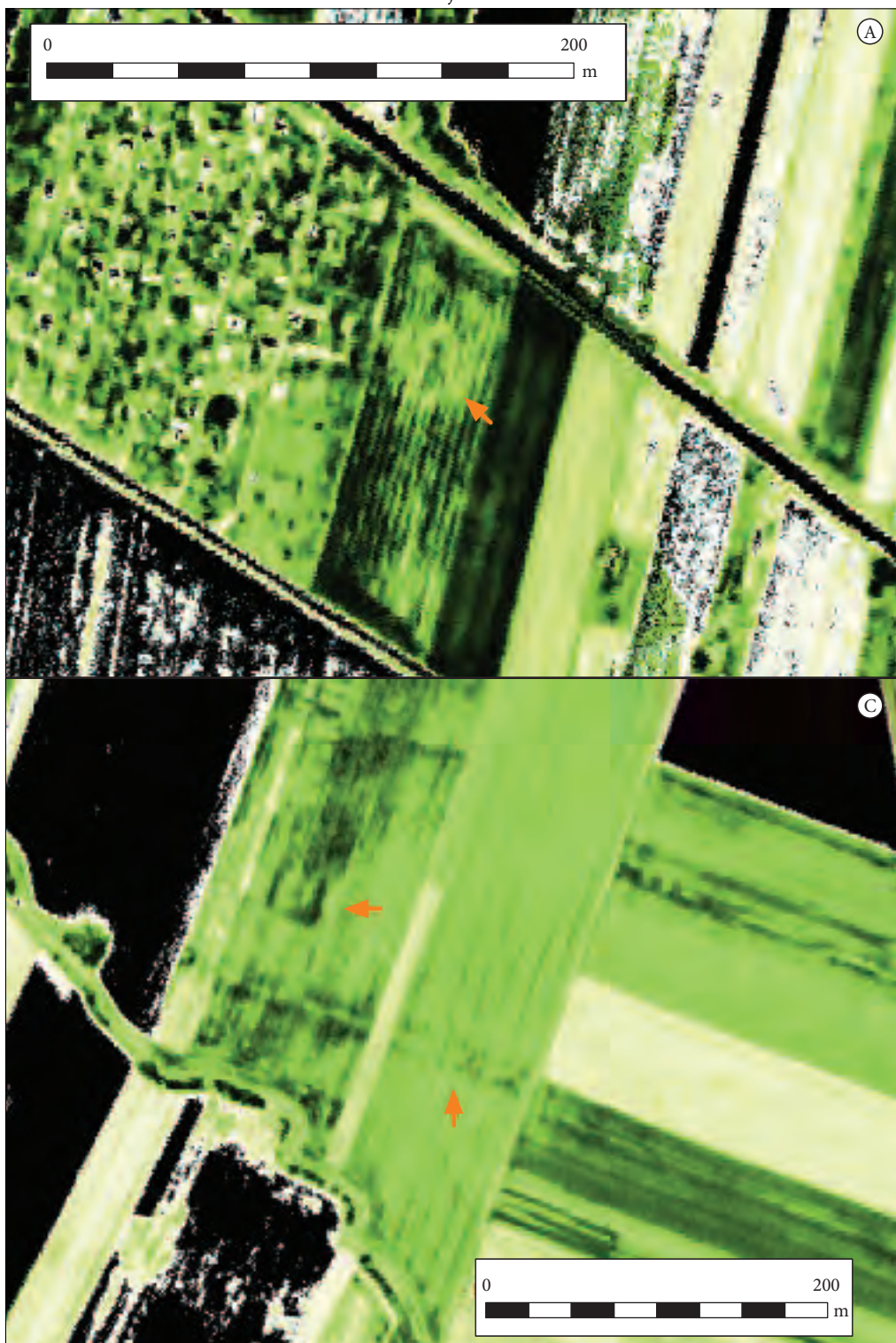
V nekaj primerih se pozitivni znaki pojavljajo v obliki linearnih oblik. Običajno gre za jarke, bodisi za ostanke drenažnih jarkov starejše zemljiške razdelitve ali celo drenažnih jarkov ob komunikacijah (slika 4).

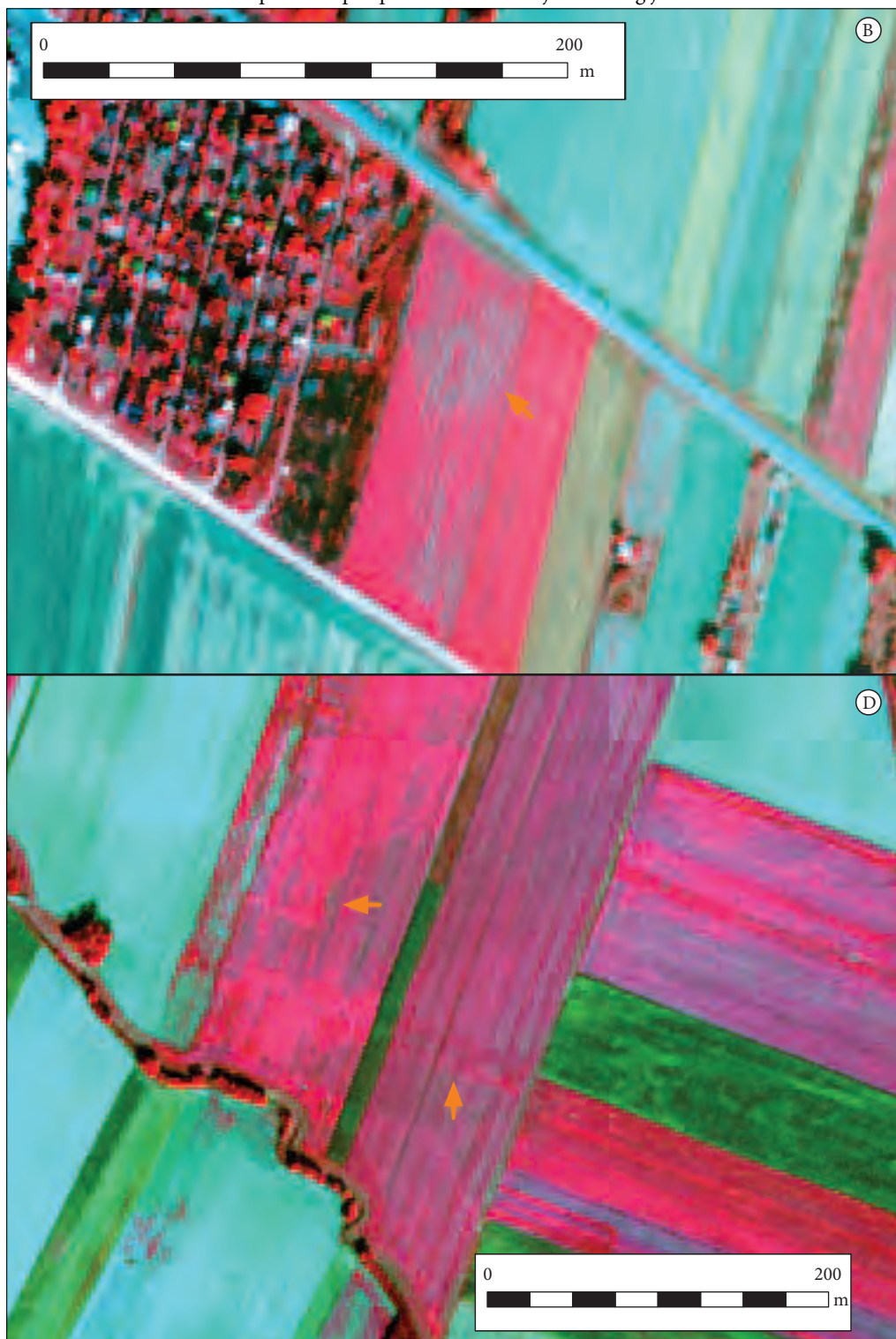
*Slika 3: Pozitivni rastlinski znak na indeksu NDVI (a) pri Grofovskem, južno od Murske Sobotne in barvni znaki na posnetku v lažnih barvah (rdeča, bližnja infrardeča in modra) (b) krožnih jarkov prazgodovinskih ali rimskih gomil v bližini Duge Njive pri Murskih Črncih. Na obeh podobah so opazna velika geometrijska popačenja hiperspektralnega posnetka. ►*

*Slika 4: Negativen rastlinski znak, verjetno ruševinska groblja rimske podeželske arhitekture pri Rjavcu v Prekmurju na indeksu NDVI (a) in posnetku v lažnih barvah (rdeča, bližnja infrardeča in modra) (b). Kombinacija negativnih in pozitivnih linearnih rastlinskih znakov ostanka rimske ceste v bližini Kroga v Prekmurju in kvadratne gomile severno od ceste na NDVI indeksu (c) in posnetku v lažnih barvah (rdeča, bližnja infrardeča in modra) (d). ► (str. 132–133)*

Uporaba hiperspektralnih snemanj v arheologiji







Negativni rastlinski znaki so redkejši od pozitivnih. Večino negativnih rastlinskih znakov lahko tolmačimo kot ostanke starejše zemljiške razdelitve, ki jo je zbrisala komasacija. Gre predvsem za ostanke grobelj, parcelnih mej in komunikacij.

Nekaj linearnih negativnih znakov lahko povežemo z ostanki rimskih cest. Gre za nasuta cestišča, ki se pogosto pojavljajo skupaj z linearnimi pozitivnimi znaki, ki kažejo na drenažne jarke ob cesti.

Pojavljajo se tudi negativni linearni znaki pravokotnih oblik. Robovi so, podobno kot pri vseh negativnih znakih, precej zabrisani. Verjeno gre za ruševinske groblje, ki jih morda lahko povežemo z rimsko podeželsko arhitekturo. V drugih primerih gre za nedoločljive ostanke nasutega materiala, domnevno ostanke grobelj, gomil ali morda ruševinskih grobelj (slika 4).

Barvni znaki so precej redkejši, odkrili smo nekaj barvnih znakov, ki kažejo na obodne jarke gomil (slika 3).

## 5 Hiperspektrala snemanja in integracija z ALS

Pri uporabi neinvazivnih metod, kot so daljinsko zaznavanje, geofizika in podobno, je ključna integracija rezultatov različnih metod. Dometi posameznih metod so močno omejeni, metode zaznavajo le določene vidike arheoloških sledov. Tako na primer ZLS odlično zaznava le topografske anomalije; tu je hiperspektralno snemanje nemočno, veliko bolj uspešno pa je pri zaznavanju znakov, ki kažejo na pokopane značilnosti, kjer ZLS popolnoma odpove.

Primerjava med rezultati obeh metod na območjih, kjer sta bili izvedeni, kaže, da sta si komplementarni. Redki sledovi, ki smo jih prepoznali na posnetkih ZLS-a, se pojavljajo tudi kot znaki na hiperspektralnih posnetkih.

Največja razlika med dometom ZLS-a in hiperspektralnimi snemanji se kaže pri pozitivni rastlinskih znakih, torej znakih, ki kažejo na vkope, jarke in podobne strukture pod površjem. Tovrstne značilnosti na posnetkih ZLS-a ne nastopajo, na hiperspektralnih posnetkih pa so eden najpogostejših znakov.

Predvsem pa sta si metodi komplementarni prostorsko. Moderna raba tal je pokrajino arbitrarno razdelila na območja z različno vidnostjo arheoloških sledov. Upoštevanje rezultatov ene metode kaže zelo pomanjkljivo sliko. V gozdovih so sledovi zelo dobro ohranjeni, medtem ko jih na njivskih zemljiščih ni več. Hiperspektralna snemanja omogočajo, da dopolnimo razumevanje prostorov, kjer sledov na podlagi podatkov ZLS-a ni več.

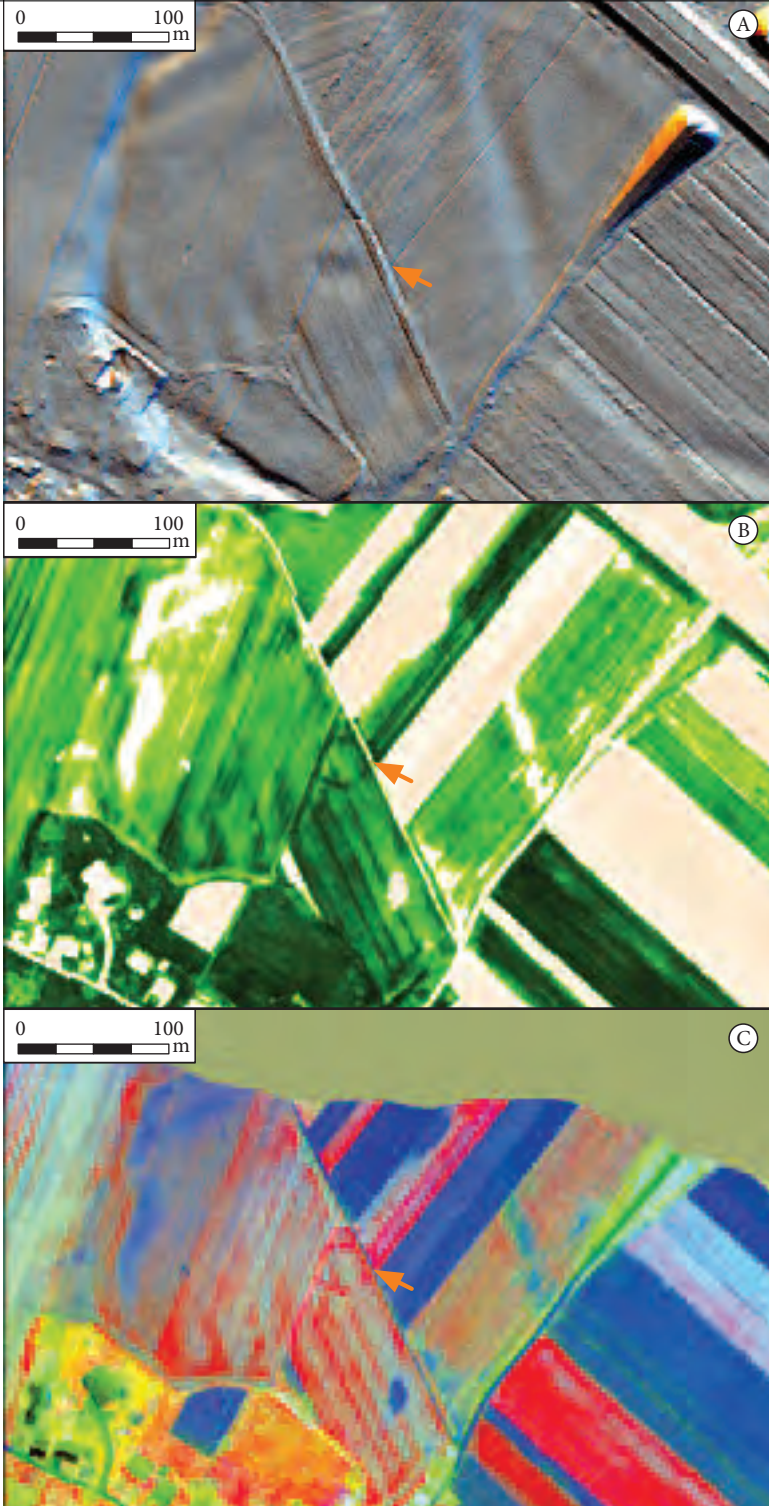
Hiperspektralna snemanja pa so se najbolj izkazala tam, kjer nam površinske anomalije, prepoznane na visokoločljivih topografskih podatkih ZLS-a, kažejo na prisotnost arheoloških sledov. Površinske anomalije so pogosto močno preorane in zmeščane, zato samo njihova oblika ne omogoča podrobnejše karakterizacije sledov. Tovrstne značilnosti kažejo le, da so arheološki sledovi pod površjem še ohranjeni. V teh primerih hiperspektralno snemanje izredno dobro dopolnjuje ZLS, in omogoča boljše karakterizacijo močno preoblikovanih površinskih sledov (slika 5).

## 6 Sklep

Vsa študijska območja so del kulturne pokrajine, ki jo je zaznamovala dolgotrajna poselitev in intenzivno obdelovanje zemljišč.

*Slika 5: Okrogla oblika na arheološkem najdišču Trnje pri Krški vasi. Na senčenem ZLS posnetku je vidna pozitivna okrogla oblika, na indeksu NDVI in prvih treh komponentah transformacije MNF hiperspektralnega posnetka pa je odlično viden obodni jarek, na katerega se vežejo dodatni jarki. Domnevno gre za ostanke gomile. ►*

Uporaba hiperspektralnih snemanj v arheologiji



Hiperspektralni posnetki pomagajo prepoznati ter razumeti predvsem močno preorane in nejasne anomalije, prepoznane na ZLS-u. Večinoma gre za linearne znake, ki kažejo na pokopane vkope, kot so jarki in podobno. V nekaterih primerih pa tudi pokopane grajene strukture, kot so nasipi ter predvsem groblje in gomile.

Značilnosti so močno predelane zaradi oranja in obdelave, zato so običajno ohranjeni zgolj kot šibki, zabrisani sledovi. Najpogostejši sledovi so pozitivni okrogli rastlinski znaki, ki jih v večini primerov lahko razlagamo kot prazgodovinske ali rimskodobne gomile. Lahko jih povežemo z rastlinskimi znaki, ki so bili prepoznani pri zračnem snemanju Prekmurja in skupki gomil, ki jih prepoznamo na posnetkih ZLS-a. Pojavljajo pa se tudi ostanki pretekle zemljiške razdelitve in rabe tal ter ostanki komunikacij.

To dejstvo kaže, da so na odprtih kmetijskih zemljiščih arheološki sledovi že močno poškodovani ali uničeni. Zdi se, da smo v prodnatih rečnih dolinah zaradi intenzivnega kmetijstva in čedalje globljeja oranja izgubili že večino podpovršinskih arheoloških sledov, ki so le še sledovi v ornici. Rezultati naše študije nakazujejo, da je za dokumentiranje arheoloških sledov s pomočjo daljinskega zaznavanja morda že prepozno, zato nam ostanejo le še metode, ki lahko dokumentirajo ta uničenja.

## 7 Viri in literatura

- Aqduş, S. A., Hanson, W. S., Drummond, J. 2012: The potential of hyperspectral and multi-spectral imagery to enhance archaeological cropmark detection: a comparative study. *Journal of Archaeological Science* 39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.01.034>
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., Huete, A. R. 1995: A review of vegetation indices. *Remote sensing review* 13.
- Beck, A. R. 2011: Archaeological Applications of Multi/hyperspectral Data – Challenges and Potential. *Remote Sensing for Archaeological Heritage Management. Proceedings of the 11th EAC Heritage Management Symposium. Brussels.*
- Bernstein, L. S., Jin, X., Gregor, B., Adler-Golden, S. M. 2012. Quick atmospheric correction code: Algorithm description and recent upgrades. *Optical Engineering* 51-11. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.OE.51.11.111719>
- Borengasser, M., Hungate, W. S., Watkins, R. 2008: *Hyperspectral Remote Sensing: Principles and Applications.* Boca Raton.
- Doneus, M., Verhoeven, G., Atzberger, C., Wess, M., Ruš, M. 2014: New ways to extract archaeological information from hyperspectral pixels. *Journal of Archaeological Science* 52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.08.023>
- Gitelson, A. A., Merzlyak, M. N., Lichtenthaler, H. K. 1996: Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm. *Journal of Plant Physiology* 148, 3-4. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(96\)80285-9](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80285-9)
- Grosman, D. 1998: Arheološka aerofotografija. *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 1997–1998.* Ljubljana.
- Mlekuž, D. 2009: Poplavne ravnice v novi luči: LiDAR in tafonomija aluvialnih krajin. *Arheo* 26.
- Mlekuž, D. 2012: Messy landscapes: lidar and the practices of landscaping. *Interpreting Archaeological Topography: Lasers, 3D Data, Observation, Visualisation and Applications.* Oxford.
- Mlekuž, D. 2013: Skin deep: LiDAR and good practice of landscape archaeology. *Good Practice in Archaeological Diagnostics: Non-invasive Survey of Complex Archaeological Sites.* Cham. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-01784-6\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-01784-6_6)
- Opitz, R. S. 2012: An overview of airborne and terrestrial laser scanning in archaeology. *Interpreting Archaeological Topography: Airborne Laser Scanning, 3D Data, and Ground Observation.* Oxford.
- Oštir, K. 2006: Daljinsko zaznavanje. Ljubljana.



- Traviglia, A. 2006: Archaeological usability of Hyperspectral images: successes and failures of image processing techniques. From Space to Place. Proceedings of the 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology. Rome.
- Traviglia, A. 2008: The combinatorial explosion: defining procedures to reduce data redundancy and to validate the results of processed hyperspectral images. Remote Sensing for Archaeology and Cultural Heritage Management. Proceedings of the 1st International EARSeL Workshop. Rome.
- Verhoven, G., Sevara, C. 2016. Trying to break new ground in aerial archaeology. Remote Sensing 8-11. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs8110918>



# NOVODOBNA POSELITEV HUDOURNIŠKIH VRŠAJEV IN NEVARNOST DROBIRSKIH TOKOV: PRIMER ZGORNJESAVSKE DOLINE

*dr. Mateja Breg Valjavec, dr. Blaž Komac*  
ZRC SAZU, Geografski inštitut Antona Melika  
mateja.breg@zrc-sazu.si, blaz.komac@zrc-sazu.si

UDK: 911.37: 551.435.17(497.452)

## IZVLEČEK

**Novodobna poselitev hudourniških vršajev in nevarnost drobirskih tokov: primer Zgornjesavske doline**  
Z analizo katastrskih podatkov, zgodovinskih letalskih posnetkov in katastra stavb smo opredelili stavbna zemljišča na vršajih in analizirali prostorski razvoj naselij na aktivnih vršajih v Zgornjesavski dolini. Analizirali smo vršaje pritokov Save iz Karavank in Julijskih Alp, v tem članku pa predstavljamo vršaj Trebiže v Ratečah ter vršaja Krotnjeka in Suhlja v Podkornu. Vršaje smo glede na podatke razvrstili po ogroženosti zaradi delovanja hudournikov in drobirskih tokov ter s tega vidika analizirali prožnost poselitve v različnih obdobjih. Ugotavljamo, da geomorfni procesi ogrožajo razmeroma velik delež nekaterih poseljenih vršajev in da usmerjanje poselitve na varna območja ni bilo uspešno niti v preteklosti niti v zadnjih desetletjih.

## KLJUČNE BESEDE

prožnost, naravne nesreče, hudourniške poplave, drobirski tokovi, poselitev, vršaji, Julijske Alpe Karavanke

## ABSTRACT

**Modern settlement of torrential alluvial fans and danger of debris flows: the example of the Upper Sava Valley**

By analyzing cadastral data, historical aerial recordings and building cadastre, we determined building plots and analyzed the spatial development of settlements on active alluvial fans in the Zgornjesavska Valley. We analyzed the tributaries of the Sava River from the Karavanke Mountains and the Julian Alps. In this paper we present the Trebiža alluvial fan in Rateče, and the Krotnjek and Suhelj alluvial fan in Podkoren. We classified the data according to the threat posed by the torrents and debris flows. From this perspective, we analyzed the resilience of settlement in different periods. We found that geomorphic processes threatening a relatively large proportion of some settlements on alluvial fans, so that settling safe areas has not been successful in the past or in recent decades.

## KEY WORDS

resilience, natural hazards, torrential floods, debris flows, settlements, alluvial fans, Julian Alps, Karavanke Mountains

## 1 Uvod

Poselitev vršajev je tradicionalna oblika poselitve, ki jo poznajo v vseh alpskih državah (Marchi in Tecca 2015). Vršaji so ugodni za poselitev zaradi oddaljenosti od večjih rek, osončenosti in možnosti kmetijske izrabe. Ker drugje primanjkuje prostora zaradi velikih naklonov, nevarnosti pobočnih procesov in poplav, se je tradicionalna poselitev v Alpah usmerila predvsem na ta območja in se izogibala le najbolj nevarnim (aktivnim) vršajem. Ker tradicionalna poselitev sloni na družbenem spominu o naravnih nesrečah (Komac 2009), so najstarejše stavbe povečini na območjih z najmanjšo ogroženostjo. Tradicionalna poselitev ravnin ob srednjem in spodnjem toku večjih rek, kjer prevladuje poplavljanje, je omejena na višje (pleistocenske) terase in se konča na ježah (Dravsko polje, Ljubljansko polje), poselitev ob manjših rekah v ožjih dolinah pa se je umaknila na vzpete predele ali vznožja pobočij (Komac, Natek in Zorn 2008). Tradicionalna poselitev vršajev je nekoliko bolj zapletena, saj se ni umikala hudourniškim poplavam, ampak marsikje tudi drobirskim tokovom, ki so kljub večji redkosti nevarni zaradi velikosti, visoke hitrosti in odlaganja velikih količin drobirja (Sodnik in Mikoš 2006; Arattano s sodelavci 2010).

V prispevku obravnavamo Zgornjesavsko dolino med Julijskimi Alpami na jugu in Karavankami na severu. Julijske Alpe zaznamujejo apnenčaste stene, pod katerimi so v Vratih pod stenama Cmira (2393 m) in Triglava (2864 m), v dolini Velike Pišnice, v Tamarju in prav tako v Zadnji Trenti ter v dolini Koritnice nekaj sto metrov visoka pobočja iz dolomita. Ta območja se zaradi večje razčlenjenosti in poraščenosti z rušjem jasno ločijo od višjih apnenčastih sten (Kunaver 1990). Dolomitna območja, ki so pogosta tudi v nižjih in položnejših Karavankah, so pomembna za varnost prebivalcev. Dolomit zaznamujeta drobljivost (Komac 2006) in površinski vodni odtok (Jesenovec 1995), zato hudourniki ob intenzivnih padavinah v nižje lege premeščajo ogromne količine gradiva, gradijo vršaje in povzročajo hudourniške poplave (Gams 1992).

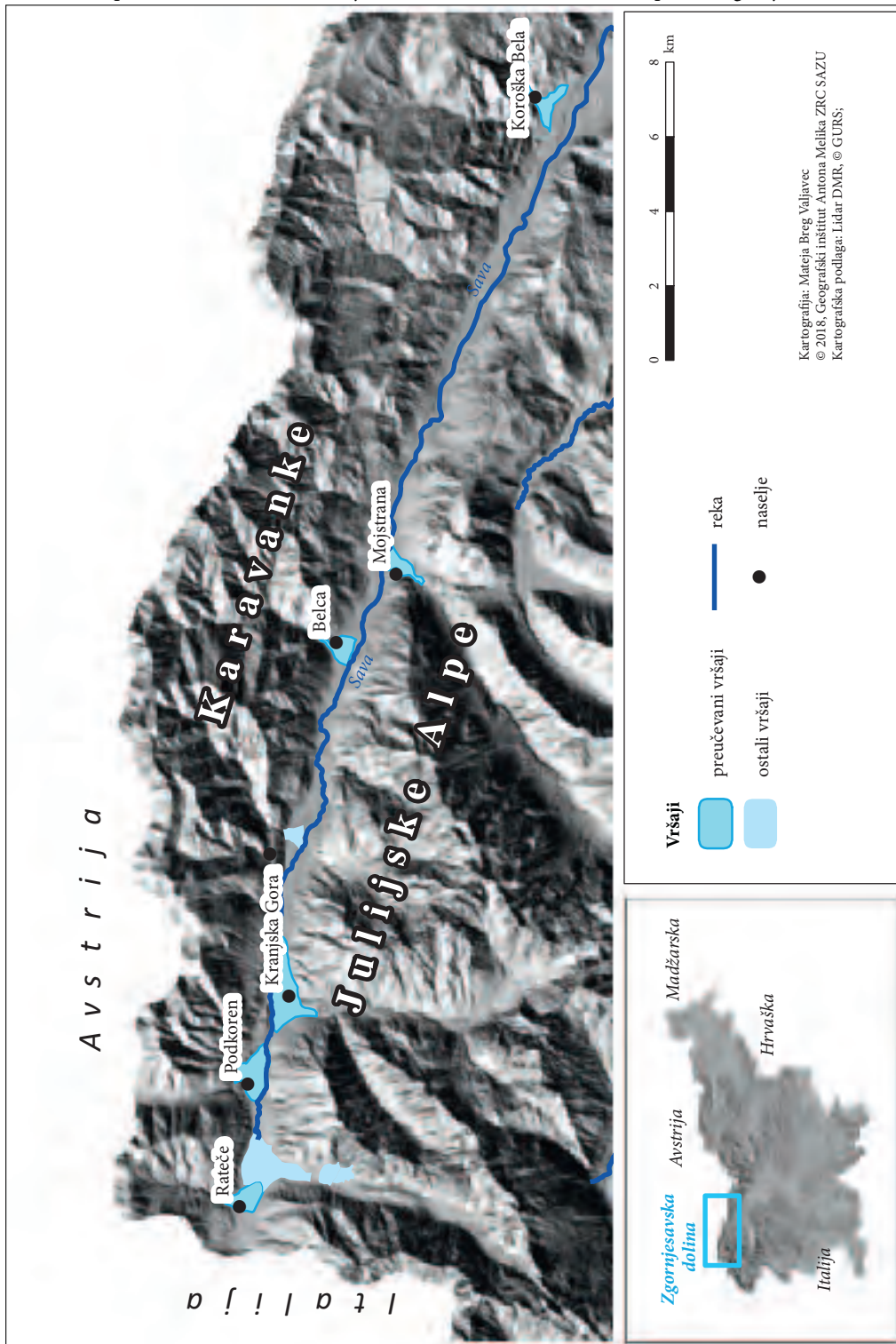
Ogroženost poselitve pred drobirskimi tokovi se določa s terenskimi meritvami v sodobnem času, pa tudi z različnimi metodami geoinformatike. Meritve količine proda za pregrado Javornik in matematično modeliranje premestitvene zmogljivosti kažejo, da se v porečju Save Dolinke sprosti 301.770 m<sup>3</sup> gradiva, kar je 1105 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>. Do hidrološkega prereza prispe 52 % gradiva, ostalo pa ostane v nestabilni legi na pobočjih ali višje v strugi. Poleg tega se po reki letno prenese še približno 68.366 m<sup>3</sup> ali 126.000 t lebdečega gradiva (Mikoš 2000). Podatki za zadnja desetletja kažejo na zmanjševanje pretokov (Hrvatina in Zorn 2017) in dotoka plavin ter posledično umirjanje erozijskih procesov, kar je posledica urejanja hudournikov pred desetletji z gradnjo pregrad (Jesenovec 1995), ki so danes pogosto porušene ali zasute (Mikoš 2006), in zaraščanja v zadnjih desetletjih (Zorn, Komac in Gabrovec 2008; Zorn in Komac 2009).

Hudournike so na tem območju urejali že zgodaj. V Ratečah je bilo leta 1885 v neurju zasutih 12 ha njiv in travnikov, zato so med letoma 1888 in 1890 regulirali hudourniško Trebižo. Ohranjen je takratni ureditveni načrt, ki velja za najstarejši tovrstni ohranjeni načrt pri nas. Tudi med letoma 1919 in 1938 so bila največja vlaganja prav v urejanje hudournikov na območju Zgornjesavske doline, sledita pa območji Gornje Savinjske doline in Ljubljane (Jesenovec 1995).

V članku smo poiskali odgovor na vprašanje, koliko so bili pri sodobni poselitvi vršajev upoštevani naravni procesi (prim. Komac, Natek in Zorn 2008). Odgovor ni enoznačen, saj gre za zapletena razmerja med interesi in zmožnostmi posameznikov, občin, ki skrbijo za urejanje prostora, upravnih enot, ki izdajajo gradbena dovoljenja, in investitorjev, ki spodbujajo netrajnostne in nevarne posege v gorski svet, kjer se lahko sprožijo zemeljski plazovi, poplave in drobirski tokovi (Komac in Zorn 2007; Zorn in Komac 2015).

Orisu naravnih nevarnosti tega območja sledi pregled znanih poplavnih dogodkov, v osrednjem delu prispevka pa predstavimo kvantitativno analizo zgodovinskega razvoja poselitve na aktivnih vršajih. Z analizo zgodovinskih letalskih posnetkov iz leta 1954 in 2011 pa smo v obstoječem katastru stavb (GURS) opredelili stavbna zemljišča na vršajih in analizirali prostorski razvoj naselij na aktivnih vršajih, ki jih dolgotrajno oblikujejo v visokogorju izvirajoči pritoki reke Save (slika 1).

*Slika 1: Vršaji v Zgornjesavski dolini. ►*



Zaradi pomanjkljivih sedimentoloških in arhivskih podatkov ne poznamo dovolj dobro pogostosti in jakosti naravnih procesov na vršajih. Zato niti med ljudmi niti v dostopnih dokumentih ni spomina nanje, ki bi se udeležil v prostorskih aktih. Zaradi sorazmerno redkih nevarnih pojavov, ki povzročajo škodo (Zorn in Komac 2011), tej problematiki v Sloveniji doslej nismo posvečali dovolj pozornosti. Pogosto ne poznamo niti prostorskih razsežnosti niti časovne dinamike širjenja poselitve na nevarna območja, zato formalno sicer urejeno področje urejanja prostora ne upošteva dolgoročnih učinkov preventive (Zorn in Komac 2006; 2015). Poselitev se, in to povsem legalno, širi tudi na nevarna območja, kar ustvarja probleme v prihodnosti (Zorn, Komac in Ciglič 2017).

V mednarodni literaturi so študije zgodovinskih letalskih posnetkov namenjene preučevanju pokrajinskih sprememb v novejši zgodovini oziroma obdobju, odkar obstajajo letalski posnetki. Številne države so v zadnjih petdesetih letih sistematično zbirale letalske posnetke svojih ozemelj, ki so danes shranjeni v arhivih ter jih lahko s fotogrametričnimi metodami razmeroma poceni in hitro obdelamo (Prokešová, Karoš in Medvedová 2010). Kadar preučujemo trirazsežnostne objekte (stavbe) in strukture (gozd), uporabimo stereoposnetke in s pomočjo stereoskopa ali stereoskopskih očal določimo, za kakšen objekt gre. V primerjavi z analogno obdelavo lahko digitalne posnetke obdelamo in izboljšamo njihovo možnost določanja iskanih objektov (povečamo barvne kontraste, prilagodimo svetlobo, pretvorimo v negativ). Poleg kakovosti zahteva obdelava posnetkov tudi strokovno usposobljenega interpretatorja in metodologijo določanja po interpretacijskem ključu (Breg Valjavec in Ribeiro 2014).

Letalske posnetke so v geografiji najprej uporabljali za analizo in vrednotenje rabe zemljišč in analizo sprememb pokrovnosti tal (Sklenička 2002; Käyhkö s sodelavci 2011; Godone s sodelavci 2014). V novejšem času je več študij o zaznavanju pokrajinskih elementov na temelju satelitskih posnetkov (Bescoby 2006), številne raziskave obravnavajo vegetacijske strukture (Archer 1995; Fensham s sodelavci 2003; Browning, Archer in Byrne 2009). Letalski posnetki so namenjeni tudi preučevanju arheoloških območij (Reeves 1936), zelo uporabni pa so tudi v geomorfoloških raziskavah, kot so preučevanje sprememb rečnih tokov in erozije (Schmitz s sodelavci 2009; Pérez Álvarez s sodelavci 2013), pa tudi v zgodovinskih raziskavah (Ravbar 2011; Ravbar 2012). So temelj za varovanje kulturne dediščine (Bryan in Clowes 1997) in za preučevanje dolgoročnih pokrajinskih učinkov gospodarskih dejavnosti, kot je rudarstvo (Pacina in Weiss 2011).

## 2 Podatki in metode

Pri vrednotenju nevarnosti drobirskih tokov smo z geoinformacijskimi orodji analizirali dva vidika:

- pojavljanja drobirskih tokov in
- spreminjanja poselitve.

Bolj kot na metodah je v ospredju prispevka poudarek na uporabnosti različnih tipov prostorskih podatkov (topografski, kartografski, slikovni, itd.). Takšen pristop omogoča, da pridobimo vpogled v kompleksnost razvoja poplavne ogroženosti na krajevni in regionalni ravni (Boudou, Danière in Lang 2016), v naravne in družbene procese skozi čas.

Drobirski tokovi se pojavljajo na vršajih, zato smo v prvi fazi omejili območje vršajev. Mejo vršaja kot tudi vse geomorfometrične značilnosti vršajev smo določili z ekspertno analizo reliefnih oblik na lidarskem digitalnem modelu višin in s terensko preverbo.

Porečje oziroma prispevno hidrografska območje vršajev smo določili s hidrološko analizo digitalnega modela višin v programu *ArcGis*, modul *Spatial Analyst*. Lasersko skeniranje Slovenije je potekalo med letoma 2011 in 2015 in je zajelo celotno državo (Triglav Čekada in Bric 2015). S spletne strani *E-vode* (Internet 1) smo prenesli klasificiran oblak točk za območje Zgornjesavske doline, za katero smo želeli preveriti uporabnost podatkov laserskega skeniranja Slovenije za geomorfološko določanje vršajev. Podatki razkrijejo reliefne oblike, vključno s tistimi, ki se skrivajo pod rastjem in jih ni mogoče

določiti niti na terenu. Na senčenem reliefu so vidne sledi paleostrug, ki so posledica premikanja struge vodotokov po vršaju.

Drugi vidik geoinformacijske analize je določitev sprememb poselitve vršajev. Uporabili smo zgodovinske kartografske in slikovne vire in določili tradicionalno poselitev na območjih, ki so jih prizadele poplave v preteklosti. Vzorec tradicionalne poselitve smo določili na podlagi stavb, označenih na franciscejskem katastru (1818–1828), ki je na voljo za večji del Slovenije. Nastajal je v okviru popisa zemljišč za odmero zemljiškega davka in njegova posodobljena različica, t. im. reambulančni kataster (1869–1887) (Seručnik 2009) za celotno ozemlje Slovenije. Delno georeferenciran franciscejski kataster je dostopen na spletni strani Registra nepremične kulturne dediščine (Internet 2).

Na podlagi letalskih posnetkov iz leta 1954 in leta 2011 smo preučevali spremembe v poselitvi vršajev, ki so se zgodile po 2. svetovni vojni. Starejši posnetki so hranjeni v Arhivu zgodovinskih aeroposnetkov (Internet 4).

Zgodovinsko in prostorsko dinamiko poselitve oziroma gradnje stavb smo določili s primerjavo stanja na franciscejskem katastru in današnjega stanja ter v večini primerov z analizo letalskih posnetkov ugotavljali tudi vmesno stanje iz sredine 20. stoletja (za leti 1954 in 1966). Letalske posnetke smo vizualno interpretirali. Ta postopek predvsem za posnetke nastale po drugi svetovni vojni ne predstavlja večjega tehničnega problema in je izvedljiv z razmeroma preprosto geoinformacijsko analizo. Analogne ali digitalne posnetke smo vizualno pregledali in tako pridobili želene informacije o poselitvi v določenem obdobju. Rezultate smo ovrednotili z vidika (ne)varnosti poselitve v posameznih obdobjih.

Za vršaje smo izračunali morfometrične lastnosti, ki so pomembne za nastanek hudournikov in drobirskih tokov (prim. Sodnik in Mikoš 2006), ter jih kategorizirali z vidika ogroženosti zaradi delovanja geomorfnihih procesov.

### 3 Rezultati

S poplavnega vidika je zelo zanimivo dolinsko razvodje (Bohinec 1935; Melik 1961), kjer je nastalo naselje Rateče. Vzhodni del naselja ob Kravnjaku je danes pred poplavami varnejši od zahodnega, ki leži ob **Trebiži** (slika 2).

Trebiža pogosto poplavlja zaradi pogostih obilnih padavin in razmeroma obsežnega povirja. Najstarejši preučeni nanosi v vršaju so nastali z najmanj tremi zaporednimi pobočnimi procesi, najverjetneje drobirskimi tokovi, v zgornjem delu pa prevladujejo rečni nanosi (Mikoš 2006). Trebiža je v Ratečah leta 1885 zasula skoraj 12 ha polj in travnikov, zadnje večje poplave pa so bile leta 2003, ko je v treh dneh avgusta padlo 274 mm padavin s 130-letno povratno dobo. Na več mestih je zasulo cesto med Jesenicami in Ratečami, onemogočen je bil promet čez prelaza Vršič in Predel ter na mangartski cesti. Prizadeta je bila tudi Kanalska dolina, kjer je padlo več kot 400 mm padavin (Palmieri, Rosenwirth in Sima 2004; Polajnar 2004; 2006; Tropeano, Turconi in Sanna 2004; Zorn, Natek in Komac 2006). Trebiža se je zaradi nasipanja v strugi razlila čez nizek izgon, ki varuje stavbe, in jih zalila ter zasula travnike pod naseljem.

Obravnavani vršaj meri 50,8 ha, površina njegovega vodozbirnega območja pa je skoraj desetkrat večja in obsega 479 ha. Potrebiže leži dokaj visoko, na povprečni nadmorski višini 1200 m, 3,8 dolg rečni tok zmernega naklona ( $4,9^\circ$ ) pa ima za to območje dokaj majhno relativno višinsko razliko 680 m. Tudi pretok s stoletno povratno dobo je zmeren ( $40 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Zato je tudi povprečni naklon površja relativno nizek, in sicer  $22,6^\circ$ , najvišji pa je  $46,0^\circ$ . Na vršaj z naklonom  $2,4^\circ$  pritečeta dva vodotoka, oba imata pozidano okolico. Čeprav hudournik z zasipanjem struge, ravnine in stavb povzroča škodo, se na trebiškem vršaju ni morejo sprožiti drobirski tokovi (Sodnik in Mikoš 2006).

Do leta 1826 so na vršaju zgradili 60 stavb s skupno površino  $10.871 \text{ m}^2$ , in sicer na vzhodnem robu vršaja, ki je najmanj ogrožen del vršaja.

Ogrožena je več kot polovica stavb (60,5 % oziroma 133 od 220 stavb). Med starimi stavbami stoji na delu vršaja, ki ga ogrožajo hudourniki, 44 stavb (73,3 % od vseh ogroženih in petina od vseh stavb v naselju), med stavbami, ki so bile zgrajene pred letom 1954, je ogroženih 58 (60,4 % od vseh ogroženih in četrtnina od vseh stavb v naselju), med novimi stavbami pa je ogroženih 31 (48,4 % od vseh ogroženih in 14,1 % od vseh stavb v naselju).

Nižje v Dolini leži vršaj v Podkornu (slika 3), ki sta ga oblikovala kar dva enako dolga (3,2 km) leva pritoka Save, in sicer **Krotnjek** na zahodu (Furlan in Kladnik 2008) in **Suhelj** na vzhodu. Površina vršaja (50,9 ha) je devetkrat manjša od njegovega zaledja (467 ha). Relativna višinska razlika je 770 m, povprečna nadmorska višina pa 1220 m. Dokaj nizek za to območje je povprečni naklon porečja (28°), najvišji pa je kar 59°. V porečju prevladujejo karbonski skrillavi glinavec, meljevec ter kremenova peščenjak in konglomerat. Danes prevladuje gozd, med letoma 1880 in 1890 pa je na višini 1300–1550 m nastalo erozijsko žarišče, iz katerega so vode odnesle 700.000 do 800.000 m<sup>3</sup> peščeno-glinastega gradiva. Po 2. svetovni vojni so zato zgradili danes že zasute in poškodovane lesene pregrade (Mikoš 2006).

Porečje Krotnjeka (3,7 km<sup>2</sup>) je večje od Suhljevega (1,9 km<sup>2</sup>), Krotnjek ima tudi višji pretok s stoletno povratno dobo (36 : 23 m<sup>3</sup>/s). Slednji vodotok je strmejši (9,6° : 5,5°), saj se spušča neposredno izpod Jerebikovca in je zato oblikoval dvakrat bolj strm vršaj (6,8° : 2,9°). Krotnjek je prehodnega značaja in ta del vršaja je v nasprotju z vzhodnim manj ogrožen zaradi možnosti nastanka drobirskih tokov (Sodnik and Mikoš 2006). Suhelj pa je zaradi visokega Meltonovega števila (0,53) in naklona med najbolj ogroženimi vršaji na tem območju, zato preseneča, da je ob glavni cesti neposredno ob strugi že v najstarejši preučevani dobi nastal zaselek z nekaj stavbami (jugovzhodno na sliki 3) (Mikoš 2006), tam pa so tudi povsem nove stavbe.

Glede poselitve je v Podkornu položaj podoben kot v Ratečah. Število stavb na vršaju se je v skoraj 200 letih povečalo za 205, in sicer z 78 leta 1826 na 283 leta 2016. Podkoren je zaradi večje usmeritve v turizem in bližine Kranjske Gore doživel močno širjenje pozidave po letu 1954, ko se je število stavb več kot podvojilo. Suhelj ogroža desetino stavb (31 od 283). Čeprav je bilo nevarno območje pozidano že v najstarejši dobi (7 stavb od takratnih 78) in je enako število stavb nastalo v obdobju pred letom 1954, ko je bilo zgrajenih 60 stavb, je v najnovější dobi zraslo 145 stavb, med katerimi jih je ogroženih 14.

Pod Kranjsko Goro ima Sava poleg Pišnice še več pritokov, ki z izjemo Hladnika ne ogrožajo poselitve: Jurežev graben, Hladnik, Martuljek ter Beli potok in Belca. Niže Belce so še vodotoki Triglavska Bistrica, Mlinca, Presušnik, Dobršnik, Jesenica, Ukova, Javornik in Bela. V porečju Bele izredno gosto poselitev naselja Koroška Bela tudi danes ogrožajo drobirski tokovi (Jež s sodelavco 2008), podobne pojave pa omenjajo tudi že zgodovinski virih (Mikoš 2006).

## 4 Razprava in sklepi

Zgornjesavska dolina je lep primer sobivanja človeka z njegovimi različnimi dejavnostmi, ki se razpenjajo od kmetijstva prek industrije (železarstvo) do turizma (Nared in Perko 2011), in razmeroma intenzivnih geomorfni procesov, ki vplivajo na omenjene dejavnosti ter usmerjajo poselitev in prostorski razvoj te stične pokrajine med Julijskimi Alpami in Karavankami (Nared, Visković Razpotnik in Komac 2015).

Tradicionalna poselitev je v pretežni meri upoštevala delovanje geomorfni procesov, ki so neposredno ogrožali človeka in zemljišča v njegovi rabi. Toda intenzivna raba gorskega sveta je v predindustrijski dobi tudi zaradi ostrejših podnebnih razmer v mali ledeni dobi pomenila večje obremenjevanje teh

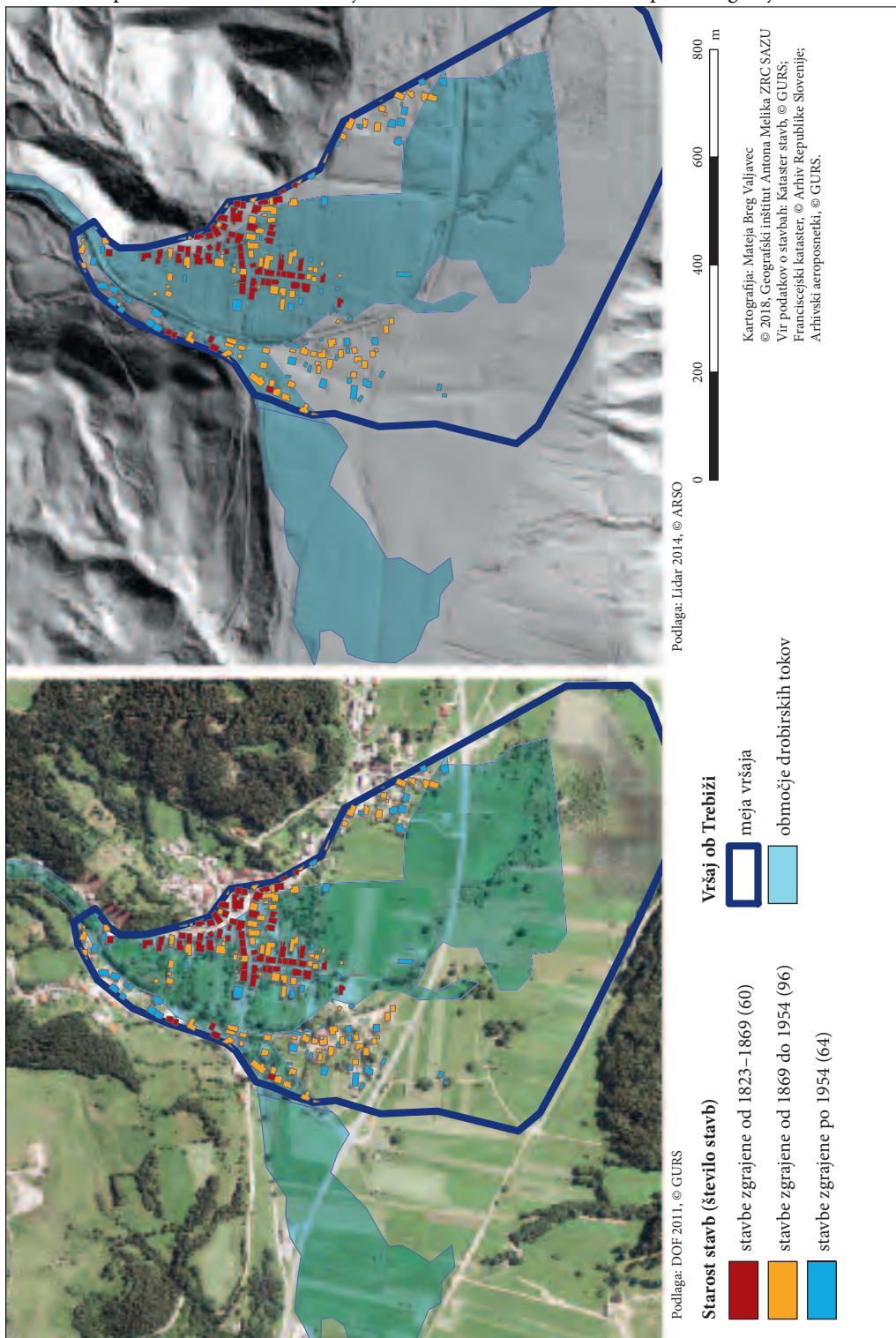
*Slika 2: Trebiža ogroža velik del Rateč. ►*

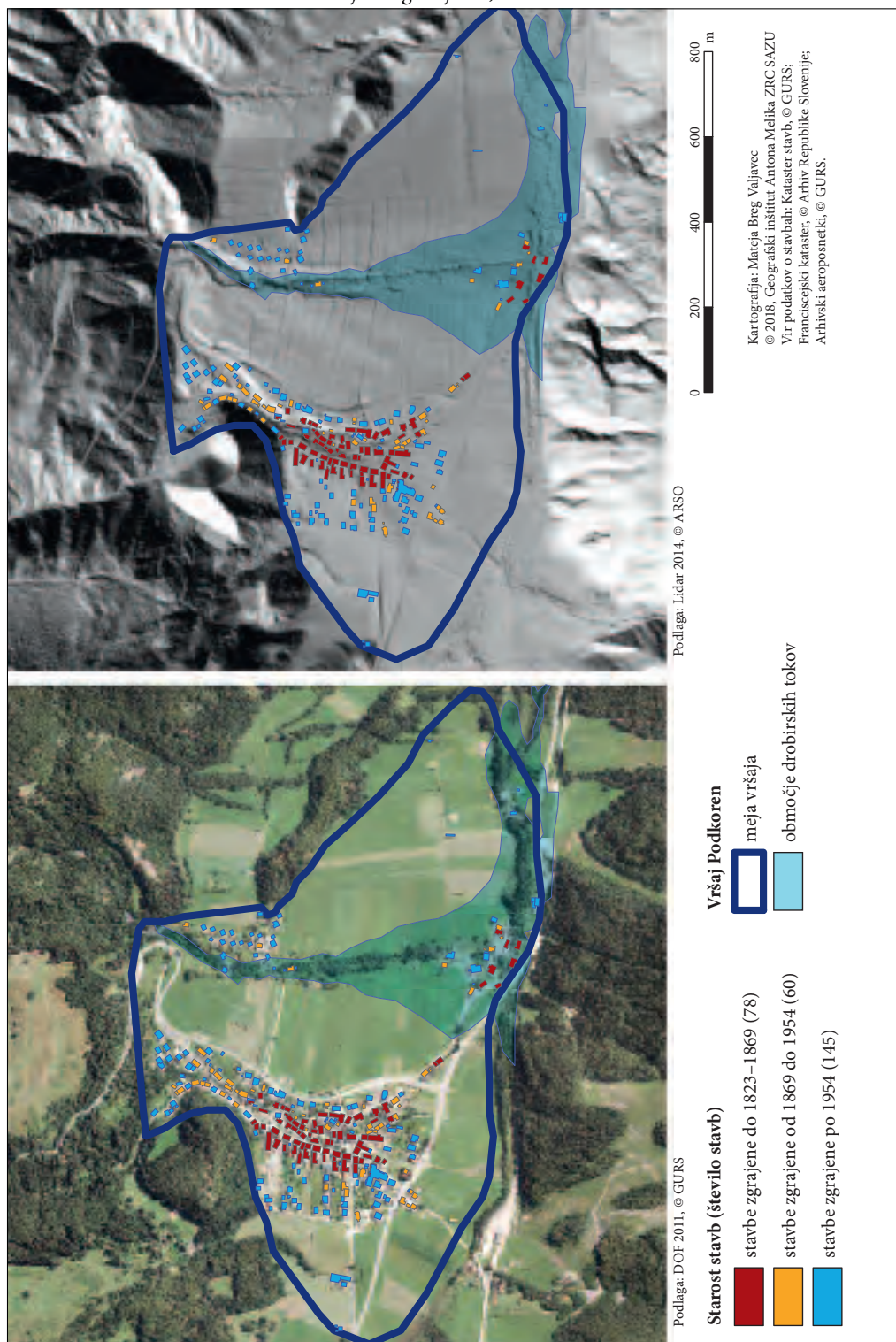
*Slika 3: Podkoren ogroža predvsem možnost nastanka drobirskih tokov v porečju Suhlja. ► (str. 146)*

*Slika 4: Vršaj Bele je tako gosto poseljen, da poselitev pomembno vpliva tudi na razlivanje morebitnega drobirskega toka po njem. ► (str. 147)*

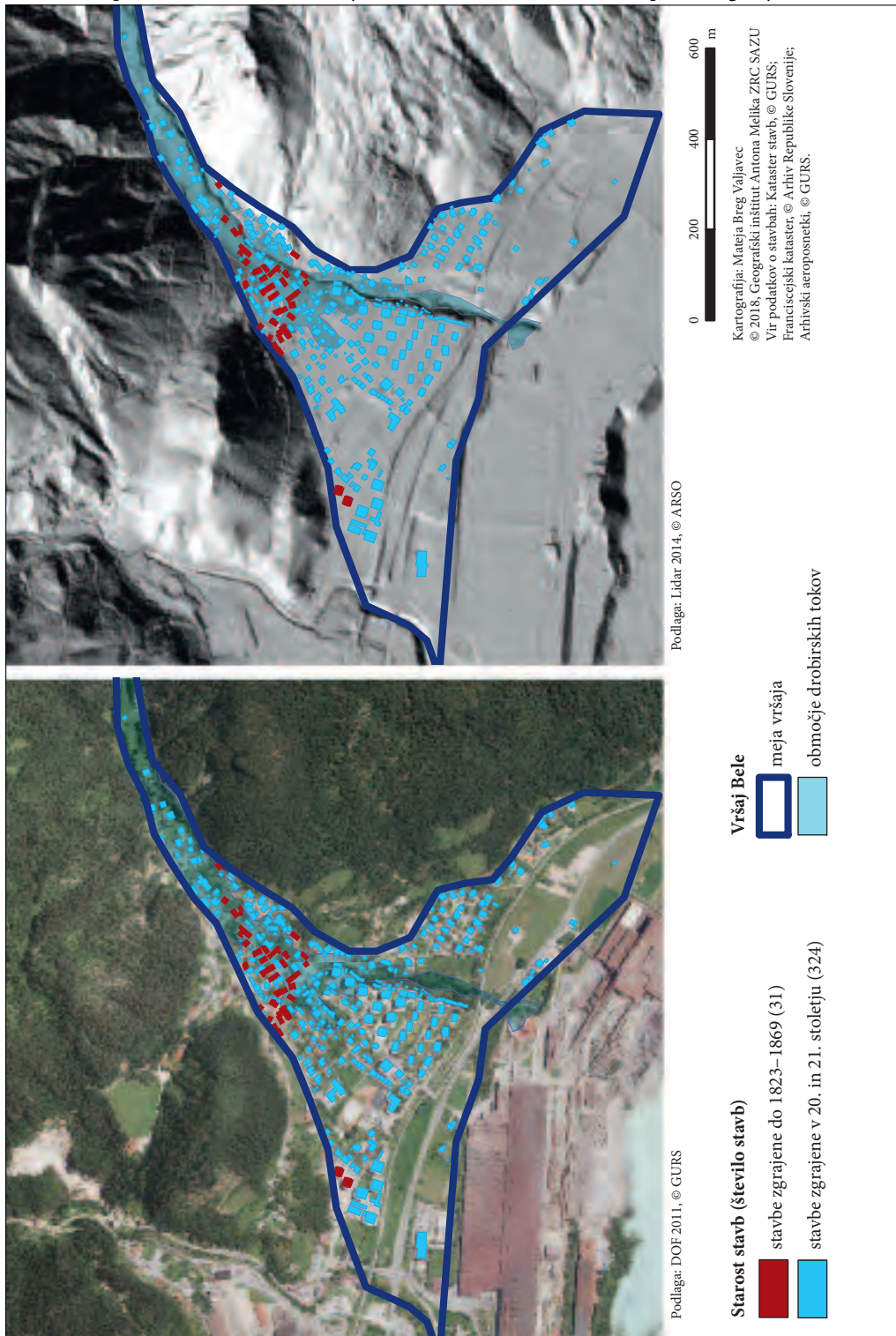


Novodobna poselitev hudourniških vršajev in nevarnost drobirskih tokov: primer Zgornjesavske doline





Novodobna poselitev hudourniških vršajev in nevarnost drobirskih tokov: primer Zgornjesavske doline



Preglednica 1: Bistveni podatki o velikosti in pozidavi vršajev.

vršaji	površina vršaja (m <sup>2</sup> )	površina porečja (m <sup>2</sup> )	število in površina stavb (m <sup>2</sup> ) do 1823/1869	število in površina stavb (m <sup>2</sup> ) med 1823/1869 in 1954/1966	število in površina stavb (m <sup>2</sup> ) po 1954/1966	skupno število in skupna površina stavb (m <sup>2</sup> )	delež stavbnih površin vršaja (%)
karavanski vršaji	508.566	4.793.359	60 10.871	96 12.142	64 6.631	220 29.644	5,8
Krotnjek in Suhej	824.317	4.674.847	78 15.385	60 6.941	145 17.263	283 39.589	4,8
Bela	463.483	5.996.842	31 7.021	324 44.739	355 51.760	11,1	
julijskoalpski vršaji	1.521.511	36.041.713	39 10.061	191 30.397	454 98.245	684 138.703	9,1
Velika Pišnica							
Bistrica	432.963	44.824.591	47 7.591	106 15.048	189 12.360	342 34.999	8,0

pokrajnin in na primer s čezmerno pašo tudi povzročala omenjene procese. Dejavno bivanje ljudi pa je omogočilo večje poznavanje naravnih procesov in povečalo priložnosti za sobivanje in prilagajanje. Novodobna poselitev po 2 svetovni vojni je zanemarila ta vidik, s čimer se je zmanjšala pokrajinska prožnost zaradi naravnih nesreč.

Zgornjesavska dolina je v 20. stoletju doživela hiter razvoj, ki odseva v naraščanju števila stavb na preučeni vršaji (preglednica 1). Opazno je, da so bili karavanški vršaji, ki so povečini nevarnejši (povprečno uvrščeni med prehodne in drobirske) od tistih v Julijskih Alpah (povprečno uvrščeni med hudourniške in prehodne), poseljeni kasneje, je pa na njih danes manj stavb kot na julijskoalpskih vršajih, kjer so večja naselja, vključno s Kranjsko Goro.

Vršaji Julijskih Alp so približno štirikrat večji od karavanških in imajo zaradi prevlade apniškega gorskega sveta večji naklon in strmejšo strugo ( $26^\circ : 34^\circ$ ). Tudi alpski vodotoki so še enkrat daljši od karavanških (slednji so dolgi 4,6 km, julijskoalpski pa 8,6 km) in imajo skoraj trikrat višji pretok stoletnih voda ( $53 : 135 \text{ m}^3/\text{s}$ ). V njih se sprosti šestkrat več gradiva ( $44.500 \text{ m}^3$ ) kot v Karavankah.

So pa zato karavanški vršaji strmejši ( $15^\circ : 5^\circ$ ) in imajo višjo povprečno vrednost Meltonovega števila (0,40), ki je pri julijskoalpskih tik pod mejo drobirskih tokov (0,27), ter veliko višje naklone vršajev, ki kažejo na večjo pogostost intenzivnih geomorfni procesov oziroma drobirskih tokov ( $4,8^\circ : 1,5^\circ$ ).

Učinke naravnih nesreč v alpskih pokrajinah, med katerimi so tudi drobirski tokovi, lahko zmanjšamo s preventivnimi ukrepi, pri katerih gre za prilagajanje družbe in njenih dejavnosti naravnim procesom. Škodo zaradi naravnih nesreč dolgoročno zmanjšamo s primernim prostorskim načrtovanjem. V drugo skupino spadajo tako imenovani aktivni ukrepi, predvsem tehnični in biotehnični ukrepi za urejanje hudournikov, ukrepi za sanacijo erozijskih žarišč in negovalni ukrepi v varovalnih gozdovih (Horvat, Jeršič in Papež 2008). V sodobnosti zakonodaja (Zakon o Triglavskem narodnem parku 2010) sicer omogoča in dopušča delovanje »... javnih služb na področju urejanja voda v skladu s predpisi, ki urejajo vode ...« (21. člen), toda aktivni ukrepi v zavarovanih območjih vzbujajo pozornost in nasprotovanje javnosti. Na zavarovanih območjih ali njihovem obrobju, kot je Zgornjesavska dolina, gre za stalno iskanje ravnovesja med poseljenim dolinskim dnem in neposeljenimi gorami, ki s pobočnimi procesi po eni strani omogočajo življenje v dolini (pitna voda, ravnice teras in vršajev), po drugi strani pa ga omejujejo (pobočni procesi).

Erozijska območja so ranljiva zaradi posegov človeka v preteklosti (paša) in sodobnosti (promet, turizem), a moramo njihovo stanje vzdrževati na ravni, ki omogoča varno poseljenost dolinskega dna in komunikacije. Sedanje razmeroma varne razmere namreč temeljijo na gradbenih in negradbenih posegih v preteklosti, pri čemer imata nenadomestljivo vlogo gospodarjenje z gozdovi in urejanje hudournikov. Čeprav naravne vrvine, kot je gozd, prispevajo k varovanju pred naravnimi nesrečami, so ponekod bili nujni posegi človeka tudi v zavarovana gorska območja. Tako so na primer nad Kranjsko Goro in Belco pred desetletji zgradili pregrade in zadrževalnike ter ogozdili in utrdili pobočja. To infrastrukturo je treba vzdrževati, saj učinki naravnih prvin samih niso zadostni za varovanje naselij in infrastrukture (Komac in Zorn 2011).

*ZAHVALA: Prispevek temelji na raziskovalnem projektu Prožnost alpskih pokrajin z vidika naravnih nesreč (J6-6853), ki ga je financirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.*

## 5 Literatura in viri

- Arattano, M., Conte, R., Franzi, L., Giordan, D., Lazzari, A., Luino, F. 2010: Risk management on an alluvial fan: a case study of the 2008 debris-flow event at Villar Pellice (Piedmont, N-W Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10-5. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-10-999-2010>
- Archer, S. 1995: Tree-grass dynamics in a Prosopis-thornscrub savanna parkland: reconstructing the past and predicting the future. *Ecoscience* 2-1.

- Bescoby, D. J. 2006: Detecting Roman land boundaries in aerial photographs using Radon transforms. *Journal of Archaeological Science* 33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2005.10.012>
- Bohinec, V. 1935: Postglacialno Korénško jezero. *Geografski vestnik* 11.
- Boudou, M., Danière, B., Lang, M. 2016: Assessing changes in urban flood vulnerability through mapping land use from historical information. *Hydrology and Earth System Sciences* 20. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-20-161-2016>
- Breg Valjavec, M., Ribeiro, D. 2014: Uporabnost zgodovinskih aeroposnetkov pri preučevanju pokrajinskih sprememb na ozemlju Slovenije. *Digitalni prostor, GIS v Sloveniji* 13. 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: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.04.003>
- Bryan, P. G., Clowes, M. 1997: Surveying Stonehenge by photogrammetry. *The Photogrammetric Record* 15-89. DOI: <https://doi.org/10.1111/0031-868X.00082>
- 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: [https://doi.org/10.1016/S0301-4797\(03\)00111-7](https://doi.org/10.1016/S0301-4797(03)00111-7)
- Furlan, M., Kladnik, D. 2008: Krottnik, Krottnjek, Krottnjak, Korenščica ali Potok. *Geografski Vestnik* 80-1.
- Gams, I. 1992: Prispevek k mladokvartarni geomorfologiji v Zgornjesavski dolini. *Geografski zbornik* 32.
- 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 overtime in the Langhe region (NW Italy). *Land use Policy* 36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.08.018>
- Horvat, A., Jeršič, T., Papež, J. 2008: Varstvo pred hudourniki in erozijo ob vse intenzivnejših vremenskih ekstremih. *Ujma* 22.
- Hrvatina, M., Zorn, M. 2017: Trendi pretokov rek v slovenskih Alpah med letoma 1961 in 2010. *Geografski vestnik* 89-2. DOI: <https://doi.org/10.3986/GV89201>
- Jesenovec, S. (ur.) 1995: Pogubna razigranost – 110 let organiziranega hudourničarstva na Slovenskem 1884–1994. Ljubljana.
- Jež, J., Mikoš, M., Trajanova, M., Kumelj, Š., Budkovič, T., Bavec, M. 2008: Vršaj Koroška Bela – Rezultat katastrofičnih pobočnih dogodkov. *Geologija* 51-2. DOI: <https://doi.org/10.5474/geologija.2008.022>
- 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2010.04.006>
- Komac, B. 2006: Dolec kot značilna oblika dolomitnega površja. *Geografija Slovenije* 13. Ljubljana.
- Komac, B. 2009: Social Memory and geographical memory of natural disasters. *Acta geographica Slovenica* 49-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/AGS49107>
- Komac, B., Natek, K., Zorn, M. 2008: Geografski vidiki poplav v Sloveniji. *Geografija Slovenije* 20. Ljubljana.
- Komac, B., Zorn, M. 2007: Pobočni procesi in človek. *Geografija Slovenije* 15. Ljubljana.
- Komac, B., Zorn, M. 2011: Vloga zavarovanih območij pri blažitvi naravnih nesreč. *Razvoj zavarovanih območij v Sloveniji, Regionalni razvoj* 3. Ljubljana.
- Kunaver, J. 1990: H geomorfologiji dolomitnega prevala Vršič v Julijskih Alpah. *Geografski vestnik* 62.
- Marchi, L., Tecca, P. R. 2015: Alluvial fans of the Eastern Italian Alps: morphometry and depositional processes. *Geodinamica Acta* 8-1. DOI: <https://doi.org/10.1080/09853111.1995.11105270>
- Melik, A. 1961: Vitranc, Zelenci in Bovško - Geomorfološke študije iz zahodnih Julijskih Alp. *Geografski zbornik* 6.
- Mikoš, M. 2000: Prodna bilanca reke Save od Jesenic do Mokric. *Gradbeni vestnik* 49.
- Mikoš, M. 2006: Ocena ogroženosti zaradi delovanja drobirskih tokov. Končno poročilo. Ljubljana. Internet 1: E-vode [http://gis.arso.gov.si/evode/profile.aspx?id=atlas\\_voda\\_Lidar@Arso](http://gis.arso.gov.si/evode/profile.aspx?id=atlas_voda_Lidar@Arso) (20. 6. 2018). Internet 2: Arhiv Republike Slovenije: <http://arsq.gov.si/Query/bild.aspx?VEID=224810&DEID=10&SQNZNR=1> (20. 6. 2018).

- Internet 3: [www.sos112.si/slo/tdocs/naloga\\_76.pdf](http://www.sos112.si/slo/tdocs/naloga_76.pdf) (20. 6. 2018).
- Internet 4: Arhiv aeroposnetkov RS: <http://www.geomatika.si/arhiv.htm> (20. 6. 2018).
- Nared, J, Perko, D. 2011: Vloga zavarovanih območij pri blažitvi naravnih nesreč. Regionalni razvoj 3, Razvoj zavarovanih območij v Sloveniji. Ljubljana.
- Nared, J., Visković Razpotnik, N., Komac, B. 2015: The Alps: A physical geography, political, and program framework. *Acta geographica Slovenica* 55-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/AGS.1970>
- Pacina, J., Weiss, L. 2011: Georeliefreconstruction and analysis based on historical maps and aerial photographs. *Proceedings – Symposium GIS Ostrava 2011*. Ostrava.
- Palmieri, R., Rosenwirth, R., Sima, F. 2004: Val – l'onda – die Flut. Trst.
- 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: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.08.025>
- Polajnar, J. 2004: Visoke vode v Sloveniji leta 2003. Ujma 17-18.
- Polajnar, J. 2006: Visoke vode rek in poplave. *Hidrološki letopis Slovenije 2003*. Ljubljana.
- Prokešová, R., Kardoš, M., Medvedová, A. 2010: Landslide dynamics from high-resolution aerial photographs: a case study from the Western Carpathians, Slovakia. *Geomorphology* 115, 1–2. DOI: <https://doi.org/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. Magistrsko delo, Filozofska fakulteta Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Ravbar, M. 2012: Letališča na soški fronti. Prispевki za novejšo zgodovino 2.
- Reeves, D. M. 1936: Aerial photography and archaeology. *Society for American Archaeology* 2-2. DOI: <https://doi.org/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: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.028>
- Sklenička, P. 2002: Temporal changes in pattern of one agricultural bohemian landscape during the period 1938–1998. *Ekológia* 21-2.
- Seručnik, M. 2009: Reambulančni kataster za Kranjsko. *Kronika* 57-3.
- Sodnik, J., Mikoš, M. 2006: Estimation of magnitudes of debris flows in selected torrential watersheds in Slovenia. *Acta geographica Slovenica* 46-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/AGS46104>
- Triglav Čekada, M., Bric, V. 2015: Končan je projekt laserskega skeniranja Slovenije. *Geodetski vestnik* 59-3.
- Tropeano, D., Turconi, L., Sanna, S. 2004: Debris flows triggered by the 29 August 2003 cloudburst in Val Canale, eastern Italian Alps. *Schutz des Lebensraumes vor Hochwasser, Muren, Lawinen und Hangbewegungen: Veränderungen im Natur- und Kulturhaushalt und ihre Auswirkungen* 1. Klagenfurt.
- Zakon o Triglavskem narodnem parku. *Uradni list Republike Slovenije* 52/2010. Ljubljana.
- Zorn, M., Komac, B. 2006: Geomorfologija in prostorsko planiranje. *Urbani Izziv* 17, 1–2.
- Zorn, M., Komac, B. 2009: Response of soil erosion to land use change with particular reference to the last 200 years (Julian Alps, Western Slovenia). *Revista de geomorfologie* 11.
- Zorn, M., Komac, B. 2011: Damage caused by natural disasters in Slovenia and globally between 1995 and 2010. *Acta geographica Slovenica* 51-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/AGS51101>
- Zorn, M., Komac, B. 2015: Naravne nesreče in družbena neodgovornost. *Geografski vestnik* 87-2. DOI: <https://doi.org/10.3986/GV87205>
- Zorn, M., Komac, B., Ciglič, R. 2017: Prilagajanje naravnim nevarnostim z urejanjem prostora – primer poplav in zemeljskih plazov v Občini Idrija. *Prostor, regija, razvoj, Regionalni razvoj* 6. Ljubljana.

- Zorn, M., Komac, B., Gabrovec, M. 2008: Influence of land use changes on erosion in Slovenian Alps. Man in the landscape across frontiers : landscape and land use change in Central European border regions. Prague.
- Zorn, M., Natek, K., Komac, B. 2006: Mass movements and flash-floods in Slovene Alps and surrounding mountains. *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica* 40.



## LOKALNA OBMOČJA DELOVNE MOBILNOSTI V SLOVENIJI

**dr. Samo Drobne**

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

**Lavra Borovnik**

lavra.borovnik@gmail.com

**dr. Mitja Lakner**

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

UDK: 711.2:331.55(497.4)

### IZVLEČEK

#### **Lokalna območja delovne mobilnosti v Sloveniji**

V prispevku predstavljamo lokalna območja delovne mobilnosti v Sloveniji za leto 2016 modelirana po metodi CURDS (Centre for Urban and Regional Development Studies). Pri tem smo sledili splošnim napotkom glede minimalnih in ciljnih parametrov, dodatno pa smo opredelili parametre modeliranja, ki členijo Slovenijo v že prepoznana območja delovne mobilnosti. Naši rezultati kažejo na smiselnost členitve Slovenije na 22 do 50 lokalnih območij delovne mobilnosti.

### KLJUČNE BESEDE

območje delovne mobilnosti, ODM, lokalno območje, metoda CURDS, Slovenija

### ABSTRACT

#### **Local travel-to-work-areas in Slovenia**

In this paper, local travel-to-work-areas in Slovenia for the year 2016 have been modelled using CURDS method (Centre for Urban and Regional Development Studies). In the modelling procedure, we followed the general guidance on minimum and target parameters, and, additionally, we defined the modelling parameters that delineate Slovenia in the already recognized local labour market areas. Our results show that there are between 22 and 50 local travel-to-work-areas in Slovenia.

### KEY WORDS

travel-To-Work-Area, TTWA, local area, CURDS method, Slovenia

## 1 Uvod

Območje delovne mobilnosti (ODM; angl. *Travel-To-Work-Areas*, TTWA) je območje, kjer večina delovno aktivnega prebivalstva živi in dela. Zato pretežni del delovnih mest v ODM zasedajo prebivalci tega območja. Statistični urad Evropske unije Eurostat (2017) opredeljuje ODM kot statistično, funkcionalno zamejeno, geografsko območje ali regijo, katerega zamejitev ni določena z administrativno opredeljenimi mejami.

Spremljanje ODM ima več namenov. Najpomembnejši je spremljanje trga dela in ugotavljanje učinkovitosti programov, povezanih z zaposlovanjem. Velika Britanija, Francija in Italija so uveljavile ODM kot uradna območja za zbiranje statističnih podatkov o trgu dela. V teh državah predstavljajo ODM najmanjša in temeljna območja za primerjavo zaposljivosti v državi/regiji. ODM služijo tudi izvedbi različnih gospodarskih analiz na lokalni ravni (Coombes in Bond 2008; Persyn in Torfs 2011). Na ravni ODM se zbirajo in analizirajo podatki o zaposljivosti, brezposelnosti, delovnih mestih in drugi podatki, vezani na trg dela.

ODM je torej funkcionalno zamejena regija na lokalni ravni, v kateri večina prebivalcev poišče za poslitev oziroma zamenja delovno mesto, pri tem pa vedo, da njihova vsakodnevna pot na delo in nazaj domov ne bo trajala predolgo. Tem principom naj bi sledila politika zaposlovanja, prav tako pa tudi politika prostorskega in urbanističnega načrtovanja (Smart 1974; Coombes s sodelavci 1979; 1982).

ODM sestavljamo iz osnovnih prostorskih enot (OPE), ki so največkrat popisni ali statistični okoliši, naselja ali občine. Med temi OPE se dnevno izvaja delovna mobilnost (vožnja na delo in nazaj domov). Po Smartu (1974) je (dnevna) delovna mobilnost najbolj množična in najbolj stabilna in redna oblika tokov prebivalstva v prostoru, pri kateri manjše spremembe v zaposlitvi in/ali prebivališču ne vplivajo bistveno na vzorec dnevnih tokov na delo in domov. V tem smislu lahko razumemo ODM kot posplošitev tokov delovne mobilnosti v prostoru (Drobne 2016).

V prispevku predstavljamo in komentiramo rezultate modeliranja lokalnih območij delovne mobilnosti (LODM) za Slovenijo za leto 2016. LODM smo modelirali po metodi CURDS, kot jo nekateri popularno imenujejo po Središču za urbane in regionalne razvojne študije (ang. *Centre for Urban and Regional Development Studies*, CURDS), Univerze v Newcastleu, kjer so metodo razvili (Coombes, Green in Openshaw 1986), nato pa jo večkrat posodobili.

## 2 Metode dela

LODM Slovenije smo modelirali po iterativnem postopku tretje različice metode CURDS (Coombes in Bond 2008) v programskem orodju R s knjižnico *LabourMarketAreas* 3.0 (LMA 2017). Pri tem smo uporabili podatke o delovni mobilnosti med občinami Slovenije leta 2016 (Delovno aktivno ... 2017), katere pa je potrebno, zaradi morebitne napačne navedbe kraja bivanja ali kraja dela, kritično obravnavati (Gabrovec in Bole 2009).

Pri modeliranju ODM sledimo principu maksimizacije notranjih tokov delovne mobilnosti (tokov znotraj ODM) in minimizacije zunanjih tokov delovne mobilnosti (tokov čez meje ODM). Ta dva principa spremljamo s samozadostnostjo ODM, ki jo obravnavamo kot samozadostnost na strani ponudbe (angl. *supply-side self-containment*, SSSC) in kot samozadostnost na strani povpraševanja (angl. *demand-side self-containment*, DSSC). Naj bo  $f_{hk}$  tok delovne mobilnosti iz (skupine) OPE  $h$  v (skupino) OPE  $k$  oziroma  $f_{hk}$  je število delavcev, ki živijo v izvoru  $h$  in delajo v ponoru  $k$ . Potem je:

$$SSSC = \frac{RW_i}{R_i} \quad \text{samozadostnost na strani ponudbe,} \quad (1)$$

$$DSSC = \frac{RW_i}{W_i} \quad \text{samozadostnost na strani povpraševanja,} \quad (2)$$

kjer je:

$$R_i = \sum_k f_{ik} \quad \text{številu delavcev, ki živijo v } i \text{ oziroma številu delovno aktivnega prebivalstva v } i, \quad (3)$$

$$W_i = \sum_h f_{hi} \quad \text{številu delavcev, ki delajo v } i \text{ oziroma številu delovnih mest v } i, \quad (4)$$

$$RW_i = f_{ii} \quad \text{številu delavcev, ki živijo in delajo v } i. \quad (5)$$

Samozadostnost na strani ponudbe (SSSC) podaja obseg možnosti zaposlitve lokalnega prebivalstva. Visoka stopnja SSSC označuje relativno zaprta ODM (velik delež lokalnega prebivalstva najde zaposlitev v ODM). Obratno, nizka stopnja SSSC označuje relativno odprta ODM (velik delež lokalnega prebivalstva dela v drugih ODM). Samozadostnost na strani povpraševanja (DSSC) pa podaja obseg možnosti bivanja zaposlenim v ODM. Visoka stopnja DSSC tako pomeni, da je velik delež zaposlenih v ODM tam našlo tudi prebivališče, hkrati pa lahko pomeni tudi primanjkljaj delovnih mest v ODM (Drobne 2016). Zato Van der Laan in Schalkke (2001) predlagata, da pri vrednotenju ODM vedno SSSC soočimo z DSSC.

Poleg samozadostnosti je pomemben kriterij pri vrednotenju oziroma modeliranju ODM še število delovno aktivnih prebivalcev. Pred izvedbo iterativnega postopka metode CURDS moramo zato opredeliti štiri parametre, s katerimi modeliramo ODM; ti so: minimalno število delovno aktivnega prebivalstva v ODM (*minWP*), ciljno število delovno aktivnega prebivalstva v ODM (*tarWP*), minimalno samozadostnost v ODM (*minSC*) in ciljno samozadostnost v ODM (*tarSC*); pri tem obravnavamo samozadostnost kot manjšo od obeh obravnavanih samozadostnosti:

$$SC = \min(SSSC, DSSC). \quad (6)$$

Algoritem CURDS korakoma združuje OPE v ODM. Pri tem obravnava vsako OPE (v našem primeru občino) kot ODM. Algoritem v postopku združevanja preverja veljavnost ODM, glede na predhodno opredeljene štiri parametre (*minWP*, *tarWP*, *minSC* in *tarSC*), ki opredeljujejo kriterijsko funkcijo,  $f_v$ :

$$f_v(WP, SC) = \left( 1 - \left( 1 - \frac{\min SC}{tarSC} \right) \max \left( 1 - \frac{tarWP - WP}{tarWP - \min WP}, 0 \right) \right) \frac{\min(SC, tarSC)}{tarSC}, \quad (7)$$

kjer je *WP* število delovno aktivnega prebivalstva v ODM.

Skupek OPE postane ODM, če velja (pogoj veljavnosti ODM):

$$f_v(WP, SC) \geq \frac{\min SC}{tarSC}. \quad (8)$$

Pogoj veljavnosti ODM se preveri po vsakem koraku združevanja OPE oziroma skupin OPE. Algoritem namreč v korakih združuje OPE (skupine OPE), med katerima obstaja najmočnejša vez,  $L_{hk}$ , opredeljena s tokovi delovne mobilnosti:

$$L_{hk} = \frac{f_{hk}^2}{R_h W_k} + \frac{f_{kh}^2}{R_k W_h}, \quad (9)$$

kjer je  $f_{hk}$  število delovno aktivnega prebivalstva, ki živi v (skupini) OPE *h* in dela v (skupini) OPE *k*, in  $f_{kh}$  število delovno aktivnega prebivalstva, ki živi v (skupini) OPE *k* in dela v (skupini) OPE *h*,  $R_h$  število delovno aktivnega prebivalstva v (skupine) OPE *h*,  $W_k$  število delovnih mest v (skupini) OPE *k*. Podrobno so algoritem tretje različice metode CURDS, ki je tudi izveden v knjižnici LabourMarketAreas 3.0 za uporabo v programskem orodju R, opisali Franconi, D'Alò in Ichim (2016). Posebnost metode CURDS je v možnosti razdruževanja skupine OPE (v našem primeru občin), v kolikor le-ta ne izpolnjuje pogoja veljavnosti ODM, in uvrščanja le-teh v rezervni seznam OPE ter možnosti ponovne kasnejše obravnave posamezne OPE iz rezervnega seznama OPE.

Končni rezultat modeliranja ODM po metodi CURDS je torej pogojen s parametri *minWP*, *tarWP*, *minSC* in *tarSC*, ki so odvisni predvsem od velikosti države in velikosti trga dela. V literaturi priporočeni parametri so (Coombes in Bond 2008; Franconi, D'Alò in Ichim 2016; Franconi s sodelavci 2016): ciljna vrednost samozadostnosti naj bo med 0,75 in 0,80 ( $0,75 \leq tarSC \leq 0,80$ ), najmanjša vrednost samozadostnosti naj bo med 0,60 in 0,70 ( $0,60 \leq minSC \leq 0,70$ ), medtem ko sta ciljno (*tarWP*) in najmanjše število delovno aktivnega prebivalstva (*minWP*) v ODM odvisna od značilnosti OPE (v našem primeru občin), tokov delovne mobilnosti ter drugih značilnosti območja države oziroma regije, ki jo členimo na ODM, predvsem od gostote poselitve. Najmanjše število delovno aktivnega prebivalstva v ODM pomembno vpliva na velikost modeliranih ODM, ciljno število delovno aktivnega prebivalstva v ODM pa je običajno večje od 10.000 (Franconi, D'Alò in Ichim 2016).

Coombes in Bond (2008) priporočata vsaj posplošeno poznavanje ODM v analizirani regiji. V ta namen smo v naši analizi predpostavili lokalna območja delovne mobilnosti, kot so jih v projektu *Strategy for a Regional Polycentric Urban System in Central-Eastern Europe Economic Integrating Zone* (projekt RePUS) za podatke o delovni mobilnosti med občinami Slovenije za leto 2002 modelirali Pichler Milanović in sodelavci (2008). Rezultat njihovega modeliranja, ki je sicer potekal po bolj preprostem postopku, kot ga opredeljuje metoda CURDS, je opredelil 42 lokalnih zaposlitvenih sistemov Slovenije. Zato smo v naši analizi preverili niz parametrov, s katerimi je mogoče po metodi CURDS Slovenijo členiti v omenjenih 42 območij lokalnih zaposlitvenih sistemov.

### 3 Rezultati

V postopku modeliranja LODM Slovenije za leto 2016 smo najprej upoštevali niz parametrov, ki jih predlaga večina strokovnjakov (na primer Coombes in Bond 2008; Casado-Díaz in Coombes 2011; Franconi, D'Alò in Ichim 2016), in so v preglednici 1 opredeljeni kot K1 (*minWP* = 5000, *tarWP* = 10.000, *minSC* = 0,600, *tarSC* = 0,750). Z uporabo parametrov K1 smo dobili samo 22 LODM, kot so prikazani na slikah 1 in 2. Pri členitvi Slovenije na 22 LODM (slika 1) po velikosti izstopa LODM Ljubljana (61), ki združuje 29 občin, kar je tudi največ združenih občin znotraj enega LODM. Med manjšimi LODM glede na število občin so LODM Idrija (36), ki ga sestavljata zgolj dve občini, in LODM Tolmin (128) ter Črnomelj (17), ki ju sestavljajo po tri občine. S podrobno analizo samozadostnosti in števila delovno aktivnih prebivalcev v LODM (glej sliko 2) ugotovimo, da je večina LODM razporejena bližje minimalni samozadostnosti 0,600 kot pa ciljni samozadostnosti 0,750. Opazimo, da so tri LODM na meji ali zelo blizu minimalne samozadostnosti; to so LODM Rogaška Slatina (106), kjer *SC* = 0,600, LODM Kranj (52) s *SC* = 0,605 in LODM Škofja Loka (122) s *SC* = 0,606. Zaradi velikih razlik v številu delovno aktivnega prebivalstva po LODM smo na sliki 2 uporabili logaritemsko lestvico. Glede na vrednotena parametra izstopa pet LODM, kjer več kot 7 od 10 delovno aktivnih prebivalcev dela v domačem LODM; ta LODM so: Koper/Capodistria (50), kjer sta *WP* = 43.268 in *SC* = 0,828, LODM Nova Gorica (84), kjer sta *WP* = 32.861 in *SC* = 0,827, LODM Murska Sobota (80), kjer sta *WP* = 37.395 in *SC* = 0,814, LODM Novo mesto (84), kjer sta *WP* = 35.802 in *SC* = 0,758, in LODM Celje (11), kjer sta *WP* = 53.084 in *SC* = 0,727.

V nadaljevanju smo s poskušanjem opredelili parametre K2 (*minWP* = 4000, *tarWP* = 8000, *minSC* = 0,333, *tarSC* = 0,667), s katerimi smo modelirali 42 lokalnih zaposlitvenih sistemov, kot so jih za Slovenijo za leto 2002 opredelili Pichler Milanović s sodelavci (2008), in še 8 dodatnih LODM. Členitev Slovenije na 50 LODM je prikazana na sliki 3. V primeru modeliranja LODM s parametri K2, se je LODM Ljubljana (61) bistveno zmanjšalo: po številu občin se je zmanjšalo za 19 občin (prej 29, sedaj 10 občin), po številu delovno aktivnega prebivalstva pa za 95.508 (prej 242.930, sedaj 147.422). Poleg LODM Ljubljane (61) so ostala LODM, kjer se je število delovno aktivnega prebivalstva zmanjšalo za več kot 10.000 še v nekaterih LODM: v Celju (11) za 25.637, Murski Soboti (80) za 19.798, Krškem (54) za 17.238, Kopru/Capodistria (50) za 15.171, na Jesenicah (41) za 13.714, v Zrečah (144) za 12.167, Postojni (94) za 12.163 in Novi Gorici (84)

za 10.942. LODM, ki so ostala nespremenjena, pa so: Črnomelj (17), Idrija (36), Kranj (52), Ravne na Koroškem (103), Rogaška Slatina (106), Škofja Loka (122) in Tolmin (128).

Podobno kot v primeru 22 LODM je tudi v primeru členitve Slovenije na 50 LODM večina LODM pod ciljno samozadostnostjo (glej sliko 4). Večina LODM je zgoščenih okoli ciljnega števila delovno aktivnih, to je 8000 delovno aktivnih prebivalcev v LODM. Najnižjo samozadostnost imajo LODM Domžale (23) s  $SC = 0,368$ , Litija (60) s  $SC = 0,368$ , Šentjur (120) s  $SC = 0,386$ , Vrhnika (140) s  $SC = 0,387$ , Grosuplje (32) s  $SC = 0,392$  in Kamnik (43) s  $SC = 0,393$ . To pomeni, da se iz omenjenih LODM 6 od 10 delovno aktivnih prebivalcev vozi na delo v drugo LODM. Večina delovne mobilnosti iz omenjenih LODM se navezuje na LODM Ljubljana (61), le LODM Šentjur (120) se navezuje na LODM Celje (11). LODM Ljubljana (61) je v primeru bolj podrobne členitve Slovenije na LODM izgubil precej samozadostnosti, saj se mu je zmanjšala na 0,545 (prej 0,756). LODM Maribor (70) se samozadostnost ni bistveno zmanjšala (prej 0,754, sedaj 0,722). Poleg LODM Maribor (70), kjer  $WP = 64.145$  in  $SC = 0,722$ , na sliki 4 še posebej izstopajo LODM, kjer več kot 7 od 10 delovno aktivnih prebivalcev dela v domačem LODM. Ta LODM so: LODM Nova Gorica (84), kjer sta  $WP = 21.919$  in  $SC = 0,781$ , LODM Tolmin (128), kjer sta  $WP = 6828$  in  $SC = 0,744$ , LODM Koper/Capodistria (50), kjer sta  $WP = 28.097$  in  $SC = 0,728$ , LODM Murska Sobota (80), kjer sta  $WP = 17.597$  in  $SC = 0,728$ , LODM Novo mesto (85), kjer sta  $WP = 27.057$  in  $SC = 0,725$ , LODM Ravne na Koroškem (103), kjer sta  $WP = 9254$  in  $SC = 0,719$ , in LODM Idrija (36), kjer sta  $WP = 6781$  in  $SC = 0,717$ . Podobno kot za sliko 2 smo tudi na sliki 4 uporabili logaritemsko lestvico števila delovno aktivnih po LODM.

Primerjava členitve Slovenije na 22 in 50 LODM izpostavi LODM, katerih samozadostnost je v obeh primerih med najvišjimi v obravnavi; to so LODM Nova Gorica (84), LODM Koper/Capodistria (50), LODM Murska Sobota (80), LODM Novo mesto (85), LODM Maribor (70) in LODM Idrija (36).

*Preglednica 1: Parametri za določitev lokalnih območij delovne mobilnosti po metodi CURDS za Slovenijo (opomba: minWP – minimalno število delovno aktivnih, tarWP – ciljno število delovno aktivnih, minSC – minimalna samozadostnost, tarSC – ciljna samozadostnost).*

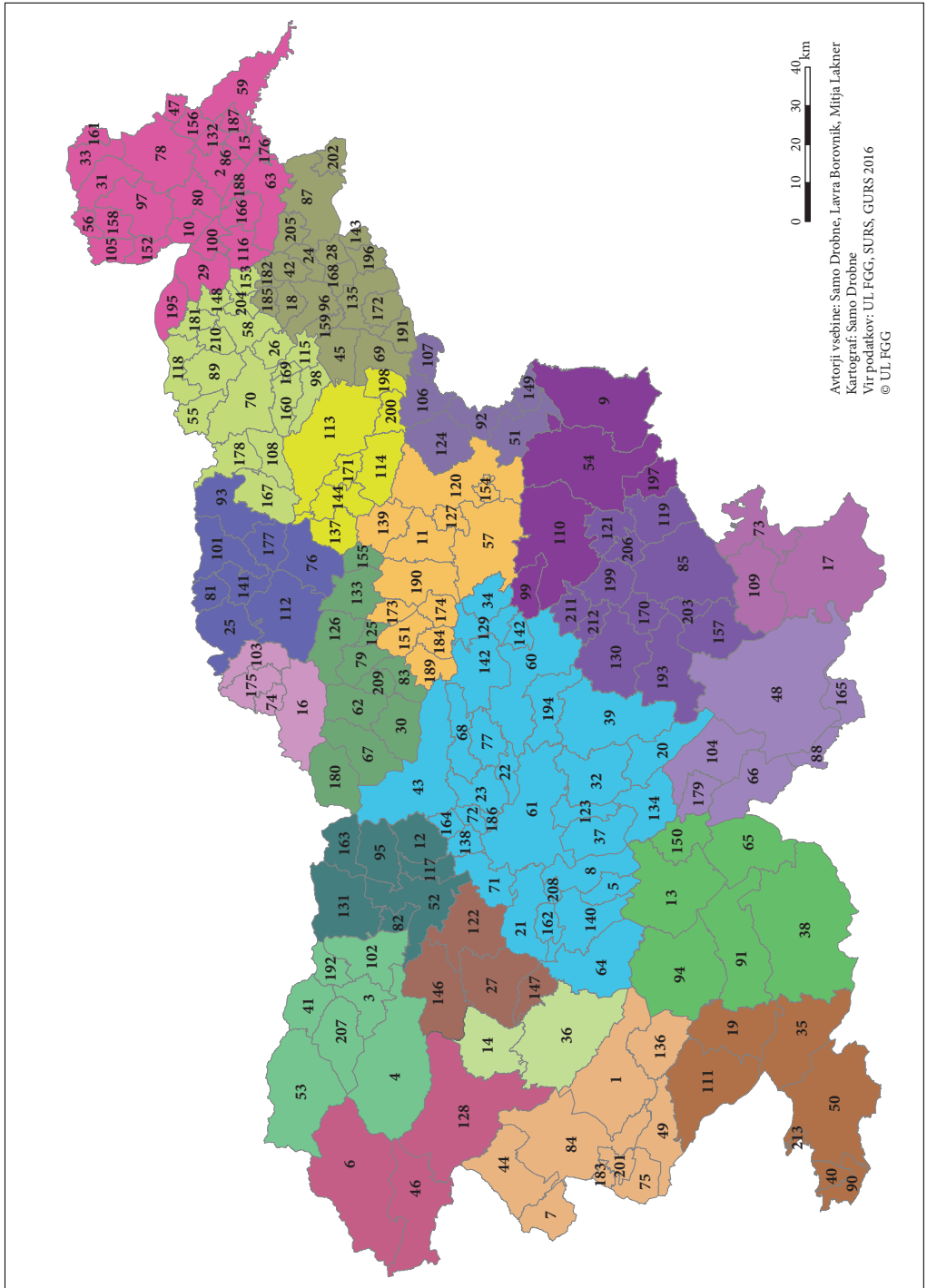
niz parametrov	minWP	tarWP	minSC	tarSC
K1	5.000	10.000	0,6	0,75
K2	4.000	8.000	0,333	0,667

*Slika 1: Členitev Slovenije na 22 lokalnih območij delovne mobilnosti leta 2016 (parametri K1: minWP = 5000, tarWP = 10.000, minSC = 0,600, tarSC = 0,750). ► (str. 158–159)*

*Slika 2: Samozadostnost 22 lokalnih območij delovne mobilnosti Slovenije leta 2016 (parametri K1: minWP = 5000, tarWP = 10.000, minSC = 0,600, tarSC = 0,750). ► (str. 159)*

*Slika 3: Členitev Slovenije na 50 lokalnih območij delovne mobilnosti leta 2016 (parametri K2: minWP = 4000, tarWP = 8000, minSC = 0,333, tarSC = 0,667). ► (str. 160–161)*

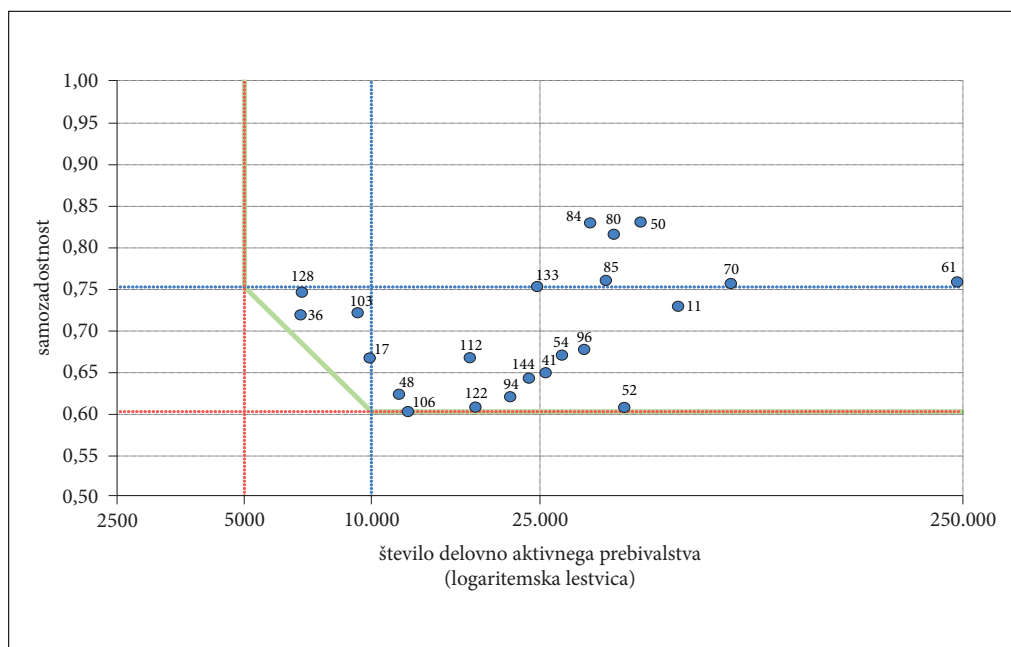
*Slika 4: Samozadostnost 50 lokalnih območij delovne mobilnosti Slovenije leta 2016 (parametri K2: minWP = 4000, tarWP = 8000, minSC = 0,333, tarSC = 0,667). ► (str. 161)*



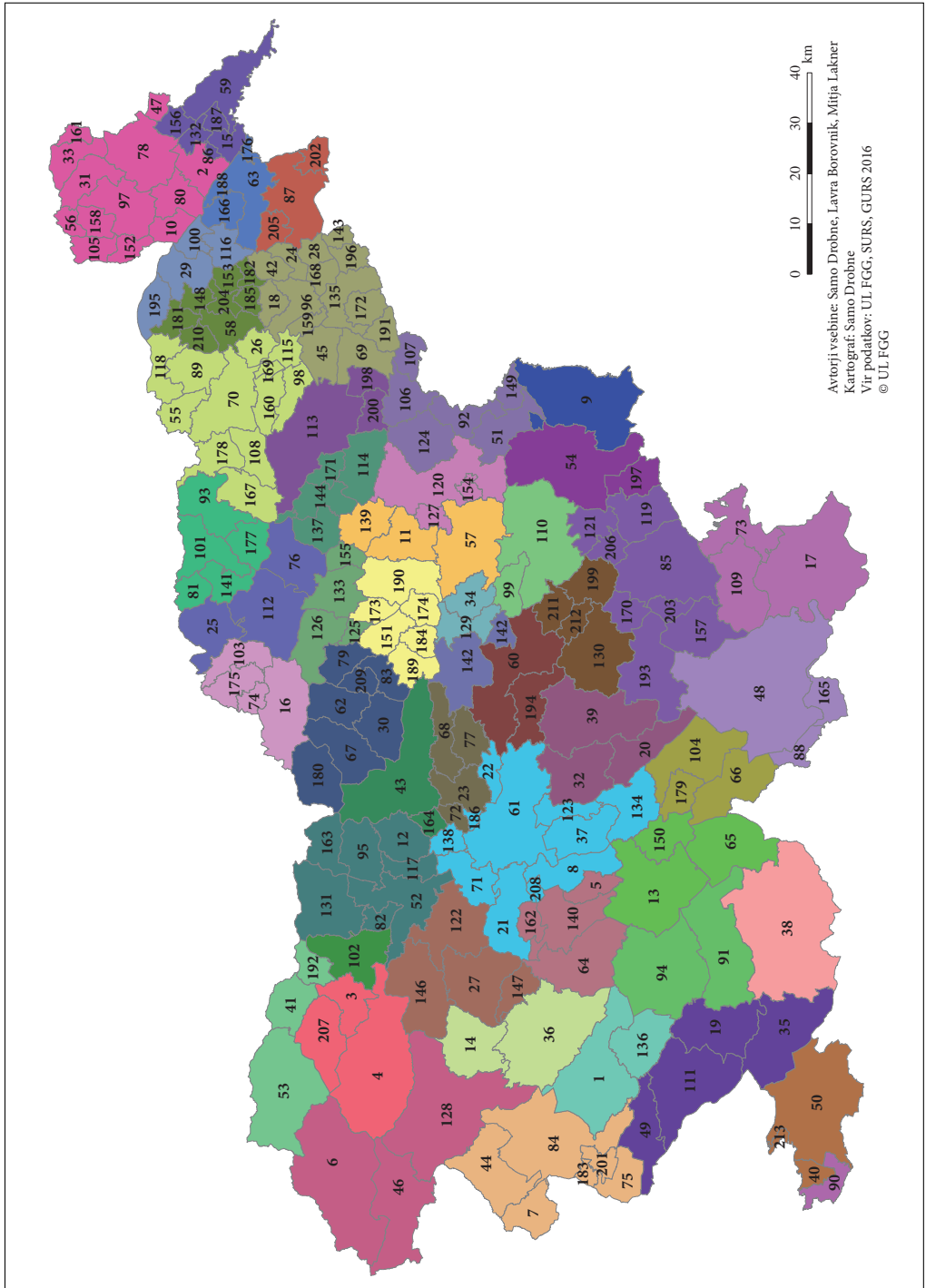
Legenda: 22 lokalnih območij delovne mobilnosti

Celje (11)	Nova Gorica (84)
Črnomelj (17)	Novo mesto (85)
Idrija (36)	Postojna (94)
Jesenice (41)	Ptuj (96)
Kočevje (48)	Ravne na Koroškem (103)
Koper/Capodistria (50)	Rogaška Slatina (106)
Kranj (52)	Slovenj Gradec (112)
Krško (54)	Škofja Loka (122)
Ljubljana (61)	Tolmin (128)
Maribor (70)	Velenje (133)
Murska Sobota (80)	Zreče (144)

Slika 1.



Slika 2.



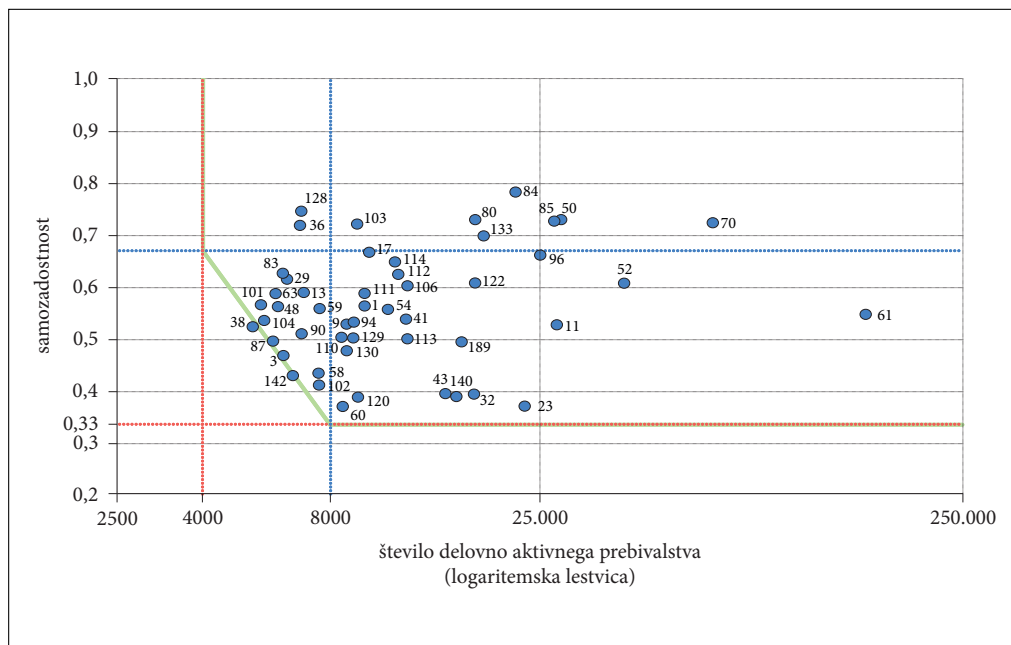


## Lokalna območja delovne mobilnosti v Sloveniji

### Legenda: 50 lokalnih območij delovne mobilnosti

<span style="color: #00B0F0;">■</span> Ajdovščina (1)	<span style="color: #008000;">■</span> Lenart (58)	<span style="color: #808000;">■</span> Ribnica (104)
<span style="color: #FF0000;">■</span> Bled (3)	<span style="color: #4B0082;">■</span> Lendava/Lendva (59)	<span style="color: #6A5ACD;">■</span> Rogaška Slatina (106)
<span style="color: #0000FF;">■</span> Brežice (9)	<span style="color: #8B0000;">■</span> Litija (60)	<span style="color: #3CB371;">■</span> Sevnica (110)
<span style="color: #FFA500;">■</span> Celje (11)	<span style="color: #00CED1;">■</span> Ljubljana (61)	<span style="color: #483D8B;">■</span> Sežana (111)
<span style="color: #32CD32;">■</span> Cerknica (13)	<span style="color: #6495ED;">■</span> Ljutomer (63)	<span style="color: #4169E1;">■</span> Slovenj Gradec (112)
<span style="color: #DDA0DD;">■</span> Črnomelj (17)	<span style="color: #C71585;">■</span> Maribor (70)	<span style="color: #663399;">■</span> Slovenska Bistrica (113)
<span style="color: #654321;">■</span> Domažale (23)	<span style="color: #FF69B4;">■</span> Murska Sobota (80)	<span style="color: #3CB371;">■</span> Slovenske Konjice (114)
<span style="color: #6495ED;">■</span> Gornja Radgona (29)	<span style="color: #191970;">■</span> Nazarje (83)	<span style="color: #DDA0DD;">■</span> Šentjur (120)
<span style="color: #8B4513;">■</span> Grosuplje (32)	<span style="color: #FFDAB9;">■</span> Nova Gorica (84)	<span style="color: #A0522D;">■</span> Škofja Loka (122)
<span style="color: #C71585;">■</span> Idrija (36)	<span style="color: #483D8B;">■</span> Novo mesto (85)	<span style="color: #DC143C;">■</span> Tolmin (128)
<span style="color: #FF6347;">■</span> Ilirska Bistrica (38)	<span style="color: #A0522D;">■</span> Ormož (87)	<span style="color: #4682B4;">■</span> Trbovlje (129)
<span style="color: #3CB371;">■</span> Jesenice (41)	<span style="color: #9932CC;">■</span> Piran/Pirano (90)	<span style="color: #654321;">■</span> Trebnje (130)
<span style="color: #006400;">■</span> Kamnik (43)	<span style="color: #3CB371;">■</span> Postojna (94)	<span style="color: #3CB371;">■</span> Velenje (133)
<span style="color: #9370DB;">■</span> Kočevje (48)	<span style="color: #808000;">■</span> Ptuj (96)	<span style="color: #A52A2A;">■</span> Vrhnika (140)
<span style="color: #A0522D;">■</span> Koper/Capodistria (50)	<span style="color: #3CB371;">■</span> Radlje ob Dravi (101)	<span style="color: #4169E1;">■</span> Zagorje ob Savi (142)
<span style="color: #4682B4;">■</span> Kranj (52)	<span style="color: #008000;">■</span> Radovljica (102)	<span style="color: #FFFF00;">■</span> Žalec (190)
<span style="color: #800080;">■</span> Krško (54)	<span style="color: #DDA0DD;">■</span> Ravne na Koroškem (103)	

Slika 3.



Slika 4.

## 4 Razprava

Primerjava naših rezultatov s podobnimi območji delovne mobilnosti iz tujine kaže na nujnost nadaljnjih raziskav primernih območij delovne mobilnosti na lokalni ravni za Slovenijo. Primeri iz tujine kažejo na precej različne pristope k obravnavi lokalnih območij delovne mobilnosti po metodi CURDS (glej preglednico 2). Menimo, da je smiselno za Slovenijo poiskati takšne parametre, ki bodo po metodi CURDS oblikovali med 22 in 50 lokalnih zaposlitvenih območij. Pri tem je treba – poleg območij delovne mobilnosti pomembnejših zaposlitvenih središč v Sloveniji, torej Ljubljane, Maribora, Celja, Kopra, Kranja, Murske Sobote, Novega mesta, Nove Gorice in Ptuja (Bole 2011) – upoštevati lokalna območja delovne mobilnosti, ki so se v naši študiji izkazala za pomembna (nespremenjena so se oblikovala pri obravnavi obeh v raziskavi uporabljenih nizov parametrov). To so lokalna območja delovne mobilnosti Črnomlja, Idrije, Raven na Koroškem, Rogaške Slatine, Škofje Loke in Tolmina.

*Preglednica 2: Parametri za določitev lokalnih območij delovne mobilnosti po metodi CURDS za izbrane države in v tej raziskave uporabljeni parametri za Slovenijo.*

država	število ODM	minWP	tarWP	minSC	tarSC
Velika Britanija (Coombes in Office for national Statistics 2015)	228	3.500	25.000	0,667	0,750
Češka (Klapka s sodelavci 2014)	104	10.000	50.000	0,600	0,700
Nova Zelandija (Papps in Newell 2002)	140	2.000	17.700	0,750	0,885
Belgija (Persyn in Torfs 2011)	11	3.500	20.000	0,667	0,750
Italija (Cruciani in Franconi 2014)	611	1.000	10.000	0,600	0,750
Finska (Palttila 2017)	40	3.000	40.000	0,667	0,900
Slovenija	22	5.000	10.000	0,600	0,750
	50	4.000	8.000	0,333	0,667

## 5 Sklep

V prispevku smo po metodi CURDS modelirali lokalna območja delovne mobilnosti za Slovenijo za leto 2016. Eurostat (2017) predlaga spremljanje območij delovne mobilnosti za analizo trga dela ter za izvedbo različnih – predvsem gospodarskih – analiz na lokalni ravni, katerih rezultati pripomorejo k bolj smotrnemu in učinkovitemu prostorskemu in tudi podrobnemu urbanističnemu načrtovanju prostora.

Metoda CURDS členi obravnavan prostor glede na moč povezave delovne mobilnosti med osnovnimi prostorskimi enotami ter glede na minimalno in ciljno samozadostnost in število delovno aktivnega prebivalstva v območju delovne mobilnosti. Modeliranje lokalnih območij delovne mobilnosti Slovenije s parametri, ki so v literaturi pogosto predlagani, je določilo 22 lokalnih območij delovne mobilnosti. Z ustrezno spremembo parametrov smo modelirali 50 lokalnih območij delovne mobil-

nosti oziroma lokalnih zaposlitvenih sistemov, kot so jih poimenovali in zamejili za Slovenijo za leto 2002 raziskovalci Pichler Milanović in sodelavci (2008).

Omejitve naše raziskave se kaže predvsem v modeliranju območij delovne mobilnosti s podatki iz Statističnega registra delovno aktivnega prebivalstva (SRDAP), za katerega sta Gabrovec in Bole (2009) ugotovila nekatere napake v navedbi kraja bivanja in kraja dela.

V nadaljnjih raziskavah je smiselno raziskati spreminjanje obsega in števila območij delovne mobilnosti pri enakih parametrih v času. Smiselno pa bi bilo tudi raziskati vpliv različno velikih osnovnih prostorskih enot (občin v Sloveniji) na rezultate modeliranja območij delovne mobilnosti po metodi CURDS.

*ZAHVALA: To delo je sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državne proračuna, v okviru raziskovalnega programa »Geoinformacijska infrastruktura in trajnostni prostorski razvoj Slovenije« (P2-0227; 2018–2023).*

## 6 Viri in literatura

- 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. DOI: <https://doi.org/10.3986/AGS51104>
- Casado-Díaz, J. M., Coombes, M. G. 2011: The delineation of 21st century local labour market areas: a critical review and a research agenda. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* 57-7.
- Coombes, M. G., Bond, S. 2008: Travel-to-Work Areas: the 2007 review. Office for National Statistics, London. Medmrežje: [http://www.istat.it/it/files/2014/12/final\\_TTWA\\_report.doc](http://www.istat.it/it/files/2014/12/final_TTWA_report.doc) (20. 11. 2017).
- Coombes, M. G., Dixon, J. S., Goddard, J. B., Openshaw, S., Taylor, P. J. 1979: Daily urban systems in Britain: from theory to practice. *Environment and Planning A* 11-5.
- Coombes, M. G., Dixon, J. S., Goddard, J. B., Openshaw, S., Taylor, P. J. 1982: Functional regions for the population census of Great Britain. *Geography and the Urban Environment. Progress in Research and Applications* 5.
- Coombes, M. G., Green, A. E., Openshaw, S. 1986: An efficient algorithm to generate official statistical reporting areas: The case of the 1984 travel-to-work-areas revision in Britain. *Journal of the Operational Research Society* 37-10.
- Coombes, M. G., Office for National Statistics 2015: Travel to Work Areas: Research undertaken with and for the Office for National Statistics. Newcastle University. Medmrežje: <http://www.ncl.ac.uk/media/wwwnclacuk/curds/files/RR2015-05.pdf> (11. 09. 2017).
- Cruciani, S., Franconi, L. 2014: Labour Market Areas. Year 2011. Istat. Medmrežje: <https://circabc.europa.eu/sd/a/79635d40-dcc1-4928-b304-ccc66de81a9/Labour%20Market%20Areas%20-%202017%20Dec%202014%20-%20Full%20text.pdf> (20. 11. 2017).
- Delovno aktivno prebivalstvo (brez kmetov) po občinah prebivališča in občinah delovnega mesta po spolu, občine, Slovenija, letno, 2017. Pregled po občinah. Ljubljana, Statistični urad Republike Slovenije. Medmrežje: [http://pxweb.stat.si/pxweb/Dialog/varval.asp?ma=0723405S&ti=&path=../Database/Dem\\_soc/07\\_trg\\_dela/05\\_akt\\_preb\\_po\\_regis\\_virih/10\\_07234\\_delovne\\_migracije/&lang=2](http://pxweb.stat.si/pxweb/Dialog/varval.asp?ma=0723405S&ti=&path=../Database/Dem_soc/07_trg_dela/05_akt_preb_po_regis_virih/10_07234_delovne_migracije/&lang=2) (15. 8. 2017).
- Drobne, S. 2016: Model vrednotenja števila in območij funkcionalnih regij. Doktorska disertacija, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Ljubljana. Medmrežje: <https://repozitorij.uni-lj.si/Dokument.php?id=97829&lang=slv> (20. 11. 2017).
- Eurostat 2017: Labour Market Areas. Medmrežje: [https://ec.europa.eu/eurostat/cros/content/labour-market-areas\\_en](https://ec.europa.eu/eurostat/cros/content/labour-market-areas_en) (17. 6. 2017).

- Franconi, L., D'Alò, M., Ichim, D. 2016: Istat implementation of the algorithm to develop Labour Market Areas. Technical Report. Istat. Medmrežje: <https://www.istat.it/en/files/2016/03/Description-of-the-LabourMarketAreas-algorithm.pdf> (17. 6. 2017).
- Franconi, L., Ichim, D., D'Alò, M., Cruciani, S. 2016. Guidelines for Labour Market Area delineation process: from definition to dissemination. Istat. Medmrežje: [https://ec.europa.eu/eurostat/cros/system/files/guidelines\\_for\\_lmas\\_production08082017\\_rev300817.pdf](https://ec.europa.eu/eurostat/cros/system/files/guidelines_for_lmas_production08082017_rev300817.pdf) (27. 10. 2017).
- Gabrovec, M., Bole, D. 2009: Dnevna mobilnost v Sloveniji. Georitem 11. Ljubljana.
- Klapka, P., Halás, M., Erlebach, M., Tonev, P., Bednář, M. 2014: A multistage agglomerative approach for defining functional regions of the Czech Republic: The use of 2001 commuting data. Moravian Geographical Reports 22-4. DOI: <https://doi.org/10.1515/mgr-2014-0019>
- LMA 2017: LabourMarketAres. Medmrežje: <https://cran.r-project.org/web/packages/LabourMarketAreas/index.html> (15. 10. 2017).
- Palttila, Y. 2017: Labour Market Areas. Final Technical report of the Finnish project. Statistics Finland. Medmrežje: [https://ec.europa.eu/eurostat/cros/system/files/lma\\_final\\_technical\\_report\\_finland.pdf](https://ec.europa.eu/eurostat/cros/system/files/lma_final_technical_report_finland.pdf) (27. 10. 2017).
- Papps, K. L., Newell, J. O. 2002: Identifying functional labour market areas in New Zealand: A reconnaissance study using Travel-to-Work data. Discussion Paper 443. Medmrežje: <http://ftp.iza.org/dp443.pdf> (27. 10. 2017).
- Persyn, D., Torfs, W. 2011: Functional labour markets in Belgium: evolution over time and intersectoral comparison. Medmrežje: [https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/354540/2/2011Vives-DP17\\_functionallabormarketsinbelgium.pdf](https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/354540/2/2011Vives-DP17_functionallabormarketsinbelgium.pdf) (17. 6. 2017).
- Pichler Milanović N., Cigale, D., Krevs, M., Gostinčar, P., Černe, A., Zavodnik Lamovšek, A., Žaucer, T., Sitar, M., Drozg, V., Pečar, J. 2008: Strategy for a Regional Polycentric Urban System in Central-Eastern Europe Economic Integrating Zone. RePUS project, Final report. University of Ljubljana, Faculty of Arts. Ljubljana.
- Smart, M. W. 1974: Labour market areas: Uses and definition. Progress in Planning 2-4.
- Van der Laan, L., Schalke, R. 2001: Reality versus policy: The delineation and testing of local labour market and spatial policy areas. European Planning Studies 9-2.

# ANALIZA POTOVALNIH VZORCEV UPORABNIKOV MESTNEGA POTNIŠKEGA PROMETA V LJUBLJANI

**Simon Koblar**

Urbanistični inštitut Republike Slovenije  
simon.koblar@uirsi.si

**Matej Žebovec**

matej.zebovec@gmail.com

UDK: 911.3:656.025.2(497.4Ljubljana)

## IZVLEČEK

### **Analiza potovalnih vzorcev uporabnikov mestnega potniškega prometa v Ljubljani**

V prispevku so predstavljeni rezultati analize potovalnih vzorcev uporabnikov mestnega potniškega prometa v Ljubljani. Za razliko od preteklih raziskav, v katerih so se podatki zbirali z anketiranjem uporabnikov, smo analizirali podatke o validacijah mestne kartice Urbana. Ker se v postopku validacije zabeleži le vstopna postaja, smo s pomočjo posebnega programskega orodja določili izstopne postaje. Izračun je potekal po že preverjenem algoritmu, ki daje kakovostne rezultate. Na podlagi teh podatkov smo analizirali potovalne vzorce med conami, obremenjenost cestnih odsekov in postajališč ter potovanja opravljena s prestopanjem. Na podlagi izvedenih analiz smo podali nekaj predlogov izboljšav omrežja javnega potniškega prometa.

## KLJUČNE BESEDE

Ljubljana, potovalni vzorci, javni potniški promet, trajnostna mobilnost, algoritem, mestna kartica Urbana

## ABSTRACT

### **Analysis of travel patterns of urban passenger transport users in Ljubljana**

The article presents the results of analyzing travel patterns of urban passenger traffic users in Ljubljana. Unlike previous surveys in which data was collected through questionnaires, we analyzed fare data from Urbana city card. Since only the boarding station is recorded, we calculated alighting stations using a special software. The calculation was carried out according to an already verified algorithm that yields good results. With this data we analyzed travel patterns between zones, number of passengers on road sections and bus stops, and the trips made by transfers. We also made some propositions for passenger transport improvements, based on beforementioned analyzes.

## KEY WORDS

Ljubljana, travel patterns, public passenger transport, sustainable mobility, algorithm, Urbana city card

## 1 Uvod

Raziskave potovalnih navad so pomemben element prometnega načrtovanja, kar velja tudi za javni potniški promet (v nadaljevanju JPP) (Wang 2010). V preteklosti so se raziskave potovalnih navad opravljale z anketiranjem prebivalcev, saj ni bilo na voljo drugih ustreznih podatkov. Na tak način so narejene tudi analize potovalnih navad v Ljubljanski urbani regiji (LUR) (Dalla Valle s sodelavci 2003; Klemenčič s sodelavci 2014) in celotni Sloveniji (Pretnar s sodelavci 2016). Glavna omejitev takih raziskav so visoki stroški, ki so povezani z anketiranjem, zato so po navadi narejene na (pre)majhnem vzorcu. Mnogokrat pa je vprašljiva tudi veljavnost anketnih vprašalnikov, ki ne odsevajo nujno dejanskega stanja. Raziskava v LUR je na primer zajela le 2000 anketirancev, kar ne zadošča za podrobnejše analize rezultatov, na kar so opozorili tudi avtorji raziskave (Klemenčič s sodelavci 2014).

Zaradi pomanjkljivosti tovrstnih raziskav in pojava elektronskih plačilnih sistemov, ki zabeležijo raznovrstne informacije o potovanju, so se razvile nove metode izračuna potovalnih vzorcev uporabnikov JPP. Te temeljijo na podatkih, ki se zabeležijo ob plačilu vožnje ter v večini primerov vključujejo čas, lokacijo in linijo vstopa. Prednosti teh raziskav so nižji stroški, možnost vključitve večjega deleža uporabnikov in enostavna ponovitev (Kim s sodelavci 2014), saj se da potovalne vzorce stroškovno učinkovito rekonstruirati za različne dneve, vremenske situacije, letne čase, različne skupine uporabnikov in podobno (Morency, Trépanier in Agard 2007). Vendar pa nam ta metoda omogoča le analizo potovalnih navad uporabnikov JPP. Ker se v večini plačilnih sistemov ne beleži informacije o izstopu potnikov, kar velja tudi za mestno kartico Urbana, ki se uporablja v mestnem prometu Ljubljanskega potniškega prometa – LPP (Šmajdek 2011), je podatek o izstopni postaji potrebno naknadno pridobiti. Za mestne linije LPP je tako analizo izdelal Koren (2016). Žal metodologija ni jasno opisana, tako da ne moremo oceniti kakovosti rezultatov. Poleg tega so bile izstopne postaje določene le za 3 % analiziranih potovanj (Koblar 2017), zato rezultati niso primerni za izvajanje podrobnejših analiz. Namen pričujočega prispevka je analiza potovalnih vzorcev uporabnikov LPP, pri tem pa želimo izpolniti naslednje cilje: izračunati izstopna postajališča uporabnikov LPP, analizirati potovalne vzorce med conami, analizirati obremenjenost cestnih odsekov in postajališč ter analizirati potovanja opravljena s prestopanjem.

## 2 Metode dela

Za izračun potovalnih vzorcev uporabnikov LPP smo uporabili podatke validacij kartice Urbana (2016). Pri izračunu izstopnih postaj smo uporabili že preverjen algoritem (Alsger s sodelavci 2016), ki je bil izdelan z dopolnjevanjem starejših algoritmov (Zhao 2004; Zhao, Rahbee in Wilson 2007; Lu 2008; Wang 2010; Li s sodelavci 2011; Wang, Attanucci in Wilson 2011; Tao s sodelavci 2014). Izstopne postaje smo določili za izbran dan. Analiza za daljše časovno obdobje bi sicer podala še nekaj dodatnih ugotovitev, vendar bi bila zahtevnejša za izvedbo (Langlois, Koutsopoulos in Zhao 2016).

Pri predhodnem urejanju podatkov smo uporabili programsko opremo MySQL. Izračun izstopnih postaj smo naredili s posebnim programskim orodjem, napisanem v programskem jeziku PHP. Prostorski prikazi in analize pa so bili narejeni s programsko opremo ESRI.

Pred izvedbo analize smo pripravili naslednje vhodne podatke:

- podatke o validacijah kartice Urbana za 18. 5. 2016 (Validacije kartice Urbana 2016);
- matriko razdalj med postajališči;
- podatkovno bazo voznih redov (LPP – Podatkovna baza ... 2016).

Podatke o validacijah smo pridobili na LPP (Validacije kartice Urbana 2016). Iz njih smo izbrali podatke za izbran dan, in sicer sredo, 18. 5. 2016. Takrat je bil že odprt prenovljen južni del Slovenske ceste, ni bilo padavin, opravljeno pa je bilo povprečno število potovanj. Zato lahko sklepamo, da gre za tipičen delavnik med šolskim letom. Ključni podatki, ki jih vključuje podatkovna baza, so čas in po-

stajališče vstopa ter avtobusna linija. Poleg tega se pri validaciji zabeleži tudi identifikacijska številka kartice. Ta dan je bilo opravljenih 142.181 validacij. Iz baze smo izločili validacije, ki niso vsebovale ustreznih podatkov. Nekatere so bile opravljene na medkrajevnih linijah, zato jih ni bilo v voznem redu mestnega JPP, pri nekaterih je bila napačno zabeležena linija ali postajališče. Ker je izstopno postajo mogoče določiti le za potnike, ki so v tistem dnevu opravili več kot eno vožnjo, smo iz baze izločili še podatke za uporabnike z le eno validacijo. Teh je bilo 17.614. Osnovne pogoje za vključitev v analizo je tako izpolnjevalo 113.985 validacij oziroma 80,2 % vseh validacij (Koblar in Žebovec 2017).

Podatkovno bazo voznih redov smo pridobili v zapisu *General Transit Feed Specification*. Baza poleg voznih redov vključuje tudi prostorske podatke o postajališčih in linijah ter zaporedje postajališč za posamezne linije. Ti podatki so potrebni pri določitvi izstopnih postaj, za kar le vozni redi po postajališčih ne bi zadostovali.

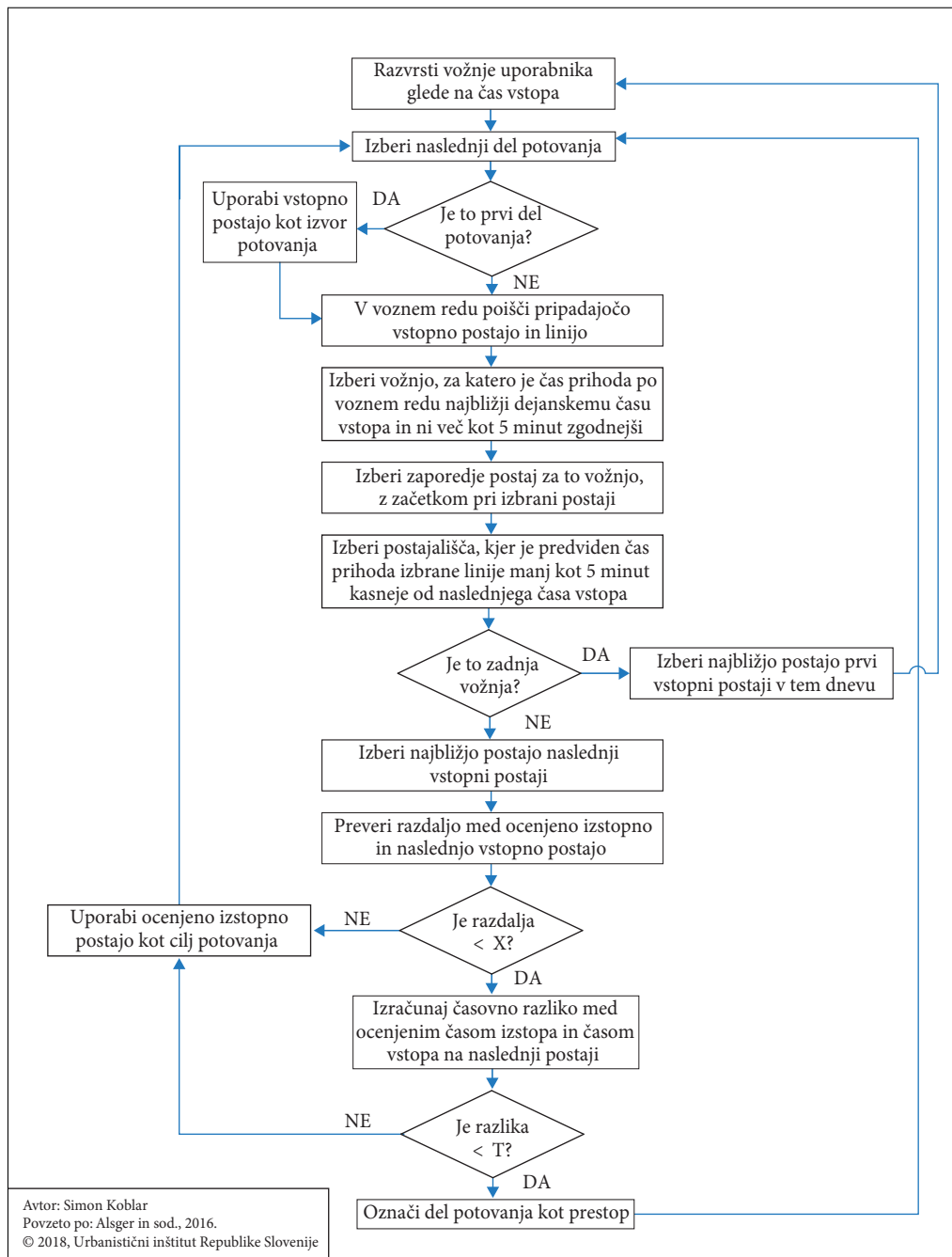
Za določitev prestopov in zadnje izstopne postaje smo potrebovali dve matriki razdalj med postajališči. V analizo smo vključili 840 avtobusnih postajališč, na katerih ustavljajo mestne in integrirane mestne linije LPP, ki smo jih pridobili iz podatkovne baze voznih redov (LPP – Podatkovna baza ... 2016). Iz baze smo izločili 9 postajališč na liniji 52, ki pelje do Črnega vrha. Za določanje prestopov smo izdelali matriko z razdaljami do 800 m med postajališči, ki smo jo izdelali na podlagi omrežja pešpoti (Kozina in Tiran 2016), ki se je izkazalo za kakovostno, kar omogoča veliko natančnejši izračun v primerjavi z zračno oddaljenostjo (Kozina 2010). Ker je proučevano območje obsegalo tudi območja zunaj uporabljenega omrežja pešpoti, smo ga na teh območjih dopolnili s podatki iz baze OpenStreetMap (2016), katastra gospodarske javne infrastrukture (2016) in digitalnih ortofoto posnetkov. Ker mora matrika razdalj med postajališči za določitev zadnje izstopne postaje vključevati vsa postajališča, bi bil izračun razdalj po omrežju pešpoti preveč zamuden. Zato smo zaradi poenostavitve to matriko izdelali na podlagi zračne (evklidske) razdalje med postajališči.

Po pripravi vhodnih podatkov je sledil izračun izstopnih postaj. Postopek je opisan na sliki 1. Algoritem analizira zaporedne vožnje iste osebe in jih razvršča v potovanja. Eno potovanje je lahko sestavljeno iz več voženj z vmesnimi prestopi. Potencialne izstopne postaje se določi na podlagi voznega reda, iz katerega se izbere potencialna izstopna postajališča, glede na vstopno linijo. Od izbranih postajališč se za izstopno postajališče določi tisto, ki je najbližje naslednji vstopni postaji. Če je naslednja vstopna postaja oddaljena manj kot 800 m (parameter X) in je vmes preteklo manj kot 60 minut (parameter T), se vožnjo označi kot prestop, v nasprotnem primeru pa kot samostojno potovanje. Če je šlo za prestop, algoritem nadaljuje toliko časa, dokler ne pride do zadnje vožnje v potovanju, ki je lahko tudi zadnja vožnja v dnevu. Za zadnjo vožnjo v dnevu se kot izstopno postajo izbere postajo, ki je najbližje vstopni postaji prve vožnje v dnevu.

S pomočjo algoritma je bila izstopna postaja določena za 110.069 validacij, to je za 96,5 % validacij, ki so izpolnjevale pogoje za vključitev v analizo. Za 3916 validacij pa je ni bilo mogoče določiti (Koblar in Žebovec 2017). Rezultat analize je seznam voženj z dodanim podatkom o izstopnem postajališču ter zaporedni številki vožnje in potovanja posameznega uporabnika. S temi podatki smo izvedli nekaj prostorskih analiz.

### 3 Potovalni vzorci uporabnikov LPP

Za analizo potovalnih vzorcev smo uporabili enaka območja, kot so bila uporabljena v analizi potovalnih navad v LUR (Klemenčič s sodelavci 2014), kar nam je omogočilo natančnejšo primerjavo rezultatov. Na sliki 2 je prikazano število potovanj znotraj parov con v obe smeri, pri čemer se za eno potovanje upošteva pot od začetne do končne postaje, brez vmesnih prestopov. Število potovanj med conami približno sovпада s tistim, ocenjenim v raziskavi potovalnih navad (Klemenčič s sodelavci 2014), le med nekaterimi conami se število potovanj močno razlikuje. Največja razlika je med območjema 2 in 5, kjer smo izračunali 55,1 % manj potovanj, kot je bilo ocenjeno v študiji.

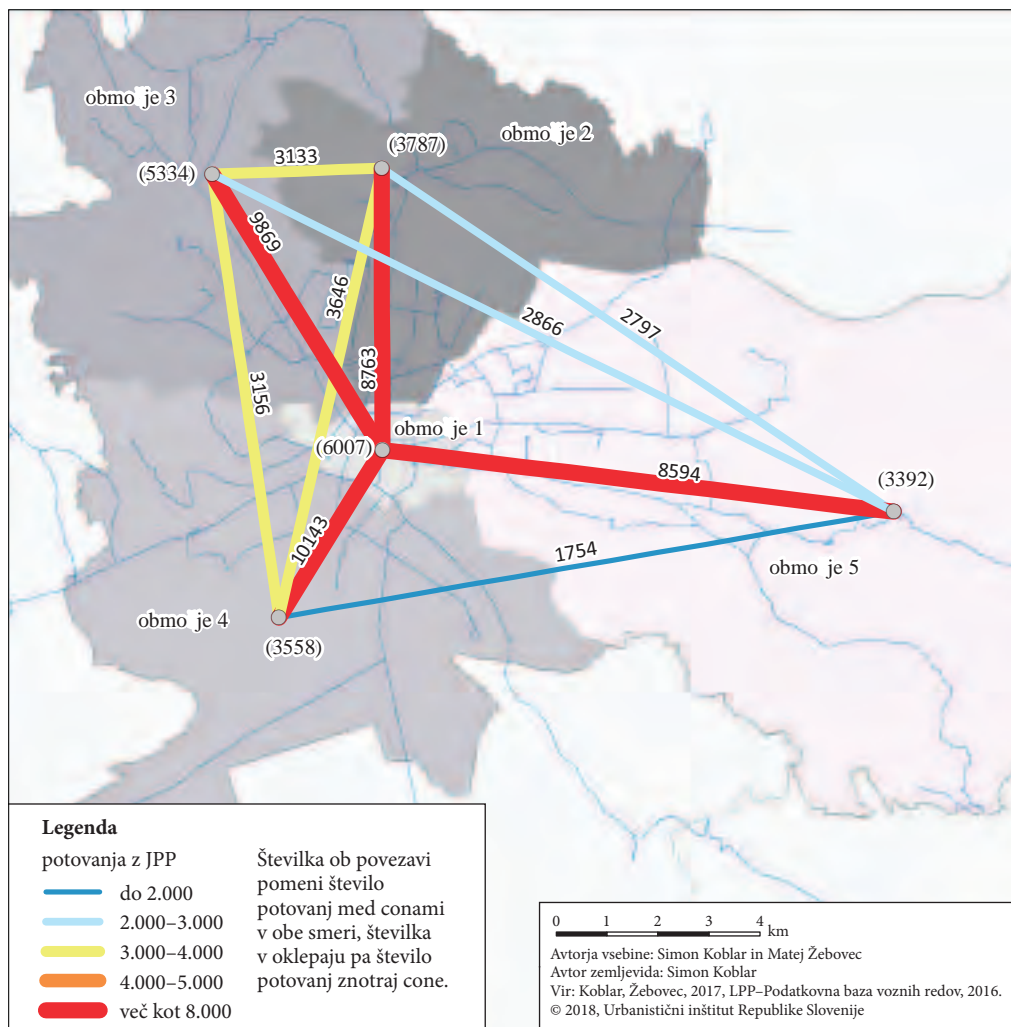


Slika 1: Algoritem za določitev izstopnih postajališč. Parameter  $X$  pomeni oddaljenost med izstopno in naslednjo vstopno postajo. V našem primeru je  $X$  enak 800 m. Parameter  $T$  pomeni čas med izstopom in vstopom. V našem primeru je  $T$  enak 60 minut.



Pričakovano je največ potovanj na in z območja 1, ki obsega širše mestno središče. To je verjetno kombinacija več dejavnikov, in sicer radialne zasnove linij ter koncentracije izobraževalnih ustanov in delovnih mest. Ker smo Mestno občino Ljubljana razdelili na pet razmeroma velikih območij, je veliko potovanj opravljenih znotraj njih. Največ potovanj (6007) je opravljenih znotraj območja 1, zato bi bilo smiselno dostopnost znotraj območja izboljšati z novo krožno linijo.

Za natančnejši vpogled v potovalne vzorce smo analizirali tudi število potovanj med posameznimi pari postajališč. Zanimivo je, da je veliko potovanj opravljenih med postajališči, ki so razmeroma blizu. Največ potovanj (282) je bilo opravljenih med postajališčema Pošta in Bavarski dvor. Med Pošto in Ajdovščino, kjer je razdalja manj kot 200 m, pa je bilo opravljenih 206 potovanj. Če bi se ti uporabniki odločili za hojo med temi postajališči, bi se zmanjšala gneča na avtobusih, ki so ravno v tem delu najbolj obremenjeni. Podatki omogočajo tudi analizo potovalnih vzorcev na posameznih linijah in vpogled v zasedenost avtobusov, kar bi bila lahko podlaga za prilaganje vozniških redov.



Slika 2: Število potovanj z LPP med območji dne 18. 5. 2016.

## 4 Število potnikov po avtobusnih postajališčih in cestnih odsekih

Prikaz obremenjenosti postajališč in cestnih odsekov s potniki na mestnih linijah LPP, nam omogoča podrobno prostorsko analizo razporeditve uporabnikov LPP, ter primerjavo z ostalimi potovalnimi načini (slika 3). Podatki o vstopih in izstopih po postajališču kažejo realno sliko obremenjenosti postajališč, kar bi lahko upoštevali pri ureditvi postajališč, s čimer bi zagotovili ustrezno opremljenost glede na število uporabnikov. To se na primer kaže na postajališču Živalski vrt, kjer ni urejenega niti nadstreška, dnevno pa na njem v smeri proti centru vstopi ali izstopi 866 potnikov.

Za izračun obremenjenosti po cestnih odsekih smo sešteli število potnikov na vseh linijah, ki vozijo po posameznem cestnem odseku. Največ potnikov je na Slovenski cesti med Gosposvetsko ulico in Bavarskim dvorom – več kot 28.000, okrog 1.000 manj pa med postajališčema Pošta in Ajdovščina. Veliko število potnikov je tudi na Celovski in Dunajski cesti, kar opravičuje ločen rumeni pas za avtobuse, katerega bi bilo glede na število potnikov z JPP smiselno uvesti še na nekaterih drugih cestah (na primer Tržaška, Celovška in Dunajska cesta v smeri iz centra ter Aškerčeva, Zoisova in Karlovska cesta v eno smer).

Na podlagi podatkov o številu vstopov na postajališčih ob linijah lahko določimo predele, kjer je potek linij neustrezen. Nekateri deli linij so speljani na način, da zajamejo čim večje število postajališč, namesto da bi sledile najkrajši povezavi. Ponekod se tako mora veliko število potnikov voziti po daljši poti, na vmesnem postajališču pa vstopi le malo potnikov. Tako je več potnikov prizadetih zaradi daljše voznje, kot jih ima korist od bližine ponudbe. Neučinkovit je na primer potek linije 9, ko iz Barjanske zavije na Opekarsko cesto. S tem se pot podaljša za 400 m, potovalni čas pa za vsaj 3 minute. Proti centru se je peljalo več kot 500 potnikov, na postajališču Opekarska pa jih je vstopilo le 43, v smeri proti parkirišču P+R Barje pa je od 400 potnikov vstopilo ali izstopilo le 46. Poleg tega je postajališče Opekarska dostopno tudi z drugimi linijami (Koblar 2017).

## 5 Delež potovanj s prestopom

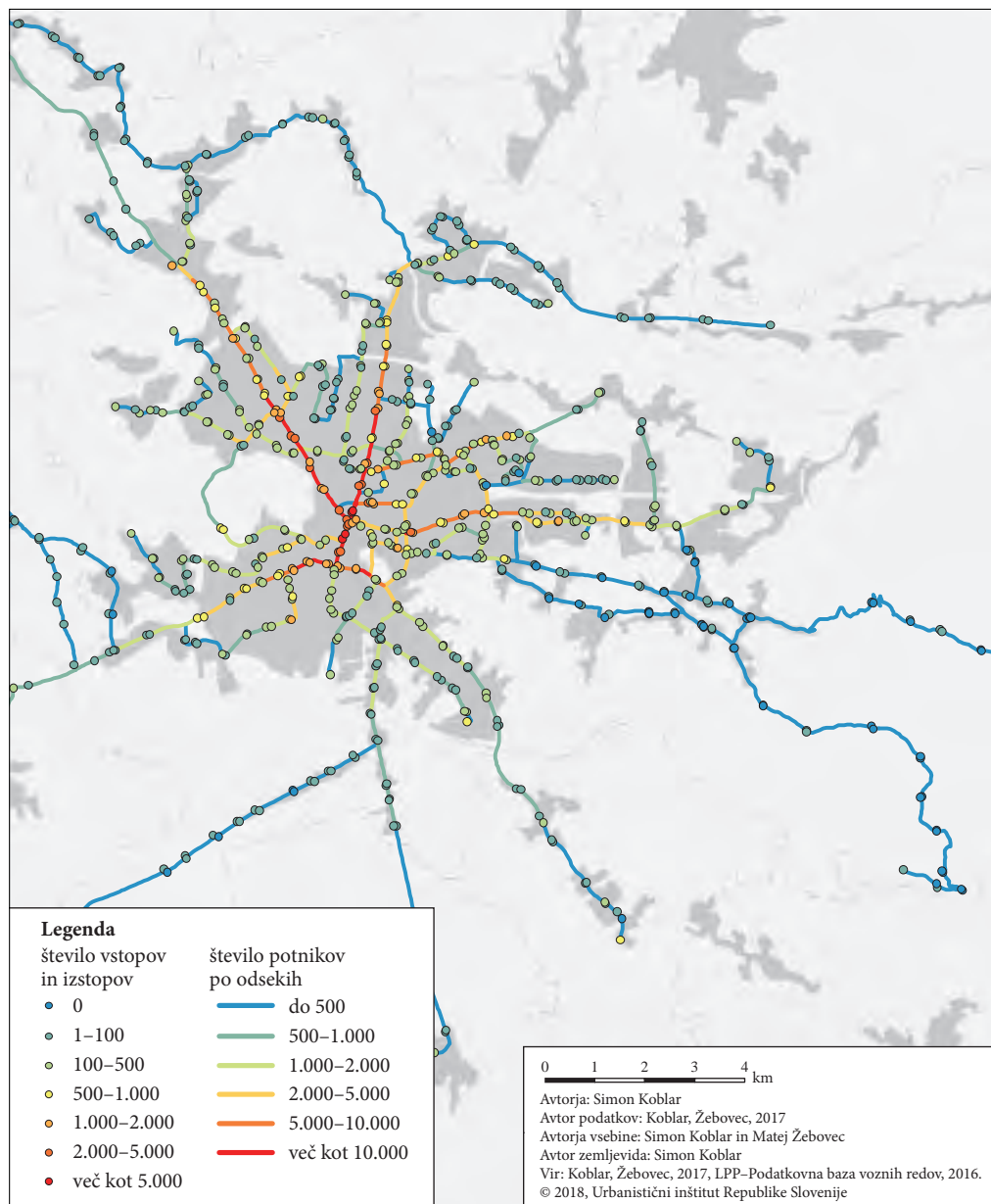
Potovanja s prestopanjem so navadno nezaželena (Mees 2010). Tudi omrežje linij v Ljubljani je bilo zasnovano tako, da bi bilo prestopov čim manj. Zanimalo nas je, kolikšen delež potovanj v mestnem prometu LPP je opravljen s prestopi in na katerih postajališčih jih je največ.

V sredo, 18. 5. 2016 je bilo s prestopi opravljenih 24.747, kar predstavlja 22,0 % vseh potovanj. Nekatera potovanja so bila opravljena z večjim številom prestopov, skupno je bilo tako opravljenih 30.390 prestopov. Glede na strukturo omrežja, ki ni najbolj naklonjena prestopanju, je to razmeroma veliko. Večina prestopov (20.000) je bila opravljena po manj kot 15 minutah čakanja, saj prestopi z daljšim časom čakanja za potnike niso tako privlačni. Največ prestopov je bilo na postajališčih na Slovenski cesti, kjer je ponudba JPP najboljša. Samo na Bavarskem dvoru je bilo opravljenih 6600 prestopov, to je 21,7 % vseh prestopov. Potniki so torej pripravljene prestopati predvsem na postajališčih, kjer lahko prestopajo med večjim številom bolj frekventnih linij. Ker na teh postajališčih prihaja do preobremenjenosti, bi bilo smiselno kakovostne prestopne točke uvesti še na nekaterih drugih postajališčih. Ob izboljšanju razmer za prestopanje bi se število potovanj s prestopi lahko še povečalo, kar predstavlja potencial za drugačno organizacijo omrežja. To ne bi več temeljilo zgolj na zagotavljanju neposrednih povezav med četrtinami skupnostmi, temveč bi se osredotočilo na boljše povezanost celotnega omrežja, kar posledično pomeni večji vpliv prestopanja.

## 6 Sklep

Analiza potovalnih vzorcev s pomočjo podatkov validacij mestne kartice Urbana omogoča dober vpogled v obstoječe potovalne navade uporabnikov LPP in lahko služi kot dopolnilo anketnim raziskavam

potovalnih navad, ali pa jih popolnoma nadomesti. Rezultati pripomorejo k boljšemu razumevanju potovalnih navad uporabnikov LPP. Poleg predstavljenih prostorskih analiz imajo še širšo možnost uporabe. Do sedaj so bili uporabljeni za snovanje predloga alternativnega omrežja JPP za LUR (Koblar 2017) in vključeni v prometni model širše Ljubljanske urbane regije. Spodbudili so tudi zanimanje zaposlenih v LPP. Predvsem pa so razkrili velik potencial za učinkovitejše načrtovanje in upravljanje omrežja JPP.



Slika 3: Število potnikov na LPP po avtobusnih postajališčih in cestnih odsekih dne 18. 5. 2016.

Seveda velja izpostaviti tudi nekaj slabosti. Ker je bila analiza izvedena za značilen delovni dan v šolskem letu, se lahko potovalni vzorci v drugih delih leta močno razlikujejo. Poleg tega so potovalni vzorci zelo odvisni od trenutnega omrežja linij, z njihovo spremembo pa bi se lahko bistveno spremenili.

S trenutnimi podatki bi bilo smiselno izdelati dodatne prostorske analize, ki bi vključevale matrike potovanj med manjšimi prostorskimi enotami, podrobnejšo časovno analizo za različne dele dneva, primerjavo z ostalimi prometnimi sistemi in podobno. V prihodnje bi bilo za celovito analizo smiselno vključiti tudi podatke validacij iz sistema integriranega javnega potniškega prometa. Tako bi dobili analizo celotnega sistema JPP, kar je pomembno zlasti za preučevanje prestopanj med medkrajevnimi in mestnimi linijami. Analiza validacij za daljše časovno obdobje pa bi omogočala prepoznavo tipičnih vzorcev obnašanja, s pomočjo umetne inteligence pa bi bilo mogoče število potnikov celo napovedovati.

## 7 Viri in literatura

- Alsger, A., Assemi, B., Mesbah, M., Ferreira, L. 2016: Validating and improving public transport origin–destination estimation algorithm using smart card fare data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 68. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2016.05.004>
- Dalla Valle, S., Guzelj, T., Lovrečić, D., Magdevski, Z., Magdevska, S., Vehovar, V., Košak, T., Podešva, V. 2003: Anketa po gospodinjstvih. Raziskava potovalnih navad prebivalcev Ljubljanske regije. Medmrežje: <http://www.ppmol.org/urbanizem5/upload/documents/LJ-Anketa%20po%20gospodinjstvih%20Internet%20Final.pdf> (25. 10. 2016).
- Kataster gospodarske javne infrastrukture, 2016. Geodetska uprava Republike Slovenije. Ljubljana.
- Kim, G., Jeoung, I., Cho, W., Lee, K., Cho, I., Lee, Y. 2014: OLAP-based Analysis on Passengers' Bus Usage Patterns. *International Conference Data Mining, Civil and Mechanical Engineering*. Medmrežje: [http://iieng.org/images/proceedings\\_pdf/2086E0214080.pdf](http://iieng.org/images/proceedings_pdf/2086E0214080.pdf) (15. 10. 2016).
- Klemenčič, M., Lep, M., Mesarec, B., Žnuderl, B. 2014: Potovalne navade prebivalcev v mestni občini Ljubljana in Ljubljanski urbani regiji. Ljubljana. Medmrežje: <https://www.ljubljana.si/assets/Uploads/Potovalne-navade-v-MOL2.pdf> (3. 4. 2018).
- Koblar, S. 2017: Predlog alternativnega omrežja javnega potniškega prometa v Ljubljanski urbani regiji. Magistrsko delo, Filozofska fakulteta Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Koblar, S., Žebovec, M. 2017: Analiza potovalnih vzorcev na mestnih linijah LPP. Elaborat, Urbanistični inštitut Republike Slovenije. Ljubljana.
- Koren, M. 2016: Načrtovanje in optimiranje linij javnega potniškega prometa. Diplomsko delo, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Kozina, J. 2010: Modeliranje prostorske dostopnosti do postajališč javnega potniškega prometa v Ljubljani. *Geografski vestnik* 82-1.
- Kozina, J., Tiran, J. 2016: Omrežje pešpoti v Ljubljani. Podatkovni sloj, Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU. Ljubljana.
- Langlois, G. G., Koutoupoulos, H. N., Zhao, J., 2016: Inferring patterns in the multi-week activity sequences of public transport users. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.12.012>
- Li, D., Lin, Y., Zhao, X., Song, H., Zou, N. 2011: Estimating a transit passenger trip origin-destination matrix using automatic fare collection system. *Database Systems for Advanced Applications*. Berlin. DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-20244-5\\_48](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-20244-5_48)
- LPP – Podatkovna baza voznih redov, 2016. Ljubljanski potniški promet. Ljubljana.
- Lu, D. 2008: Route level bus transit passenger origin-destination flow estimation using apc data: Numerical and empirical investigations. Magistrsko delo, The Ohio State University. Ohio. Medmrežje: [https://etd.ohiolink.edu/etd.send\\_file?accession=osu1228268640&disposition=inline](https://etd.ohiolink.edu/etd.send_file?accession=osu1228268640&disposition=inline) (10. 11. 2016).

- Mees, P. 2010: Transport for suburbia: beyond the automobile age. Medmrežje: [https://www.google.si/url?sa=t&rct=j&q=&resrc=s &source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKewjq6aO-4nRAhUXN1AKHdQSCFsQFggfMAE&url=http%3A%2F%2Fs550ee9e7fd146a90.jimcontent.com%2Fdownload%2Fversion%2F1438000012%2Fmodule%2F5399196768%2Fname%2FTransport\\_for\\_Suburbia\\_\\_Beyond\\_the\\_Automobile\\_Age.pdf&usq=AFQjCNFEq348E\\_wbfS-Foe6OIf\\_7n-Yfj2A&sig2=9He6H2a3iA8bi-QYQNg3aw&bvm=bv.142059868,d.ZWM](https://www.google.si/url?sa=t&rct=j&q=&resrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKewjq6aO-4nRAhUXN1AKHdQSCFsQFggfMAE&url=http%3A%2F%2Fs550ee9e7fd146a90.jimcontent.com%2Fdownload%2Fversion%2F1438000012%2Fmodule%2F5399196768%2Fname%2FTransport_for_Suburbia__Beyond_the_Automobile_Age.pdf&usq=AFQjCNFEq348E_wbfS-Foe6OIf_7n-Yfj2A&sig2=9He6H2a3iA8bi-QYQNg3aw&bvm=bv.142059868,d.ZWM) (23. 12. 2016).
- Morency, C., Trépanier, M., Agard, B. 2007: Measuring transit use variability with smart-card data. *Transport Policy* 14-3. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.01.001>
- OpenStreetMap – podatkovni sloj, 2016. Medmrežje: <http://download.geofabrik.de/europe/slovenia.html> (20. 4. 2016).
- Pretnar, G., Trošt, D., Naglič, A., Zgonec, K., Ružič, L., Nose, M., Hohkraut, T., Rakuša, R., Milanković, M. 2016: Priprava in izvedba ankete po gospodinjstvih o prometnih navadah prebivalcev na nivoju Republike Slovenije. Končno poročilo, Ministrstvo za infrastrukturo Republike Slovenije. Ljubljana.
- Šmajdek, J. 2011: Uvajanje sodobnega plačilnega sistema v javnem mestnem potniškem prometu. Specialistično delo, Fakulteta za pomorstvo in promet Univerze v Ljubljani. Koper.
- Tao, S., Corcoran, J., Mateo-Babiano, I., Rohde, D. 2014: Exploring Bus Rapid Transit passenger travel behaviour using big data. *Applied Geography* 53. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.06.008>
- Validacije kartice Urbana, 2016. Ljubljanski potniški promet. Ljubljana.
- Wang, W. 2010: Bus passenger origin-destination estimation and travel behavior using automated data collection systems in London, UK. Diplomsko delo, Massachusetts Institute of Technology. Massachusetts. Medmrežje: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/60814> (12. 10. 2016).



## PROMETNE NESREČE V OBČINI MARIBOR OB RAZLIČNIH VREMENSKIH SITUACIJAH

**dr. Danijel Ivajnsič**

Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko  
dani.ivajnsic@um.si

**dr. Igor Žiberna**

Univerza v Mariboru, Filozofska fakulteta  
igor.ziberna@um.si

UDK: 614.86:551.515(497.4Maribor)

### IZVLEČEK

#### **Prometne nesreče v občini Maribor ob različnih vremenskih situacijah**

V prispevku se osredotočamo na strukturo prometnih nesreč v občini Maribor ob vremensko pogojenih (dež, sneg, megla) in nepogojenih (jasno, oblačno, ostalo) okoliščinah. Obravnavamo strukturo in prostorsko razporeditev žarišč prometnih nesreč. V običajnih vremenskih razmerah se je v obdobju 2006–2016 zgodilo 88,1 % prometnih nesreč, 9,6 % se jih je zgodilo v deževnem vremenu, 1,9 % v snežnih razmerah, 0,4 % pa v megli. Tipična prometna nesreča v neugodnih vremenskih razmerah se je zgodila ob deževnem vremenu, v popoldanski prometni konici med 14. in 17. uro, v naselju z uličnim sistemom ali na hitri cesti. Prometne nesreče v snegu in megli tvorijo prostorske zgostitve na drugačnih lokacijah cestnega omrežja. Prostorski vzorec v megli se najbolj razlikuje od ostalih vremenskih situacij.

### KLJUČNE BESEDE

občina Maribor, prometne nesreče, prometno omrežje, SANET, vremenske okoliščine

### ABSTRACT

#### **Weather conditions and road accidents in Maribor**

This study focuses on the structure of road accidents in the municipality of Maribor by considering weather-dependent (rain, snow, fog) and weather-independent (clear, cloudy, other) conditions. We discuss the structure and the spatial distribution of road accidents. In the period 2006–2016, 88.1% of road accidents happened in normal weather conditions, 9.6% occurred in rainy weather, 1.9% in snow conditions, and 0.4% in fog. A typical road accident in adverse climatic conditions occurred in rainy weather, in the afternoon traffic peak between 2 pm and 5 pm, in an urban street system or on a highway. Road accidents occurring in snow and in fog form spatial clusters at other locations of the road network. The spatial pattern in fog highly differs from other weather situations.

### KEY WORDS

Maribor municipality, road accidents, road network, SANET, weather conditions

## 1 Uvod

Cestni promet ostaja ena od najpomembnejših človekovih dejavnosti. Ena od bistvenih komponent učinkovitosti cestnega prometa je varnost. Slednja je rezultat trikotnika, ki ga oblikujejo cestna infrastruktura, vozilo in človek (Perrels s sodelavci 2015; Yannis in Karlaftis 2010). Socialna, psihološka in finančna škoda, ki nastaja ob prometnih nesrečah na svetovni ravni je ogromna. Po podatkih Svetovne zdravstvene organizacije letno zaradi prometnih nesreč umre 1,24 milijona ljudi (WHO global ... 2013).

Vremenske okoliščine imajo značilen vpliv na število prometnih nesreč, ki je različen glede na tip ceste (avtoceste, urbane ali ruralne ceste) (Bergel-Hayat s sodelavci 2013). Frekvenca prometnih nesreč je sočasno odvisna tudi od mobilnosti, na katero pa ima vreme bodisi pozitiven ali negativen vpliv (Bergel-Hayat s sodelavci 2013). Fridström s sodelavci (1995) in Hermans s sodelavci (2006) ugotavljajo, da vremenske okoliščine lahko pojasnijo 5 % variabilnosti frekvenca prometnih nesreč na mesečni ravni. Brodsky in Hakkert 1988 sta dokazala, da je vremenski tip z dežjem glavni meteorološki pojasnjevalni dejavnik tveganja za prometno nesrečo. V Franciji se je v obdobju 1990–2000 zgodilo 14 % prometnih nesreč v deževnem vremenu in le 1 % v vremenskih okoliščinah z meglo, snegom, točo ali poledico (Aron s sodelavci 2007). Dež ima lahko na frekvenco prometnih nesreč tudi nasproten vpliv. Karlaftis in Yannis (2010) ugotavljata, da se je ponekod število prometnih nesreč ob deževnem vremenu zmanjšalo kar razlagata s preventivnim vedenjem voznikov in hkratnem zmanjšanju izpostavljenosti za nesrečo. Študije, ki obravnavajo časovno spremenljivost učinkov padavin na prometne nesreče izpostavljajo, da se učinek padavin na število prometnih nesreč zmanjša, če so bile padavine prisotne že dan prej (Eisenberg 2004). Takšen rezultat je posledica prilagoditve voznikov na dane razmere. Te ugotovitve dodatno potrjujejo še Brijs, Karlis in Wets (2008), ki dokazujejo povezanost dolžine sušnega obdobja s povečanim številom prometnih nesreč ob ponovnem nastopu dežja.

Navedeno priča o tem, da so raziskave, ki obravnavajo vpliv vremenskih okoliščin na število in vzorec prometnih nesreč, pomembne pri pripravi ustreznih omilitvenih ukrepov in strateških načrtov za povečanje prometne varnosti. Pri tem imajo pomembno vlogo geografski informacijski sistemi, ki omogočajo prostorsko in časovno identifikacijo žarišč prometnih nesreč (*ang. Hot Spots, Black Spots, Death Spots*) (Aguero-Valverde in Jovanis 2006; Erdogan 2009; Plug, Xia in Caulfield 2011; Ivan in Haidu 2012; Ivan s sodelavci 2015; Vandenbulcke, Thomas in Intpanis 2014; Ivajnsič in Žiberna 2017). V literaturi najdemo številne študije (Li, Zhu in Sui 2007; Erdogan s sodelavci 2008; Montella 2010; Yu s sodelavci 2014), ki obravnavajo zaznavanje žarišč prometnih nesreč. Najpogosteje uporabljena metoda ostaja določanje Kernerjeve gostote vendar pri tem sedaj lahko upoštevamo kompleksnost cestnega omrežja (Okabe, Satoh in Sugihara 2009).

V prispevku obravnavamo prometne nesreče v občini Maribor pri čemer ugotavljamo razlike med tistimi dogodki, ki so se pripetili ob vremensko pogojenih (dež, sneg, megla) in vremensko nepogojenih (oblačno, jasno in ostalo) okoliščinah. Podrobneje nas zanimajo: (1) struktura letnega in dnevnega režima, (2) struktura nesreč glede na vrsto ceste, glede na vzrok ter (3) prostorski vzorec prometnih nesreč v obravnavanih vremenskih okoliščinah s poudarkom na identificiranih žariščih.

## 2 Metodologija

Ministrstvo za notranje zadeve (Policija) vodi statistiko prometnih nesreč tudi v povezavi z vremenskimi situacijami. Slednje deli v naslednje kategorije: deževno, jasno, megla, neznano, oblačno, sneg, toča in veter. Ker nas je v razpravi zanimal vpliv tistih neugodnih vremenskih okoliščin, ki bi lahko bile vzrok prometnim nesrečam smo izločili prometne nesreče ob jasnem vremenu, oblačnem vremenu in situacije z neznanimi vremenskimi okoliščinam. Ker se v obravnavanem obdobju na območju Mestne občine Maribor niso pojavljale prometne nesreče v povezavi s pojavom toče ali vetra, so nam v analizi tako ostale tiste, ki so se zgodile v deževnem vremenu, megli in snegu.



Tako smo sprva pridobili podatke o prometnih nesrečah, ki so prosto dostopni na spletni strani Ministrstva za notranje zadeve. Letna poročila so dostopna od leta 1995 naprej. Obravnavali smo obdobje 2006–2016, pri čemer smo filtrirali podatke le za območje občine Maribor. Uporabili smo vse točkovne podatke prometnih nesreč s pripisanima atributoma geolokacija in vremenske okoliščine. Sledila je priprava opisne statistike v programskem paketu SPSS z namenom ugotavljanja razlik v frekvenci prometnih nesreč v povezavi z vremensko pogojenimi in nepogojenimi okoliščinami na raziskovanem območju. Pri tem smo upoštevali še nekatere ostale attribute (mesec, leto, ura, vzrok nesreče, tip nesreče). Temu smo dodali še prostorski vidik, kjer smo uporabili prostorske podatke Gospodarske javne infrastrukture (GJI), ki smo jih pridobili na Geodetski upravi Republike Slovenije. Z orodji programa ESRI ArcGIS Desktop smo pripravili cestno prostorsko podatkovno bazo (*ang. Network Dataset*), ki smo jo potrebovali za ugotavljanje prostorskega vzorca prometnih nesreč v obravnavanih vremensko pogojenih (dež, sneg, megla) in nepogojenih okoliščinah (jasno, oblačno, ostalo). V ta namen smo uporabili orodje SANET (*ang. Spatial Analysis along Networks*) (Okabe, Okunuki in Shoiode 2006), natančnejše funkcijo določanja Kernerjeve gostote ob upoštevanju cestnega omrežja (*ang. Network Kernel Density Estimation*). Prednost te metode določanja gostote točk je, da upošteva dejansko razdaljo po cestnem omrežju v primerjavi z ostalimi planarnimi (2-D) metodami, ki bolj ali manj temeljijo na uporabi Evklidove razdalje (Okabe, Satoh in Sugihara 2009; Benedek, Ciobanu in Man 2016). Ker obstaja jasna povezava med frekvenco prometnih nesreč in gostoto prometa (Benedek, Ciobanu in Man 2016), smo pri določanju žarišč prometnih nesreč ob različnih vremenskih situacijah uporabili še podatke o prometnih obremenitvah. Le ti so od leta 2005 naprej dostopni na spletni strani Ministrstva za infrastrukturo Republike Slovenije. Gre za točkovne podatke štetja prometa avtomatskih postaj. V okviru naše študije smo izračunali povprečje vseh vozil v časovnem oknu 2006–2016 in dobljene vrednosti, s pomočjo orodja SANET, interpolirali po cestnem omrežju (Okabe in Sugihara 2012). Ta kazalec nam je služil kot utež za določanje žarišč prometnih nesreč v občini Maribor v različnih vremenskih situacijah. Za medsebojno primerjavo prostorskega vzorca prometnih nesreč ob obravnavanih vremenskih situacijah smo uporabili orodje *Band Collection Statistics* v sklopu programa ESRI ArcGIS Desktop. Primerjali smo vzorec žarišč prometnih nesreč v deževnem, sneženem in meglenem vremenu. Temu smo dodali še dva naključna vzorca žarišč prometnih nesreč ob vremensko nepogojenih situacijah pri čemer smo za le-ta upoštevali kriterija primerljive številčnosti dogodkov v primerljivi z vremensko pogojenimi dogodki ( $N = 300$ ) in medsebojno stopnjo korelacije  $> 0,5$ .

## 3 Rezultati

### 3.1 Splošne značilnosti prometnih nesreč na območju občine Maribor v povezavi z vremenskimi razmerami

Od skupaj 6275 prometnih nesreč na območju občine Maribor v obdobju od 1. januarja 2006 do 31. decembra 2016, se jih je 748 zgodilo v enem od treh neugodnih vremenskih okoliščinah (ali 11,9 % od vseh prometnih nesreč). Od teh se jih je 600 zgodilo v deževnem vremenu (9,6 % od vseh prometnih nesreč ali 80,2 % od tistih, ki so povezani z neugodnimi vremenskimi okoliščinami), 117 v snežnih razmerah (1,9 % od vseh prometnih nesreč ali 15,6 % od tistih, ki so povezani z neugodnimi vremenskimi okoliščinami), 31 pa v megli (0,4 % od vseh prometnih nesreč ali 4,1 % od tistih, ki so povezani z neugodnimi vremenskimi okoliščinami).

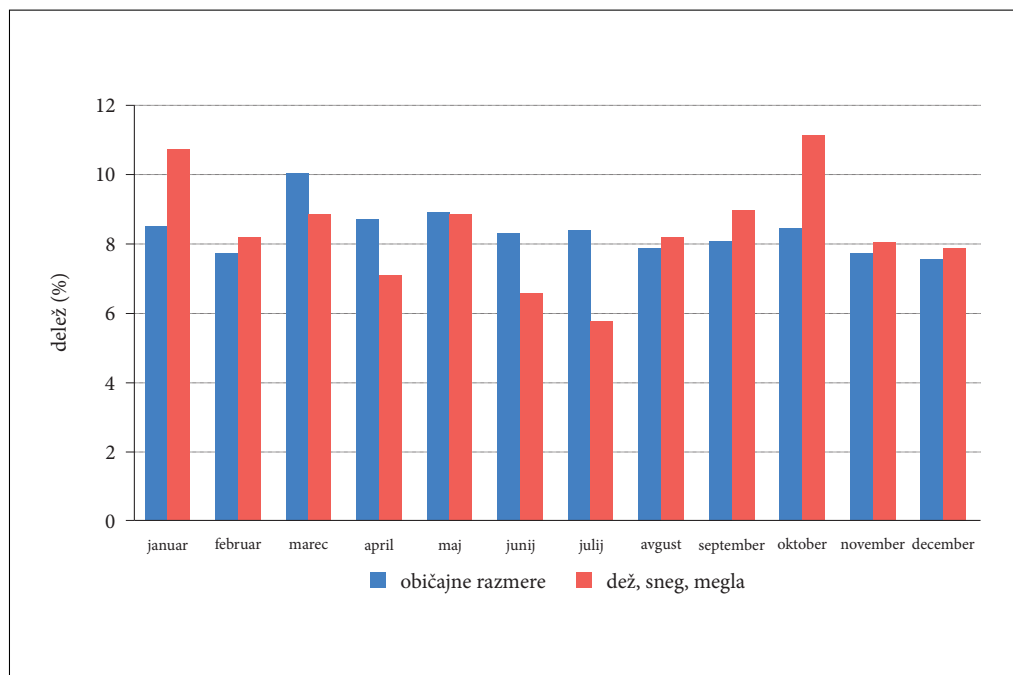
Na območju občine Maribor v obravnavanem obdobju beležimo padec števila vseh prometnih nesreč. Linearni trend padanja vseh prometnih nesreč je v povprečju 73 na leto. Posledično beležimo tudi padec števila nesreč, ki so povezane z neugodnimi vremenskimi razmerami. Leta 2006 smo beležili 127 takih prometnih nesreč, leta 2016 pa 50. Linearni trend padanja teh vrst prometnih nesreč je v povprečju 8 na leto (pri prometnih nesrečah v deževnih situacijah 7 na leto).

Mesečni režim prometnih nesreč ni enoten. Največji delež prometnih nesreč, povezanih z deževnimi situacijami se je zgodil med avgustom in oktobrom (oktobra 75 nesreč ali 12,5 % vseh v deževnem vremenu, septembra 66 ali 11,0 % in avgusta 61 ali 10,2 %), izstopa pa tudi maj (66 nesreč ali 11,0 %). Prometne nesreče, povezane z meglo so zgoščene v jesensko-zimskem obdobju, med oktobrom in januarjem (največ v oktobru in decembru, po 8 ali 25,8 %, sledita pa januar in november). Prometne nesreče v povezavi s snežnimi razmerami so seveda zgoščene v hladni polovici leta, med decembrom in marcem, pri čemer prednjačita januar (41 nesreč ali 35 % vseh nesreč v snežnih razmerah) in februar (38 ali 32,5 %). Zanimiva je tudi primerjava mesečnih relativnih frekvenc vseh nesreč in nesreč, ki so povezane z neugodnim vremenom. Če so prometne nesreče, ki niso povezane z neugodnimi vremenskimi situacijami zgoščene v marcu (10,0 % vseh takih prometnih nesreč) pa so tiste v povezavi z neugodnim vremenom v oktobru (11,1 %) in januarju (10,7 %) (slika 1).

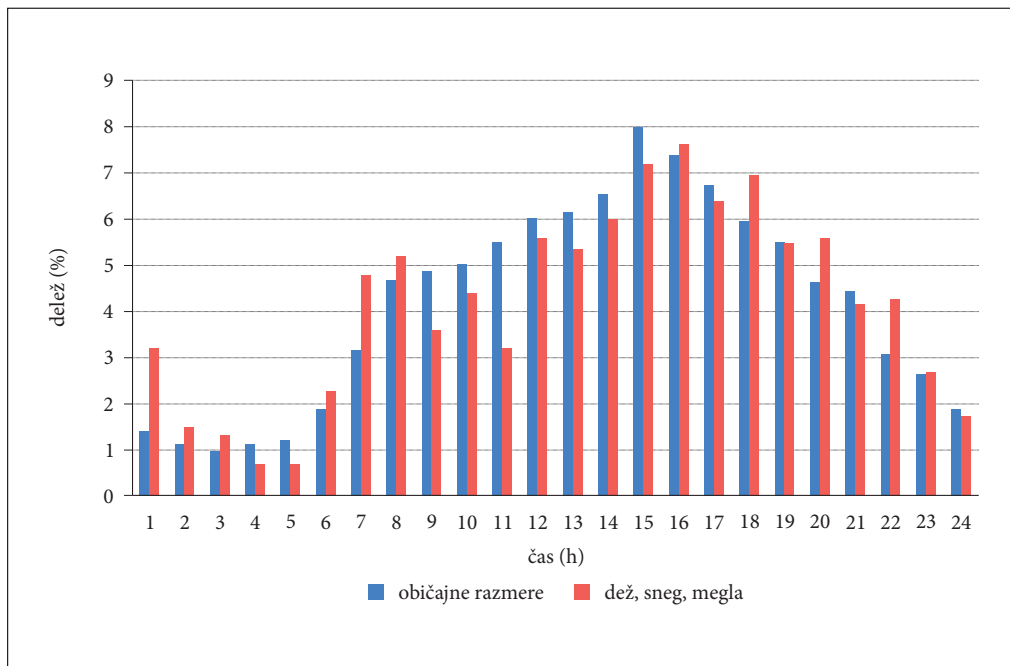
Tudi pri dnevnem režimu prometnih nesreč prihaja do določenih odstopanj med tistimi, ki so se zgodile v običajnih razmerah, in tistimi v vremensko neugodnih okoliščinah. Pri obeh tipih se kaže primarna konica v popoldanskem času (po 13. uri) in sekundarna v jutranjem času, z vrhuncem med 7. in 9. uro. Vremensko pogojene prometne nesreče kažejo relativno pogostejše pojavljanje v večernem, nočnem in jutranjem času, medtem ko med 9. in 15. uro relativno prevladujejo nesreče v običajnih okoliščinah (slika 2).

Režimi prometnih nesreč glede na vrsto ceste so si podobni (slika 3). Največ prometnih nesreč se zgodi v naseljih z uličnim sistemom: v normalnih vremenskih okoliščinah je bilo tam takih nesreč 2604 ali 47,1 %, v vremensko neugodnih okoliščinah pa 280 ali 37,4 %. Nesreče so pogoste tudi na hitrih cestah.

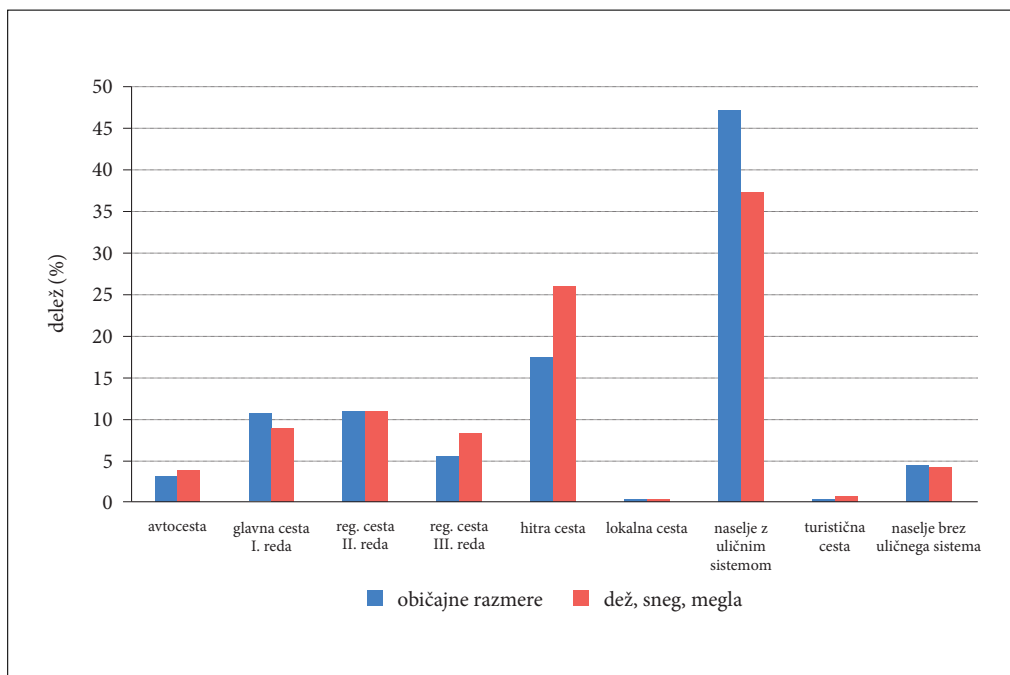
Kot vzrok za prometne nesreče se na območju Mestne občine Maribor najpogosteje pojavlja premik z vozilom (2215 nesreč ali 35,3 % vseh prometnih nesreč), sledijo pa neustrezna varnostna razdalja (1146 ali 18,3 %) in nepravilna stran ali smer vožnje (771 ali 12,3 %). Pogost vzrok vseh prometnih nesreč je še neupoštevanje pravil o prednosti (723 ali 11,5 %). Primerov z ostalimi vzroki je 699 (11,1 %). Pri



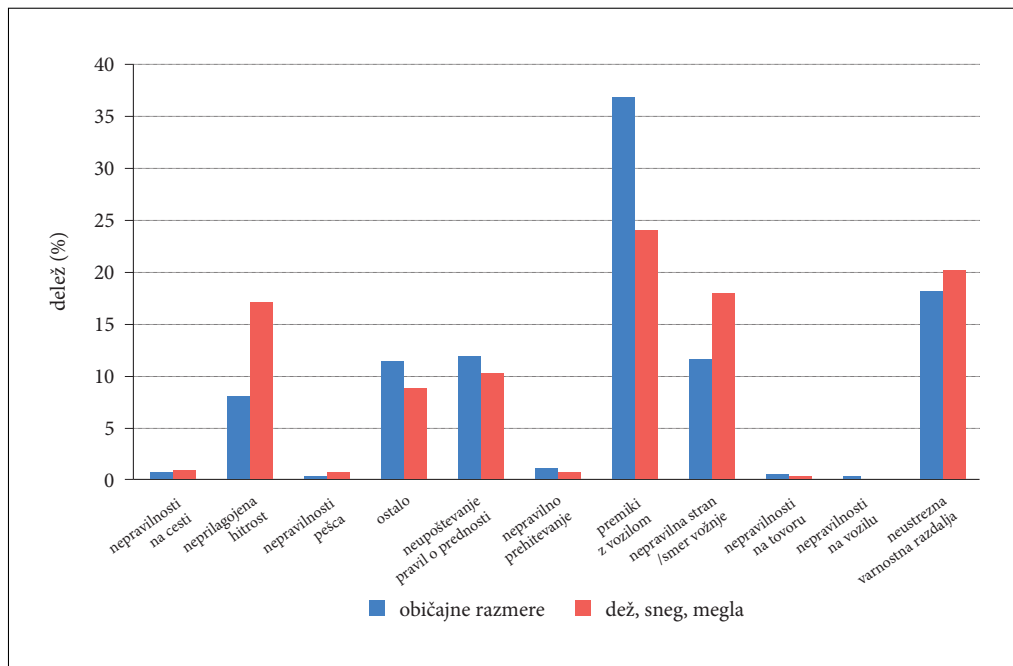
Slika 1: Struktura letnega režima prometnih nesreč.



Slika 2: Struktura dnevnega režima prometnih nesreč.



Slika 3: Struktura prometnih nesreč glede na vrsto ceste.



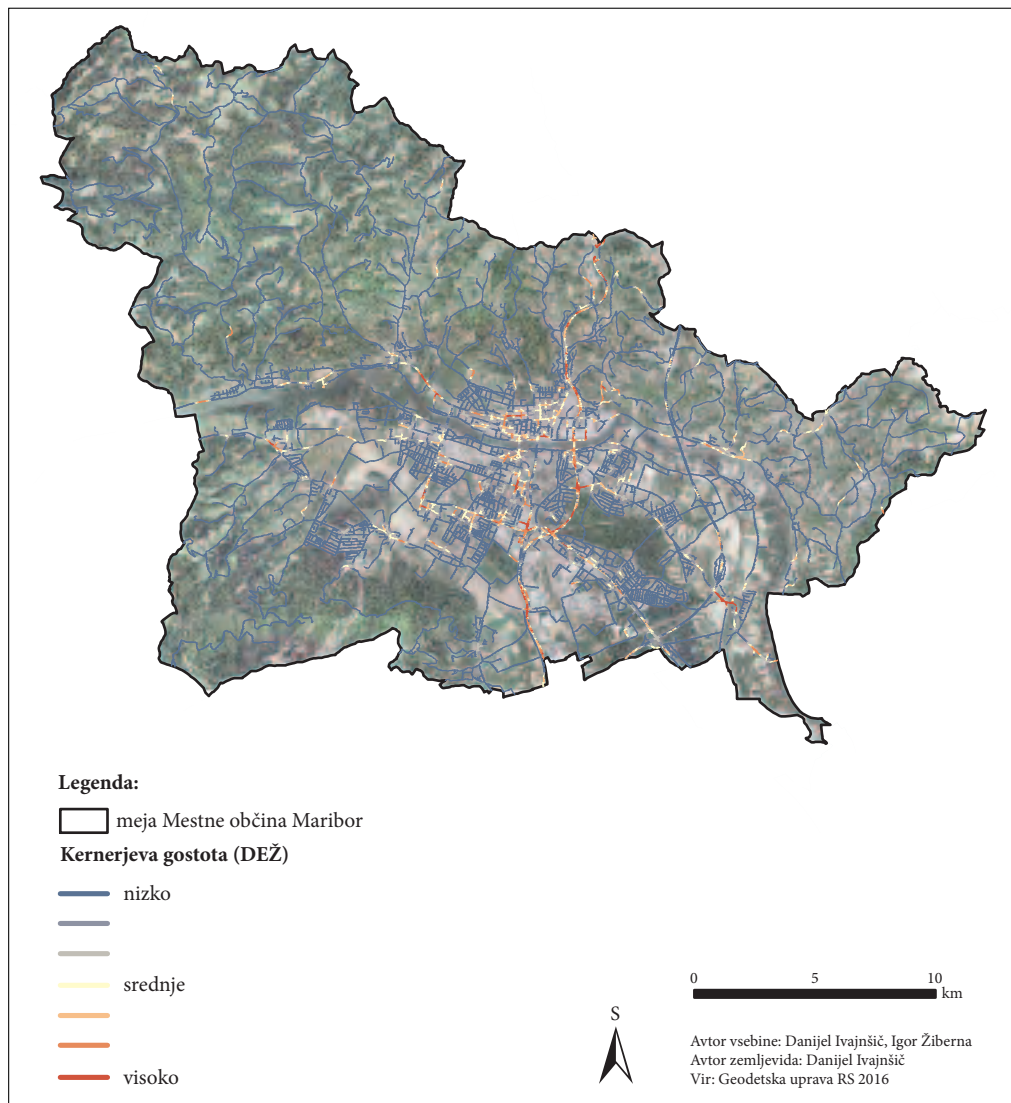
Slika 4: Struktura prometnih nesreč glede na vzrok nesreče.

prometnih nesrečah v neugodnih vremenskih razmerah se kot najpogostejši vzrok pojavlja premik z vozilom (179 ali 23,9%), neustrezna varnostna razdalja (151 ali 20,2%), nepravilna stran ali smer vožnje (133 ali 17,8%) in neprilagojena hitrost (128 ali 17,1%). Relativno gledano se kot vzrok pri prometnih nesrečah v neugodnih vremenskih razmerah pogosteje kot v običajnih razmerah pojavlja neprilagojena hitrost, nepravilna stran/smer vožnje in neustrezna varnostna razdalja (slika 4).

Kot najpogostejši tip prometne nesreče se pojavlja bočno trčenje (1301 ali 20,7%), trčenje v stoječe ali parkirano vozilo (1182 ali 18,8%) in naletno trčenje (1093 ali 17,4%). Prometne nesreče v vremensko neugodnih okoliščinah imajo podoben vzorec. Najpogostejši tip prometne nesreče je bočno trčenje (148 ali 19,8%), sledijo pa naletno trčenje (132 ali 17,6%), trčenje v objekt (138 ali 18,4%) in trčenje v stoječe ali parkirano vozilo (111 ali 14,8%). Trčenje v objekt se v normalnih okoliščinah kot tip prometne nesreče pojavlja le v 9,2%.

### 3.2 Prostorski vzorec žarišč prometnih nesreč na območju občine Maribor glede na vremenske situacije

Prostorski odtis prometnih nesreč v deževnem vremenu (slika 5) kaže značilna žarišča na hitri cesti H2 v smeri sever–jug (Pesnica–Bohova). Izstopajo predvsem ostrejši ovinki, uvozi in izvozi s hitre ceste ter večja križišča. V mestnem predelu na levem bregu Drave so identificirane naslednje žariščne cone: Kraljeviča Marka ulica (pri centru Jager), križišče med ulico Kneza Koclja in Vošnjakovo ulico, Gregorčičeva ulica (od Ljudskega vrta do Trga Generala Maistra), predel Koroških vrat (križišče Gosposvetske in Koroške ceste ter odsek Koroške ceste, ki se spušča proti naselju Kamnica). Na desnem bregu Drave je kritičen predel Dupleške ceste, ki prečka kanal Drave. Odsek Tržaške ceste ob nakupovalnem središču Mercator tehnika in križišču s Ptujsko cesto. Nekatera križišča na cesti Proletarskih brigad ter krožišči ob nakupovalnem središču Qlandia na Ulici heroja Šercerja. Omeniti velja še naselje



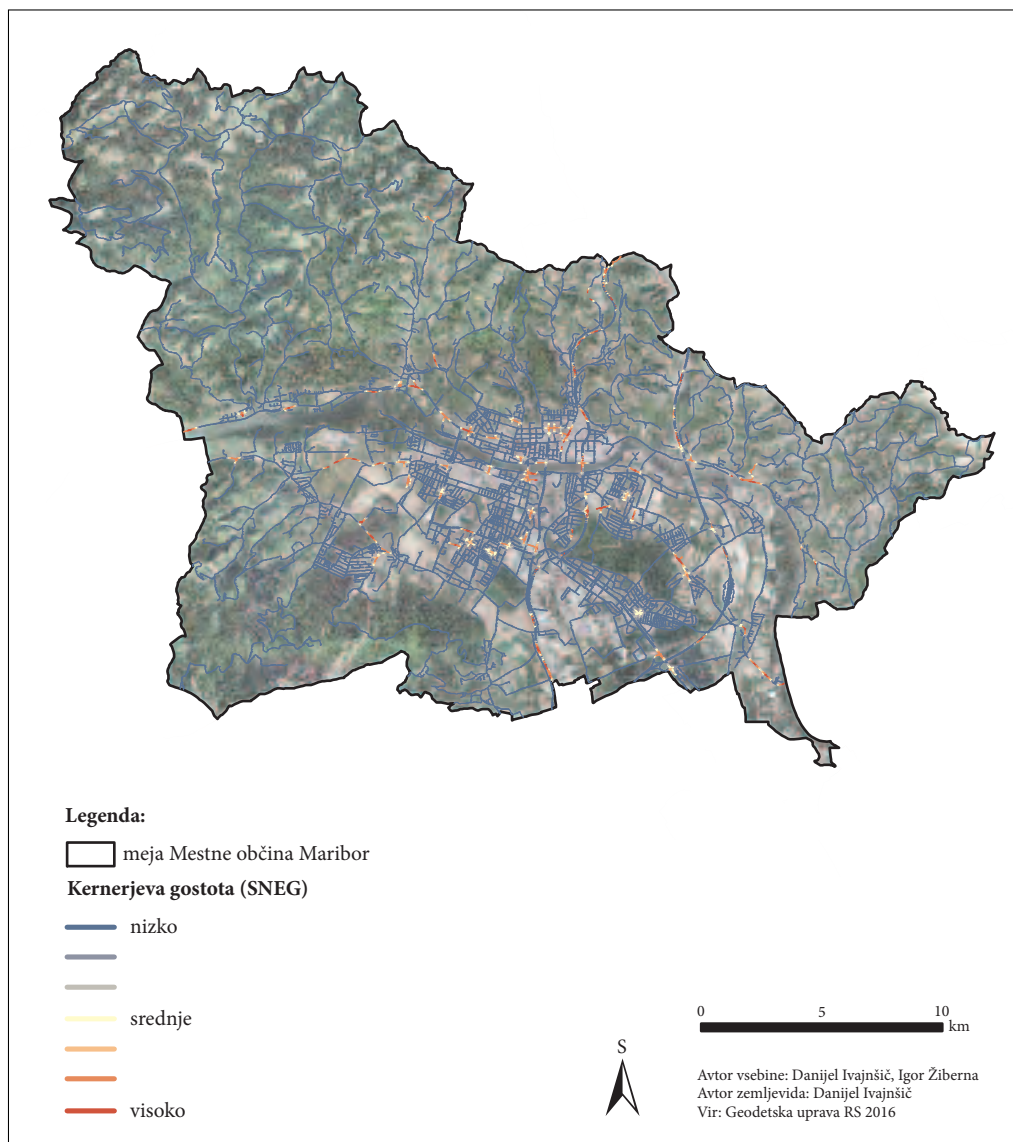
Slika 5: Žarišča prometnih nesreč ob deževnem vremenu.

Limbuš kjer izstopa cona od krožišča do pokopališča. Vzhodna obvoznica v deževnem vremenu nima značilnih zgostitev prometnih nesreč.

V snežnih razmerah so žarišča prometnih nesreč bolj razpršena (slika 6). Na hitri cesti H2 je letev v primerjavi z deževnim vremenom manj. Na Šentiljski cesti je problematičen odsek kjer se cesta vzpenja do trgovine Hofer oziroma spušča proti podjetju Porsche Maribor. Značilna žarišča prometnih nesreč v snežnih razmerah smo identificirali tudi na odseku Partizanske ceste (od Pošte Slovenije do križišča z Meljsko cesto). Na levem bregu Drave enako tendenco kažejo še strma cesta v naselju Malečnik čez Malečniški hrib, Gosposvetska cesta med križiščem s Turnerjevo ulico in krožiščem pred gostilno Štuk, odsek Koroške ceste, ki se spušča proti naselju Kamnica z nadaljevanjem na predelih Celovške

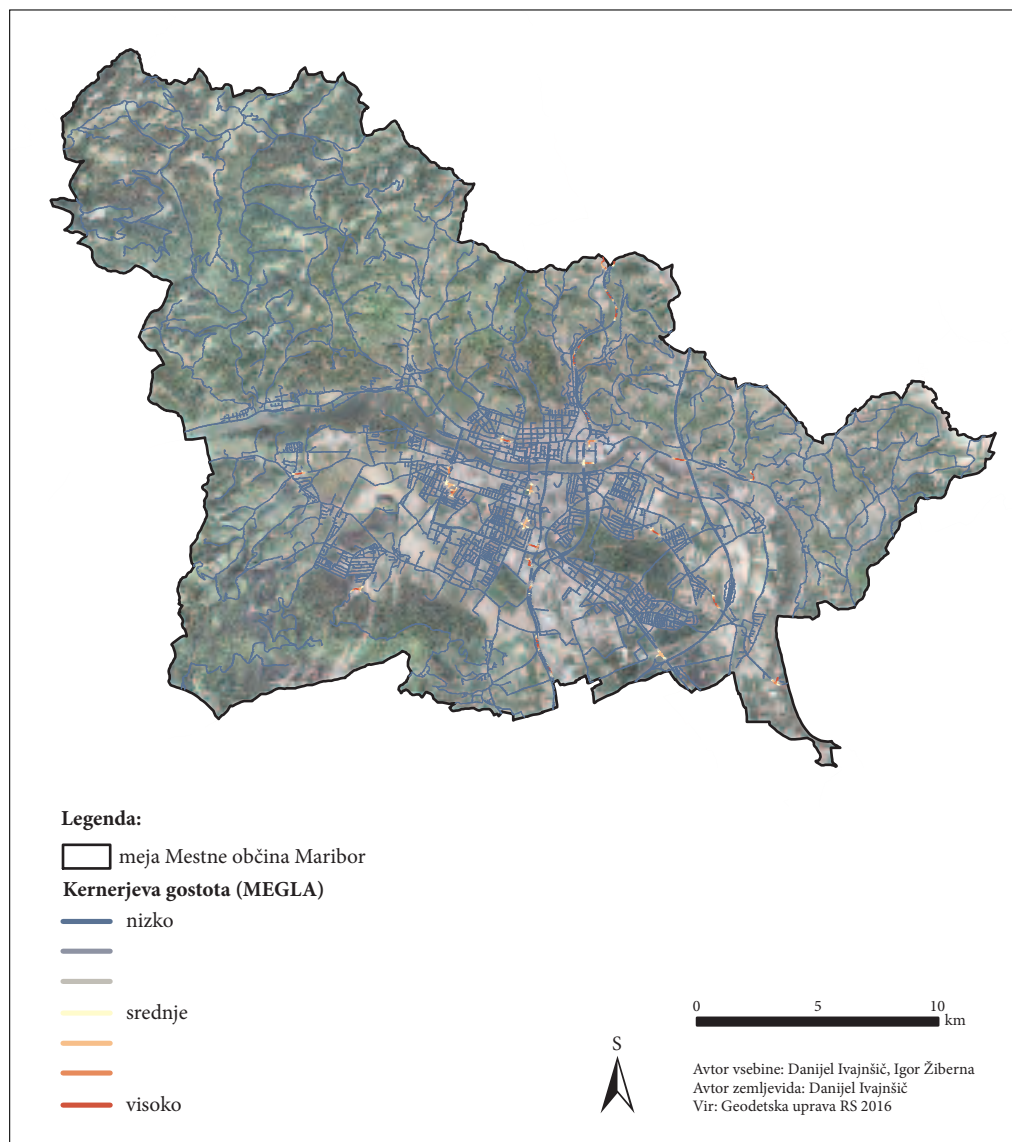
ceste in Mariborske ceste v smeri naselja Selnice ob Dravi. Na desnem bregu Drave (v smeri vzhod–zahod) prednjačijo naslednje lokacije: ovinek pred mostom čez kanal Drave v Dogošah (v smeri Maribora), odsek na Dupleški cesti pri motelu Lešnik, odsek Kosovelove ulice pri mestnem pokopališču do krožišča pri cerkvi Sv. Mati Marije, območje ob vhodu v Univerzitetni klinični center Maribor in pri Medicinski fakulteti ter odsek Limbuške ceste pri podjetju Marles. V snežnih razmerah so značilna žarišča prometnih nesreč tudi na vzhodni mariborski obvoznici, zlasti pred obema predoroma.

V meglenih vremenskih okoliščinah (slika 7) je v primerjavi z vsemi ostalimi vremenskimi razmerami zaznanih najmanj žarišč prometnih nesreč. V samem mestnem jedru pričakovano ni zaznavnih



Slika 6: Žarišča prometnih nesreč v snežnih razmerah.

značilnih zgostitev z izjemo Gosposvetske ceste ob III. gimnaziji Maribor, okolice trgovine Mercator tehnika ob Tržaški in Jadranski cesti ter Korčetove ulice na Studencih. V mestni okolici pa izstopajo odsek hitre ceste H2 proti pesniškemu krožišču in obratno, odsek ceste v smeri naselja Malečnik pred viaduktom vzhodne obvoznice, oba ostra ovinka iste ceste v smeri malečniškega hriba, odsek Ceste XIV. divizije med križiščema Pečetove ulice in Vzhodne ulice z nadaljevanem na odseku Dupleške ceste pred nadvozom vzhodne obvoznice. Problematici sta še lokaciji ob pohorski vzpenjači na Pohorski ulici ter odsek Limbuške ceste tik pred krožiščem v Limbušu.



Slika 7: Žarišča prometnih nesreč ob prisotnosti megle.

Tudi pri obravnavanju prometnih nesreč ob vremensko nepogojenih situacijah (jasno, oblačno in ostalo) je zaznaven prostorski vzorec, ki je sicer, na prvi pogled, podoben tistemu v deževnem vremenu (slika 8). Razlike so predvsem opazne na območju Dupleške ceste čez kanal reke Drave, na odseku ceste pri nakupovalnem središču Qlandia Maribor, v naseljih Limbuš in Malečnik. Tudi na odseku hitre ceste H2 med Mariborom in pesniškim krožiščem je v deževnem vremenu večja gostota prometnih nesreč.

Vsak obravnavani vremenski tip pušča na cestnem omrežju občine Maribor značilen prostorski od-tis. Žarišča prometnih nesreč so posledično različno razporejena. V deževnih vremenskih okoliščinah je prostorski vzorec prometnih nesreč sicer najbolj podoben tistemu ob bodisi jasnem ali oblačnem vremenu. Zveza med ostalimi obravnavanimi vremenskimi situacijami je bistveno šibkejša kar kaže na značilne razlike v razporeditvi žarišč prometnih nesreč v občini Maribor. Razlike so največje, če primerjamo žarišča prometnih nesreč ob meglenu in sneženem vremenu (preglednica 1).

*Preglednica 1: Korelacijska matrika prostorskih vzorcev prometnih nesreč ob obravnavanih vremenskih situacijah.*

SLOJ	VZOREC 1	VZOREC 2	DEŽ	SNEG	MEGLA
VZOREC 1	1	0,54	0,46	0,36	0,25
VZOREC 2		1	0,54	0,31	0,39
DEŽ			1	0,32	0,29
SNEG				1	0,13
MEGLA					1

## 4 Sklep

Frekvenca prometnih nesreč v neugodnih vremenskih okoliščinah je primerljiva s tistimi v tujini. Palutikof (2003) navaja, da se je leta 1987 v Veliki Britaniji 81,6 % prometnih nesreč zgodilo v običajnih vremenskih razmerah, 16,4 % v deževnem vremenu, 0,9 % v snežnih razmerah, 1,1 % pa v megli. Na območju občine Maribor se je v običajnih vremenskih razmerah zgodilo 88,1 % prometnih nesreč, 9,6 % se jih je zgodilo v deževnem vremenu, 1,9 % v snežnih razmerah, 0,4 % pa v megli. Tipična prometna nesreča v neugodnih vremenskih razmerah se je zgodila ob deževnem vremenu, v popoldanski prometni konici med 14. in 17. uro, v naselju z uličnim sistemom ali na hitri cesti, pri čemer pa je glavni vzrok nesreče premik z vozilom, nepravilna stran ali smer vožnje ter neprilagojena hitrost. Ob tem najpogosteje prihaja do bočnega ali naletnega trčenja ter trčenja v objekt, ob normalnem ali gostem prometu in izrazito (kar v 82,5 %) na mokrem cestišču. Na osnovi ugotovljenega se nakazuje interpretacija, da so vremenske razmere pogosto posredni vzrok za prometne nesreče (dež in sneg lahko vplivata na stanje cestišča). Nasprotno velja za meglene vremenske okoliščine, ki v večini predstavljajo neposreden vzrok za prometne nesreče predvsem na odseku hitre ceste na območju severno od antropogeno znižane razvodnice med Dravo in Pesnico, kamor meglja pogosteje sega iz Pesniške doline.

Vsa identificirana žarišča prometnih nesreč so na območjih z neugodnimi krajevnimi podnebni-mi značilnostmi (odprt prostor izven mesta v primeru sneženja in vetra nanaša sneg na cestišče) ali pa neugodne morfologije (nadvozu sledi križišče, zaradi česar se ob povišani hitrosti zavorna pot v snežnih razmerah podaljša). Morda bi na takih mestih kazalo razmisliti o opozorilnih informacijskih tablah,

*Slika 8: Žarišča prometnih nesreč ob vremensko nepogojenih situacijah. ►*



# Prometne nesreče v občini Maribor ob različnih vremenskih situacijah



ki voznikom sporočajo njihovo dejansko hitrost, pri čemer jih ob morebitnih prekoračitvah hitrosti na to tudi opozorijo.

Če povzamemo prostorsko komponento prispevka lahko poudarimo, da je prostorski odtis žarišč prometnih nesreč v občini Maribor ob obravnavanih vremenskih situacijah značilno različen. Po številu žarišč izstopa deževno vreme, ki je v sami prostorski razporeditvi presenetljivo dokaj podobno vremensko nepogojenim situacijam. Prometne nesreče v snegu in megli tvorijo prostorske zgostitve na drugačnih lokacijah cestnega omrežja, pri čemer se prostorski vzorec v megli najbolj razlikuje od ostalih vremenskih situacij.

Omenili smo že, da povezave med neugodnimi vremenskimi razmerami in številom prometnih nesreč niso vedno linearne. Kot primer naj navedemo epizodo konec januarja in februarja 2014, ko se je po celotni Sloveniji pojavljal žled, ki ga je spremljala močna poledica. Ta pojav v severovzhodni Sloveniji sicer ni bil tako izrazit kot v osrednji in zahodni Sloveniji, pa vendar je škoda nastajala tudi v okolici Maribora. Ker je žled spremljala tudi močna poledica na cestiščih, bi pričakovali, da se je število prometnih nesreč v februarju, v primerjavi z ostalimi februarji v obravnavanem obdobju, povečalo. V resnici podatki kažejo prav nasprotno. Ta mesec je s tremi vremensko pogojenimi prometnimi nesrečami sodil med mesece z najmanjšim številom prometnih nesreč, saj sta le še februar 2007 in februar 2011 imela manj vremensko pogojenih prometnih nesreč. Očitno so v izrednih vremenskih razmerah ljudje delovali racionalno in s potrebno previdnostjo.

Čeprav vremena ni mogoče spremeniti, pa je razumevanje njegovega vpliva na varnost v cestnem prometu pomembno (Bergel-Hayat s sodelavci 2013). Kljub aplikativnemu pomenu prostorskih analiz prometne varnosti tovrstnih študij ni veliko, saj je modeliranje vzorca prometnih nesreč zaradi mnogoterega vpliva različnih dejavnikov ter stohastičnosti zelo kompleksno.

## 5 Viri in literatura

- Aguero-Valverde, J., Jovanis, P. 2006: Spatial analysis of fatal and injury crashes in Pennsylvania. *Accident Analysis and Prevention* 38-3. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.12.006>
- Aron, M., Bergel-Hayat, R., Violette, E., Saint Pierre, G. 2007: Added risk by rainy weather on the roads of normandie-centre region in France. *Proceedings of 11th World Conference on Transport Research*. Berkeley.
- Benedek, J., Ciobanu, S. M., Man, T. C. 2016: Hotspots and social background of urban traffic crashes: A case study in Cluj-Napoca (Romania). *Accident Analysis and Prevention* 87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.11.026>
- Bergel-Hayat, R., Debbarh, M., Antoniou, C., Yannis, G. 2013: Explaining the road accident risk: Weather effects. *Accident Analysis and Prevention* 60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.03.006>
- Brijs, T., Karlis, D., Wets, G. 2008: Studying the effect of weather conditions on daily crash counts using a discrete time series model. *Accident Analysis and Prevention* 40-3. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2008.01.001>
- Brodsky, H., Hakkert, A. S. 1988: Risk of road accident in rainy weather. *Accident Analysis and Prevention* 20-3. DOI: [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(88\)90001-2](https://doi.org/10.1016/0001-4575(88)90001-2)
- Eisenberg, D. 2004: The mixed effects of precipitation on traffic crashes. *Accident Analysis and Prevention* 36-4. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(03\)00085-X](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(03)00085-X)
- Erdogan, S. 2009: Explorative spatial analysis of traffic accident statistics and road mortality among the provinces of Turkey. *Journal of Safety Research* 40-5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2009.07.006>
- Erdogan, S., Yilmaz, I., Baybura, T., Gullu, M. 2008: Geographical informationsystems aided traffic accident analysis system case study: city of Afyonkarahisar. *Accident Analysis and Prevention* 40-1. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2007.05.004>

- Fridström, L., Ifver, J., Ingebrigtsen, S., Kulmala, R., Thomsen, L. K. 1995: Measuring the contribution of randomness, exposure, weather, and daylight to the variation in road accident counts. *Accident Analysis and Prevention* 27-1. DOI: [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(94\)E0023-E](https://doi.org/10.1016/0001-4575(94)E0023-E)
- Hermans, E., Wets, G., Van Den Bossche, F. 2006: Frequency and severity of Belgian road traffic accidents studied by state-space methods. *Journal of Transportation and Statistics* 9-1.
- Ivajnsič, D., Žiberna, I. 2017: Prostorsko-časovna razporeditev prometnih nesreč v Mariboru. *Geografije Podravja*. Maribor. DOI: <https://doi.org/10.18690/978-961-286-074-5>
- Ivan, K., Haidu, I. 2012: The spatio-temporal distribution of road accidents in Cluj-Napoca. *Geographa Technica* 2.
- Ivan, K., Haidu, I., Benedek, J., Ciobanu, S. M. 2015: Identification of traffic accident risk-prone areas under low-light conditions. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 15. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-15-2059-2015>
- Karlaftis, M., Yannis, G. 2010: Weather Effects on Daily Traffic Accidents and Fatalities: A Time Series Count Data Approach. *Proceedings of the 89th Annual meeting of the Transportation Research Board*. Washington.
- Li, L., Zhu, L., Sui, D. 2007: A GIS-based Bayesian approach for analyzing spatial-temporal patterns of intra-city motor vehicle crashes. *Journal of Transport Geography* 15-4. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2006.08.005>
- Montella, A. 2010: A comparative analysis of hotspot identification methods. *Accident Analysis and Prevention* 42-2. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.09.025>
- Okabe, A., Okunuki, K-I., Shoiode, S. 2006: The SANET toolbox: New Methods for Network Spatial Analysis. *Transactions in GIS* 10-4. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2006.01011.x>
- Okabe, A., Satoh, T., Sugihara, K. 2009: A kernel density estimation method for networks, its computational method and GIS-based tool. *International Journal of Geographical Information Science* 23-1. DOI: <https://doi.org/10.1080/13658810802475491>
- Okabe, A., Sugihara, K. 2012: *Spatial Analysis along Networks: Statistical and Computational Methods*. Chichester.
- Palutikof, J. P. P. 2003: *Road Accidents And The Weather*. Highway Meteorology. London.
- Perrels, A., Votsis, A., Nurmi, V., Pilli-Sihvola, K. 2015: Weather Conditions, Weather Information and Car Crashes. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 4-4. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi4042681>
- Plug, C., Xia, J. C., Caulfield, C. 2011: Spatial and temporal visualisation techniques for crash analysis. *Accident Analysis and Prevention* 43-6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.05.007>
- Vandenbulcke, G., Thomas, I., Int Panis, L. 2014: Predicting cycling accident risk in Brussels: a spatial case-control approach. *Accident Analysis and Prevention* 62. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.07.001>
- WHO global status report on road safety, 2013: supporting a decade of action. World Health Organization.
- Yannis, G., Karlaftis, M. G. 2010: Weather Effects on Daily Traffic Accidents and Fatalities: A Time Series Count Data Approach. *Proceedings of the TRB 89th Annual Meeting*. Washington.
- Yu, H., Liu, P., Chen, J., Wang, H. 2014: Comparative analysis of the spatial analysis methods for hotspot identification. *Accident Analysis and Prevention* 66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.01.017>



## POKRAJINSKA IN ZEMLJEPISNOIMENSKA RAZNOLIKOST V SLOVENIJI

**dr. Matjaž Geršič, dr. Rok Ciglič, dr. Drago Perko**

ZRC SAZU, Geografski inštitut Antona Melika

mgersic@zrc-sazu.si, rok.ciglic@zrc-sazu.si, drago@zrc-sazu.si

UDK: 913:81'373.21(497.4)

### IZVLEČEK

#### **Pokrajinska in zemljepisnoimenska raznolikost v Sloveniji**

Slovenija zaradi lege na stiku različnih evropskih geografskih enot v celoti spada med izrazite pokrajinske vroče točke Evrope. Toda tudi znotraj države so velike razlike. V raziskavi pokrajinske raznolikosti Slovenije smo območja z veliko pokrajinsko raznolikostjo opredelili kot pokrajinske vroče točke, območja z majhno pokrajinsko raznolikostjo pa pokrajinske mrzle točke. Del raziskave so bila tudi zemljepisna imena. Identificirali smo jih iz različnih zgodovinskih in sodobnih virov, njihovo prostorsko razširjenost pa smo ugotavljali s pomočjo spoznavnih zemljevidov. Izrisali so jih anketiranci, ki smo jih izbrali na podlagi naključnega vzorčenja prebivalcev Slovenije, starih med 15 in 75 let. Izračunali smo zemljepisnomo raznolikost in določili zemljepisnoimenske vroče točke. Ugotavljali smo povezanost med pokrajinsko in zemljepisnomo raznolikostjo, ali obstajajo tudi vroče in mrzle točke zemljepisnih imen ter kako so le-te povezane s pokrajinskimi vročimi in mrzlimi točkami. Ugotovili smo, da je povezanost med slojema statistično značilna, a precej nizka.

### KLUČNE BESEDE

geografija, zemljepisno ime, pokrajina, pokrajinska raznolikost, zemljepisnoimenska raznolikost, vroča točka, spoznavni zemljevid, Slovenija

### ABSTRACT

#### **Landscape and toponymic diversity in Slovenia**

Due to its location at the crossroads of different European geographical units, Slovenia is one of Europe's most prominent landscape hotspots. Even within the country there are great differences. In the study of Slovenia's landscape diversity, we determined areas with high landscape diversity as landscape hotspots and areas with low landscape diversity as landscape coldspots. Part of the study also examines geographical names. We identified them from various historical and modern sources. Their spatial distribution was established with the help of cognitive maps. They were drawn by respondents selected through random sampling of Slovenian residents fifteen to seventy-five years old. We determined toponymic diversity and toponymic hotspots. We analyzed the connection between landscape diversity and the diversity of geographical names, the existence of hotspots and coldspots of geographical names, and their connection with landscape hotspots and coldspots. We found out that the correlation of both layers is statistically significant but the level of correlation is quite low.

### KEY WORDS

geography, toponym, landscape, landscape diversity, toponymic diversity, hotspot, cognitive map, Slovenia

## 1 Uvod

Z raziskavo ugotavljamo, ali se na pokrajinsko raznolikost Slovenije navezujeta tudi prostorska spremenljivost zemljepisnih imen oziroma zemljepisnoimenska raznolikost v zavesti prebivalcev.

Slovenija po pokrajinski raznolikosti spada med najpestrejšje dele Evrope. Kot celota je izrazita evropska pokrajinska vroča točka (Ciglič in Perko 2013), hkrati pa so med njenimi deli velike razlike (Perko, Ciglič in Hrvatin 2017). Območja z veliko pokrajinsko raznolikostjo lahko opredelimo kot pokrajinske vroče točke, območja z majhno pokrajinsko raznolikostjo pa kot pokrajinske mrzle točke.

Podobno velja za zemljepisna imena: nekatera območja označuje le eno ime, druga cela vrsta imen. Pri tem ne mislimo na uradna zemljepisna imena, pač pa na zemljepisna imena v zavesti ljudi, ki živijo na določenem območju, v njegovi soseščini ali na povsem drugem koncu države. Zanima nas, ali imamo v Sloveniji poleg pokrajinskih vročih in mrzlih točk tudi zemljepisnoimenske vroče in mrzle točke.

Zemljepisnih imen je cela vrsta, na primer imena rek, hribov, naselij, ulic in podobno, v prispevku pa se osredotočamo na imena pokrajin, ki se navezujejo na razmeroma velika območja.

Pokrajinske vroče točke so najbolj pogosto na stiku različnih reliefnih, kamninskih in drugih naravnih enot, s tem pa tudi na meji različnih pokrajin. Vprašanje pa je, ali so te meje skladne z mejami, kot jih v pokrajini in o pokrajini dojemajo ljudje. Pri odgovoru lahko pomagajo spoznavni zemljevidi, na katere ustvarjalci vrišejo in zamejijo posamezno pokrajino, jo poimenujejo in ločijo od sosednjih pokrajin. Takšni georeferencirani spoznavni zemljevidi s pomočjo geografskih informacijskih sistemov dajejo nekatere odgovore, predvsem na vprašanja:

- ali sta pokrajinska in zemljepisnoimenska raznolikost povezani in
- ali pokrajinske vroče točke prostorsko omejujejo zemljepisna imena oziroma območja, na katera se nanašajo posamezna zemljepisna imena.

## 2 Metodologija in podatki

Pokrajinska raznolikost temelji na podlagi podatkov o reliefu (Perko 2001), kamninah (Litostratigrafska karta ... 2011) in rastlinstvu (Zemljevid potencialne ... 1998), poenostavljenih na 7 reliefnih tipov, 15 litoloških tipov in 15 vegetacijskih tipov (Perko, Ciglič in Hrvatin 2017). Za vsako celico je bilo s pomočjo premičnega okna izračunano razmerje med številom reliefnih, litoloških in vegetacijskih tipov, ki se pojavljajo v radiju 1 km, in številom vseh reliefnih, litoloških in vegetacijskih tipov. Najmanjše možno razmerje je 3 proti 37 ali 0,0810, če se v kilometrskem radiju pojavi le po 1 reliefni, litološki in vegetacijski tip, največje možno razmerje pa 37 proti 37 ali 1,0000, če se v kilometrskem radiju pojavi hkrati vseh 7 reliefnih tipov, 15 litoloških tipov in 15 vegetacijskih tipov. Tako na primer pokrajinska raznolikost 0,2500 pomeni, da se v kilometrskem radiju hkrati pojavi 25 % ali četrtina od vseh 37 možnih reliefnih, litoloških in vegetacijskih tipov (Perko, Hrvatin in Ciglič 2015). Najmanjša izračunana vrednost pokrajinske raznolikosti je 0,081, največja pa 0,4324. Kot pokrajinske vroče točke je opredeljena desetina Slovenije z največjo pokrajinsko raznolikostjo, kot pokrajinske mrzle točke pa desetina Slovenije z najmanjšo pokrajinsko raznolikostjo.

Zemljepisnoimenska raznolikost temelji na spoznavnih zemljevidih. Z njimi lahko ugotavljamo različne značilnosti v pokrajini, med drugim tudi prostorsko identiteto prebivalcev. Spoznavni zemljevid *»... je tehnika za ugotavljanje slike prostorskih odnosov in okoljskih značilnosti ter stališč do njih pri ljudeh ...«* (Polič 2002, 39) oziroma *»... miselna ponazoritev podatkov, ki jih imajo posamezniki o določenem okolju ...«* (Golledge in Stimson 1997).

Za nabor imen pokrajin v Sloveniji in njihovo zamejitev smo spoznavne zemljevide vključili v vprašalnike, ki smo jih poslali 5000 naključno izbranim anketirancem po vsej državi, starim od 15 do 75 let. Vzorec je na podlagi Centralnega registra prebivalstva pripravil Statistični urad Republike Slovenije. Odziv na anketo je bil 14 %.

Anketiranci so kot podlago za svoje grafično izražanje prejeli zemljevid Slovenije v merilu 1 : 650.000, odtisnjen na listu formata A3. Podlaga spoznavnega zemljevida je vsebovala državno mejo, nekaj večjih mest (Koper/Capodistria, Ilirska Bistrica, Črnomelj, Ribnica, Postojna, Novo mesto, Ajdovščina, Krško, Nova Gorica, Idrija, Ljubljana, Litija, Rogaška Slatina, Celje, Kamnik, Kranj, Velenje, Bovec, Ptuj, Jesenice, Ravne na Koroškem, Maribor, Murska Sobota), temeljno rečno mrežo in Triglav kot najvišjo goro. Anketiranci so morali:

- na zemljevid vrisati slovenske pokrajine, ki jih poznajo, in
- vsako narisano pokrajino tudi poimenovati.

Vrnjene spoznavne zemljevide z vrisanimi mejami pokrajin in vpisanimi njihovimi imeni smo najprej skenirali in nato digitalizirali. Za izdelavo zemljevida zemljepisnoimenske raznolikosti smo uporabili programski paket ESRI ArcGIS for Desktop. Najprej smo vse enako poimenovane poligone združili. V našem primeru je šlo za poligone pokrajin, ki so jih anketiranci enako poimenovali. Vsak poligon je kazal največji obseg posamezne pokrajine oziroma njenega imena. Nato smo ugotavljali, kje se poligoni prekrivajo in določili območja z enakim številom prekrivanj. Večje je število poligonov, večja je zemljepisnoimenska raznolikost. Najmanjše možno število poligonov bi bilo 0, če neko območje ne bi poimenoval noben anketiranec, največje pa 84, če bi neko območje prekrivalo vseh 84 imen, kolikor so jih skupno vpisali vsi anketiranci. Dejansko je bila najnižja vrednost 6, najvišja pa 23, ustrezne normirane vrednosti pa med 0,0714 in 0,2738. Vektorski sloj raznolikosti smo nato rasterizirali na ločljivost 200 m.

Na koncu smo imeli na razpolago rastrska sloja pokrajinske in zemljepisnoimenske raznolikosti, ki smo ju primerjali z različnimi statističnimi in GIS orodji.

### 3 Rezultati in razprava

Anketiranci so na spoznavne zemljevide vrisali skupno 3769 pokrajin oziroma poligonov in jih poimenovali s 84 različnimi imeni, kar je povprečno 45 poligonov na ime. Glede imen pokrajin so najbolj enotni deli Slovenije Prekmurje, Bela krajina, Koprsko primorje, Gorenjska in Koroška, najbolj raznoliki pa:

- območje med Julijskimi Alpami in Vipavsko dolino,
- okolica Snežnika,
- območje Posavskega hribovja med Ljubljano in Sotlo,
- območje med Kamniško-Savinjskimi Alpami in Posavskim hribovjem ter
- območje južno od Ptuja.

V grobem izstopata dve večji območji raznolikih imen, ki jih lahko opredelimo kot zemljepisnoimenski vroči točki:

- širše območje vzdolž meje nekdanjih avstrijskih dežel Kranjske in Avstrijskega primorja ter
- širše območje vzdolž meje nekdanjih avstrijskih dežel Kranjske in Štajerske.

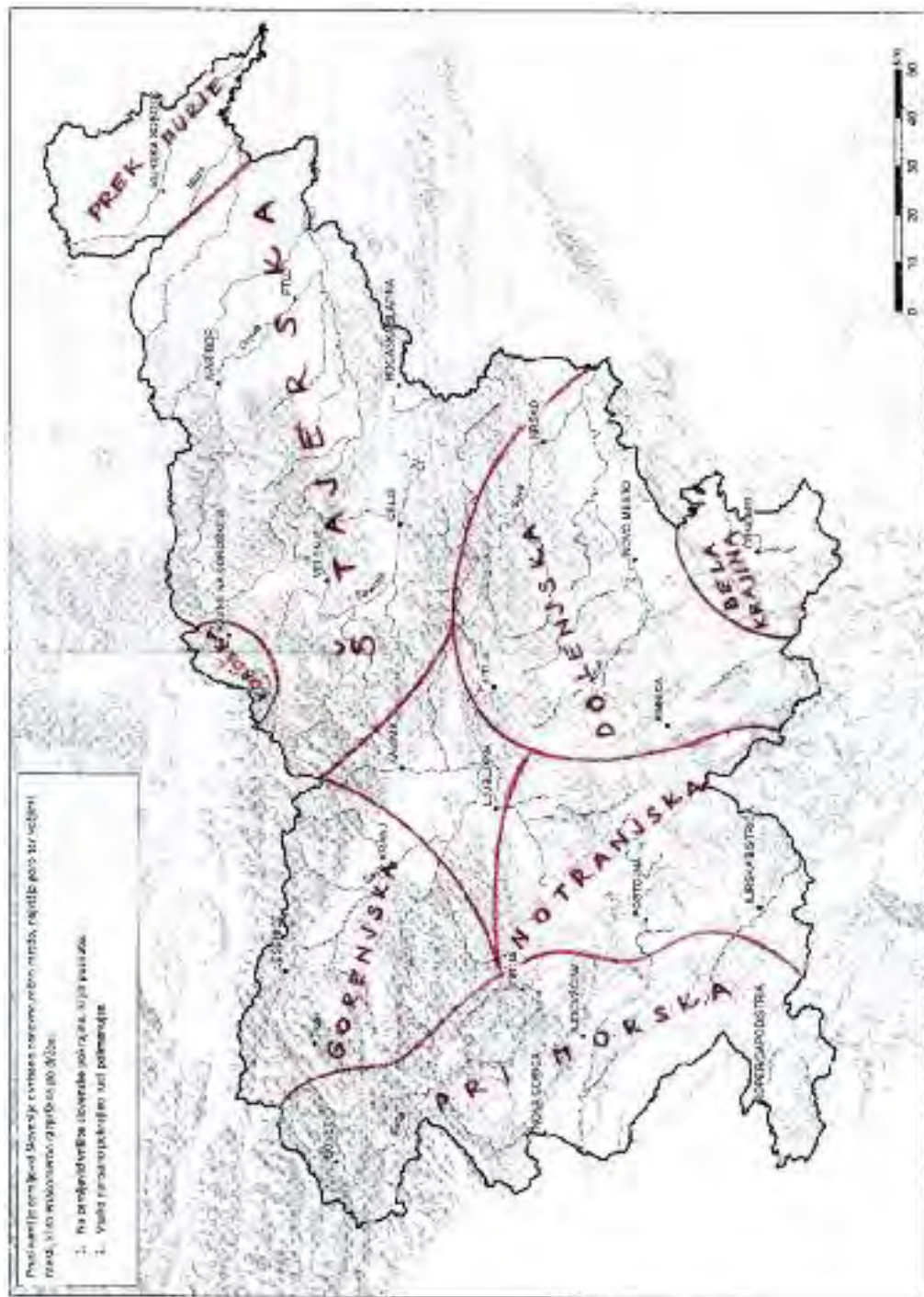
Prekritje slojev pokrajinske in zemljepisnoimenske raznolikosti (slika 5) pokaže, da so območja z večjo pokrajinsko raznolikostjo precej bolj razpršena kot območja z večjo zemljepisnoimensko raznolikostjo. Številna območja z veliko pokrajinsko raznolikostjo se prostorsko prekrivajo z večjo zemljepisnoimensko raznolikostjo, pri velikem številu območij pa obe raznolikosti ne sovpadata. Vrednost Spearmanovega

*Slika 1: Na spoznavne zemljevide so anketiranci največkrat vrisali in poimenovali nekdanje avstrijske dežele. ► (str. 192)*

*Slika 2: Še en primer spoznavnega zemljevida, kjer so na zamejena območja vpisana imena nekdanjih avstrijskih dežel. ► (str. 193)*

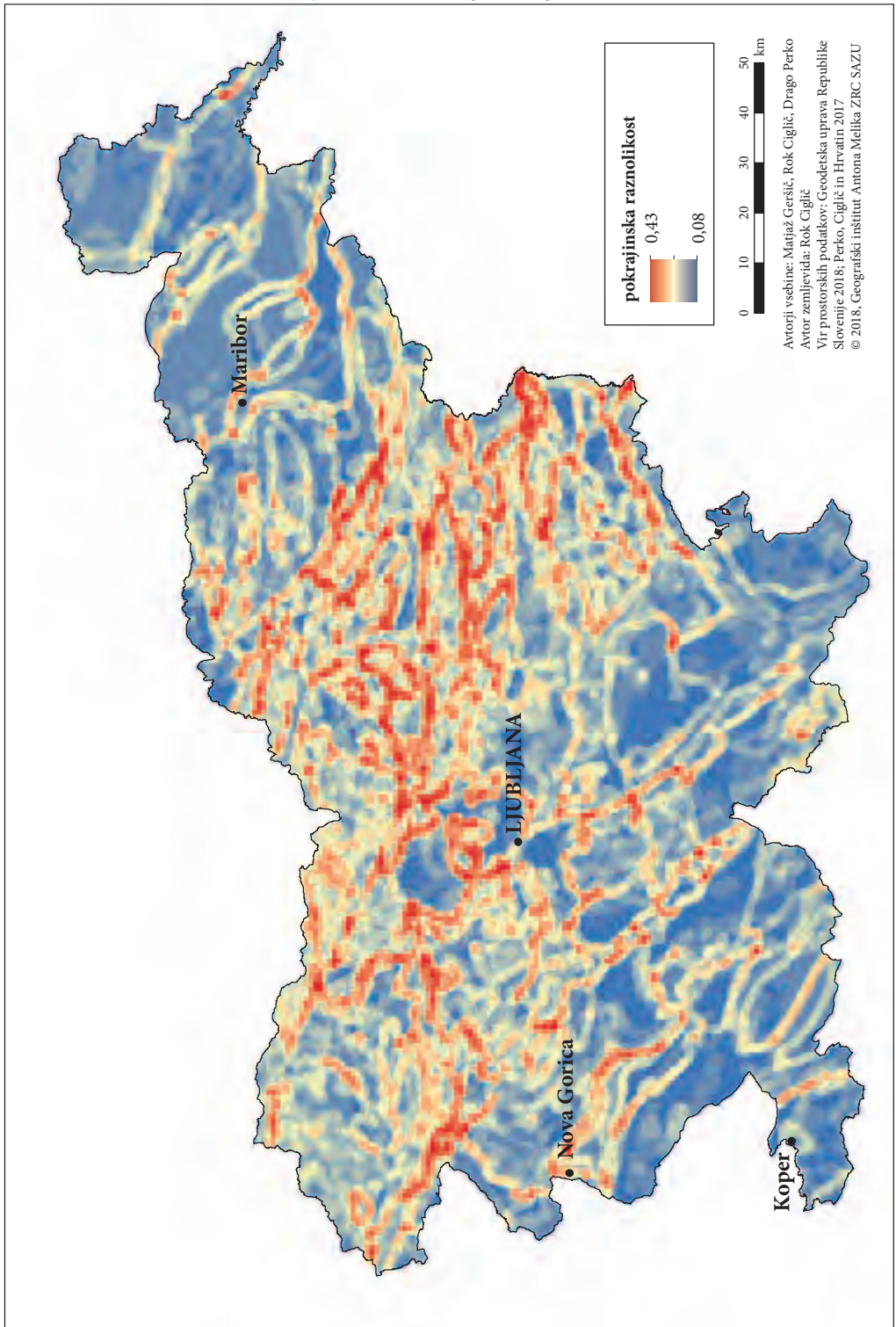
*Slika 3: Pokrajinska raznolikost v Sloveniji. ► (str. 194)*

*Slika 4: Zemljepisnoimenska raznolikost v Sloveniji. ► (str. 195)*

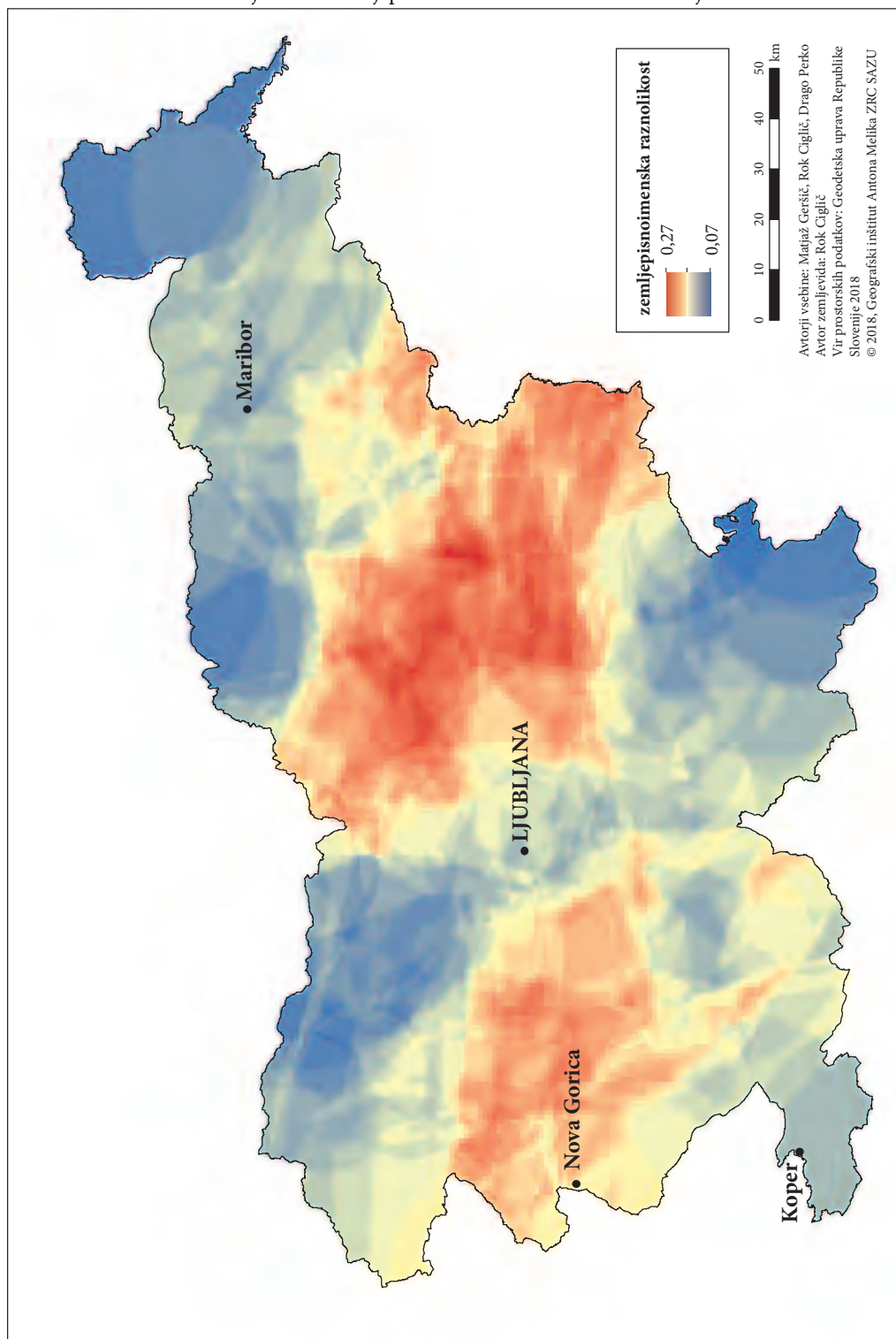








## Pokrajinska in zemljepisnoimenska raznolikost v Sloveniji



koeficienta korelacije, ki za izračun ne zahteva normalne porazdelitve podatkov, je 0,241, kar ni ravno veliko, je pa statistično značilno (pri 504.986 celicah in  $p = 0,001$ ).

Med vsemi zemljepisnimi imeni se samo 9 imen pojavlja pri več kot 100 anketirancih, zato ta imena izrazito odstopajo od preostalih imen. Le še 5 imen se pojavlja več kot 50-krat, vsa ostala pa precej manjkrat.

Če za vsako celico prikažemo ime pokrajine, ki se največkrat pojavlja, na zemljevidu ostane osem imen pokrajin (slika 6). Razlika med številom pokrajin, ki so jih anketiranci vrisali več kot stokrat, to je 9, in številom prevladujočih pokrajin v posamezni celici, to je 8, nastane zaradi Bele krajine, ki so jo anketiranci pogosteje uvrstili k Dolenjski. Ime Bela krajina vsebuje občni pojem »krajina« v pomenu »mejna krajina (z urejeno vojaško obrambo)«, pridevnik bel pa se lahko nanaša na listnate, svetle, pretežno brezove gozdove ali pa pomeni »zahodni« (Snoj 2009).

Precej zmede je med anketiranci povzročila tudi Primorska, ki v grobem združuje ozemlja nekdanjih upravnih enot Goriške, Istre in Trsta oziroma Avstrijskega primorja, katerih deli so na ozemlju sedanje Republike Slovenije. Zagotovo se je ime Primorska uveljavilo tudi zato, ker je to ozemlje zahodno od rapalske meje, ki ga je odrezala od matične domovine, in zaradi boja tamkajšnjega prebivalstva proti fašizmu med svetovnimi vojnami (Kacin Wohinz 2005).

Povprečna pokrajinska raznolikost po prevladujočih pokrajinah (slika 6, preglednica 2) kaže, da je pokrajinsko najbolj raznolika Gorenjska, najmanj raznoliko pa Prekmurje. To je glede na naravne značilnosti obeh pokrajin pričakovano, vendar razlike niso velike.

*Preglednica 1: Imena pokrajin in pogostnost njihovega pojavljanja.*

ime pokrajine	število vnosov
Gorenjska	405
Dolenjska	387
Koroška	375
Štajerska	366
Prekmurje	354
Primorska	352
Notranjska	343
Osrednja Slovenija	148
Bela krajina	150

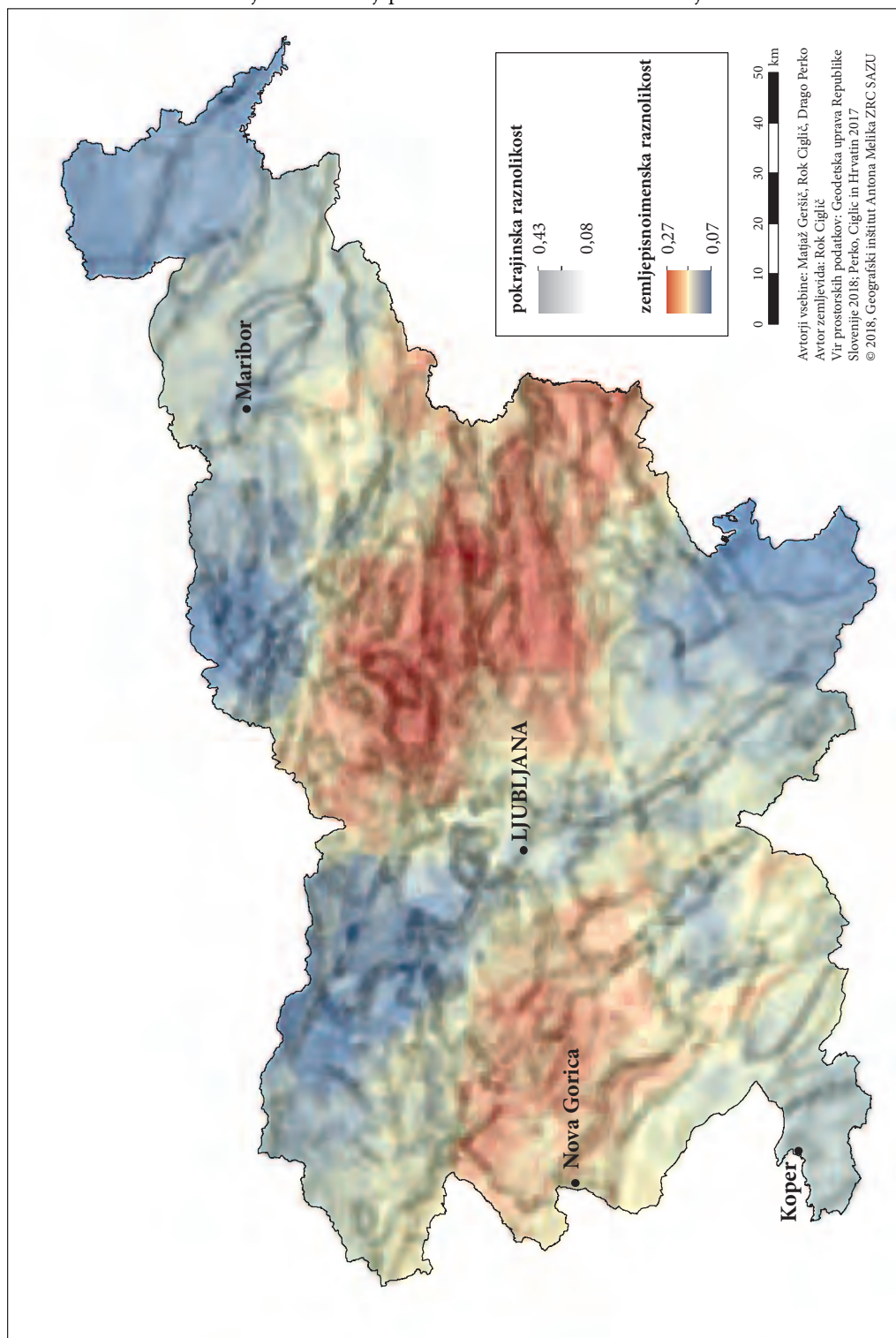
*Preglednica 2: Stopnja pokrajinske raznolikosti posamezne pokrajine.*

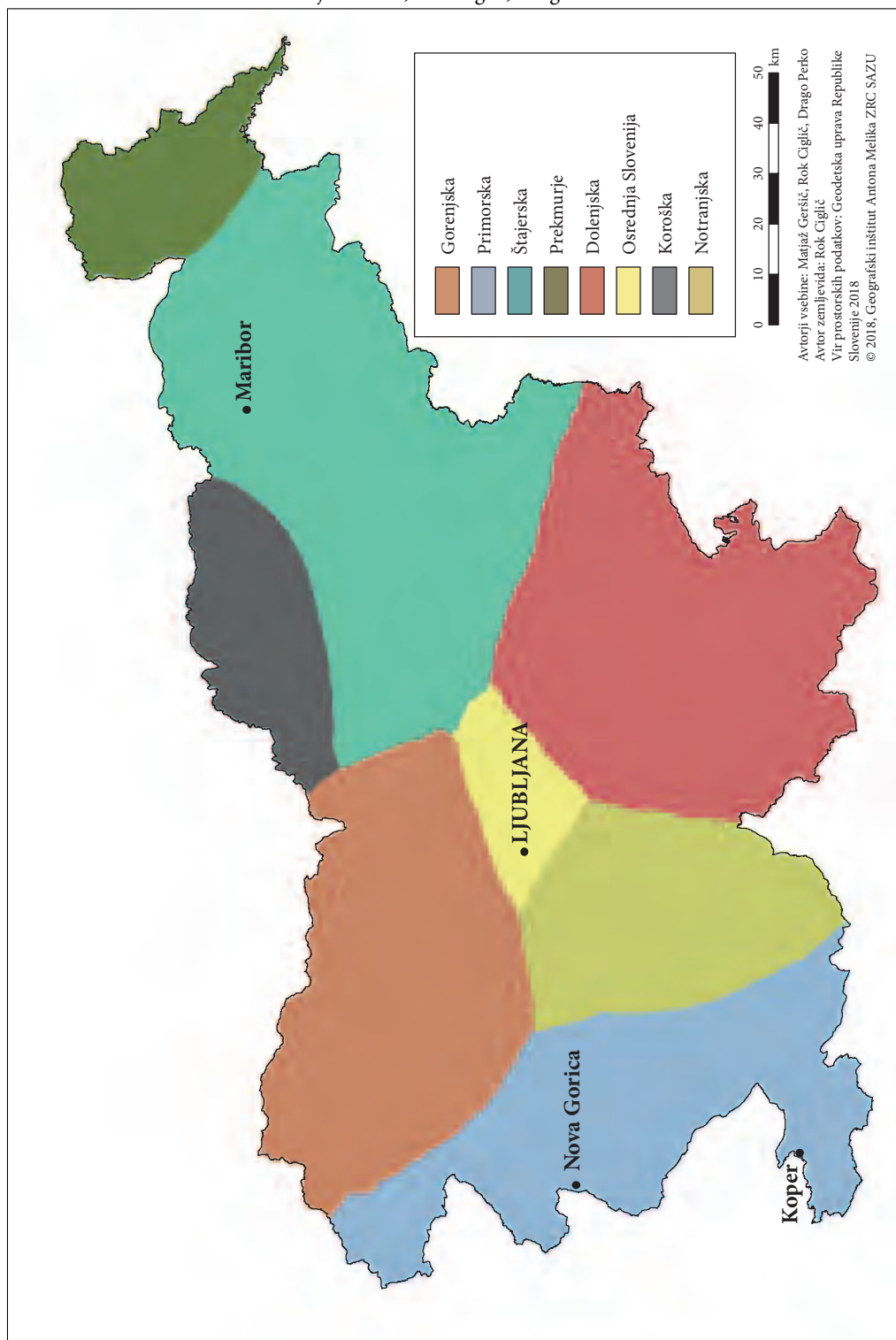
pokrajina	stopnja pokrajinske raznolikosti
Gorenjska	0,182
Štajerska	0,172
Koroška	0,172
Osrednja Slovenija	0,167
Notranjska	0,154
Primorska	0,151
Dolenjska	0,151
Prekmurje	0,129

*Slika 5: Primerjava pokrajinske in zemljepisnoimenske raznolikosti v Sloveniji. ►*

*Slika 6: Prevladujoča imena pokrajin po posameznih celicah. ► (str. 198)*

## Pokrajinska in zemljepisnoimenska raznolikost v Sloveniji





## 4 Sklep

Slovenska zemljepisna imena so del naše kulturne dediščine. Spoznavni zemljevidi z vrisanimi pokrajinami in vpisanimi njihovimi imeni so pokazali, da so kljub številnim regionalizacijam in tipizacijam Slovenije, uvajanjem različnih imen pokrajin v geografskih učbenikih, uradnih dokumentih na različnih ravneh ter najrazličnejšim tiskanim in elektronskim medijem med ljudmi še vedno najbolj živa imena nekdanjih avstrijskih pokrajin in njihovih delov. Mednje se je uspelo vriniti samo razmeroma mlademu zemljepisnemu imenu Osrednja Slovenija.

To dopolnjuje dejstvo, da sta najboljšežnejši zemljepisnoimenski vroči točki nastali prav na mejah nekdanjih avstrijskih dežel, ker so se njihove meje na eni strani skozi zgodovino spreminjale (Geršič 2017), na drugi pa v zavesti prebivalcev Slovenije deloma že zbledele, kar se nanaša predvsem na njihove natančne razmejitve.

Ker pokrajinska raznolikost temelji na naravnih prvinah oziroma fizični geografiji, pri zemljepisnoimenski raznolikosti pa izstopajo imena nekdanjih avstrijskih dežel, kar spada na področji humane geografije oziroma njene veje historične geografije, večje povezanosti ni bilo pričakovati, četudi je korelacija statistično značilna.

*ZAHVALA: Prispevek temelji na raziskovalnem projektu Pokrajinska raznolikost in vroče točke Slovenije (L6-6852), ki sta ga financirali Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije ter Slovenska akademija znanosti in umetnosti.*



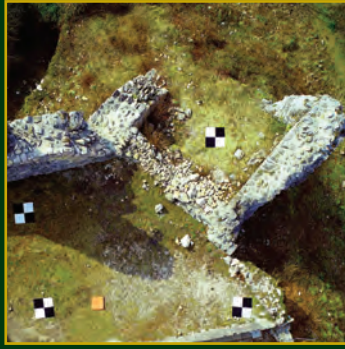
JERNEJA FRIDL

*Slika 7: Mejni kamen med nekdanjima avstrijskima deželama Štajersko in Kranjsko na magistralni cesti med Ljubljano in Celjem spominja na deželno delitev v avtro-ogrski monarhiji. Območje Trojan je del pokrajinske vroče točke in hkrati zemljepisnoimenske vroče točke.*

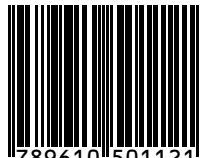
## 5 Viri in literatura

- Ciglič, R., Perko, D. 2013: Europe's landscape hotspots. *Acta geographica Slovenica* 53-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/AGS53106>
- Geršič, M. 2017: Spreminjanje denotata izbranih slovenskih pokrajinskih imen. *Acta geographica Slovenica* 57-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/AGS.4600>
- Golledge, R. G., Stimson, R. J. 1997: *Spatial behaviour: a geographic perspective*. New York, London.
- Kacin Wohinz, M. 2005: *Slovenci zunaj jugoslovanske države. Slovenska novejša zgodovina 1848–1992*. Ljubljana.
- Litostratigrafska karta Slovenije. Geološki zavod Slovenije, naročnik ARSO, revizija 2011. Ljubljana.
- Perko, D. 2001: *Analiza površja Slovenije s stometrskim digitalnim modelom reliefa*. Geografija Slovenije 3. Ljubljana.
- Perko, D., Ciglič, R., Hrvatin, M. 2017: Determination of landscape hotspots of Slovenia. *Acta geographica Slovenica* 57-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/AGS.4618>
- Perko, D., Hrvatin M., Ciglič, R. 2015: A methodology for natural landscape typification of Slovenia. *Acta geographica Slovenica* 55-2. DOI: <https://doi.org/10.3986/AGS.1938>
- Polič, M. 2002: *Doumevanje okolja. Spoznavni zemljevid Slovenije*. Ljubljana.
- Zemljevid potencialne naravne vegetacije. Biološki inštitut Jovana Hadžija ZRC SAZU. Ljubljana, 1998.
- Snoj, M. 2009: *Etimološki slovar slovenskih zemljepisnih imen*. Ljubljana.





ISSN 1855-4954



9 789610 501121

39,00 €