

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

V zbirki je izvorna različica izdajatelja.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

University  
of Ljubljana  
Faculty of  
*Civil and Geodetic  
Engineering*



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is a publisher's version PDF file.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Obu, J., Podobnikar, T. 2013. Algoritem za prepoznavanje kraških kotanj na podlagi digitalnega modela reliefa = Algorithm for karst depression recognition using digital terrain Models. Geodetski vestnik 57, 2: 260-270.

DOI: <http://dx.doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2013.02.260-270>  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/4499/>

Datum arhiviranja / Archiving Date: 14-09-2014

# ALGORITEM ZA PREPOZNAVANJE KRAŠKIH KOTANJ NA PODLAGI DIGITALNEGA MODELA RELIEFA

ALGORITHM FOR KARST DEPRESSION RECOGNITION USING DIGITAL TERRAIN  
MODELS

*Jaroš Obu, Tomaž Podobnikar*

UDK: 528.4:551.44(497.4)

## IZVLEČEK

Algoritem samodejnega prepoznavanja kraških kotanj deluje na podlagi digitalnega modela reliefa (DMR) in večinoma temelji na analizah s premikajočim se lokalnim oknom velikosti  $3 \times 3$  celice. Razdeljen je na štiri dele: računanje porečij, omejevanje kotanj, omejevanje kotanj višjega reda in izločanje nekraških kotanj. Jedro izdelanega algoritma je, da so kotanje omejene z višino najnižje robne celice porečja. Kotanje višjega reda pa so prepoznane z algoritmom zalivanja predhodno prepoznanih kotanj. Uspešnost algoritma je bila preizkušena na testnem območju Krasa na DMR-jih s prostorsko ločljivostjo 12,5 metra in 3 metre. Pokazalo se je, da so rezultati precej odvisni od več lastnosti in kakovosti DMR-ja, predvsem od prostorske ločljivosti.

## KLJUČNE BESEDE

*kraške kotanje, geomorfometrija, GIS, DMR, prostorske analize*

Klasifikacija prispevka po COBISS-u: 1.01

## ABSTRACT

An algorithm of automated karst depression recognition uses a digital terrain model (DTM) and mainly applies the methods of a moving window with a kernel size of  $3 \times 3$  cells using focal functions. It is divided into four parts: watershed calculation, depression delineation, higher level depression delineation and elimination of non-karst depressions. The essential part of the algorithm is the delineation of depression by the elevation of the lowest border cell of watershed. Depressions at higher levels are recognised by filling previously recognised depressions. The performance of algorithm was tested on test area in the Kras region (Slovenia) using DTMs with a spatial resolution of 12.5 m and 3 m. The results mainly depend on the DTM characteristics and quality, especially of their spatial resolution.

## KEY WORDS

*karst depressions, geo-morphometry, GIS, DTM, spatial analysis*

## 1 UVOD

Informacije o zemeljskem površju je bilo некоč mogoče pridobiti zgolj s terenskim delom. Z razvojem geoinformatike in daljinskega zaznavanja so na voljo vse boljše zbirke podatkov, na podlagi katerih lahko te informacije pridobivamo brez neposrednega stika s površjem. Zaradi velikega obsega podatkov se je pojavila potreba po izdelavi samodejnih postopkov za obdelavo prostorskih podatkov in pridobivanje iskanih informacij (Podobnikar in Székely, 2008). V našem primeru so to območja zemeljskega površja, ki ustrezajo izbranim merilom za kraške kotanje.

Veda, ki preučuje izoblikovanost zemeljskega površja, je geomorfologija. Njeno področje, ki obravnava izoblikovanost površja s kvantitativnega vidika, se imenuje geomorfometrija

(MacMillan, Shary, 2009). Evans (1972) je razdelil geomorfometrijo na splošno, ki obravnava Zemljino površje zvezno, in posebno, ki obravnava diskretne površinske strukture. Iskanje kraških kotanj spada v posebno geomorfometrijo, saj iščemo samo točno določene reliefne oblike.

Kotanje razumemo kot reliefne oblike, ki so vbočene v smeri vseh azimutov in pomenijo primanjkljaj mase na površju. Pogoste so na kraškem reliefu, najdemo pa jih tudi na ledeniškem in puščavskem reliefu (Šušteršič, 1986). Izraz kraške kotanje tako označuje kotanje, ki se pojavljajo na kraškem tipu reliefa. Na različnih območjih kraškega reliefa po svetu se pojavljajo različne kotanje in zato so različna tudi njihova poimenovanja. Posebej značilna reliefna oblika pa so kraške kotanje na Dinarskem krasu (Mihevc, Prelovšek, Zupan Hajna, 2010). Pri nas se za kraške kotanje največkrat štejejo vrtače, udornice, uvale, kraška polja, slepe doline in konte. Za samodejno prepoznavanje kraških kotanj je treba določiti morfometrična merila, ki pa ne morejo povsem zajeti subjektivnega dojemanja kraških kotanj. S podobno težavo se je pri opredeljevanju vrhov ukvarjal Podobnikar (2012). V našem primeru smo kraško kotanje omejili do višine iztoka. To je višina, pri kateri bi se ob predpostavki, da je kotanja neprepustna in jo zalijemo z vodo, ta iz nje pričela izlivati. Ta omejitev ne zajame delov kotanje, ki so nad to višino. Za razlikovanje med kraškimi in nekraškimi kotanjami smo uporabili morfometrični merili globino in povprečni premer kotanje.

Kraške kotanje se pogosto pojavljajo v zapletenih medsebojnih odnosih. To pomeni, da se lahko kotanje iste vrste pojavljajo druga znotraj druge ali različne kotanje znotraj drugih kotanj (Habič, 1986). Tako lahko na primer vrtača obstaja znotraj večje vrtače ali pa znotraj kraških polj, uval, slepih dolin, kont in celo udornic. Ti odnosi pomenijo dodatno težavo pri samodejnem prepoznavanju kraških kotanj. Lastnost kotanje, da se pojavlja znotraj druge kotanje, smo poimenovali red kotanje. Najmanjša kotanja je prvega reda. Vsaka naslednja kotanja, znotraj katere se pojavlja kotanja prejšnjega reda, pa je višja za en red.

Namen prispevka je opis izdelave algoritma za samodejno omejevanje in prepoznavanje kraških kotanj na podlagi izbranih in opredeljenih morfoloških meril (nadmorska višina iztoka, globina in povprečni premer kotanje). Pri izdelavi samodejnega algoritma za prepoznavanje kraških kotanj smo se osredotočili na izključno uporabo digitalnega modela reliefa (DMR).

## 2 PREGLED DOSEDANJIH ALGORITMOV

Neposrednih poskusov samodejnega prepoznavanja kraških kotanj pri nas še ni bilo zaslediti, če izvzamemo metode iskanja lokalnih ekstremov. Tovrstne ekstreme, med katerimi so bila lahko tudi dna kraških kotanj, je na podlagi DMR-ja na primer preučeval Krevs (1992). Ortar (2011) je v okviru preučevanja oziroma tipizacije in regionalizacije slovenskih mrazišč samodejno prepoznaval mrazišča oziroma posredno kraške kotanje najvišjega reda z ukazom »Fill« v programskem paketu ArcGIS in na podlagi DMR-ja.

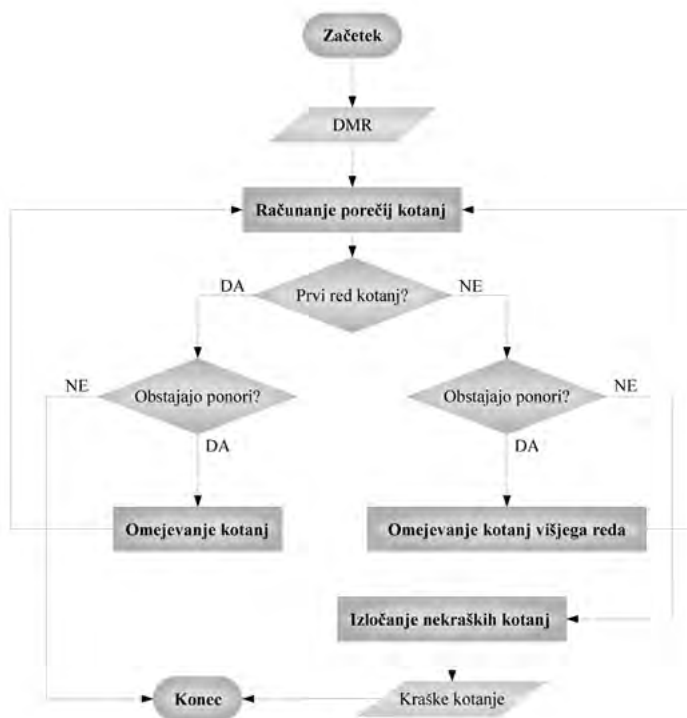
V tuji literaturi je zaslediti polsamodejne poskuse prepoznavanja kraških kotanj, ki temeljijo na uporabi DMR-ja in/ali posnetkov daljinskega zaznavanja. Vsi navedeni algoritmi so prilagojeni območjem raziskav, zato je mogoče, da bi bili rezultati na drugih območjih težje primerljivi. Guimarães s sodelavci (2005) je prepoznaval kotanje z daljinsko zaznamanimi satelitskimi posnetki

ASTER in ASTERDEM v osrednji Braziliji (skupina Bambui). Kraške kotanje so določili na podlagi sistemov razpok, ki so vidne na posnetkih, in na podlagi razlikovanja spektralnih odbojnih vzorcev na območju kraških kotanj, kjer je prst bolj vlažna in je torej več rastlinskega pokrova.

Siart s sodelavci (2009) je prepoznaval kraške kotanje na podlagi slojev naklona reliefa, rabe tal, ponorov, višinskih pasov, ekspozicij (dna kotanj praviloma obkrožajo vse ekspozicije v razponu od  $0^\circ$  do  $360^\circ$ ), geoloških značilnosti in posnetkov satelita Quickbird (kraške kotanje so na tem območju pogosto pokrite s sedimenti, bogatimi z železom). Območja kraških kotanj so izločili ročno na podlagi rastrskega sloja, ki so ga dobili s prekrivanjem in računskimi ter logičnimi operacijami med navedenimi sloji. Algoritem deluje tudi pri uporabi DMR-ja, vendar ni samodejen, zato so rezultati na drugih območjih težko primerljivi.

Polsamodejen postopek prepoznavanja kraških kotanj je izdelal tudi Suma s sodelavci (2010). Večje in srednje velike kraške kotanje na območju Andaluzije so prepoznali z združevanjem ortofotov in satelitskih posnetkov LANDSAT. Območja, ki so bila bogata z železovimi oksidi in so bila videti kot kraške kotanje, so nato kartirali v to kategorijo.

### 3 METODOLOGIJA IZDELAVE ALGORITMA



Slika 1: Diagram poteka algoritma

Izdelali smo algoritem, ki temelji zgolj na podatkih DMR. Celoten postopek temelji na simulaciji vodnega toka po površju, ki ga predstavlja DMR. Tu velja omeniti, da voda na kraškem površju praviloma ne teče po površju, zato se bodo vsi izrazi v prihodnjem besedilu nanašali zgolj na simulacijo vodnega toka po DMR-ju. Algoritem je bil napisan v programskem jeziku Python kot skriptnem jeziku za programski paket ArcGIS 9.3, pri čemer modul »arcgisscripting« uporablja izbrane ArcGIS-ove ukaze. Za branje in shranjevanje rastrskega DMR-ja v smislu dvodimenzionalnega polja smo uporabili knjižnico GDAL. Za delo s polji smo uporabili modul Numerical Python. Algoritem pretežno temelji na metodologiji lokalnih oken velikosti 3 x 3 celice. Razdelili smo ga na štiri dele (slika 1):

- računanje porečij kotanj,
- omejevanje kotanj,
- omejevanje kotanj višjega reda,
- izločanje nekraških kotanj.

### 3.1 Računanje porečij kotanj

Porečja kotanj so zelo pomembna konceptualna zasnova, saj so najširše opredeljeni del kotanj, ki pomeni zaledje za zlivanje vode v dna. Na podlagi simulacije porečja lahko kotanjo poljubno omejimo tako, da ne posegamo na območje druge kotanje istega reda. Računanje porečij temelji na sloju dnov kotanj in na sloju smeri odtoka, kjer ima vsaka celica podatek, v katero sosednjo celico se steka (Jenson in Domingue, 1988). Tako lahko začnemo računanje porečij v dneh kotanj in preverjamo, ali se sosednje celice zlivajo vanj in ali se vsaka naslednja celica zliva v celico, ki se je zlivala v dno kotanje.

Podlaga za računanje dnov kotanj in porečij je sloj smeri odtoka, kjer vsaka celica vsebuje podatek, v katero izmed sosednjih celic se izliva. Uporabili smo ArcGIS-ov ukaz »Flow Direction«. Posamezne celice dobijo vrednost  $2^n$  do sedme potence (1, 2, 4, 8 ...) glede na sosednjo celico, v katero se steka (Jenson in Domingue, 1988). Če se celica izliva v več sosednjih celic, se njihove vrednosti seštejejo. Iz vrednosti celice tako dobimo informacijo, v katere vse sosednje celice se ta izliva. Ponor je v smislu uporabljenega algoritma celica ali več med seboj povezanih celic, ki jim ne moremo določiti smeri odtoka. To se lahko zgodi, ko so vse sosednje celice višje od srednje ali ko se dve celici izlivata druga v drugo. Ponor (v našem primeru so to dna kotanj) se torej štejejo za točke oziroma celice, ki nimajo določenega odtoka in jim ni mogoče pripisati nobene izmed vrednosti odtoka (Mark, 1988). Z ArcGIS-ovim ukazom »Sink« dobimo sloj z dni kotanj, kjer ima vsako dno svojo zaporedno številko (ArcGIS, 2009).

Na podlagi slojev o smeri odtoka in dnov kotanj je mogoče izračunati porečja kotanj. Za vsako dno kotanje se požene funkcija z lokalnim oknom 3 x 3 celice, ki preveri, ali se sosednja celica izliva v središčno. Za vsako celico, ki se izliva v središčno (na začetku je to dno), ji funkcija dodeli zaporedno številko dna in pokliče samo sebe (rekurzija). Rekurzivni postopek se nadaljuje, dokler niso določene vse celice porečja. Porečja, ki so dobljena s tem postopkom, so enaka porečjem, ki jih dobimo z ArcGIS-ovim ukazom »Watershed« (ArcGIS, 2009). Zaradi hitrejšega delovanja algoritma, vgrajenega v ArcGIS, smo uporabili slednjega.

### 3.2 Omejevanje kotanj

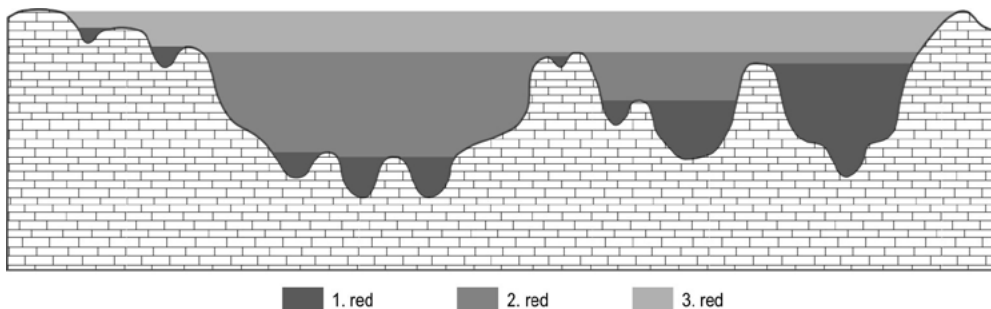
Kotanje smo omejili z višino iztoka. To je nadmorska višina najnižje robne celice kotanje. Ista celica je hkrati najnižja robna celica porečja. Tako je v postopku omejevanja kotanj za vsako porečje treba shraniti najnižjo nadmorsko višino robnih celic. Kot kotanja so določene le tiste celice porečja, ki imajo nižjo ali isto nadmorsko višino, kot je nadmorska višina iztoka.

Vhodna podatka za postopek omejevanja kotanj sta sloj s porečji kotanj in sloj nadmorskih višin. Postopek deluje z dvema funkcijama. Prva na podlagi lokalnega okna 3 x 3 najprej na sloju porečij preveri, ali je v lokalnem oknu vrednost, ki ni enaka središčni celici (to pomeni, da je celica na robu porečja). Če je ta pogoj izpolnjen, se v polje oziroma na seznam shrani nadmorska višina k zaporedni številki porečja, če je nižja od že obstoječe na seznamu. Rezultat te funkcije je seznam, kjer ima vsaka zaporedna številka porečja shranjeno najnižjo nadmorsko višino robne celice porečja. Druga funkcija prečeše rastrski sloj porečja kotanj in hkrati za vsako celico preveri, ali je njena nadmorska višina nižja ali enaka nadmorski višini pripadajočega porečja s seznamu. Celice, ki ustrezajo temu pogoju, so v izhodnem sloju določene kot kotanja in obdržijo zaporedno številko, preostale pa so izločene.

### 3.3 Omejevanje kotanj višjega reda

Lastnost pojavljanja kotanj znotraj drugih kotanj smo poimenovali red kotanje. Manjše kotanje so nižjega reda in se pojavljajo znotraj večjih kotanj višjega reda. Če se manjše kotanje pojavljajo znotraj večjih kotanj, so pri njihovem omejevanju z višino preliva omejene samo najmanjše. To so tiste, pri katerih je bilo najdeno dno in posledično izračunano porečje. Ker so te kotanje, ki so v našem primeru prvega reda, lahko del večje kotanje, je treba izračunati dno in porečje morebitne večje kotanje. To je mogoče, če najdene kotanje na DMR-ju navidezno zapolnimo in ponovimo postopek omejevanja kotanj. Pri vsaki ponovitvi dobimo kotanje višjega reda (slika 2). Ta postopek se ponavlja, dokler ni mogoče najti nobenega dna kotanje več oziroma voda neovirano teče čez celoten DMR.

S programerskega vidika je smiselno postopek omejevanja kotanj višjega reda vključiti v predhodni postopek omejevanja kotanj, saj je prvi razširjeni del slednjega. Dodatni sta funkcija za iskanje nadmorskih višin, do katerih je treba s simulacijo zaliti kotanje, in funkcija, ki te kotanje zalije. Funkcija za iskanje nadmorskih višin pri zalivanju kotanj je podobna funkciji za iskanje nadmorskih višin pri omejevanju. Razlika je, da se v lokalnem oknu preverja, ali je nadmorska višina celice, ki je sosednja robni celici porečja, višja od nadmorske višine iztoka in nižja od sedaj najdene nadmorske višine na seznamu. S tem pogojem poskrbimo, da pri nadaljnjih simulacijah vodnega toka vsa voda steče prek kotanje. Funkcija, ki zalije kotanje, je podobna funkciji, ki kotanje omeji. Razlika je, da se na DMR-ju spremenijo nadmorske višine celic kotanje v nadmorsko višino, določeno za simulacijo zalivanja. DMR s spremenjenimi nadmorskimi višinami na območju kotanj je izhodni sloj funkcije. Vse opisane funkcije se kličejo iz zanke, ki za vsako ponavljanje znova izračuna dna kotanj in porečja na DMR-ju z zalitimi kotanjami ter pokliče vse štiri opisane funkcije. Zanka se konča, ko na DMR-ju ni več mogoče najti nobenega dna kotanje.



Slika 2: Primer omejevanja kotanj višjega reda

### 3.4 Izločanje nekraških kotanj

Rezultat prej opisanih postopkov so vse kotanje, ki izhajajo iz DMR-ja. Kotanje se večkrat pojavljajo kot napake, nastale pri izdelavi DMR-ja (Burrough in McDonnell, 1998; Podobnikar, 2005). Tudi vse kotanje v naravi niso nujno kraške. Glede na krasoslovno literaturo (Kunaver, 1983; Habič, 1986; Gams, 2004) so kraške kotanje najpogosteje opisane kot kotanje, ki imajo premer, večji od 10 metrov, in globino, večjo od 2 metrov. Z merilom globine 2 metra pa bi lahko izločili tudi plitve, neizrazite kotanje, ki bi se lahko pojavljale kot napake DMR-ja. Območja izračunanih kotanj smo samodejno vektorizirali po mejah rastrskih celic ter napravili opisno statistiko, s katero smo pridobili podatke o globini in premeru kotanj. Z upoštevanjem obeh meril smo izločili nekraške kotanje.

## 4 REZULTATI

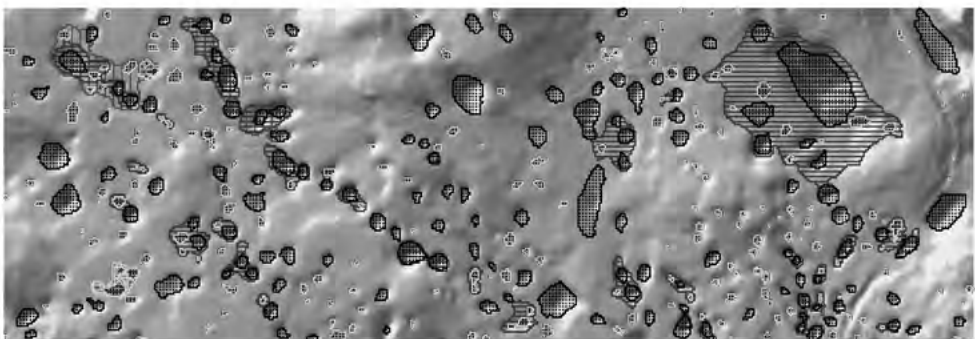
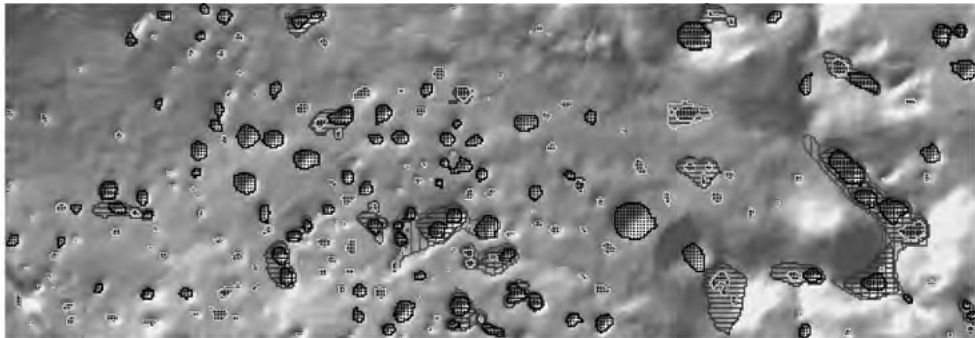
Algoritem smo preizkusili na DMR-ju s prostorsko ločljivostjo 12,5 metra, izdelanem z metodo, ki jo je razvil Podobnikar (2005), pri čemer gre za nacionalni model, dostopen na Geodetski upravi RS, ter in lidarskem DMR-ju (Kobler in Ogrinc, 2007). Lidarski DMR smo z bilinerano interpolacijo prevzorčili s prostorske ločljivosti 1 meter na prostorsko ločljivost 3 metre ter pri tem pospešili izvedbo algoritma. Rezultate smo primerjali tudi z dejanskim stanjem kraških kotanj na terenu.

Testno območje je na Krasu med Komnom in Štanjelom (slika 3), s koordinatami oglišč v Gauss-Kruegerjevem koordinatnem sistemu ( $y = 399.710$ ,  $x = 73.800$ ) in ( $y = 411.220$ ,  $x = 75.800$ ), s površino 23 km<sup>2</sup>. Na vzhodu sega območje do doline Raše, kjer je razvit rečni relief, v splošnem pa je na območju razvit tipičen kraški relief z raznolikimi kotanjami. Območje je na slikah 4 in 5 prikazano v dveh delih (leva polovica zgoraj in desna polovica spodaj).

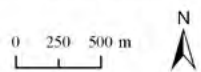
Na DMR-ju 12,5 je algoritem prepoznal 682 kotanj (slika 4). Izmed teh je kotanj prvega reda 601, kotanj drugega reda je 73, kotanj tretjega reda pa je osem. 410 kotanj ne ustreza merilom za kraško kotanjo. V tem primeru so vse izločene kotanje plitvejšje od 2 metrov, pri čemer imajo vse kotanje zaradi ločljivosti DMR-ja večji premer od 10 metrov. Kotanje prvega reda so večinoma vrtače, medtem ko so kotanje drugega in tretjega reda kompleksnejše in pogosto v naravi pomenijo združene vrtače.



Slika 3: Testno območje (vir podlage: DPK 250, Geodetska uprava RS)



- 1. red
- 3. red
- 2. red
- izločeno

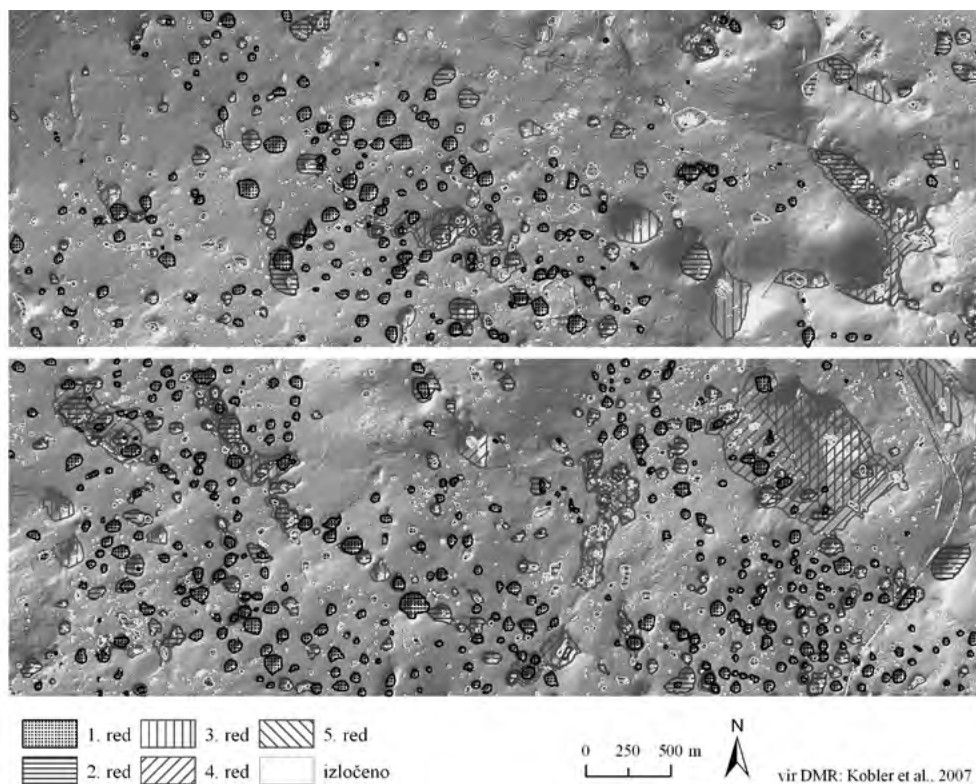


vir DMR: GURS, 2011

Slika 4: Rezultati prepoznavanja kraških kotanj algoritma na DMR z ločljivostjo 12,5 metra



Na lidarskem DMR-ju je algoritem prepoznal 7715 kotanj z najvišjim prepoznanim redom 5 (slika 5). Izmed teh je 6482 kotanj prvega, 1031 drugega, 174 tretjega, 27 četrtega in ena petega reda. Merilom za kraško kotanjo ne ustreza 6796 kotanj, večinoma zato, ker so preplitve, nekaj pa jih ima manjši premer od 10 metrov. Kotanje prvega reda se pojavljajo od velikosti ene celice do precej večjih, ki so lahko tudi nepravilne oblike. Precej najmanjših kotanj prvega reda predstavlja dna večjih kotanj, ki so razčlenjena zaradi visoke prostorske ločljivosti DMR-ja. Kotanje drugega in tretjega reda predstavljajo združena manjša dna večjih kotanj, kotanje okroglih oblik in nekatere večje kotanje, ki so nepravilnih oblik. Kotanje četrtega in petega reda povezujejo manjše kotanje v kotanje izrazito nepravilnih oblik.



Slika 5: Rezultati prepoznavanja kraških kotanj algoritma na lidarskem DMR-ju z ločljivostjo 3 metre

	1. red	2. red	3. red	4. red	5. red	Skupaj	Kraške
DMR 12,5	601	73	8	0	0	682	272
Lidarski DMR	6482	1031	174	27	1	7715	919

Preglednica 1: Število prepoznanih kotanj na obeh DMR-jih

## 5 RAZPRAVA

Uspešnost prepoznavanja kotanj je precej odvisna od lastnosti DMR-ja oziroma njegove kakovosti (predvsem prostorske ločljivosti in geomorfološke pravilnosti). Pri rastrskih DMR-jih so podatki predstavljeni v mreži kvadratnih celic, zato po robovih celic potekajo

tudi meje kotanj. Glede na primerjavo z dejanskim stanjem kraških kotanj smo ugotovili, da model kotanjo, ki je bistveno večja od velikosti celice, lahko prepozna in dobro zajame. Če je velikost kotanje približno enaka velikosti celice, algoritem kotanjo večinoma prepozna, če je v središču celice, sicer jo prepozna redko ali pa sploh ne. Uspešnost prepoznavanja kotanj je torej odvisna tudi od lokacije kotanje glede na dano rastrsko mrežo, pa tudi od oblike kotanj. Pri ločljivosti DMR-ja 12,5 metra se je izkazalo kot problematično prepoznavanje kotanj s premerom, manjšim od 40 metrov. Z manjšanjem ločljivosti se poveča tudi velikost kotanj, ki so lahko prepoznane. Na lidarskem DMR-ju so prepoznane nekatere kotanje, ki jih ne dojemamo več kot kraške kotanje, ampak kot neravno površje. Odvisnost rezultatov od izbire DMR-ja se kaže v številu prepoznanih kotanj, ki je pri lidarskem DMR-ju za faktor 11 večje kot pri DMR-ju 12,5 metra (preglednica 1). Na lidarskem DMR-ju z ločljivostjo 3 metre so med kotanjami prepoznane tiste, ki na DMR-ju 12,5 niso bile prepoznane, in tudi tiste, ki niso kraške. Posledično je bilo na lidarskem DMR-ju izločenih bistveno več kotanj (85 %) kot na DMR-ju 12,5 (60 %).

V primerjavi z drugimi algoritmi za prepoznavanje kraških kotanj deluje predlagani algoritem zgolj na podlagi DMR-ja in je samodejen. Določitev natančnih meja kotanj in meril za izločanje kraških kotanj poveča objektivnost postopka in omogoča primerjavo med pokrajinsko (geomorfološko) različnimi območji. Postopek samodejnega prepoznavanja kotanj je zaradi avtomatizacije hitrejši od dosedanjih polsamodejnih in ročnih postopkov. Izbira programskega jezika Python je bila smiselna zaradi uporabe že obstoječih ArcGIS-ovih ukazov. Kot slabost pa se je pokazala njegova počasnost. Pri uporabi testnih območij z več kot 5000 x 5000 celicami je procesiranje na namiznem računalniku trajalo več ur. Kot slabost omejevanja kotanj na podlagi višine iztoka se je pokazala nezmožnost omejitve območij kotanj, ki se pojavljajo na dnu večjih kotanj, tako da med njima ne pride do prelivanja (slika 2, kotanja skrajno desno). Prepoznana je samo večja kotanja. Pri prepoznavanju kraških kotanj nismo ločili med posameznimi vrstami, kot so vrtača, uvala, udornica, kraško polje ipd. Morfometrične meje med njimi niso jasno določene, zato jih raziskovalci večkrat obravnavajo subjektivno. Zaradi navedenega je objektivna določitev meril za klasifikacijo kraških kotanj precej težavna (Obu, 2011).

## 6 SKLEP

V prispevku smo pokazali, kako je mogoče postopek prepoznavanja kraških kotanj avtomatizirati. Postopek deluje izključno na podlagi DMR-ja, zato je uporaba enostavna in univerzalna. Algoritem sestavljajo štirje deli, njegov koncept pa močno temelji na metodah lokalnih oken velikosti 3 x 3 celice. V prvem delu se izračunajo porečja na podlagi slojev smeri odtoka in dnov kotanj. Iz porečij se zatem omejijo kotanje na podlagi najnižjih robnih celic porečij. Z zalivanjem prepoznanih kotanj se v tretjem delu omejijo kotanje višjih redov. Na koncu se z merilom o globini in premeru kotanj izločijo tiste, ki niso kraške.

Primerjava zagona algoritma na testnem območju pri uporabi DMR-jev ločljivosti 3 metre in 12,5 metra je pokazala, da so rezultati močno odvisni od prostorske ločljivosti in geomorfološke pravilnosti DMR-jev. Rezultati so bolj verodostojni za DMR ločljivosti 3 metre, medtem ko se je ločljivost 12,5 metra izkazala kot premajhna.

Čeprav ima algoritem nekaj pomanjkljivosti, ima tudi veliko prednosti pred ročnim prepoznavanjem kraških kotanj. Navsezadnje odpira samodejno prepoznavanje kraških kotanj mnogo aplikativnih možnosti uporabe na različnih področjih, kot so varstvo okolja, prostorsko planiranje, podpora pri odločanju ali arheologija.

## ZAHVALA

Algoritem je nastal v okviru diplomskega dela, v katerem je obravnavano prepoznavanje kraških kotanj glede na različne okoliščine in ki je nastalo pod mentorstvom Marka Krevsa ter somentorja Tomaža Podobnikarja. Avtorja članka se zahvaljujeva dr. Marku Krevsu, vsem, ki so kakorkoli pripomogli k izdelavi diplomskega dela, ter recenzentoma.

## Literatura in viri:

- ArcGIS (2009). Datoteka za pomoč pri uporabi programskega paketa ArcGIS 9.3 (Help).*
- Burrough, P. A., McDonnell, R. A. (1998). Principles of geographical information systems. Oxford: Oxford University Press.*
- Evans, I. S. (1972). General Geomorphometry, derivatives of altitude and descriptive statistics. V: R. V. Chorley (ur.), Spatial Analysis in Geomorphology. London: British Geomorphological Research Group.*
- Digitalni model reliefa 12,5 (2005). Ljubljana: Geodetska uprava Republike Slovenije.*
- Državna pregledna karta 1: 250.000 (2011). Ljubljana: Geodetska uprava Republike Slovenije.*
- Gams, I. (2004). Kras v Sloveniji v prostoru in času. Ljubljana: Založba ZRC.*
- Guimarães, R. F., de Carvalho Júnior, O. A., de Souza Martins, A., Ferreira de Carvalho, A. P., Trancoso Gomes, R. A. (2005). Detection of karst depression by ASTER image in the Bambuí Group, Brazil. V: Proceedings of the SPIE 5983. Brugge: College of Europe Press, 328–339.*
- Habič, P. (1986). Površinska razčlenjenost Dinarskega krasa. Acta carsologica, 14(15), 39–58.*
- Jenson, S. K., Domingue, J. O. (1988). Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54(11), 1593–1600.*
- Kobler, A., Ogrinc, P. (2007). Rein algorithm and the influence of point cloud density on NDSM and DEM precision in a submediterranean forest. IAPRS Volume XXXVI(3), 216–220.*
- Krevs, M. (1992). Iskanje lokalnih ekstremov na DMR / The recognition of local surface extremes on DEM. Geografski vestnik 64, 205–218.*
- Kunaver, J. (1983). Geomorfološki razvoj Kaninskega pogorja s posebnim ozirom na glaciokraške pojave. Geografski zbornik, 22, 197–346.*
- MacMillan, R. A., Shary, P. A. (2009). Landforms and Landform Elements in Geomorphometry. V: T. Hengl, H. I. Reuter (ur.) Geomorphometry – Concepts, Software, Applications. Oxford: Elsevier.*
- Mark, D. M. (1988). Network Models in Geomorphology. V: M. G. Anderson (ur.) Modelling in Geomorphological Systems. New York: John Wiley.*
- Mihevc, A., Prelovšek, M., Zupan Hajna, N. (2010). Introduction to the Dinaric Karst. Postojna: Institut za raziskovanje krasa ZRC SAZU.*
- Obu, J. (2011). Prepoznavanje kraških kotanj na podlagi digitalnega modela višin. Diplomsko delo. Ljubljana: Filozofska fakulteta.*
- Ortar, J. (2011). Tipizacija in regionalizacija slovenskih mrazišč. Diplomsko delo. Ljubljana: Filozofska fakulteta.*
- Podobnikar, T. (2005). Production of integrated digital terrain model from multiple datasets of different quality. International Journal of Geographical Information Science, 19(1), 69–89.*
- Podobnikar, T. (2012). Detecting Mountain Peaks and Delineating Their Shapes Using Digital Elevation Models, Remote Sensing and Geographic Information Systems Using Autometric Methodological Procedures. Remote Sensing, 4,784–809.*

*Podobnikar, T., Székely, B. (2008). Poskus analize potencialno nevarnih vršajev z DMR-jem. V: D. Perko et al. (ur.) Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2007–2008. Ljubljana: Založba ZRC, 73–81.*

*Siart, C., Bubenzer, O., Eitel, B. (2009). Combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: A multi-component case study on Mediterranean karst in Central Crete. Geomorphology, 112(1-2), 106–121.*

*Suma, A., Prieto, F. J. G., Domenico de Cosmo, P. (2010). Detection and mapping of karst depressions through remote sensing approach: an example from Sierra de Libar. V: »Classical karst«. 18th international karstological school. Postojna: Inštitut za raziskovanje krasa, 63.*

*Šušteršič, F. (1986). Zaprte kraške globeli, problematika interpretacije in kartografskega prikaza. Acta carsologica, 14(15), 89–98.*

**Prispelo v objavo: 7. november 2012**

**Sprejeto: 5. februar 2013**

**Jaroš Obu, univ. dipl. geograf**

Alfred Wegener Institute

Telegrafenberg A43, D-14473 Potsdam

e-pošta: jarošlav.obu@awi.de

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

Znanstvenoraziskovalni center SAZU, Novi trg 2, 1000 Ljubljana

e-pošta: tp@zrc-sazu.si in

UL Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

e-pošta: tomaz.podobnikar@ifgg.uni-lj.si