



PROUČEVANJE VZPETIN KOPASTEGA KRASA S POMOČJO DIGITALNEGA MODELA VIŠIN

Izvirni znanstveni članek
COBISS 1.01
DOI: 10.4312/dela.52.141-160

Izvleček

Glavni namen članka je prikaz postopka prepoznavanja in klasifikacije geomorfoloških oblik kopastega krasa na štirih različnih območjih v Sloveniji ter na podlagi morfometrične analize podati nove ugotovitve o Dinarskem kopastem krasu. Analiza je potekala s pomočjo programskega orodja *ArcMap* 10.4.1, kjer smo oblike prepoznali s pomočjo orodja *Fill*. Avtorja ugotavljata, da je kopasti kras zelo raznolik tip površja, ki se od območja do območja razlikuje. Največji vpliv na oblikovanost vrhov pripisujeta strukturnim geološkim razmeram ter globini vadozne cone.

Ključne besede: kopasti vrhovi, GIS, Dinarski kras, geomorfologija, DMV, samodejno prepoznavanje oblike, Slovenija

STUDY OF CONE KARST PINNACLES WITH THE USE OF DIGITAL ELEVATION MODEL

Abstract

The main goal of the article is detection and classification of cone karst landforms in four different study areas in Slovenia and the introduction of new Dinaric cone karst findings based on the morphometric analysis. Analysis was made in *ArcMap* 10.4.1, where the landforms were recognized using the *Fill* tool. Authors found out

⋮ * Ulica Metoda Mikuža 16, SI-1000 Ljubljana

⋮ ** Oddelek za geografijo, Filozofska fakulteta Univerze v Ljubljani, Aškerčeva 2,
⋮ SI-1000 Ljubljana

⋮ e-pošta: sasostefanovski34@gmail.com, blaz.repe@ff.uni-lj.si

that cone karst is a very diverse type of relief that differs from area to area. The biggest factors of cone karst landform shaping are structural geological settings and the depth of the vadose zone.

Keywords: cone hills, GIS, Dinaric karst, geomorphology, DEM, automated feature recognition, Slovenia

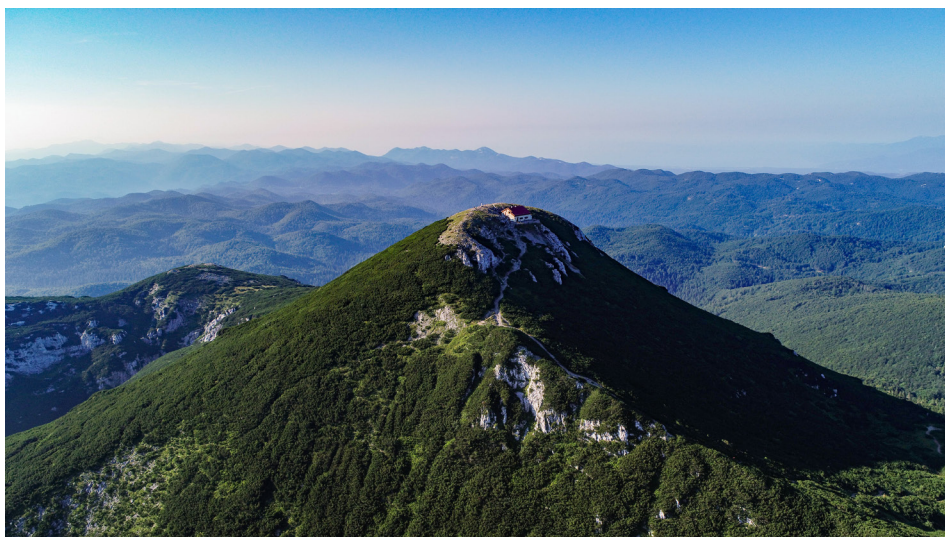
1 UVOD

Kopasti kras je tip kraškega površja, ki se mu je na območju zmerno toplega podnebja v primerjavi z drugimi tipi krasa v krasoslovju namenjalo manj pozornosti. Gre za tip površja, kjer se osamljeno ali iz skupne osnove dvigajo več deset metrov visoke kraške vzpetine. Te vzpetine imajo tloris večinoma okroglaste oblike, vendar se med seboj razlikujejo po strmini pobočij in reliefni energiji (Habič, 1968, 1980; Gams, 2004). V kontekstu kopastega krasa moramo upoštevati tudi kotanje, ki ležijo med vzpetinami. Na območju zmerno toplega podnebja te kotanje imenujemo uvale (Ford, Williams, 2007; Čalić, 2011; Stepišnik in sod., 2019).

Podrobneje proučene so kraške vzpetine tropskih predelov (Daneš, 1915; Lehmann, 1936; Sweeting, 1972; Williams, 1987; Sweeting, 1995; Ford, Williams, 2007; Salomon, 2011). Kraške vzpetine na teh območjih pogosto delimo v dve skupini. Prvo skupino imenujemo stožčasti kras (angl. *cone karst*, kit. *fengcong*) in predstavlja šope vrhov različnih oblik ter dimenzij, ki se dvigujejo iz skupne osnove (Ravbar, 2002). Izraz stožčasti kras se pogosto uporablja za sopomenko kopastega krasa, vendar izraz ni najbolj primeren, saj predstavlja zgolj eno izmed dveh skupin tropskih kraških vzpetin, poleg tega so vrhovi zmerno toplega podnebja redkeje stožčasto oblikovani. S korozijskim poglobljanjem vmesnih kotanj stožčastega krasa, ki jim v tropskih predelih pravimo cockpiti (Lehmann, 1936; Sweeting, 1972; Stepišnik, 2011), te dosežejo nivo kraške talne vode, kjer se poglobljanje zaključí. V nadaljevanju se preoblikujejo zgolj vrhovi, katerih pobočja se oddaljujejo eno od drugega, dokler ne postanejo izolirani. Tip krasa, kjer se vzpetine dvigujejo samostojno na aluvialni ravnici, močvirju ali sredi morja, imenujemo stolpasti kras (angl. *tower karst*, kit. *fenglin*) (Ravbar, 2002; Stepišnik, 2011).

Habič (1968; 1980; 1986) je podal teorijo, da je dinarski kopasti kras relikv tropskega podnebja v terciarju. S prisotnostjo zmrzalnega preperevanja in manj intenzivne evapotranspiracije naj bi iz prepadnih sten nastala aktivna in uravnotežena pobočja. V pleistocenu so se vmesne kotanje intenzivno lokalno poglobljale (Habič, 1968). Teorije, ki temelji na klimatski geomorfologiji, ne moremo z gotovostjo potrditi, saj ni dokazov, ki bi jo podprli.

Slika 1: Snežnik, pogled proti jugu (foto: U. Stepišnik).



Habiča (1968; 1980; 1986) lahko označimo za edinega, ki je podrobneje proučeval dinarski kopasti kras. Izdelal je klasifikacijo, kjer je vrhove klasificiral v tri razrede glede na razmerje med reliefno energijo in dolžino pri vzhodu. Vrhove je tudi ločil glede na obliko, kjer je za kopasto oblikovane vrhove ponudil ime hum. Poimenovanje je ponesrečeno, saj hum razumemo kot osamel vzpetino na kraškem polju (Gams, 2004).

Od zadnje podrobnejše raziskave na temo kopastega krasa je minilo več kot 30 let. V tem času so se izjemno spremenile tudi metode geomorfološkega proučevanja. Z razvojem kvantitativnih metod in podatkov je omogočeno proučevanje površja na daljavo. S pomočjo geoinformacijskih orodij lahko izdelamo postopke prepoznavanja reliefnih oblik ter jih v nadaljevanju analiziramo. Proučevanja kopastega krasa smo se lotili sistematično. Glavni namen prispevka je prikaz izdelave postopka prepoznavanja kraških vzpetin s pomočjo programskega orodja *ArcMap 10.4.1*. Postopek temelji na nivojskem zapolnjevanju inverznega DMV-ja. Vzpetine smo morfometrično analizirali ter klasificirali na podlagi nivoja, na katerem je bila oblika prepoznana, in oblikovanosti, kar smo želeli storiti objektivno s pomočjo avtomatiziranih geoinformacijskih postopkov.

2 METODE IN MATERIALI

Raziskava ima štiri metodološke sklope. Prvi sklop predstavlja prepoznavanje oblik kopastega krasa na podlagi digitalnega modela višin (DMV) s pomočjo avtomatiziranega, iterativnega zapolnjevanja kotanj. V drugem delu smo ročno urejali rezultate avtomatiziranega postopka, kjer smo odstranili oblike, ki ne ustrezajo kriterijem, ter dodali tiste, ki so s postopkom ostale neprepoznane. V tretjem sklopu smo izvedli morfometrično analizo. Na podlagi variacijskega razmika, nivoja zaznavanja in ovalnosti smo v zadnjem sklopu oblike kopastega krasa klasificirali.

Slika 2: Metodološki koraki.

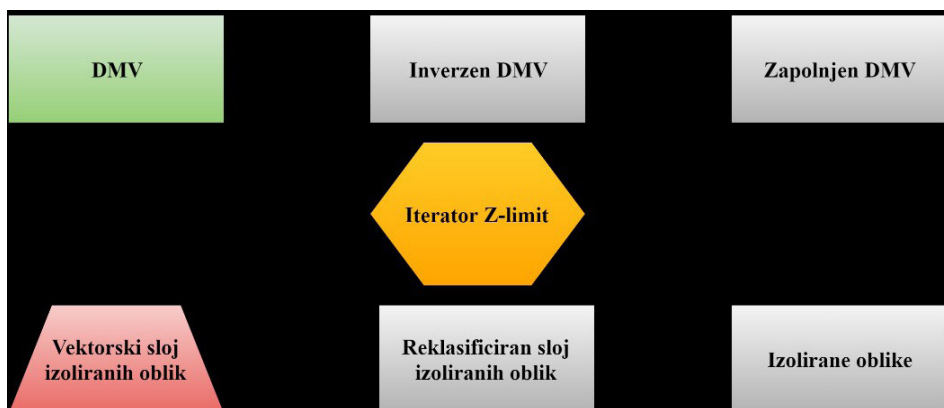


Inventarizacije geomorfoloških oblik, vezanih na kraške vzpetine, smo se lotili s pomočjo geoinformacijskega orodja *ArcMap 10.4.1*, kjer smo oblike identificirali na podlagi digitalnega modela višin ločljivosti 5 metrov. Postopek je procesorsko, časovno in spominsko zahteven. Temelji na uporabi hidrološkega orodja *Fill*, ki je namenjeno odstranjevanju ponorov DMV-ja. Orodje *Fill* je Grlj (2014) uporabil za prepoznavanje kraških kotanj, kjer je nato na podlagi morfometričnih značilnosti izoliral brezstropne jame. Orodje smo uporabili za prepoznavanje kraških vzpetin, kjer je treba kot vhodni sloj definirati inverzen DMV. Vhodni DMV proučevanega območja pretvorimo v inverzen DMV, s čimer se tudi kotanje pretvorijo v vrhove ter obratno. S pomočjo hidrološkega orodja *Fill* nastale kotanje nato nivojsko zapolnjujemo. Inverzen DMV dobimo z enačbo:

$$\text{InverzenDMV} = (\text{DMV} - Z_{\text{max}}) \times (-1) + Z_{\text{min}}$$

Kjer DMV predstavlja digitalni model višin proučevanega območja, Z_{max} najvišjo nadmorsko višino območja in Z_{min} najnižjo. Orodje *Fill* ponuja možnost nivojskega zapolnjevanja s pomočjo parametra *Z-limit*. Če je variacijski razmik vzpetine večji kot vrednost parametra *Z-limit*, kotanja inverzne vzpetine ostane nezapolnjena. Uporabili smo vrednosti od 10 do 150 metrov s korakom zapolnjevanja enakim 2. Najvišjo in najnižjo vrednost smo določili glede na Habičeve (1980) opise. Ko od zapolnjenega DMV-ja odštejemo inverzen DMV, izoliramo zaznane vzpetine, ki jih nato avtomatično pretvorimo v vektorske. Rezultat prvega koraka je enainšedeset vektorskih podatkovnih slojev. Te združimo z orodjem *Merge* in pobrišemo dvojnike. Z orodjem *Sort* nato uredimo nivojski prikaz glede na površino od najmanjšega do največjega.

Slika 3: Postopek za prepoznavanje kraških vzpetin.



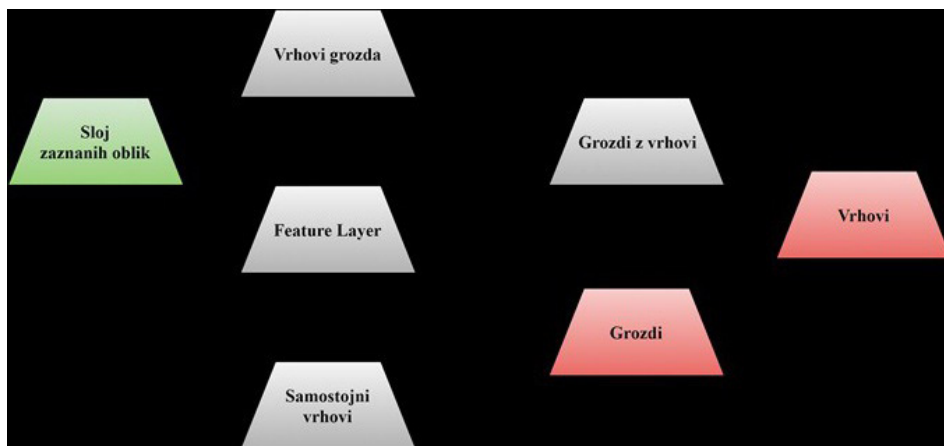
Večine zaznanih vzpetin ni mogoče šteti za oblike kopastega krasa. Obdržali smo vse tiste vzpetine, kjer za njihove morfometrične parametre velja:

$$\frac{P}{h} \times 10^4 \geq 1$$

Pri čemer je P površina vzpetine in h variacijski razmik. Na ta način se znebimo vseh mnogokotnikov, ki glede na površino ne predstavljajo znatnega dviga površja. Večinoma gre za vrhove z izjemno majhnim tlorisom (nekaj 10 m^2) in obsežna dvignjena območja, ki jih je algoritem vseeno zaznal kot vzpetino. S pomočjo topografskih zemljevidov merila 1 : 25.000 smo izbrisali tudi antropogene oblike (npr. dvignjeno površje ob železnici). V primerih, kjer je en vrh ali baza vrhov zaznalo večkrat, smo obdržali zgolj zadnji, največji mnogokotnik. Nekaj oblik je bilo treba dodati ročno s pomočjo najnižje ležeče zaprte plastnice pri ekvidistanci 5 metrov. Večinoma je šlo za najvišji vrh skupine vrhov.

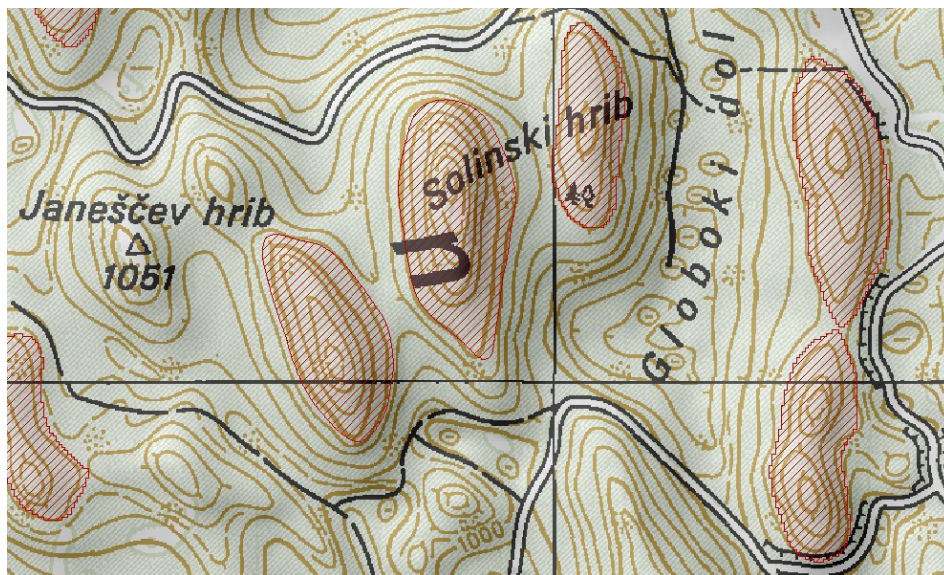
Sledila je klasifikacija oblik kopastega krasa. Slovenska literatura nivojske klasifikacije kraških vzpetin ne pozna, primanjkujejo tudi natančnejše morfometrične definicije in opisi vzpetin. Sprva smo oblike delili glede na to ali gre za en vrh ali skupno bazo več vrhov. Skupno bazo vrhov smo poimenovali kopasti grozd. Gre za geomorfološko obliko, ki se pojavlja v bolj razgibanem svetu, izjemoma pa tudi na uravninah. Značilno je, da imajo kraške vzpetine vnožja na približno enaki nadmorski višini. Posebna vrsta kopastih grozdov so kopasti hrbti. Gre za tip kopastega grozda, kjer si kraške vzpetine sledijo v nizu in izkazujejo skupno navezavo na lokalno geološko strukturo. Kopasti hrbet je pogosta oblika visokega dinarskega krasa. Hrbte smo od grozdov ločili ročno.

Slika 4: Postopek ločevanja vrhov in grozdov.



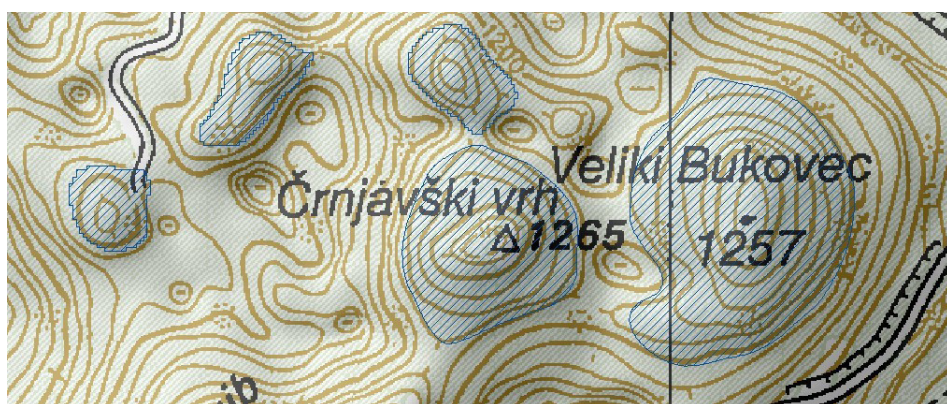
Obenem smo se odločili tudi za klasifikacijo kopastih vrhov s pomočjo avtomatiziranega postopka. Slovenska (Habič, 1980; Stepišnik, 2017) in tuja literatura (Salomon, 2011) opisujeta, da so si kopasti vrhovi morfološko precej različni. Poleg razlik v variacijskem razmiku in premeru je najbolj očitna razlika v podolgovatosti oziroma ovalnosti.

Slika 5: Rebra na osrednjem delu Nanosa.



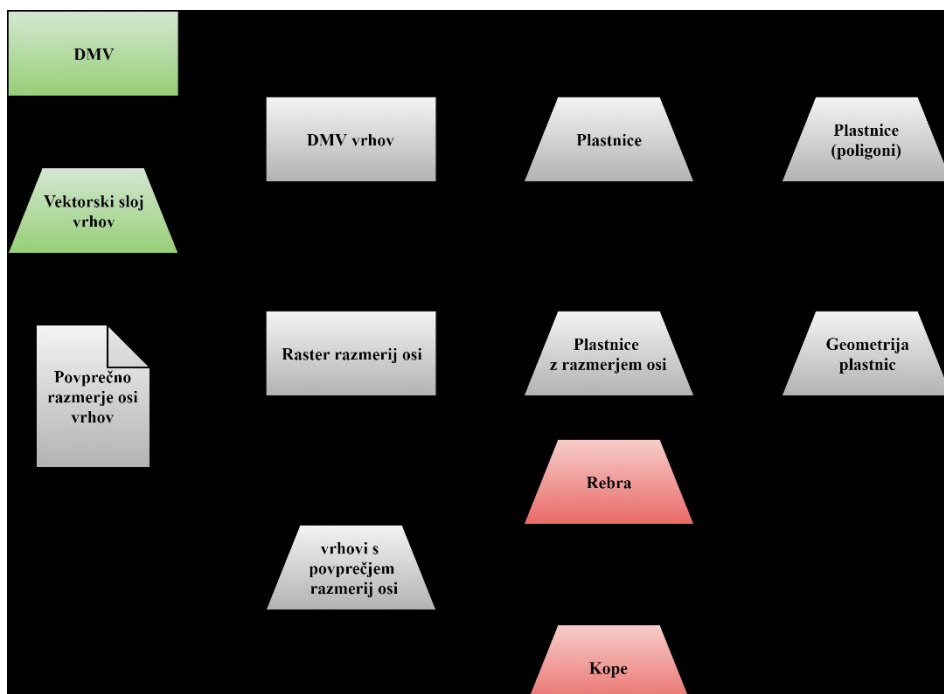
V literaturi, ki obravnava kraško površje, pogosto zasledimo termin greben. Njegovo uporabo na krasu težko upravičimo, saj gre za geomorfno obliko, ki jo najdemo na fluvialnem površju. V primeru grebenasto oblikovanih kopastih vrhov površinsko tekoča voda ni tista, ki je odgovorna za njihovo preoblikovanje, temveč je to verjetno posledica lokalne geološke strukture. Podolgovate vrhove smo poimenovali rebra. Zanje je značilna izrazita slemenitev. Vrh je neizrazit in razpotegnjen v smeri daljše osi kraške vzpetine, zato je tudi naklon v tej smeri bolj blag kot prečno na rebro. Kope so kraške vzpetine, ki so bolj ovalne oblike in jim pogosto težje določimo orientacijo, kot je to v primeru reber. Njihov vrh je precej bolj izrazit ter je lahko oblikovan stožčasto ali bolj položno. Vrednosti naklonov različnih smeri neba pri kopah precej manj variirajo kot pri rebrih (Stefanovski, 2018).

Slika 6: Kope na vzhodnem delu Nanosa.



Ovalnost se lahko z višino vzpetine drastično spreminja, zato klasifikacija zgolj na podlagi razmerja daljše in krajše osi ob vznožju ni smiselna. Oblike smo klasificirali glede na razmerja osi plastnic pri ekvidistanci 5 metrov, kjer smo dobili vrednosti od 0 do 1. Če ovalnost znaša 1, pomeni, da so vse osi enako dolge. Vse vzpetine, katerih ovalnost je manjša ali enaka 0,5, spadajo v skupino reber. Oblike, ki jih zaradi prenizkega variacijskega razmika nismo mogli šteti med kraške vzpetine, vendar dosegajo variacijski razmik med 5 in 10 metrov, smo poimenovali grbe. Gre za manjše pregibe na površju, ki ne dosegajo višine 10 metrov. Grbe lahko predstavljajo začetni stadij razvoja kopastega vrha, kjer se okoliške kotanje še niso dovolj poglobile. V nekaterih primerih pa predstavljajo zaključni stadij razvoja, kadar se kotanje več ne poglobljajo, mehanske sile pa delujejo zgolj na vzpetino in jo tako nižajo (Stefanovski, 2018).

Slika 7: Postopek klasifikacije vrhov.

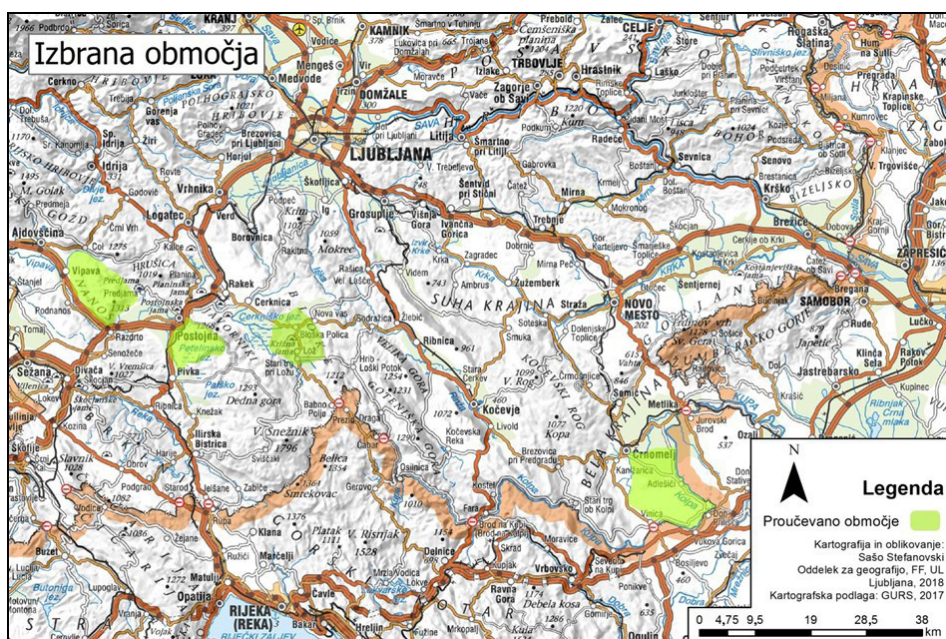


Oblike smo podrobneje morfometrično analizirali. Zanimali so nas višina, naklon, površina, ovalnost in orientacija vzpetin kopastega krasa. Naklone grozdov smo izmerili brez vrhov in grb, podolgovatost in orientacijo pa smo določili zgolj kopastim hrbtom. V preglednici 2 so predstavljene aritmetične sredine morfometričnih parametrov, zgolj orientacija je prikazana z modusom.

3 RELIEFNE ZNAČILNOSTI PROUČEVANIH OBMOČIJ

Kopasti kras je kompleksen tip površja, ki ga še ne poznamo dovolj dobro, zato je bilo za potrebe celovitejše sistematične analize treba izbrati večje število območij, ki se razlikujejo po globini vadozne cone. Izbrali smo štiri območja, eno območje globokega krasa, eno plitvega krasa in dve območji, kjer se plitvi ter globoki kras stikata. Obenem smo se izognili površju, ki je bilo ledeniško preoblikovano, saj so nas zanimale morfometrične lastnosti kopastih vrhov, ki v pleistocenu niso bili preoblikovani z ledeniški procesi. Izbira območij je temeljila tudi na dosedanjih raziskavah kopastega krasa v Sloveniji (Habič, 1968; 1980; Stepišnik, 2017).

Slika 8: Proučevana območja.

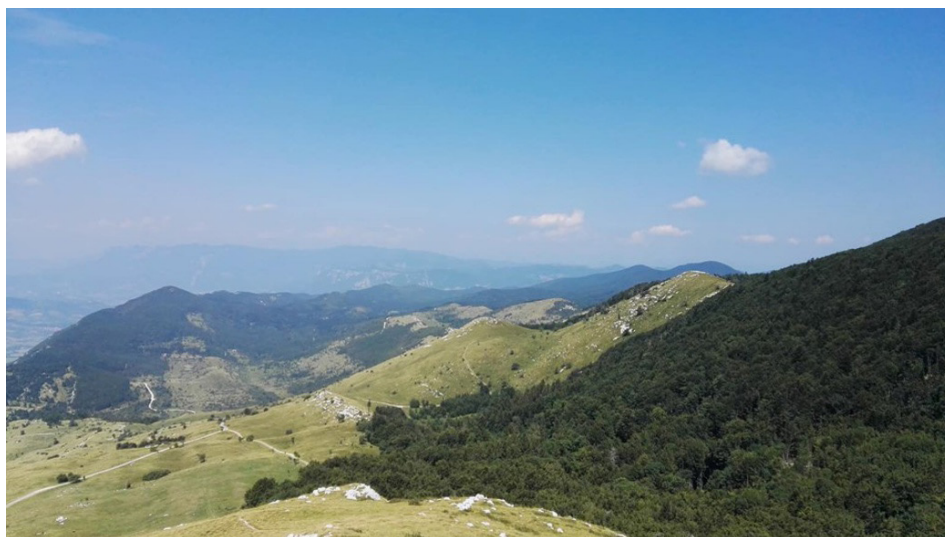


3.1 Nanos

Nanos je visoka robna dinarska planota, ki leži na zahodu Slovenije. Razmejena je s strukturnimi stopnjami, ki se dvigajo nad Pivško kotlino in Vipavsko dolino. Relief Nanoške planote je zelo raznovrsten, predvsem zaradi geološke osnove in tektonske zgradbe (Habič, 1968). Med vzpetinami prevladujejo kopasti vrhovi in vzpetine, ki imajo obliko grebenov. Med vdolbinami so podolgovate, suhim dolinam in grapam podobne oblike, ki so večinoma lokalno poglobljene. Planoto lahko razdelimo na dva dela, na višjo vzhodno polovico in nižjo zahodno (Habič, 1968).

Po geološki zgradbi je Nanos velika, polegla in na eocenski fliš narinjena guba krednih apnencev (Limanovski, 1910, cit. v Habič, 1980; Gams, 2004). Na severnem delu planote je lepo vidna antiklinala jurskih plasti, ki jo je na severu presekal predjamski prelom. Nadaljevanje istih jurskih plasti najdemo na Hrušici (Pleničar, 1970). Nanos večinoma sestavljajo apnenci. Najstarejše so jurske plasti na vzhodnem in severovzhodnem delu planote. Mestoma se apnenec menjava z dolomitom. Večinski del Nanosa pa tvorijo apnenci in dolomiti kredne starosti (Pleničar, 1970; Buser, 1973).

Slika 9: Pogled z Nanoške Grmade proti zahodu (foto: S. Stefanovski).



3.2 Jugovzhodna Bela Krajina

Bela Krajina je kraški ravnik na skrajnem jugovzhodu Slovenije. Gre za območje nizkega dinarskega krasa, kjer se mestoma pojavljajo kopaste vzpetine (Gams, 2004). Območje, kjer najdemo največje kraške vzpetine, nosi toponim Bukovje (Gams, 1961). Habič (1984) razporeditev vrhov v Beli Krajini razlaga z razporeditvijo bolj prepustnih drenažnih con in vmesnih manj zdrobljenih delov kamnin. Najbolj pogoste geomorfološke oblike na območju so vrtače (Gams, 1961).

Ravnik večinso tvorijo karbonatne kamnine. Gre za plasti jurske in kredne starosti, na površju se izmenjujejo dolomiti in apnenci. Jurske plasti v obliki podkve oklepajo kredne karbonate od Jankovičev, preko Kolpe do Vinice, kjer se razdeli v dva dela. Na območju najdemo številne prelome v dinarski in prečno dinarski smeri (Bukovac in sod., 1984).

3.3 Območje Križne gore

Območje Križne gore leži med Cerkljanskim, Loškim in Bloškim poljem. Gre za relativno uravnano površje, ki je razčlenjeno s številnimi uvalami in kopastimi vrhovi. Nekatere uvale imajo uravnana dna, kar je posledica fluviokraškega delovanja na dolomitnih pobočjih v njihovi okolici. Takšen primer uvale je Bloška polica (Gams, 2004). Najstarejše plasti območja so iz časov zgornjega triasa. Gre za glavni dolomit, ki

zvezno prehaja v spodnje jurske karbonate, ki na območju prevladujejo. Gre tako za dolomit kot apnenec. Osrednji del planote sestavljata apnenec in dolomit zgornjejur-ske starosti. Na okoliških kraških poljih najdemo holocenske nanose rek, ki so lahko globoki tudi do 25 metrov (Pleničar, 1970; Buser, 1974).

3.4 Zgornja Pivka in zahodni Javorniki

Območje Zgornje Pivke lahko na grobo označimo kot uravnano pokrajino, ki jo delimo na aluvialne uravnave in kraško uravnavo, ki je razčlenjena s številnimi oblikami kopastega krasa (Stepišnik, 2017). Površje Javornikov je zakraselo pogorje in ni planotasto kot npr. Nanos. Večina vode se drenira proti Planinskemu polju, ob visokih vodostajih del vod odteka v smeri izvirov na Zgornji Pivki (Gams, 2004).

Spodnjekredni karbonati so najstarejše kamnine območja, ki jih najdemo na vzhodnem in osrednjem delu Javornikov. Gre za apnenec z vložki zrnatega dolomita. Spodnjeturonske plasti najdemo na prehodu Javornikov v Pivško kotlino. V Pivški kotlini najdemo fliš, ki je ponekod prekrit s preperino fliša in nanosi rek. Pojavlja se luskasta zgradba s slemenitvijo vzhod-zahod, kar kaže na vpliv mlajšega narivanja (Pleničar, 1970).

4 REZULTATI KLASIFIKACIJE IN MORFOMETRIČNE ANALIZE

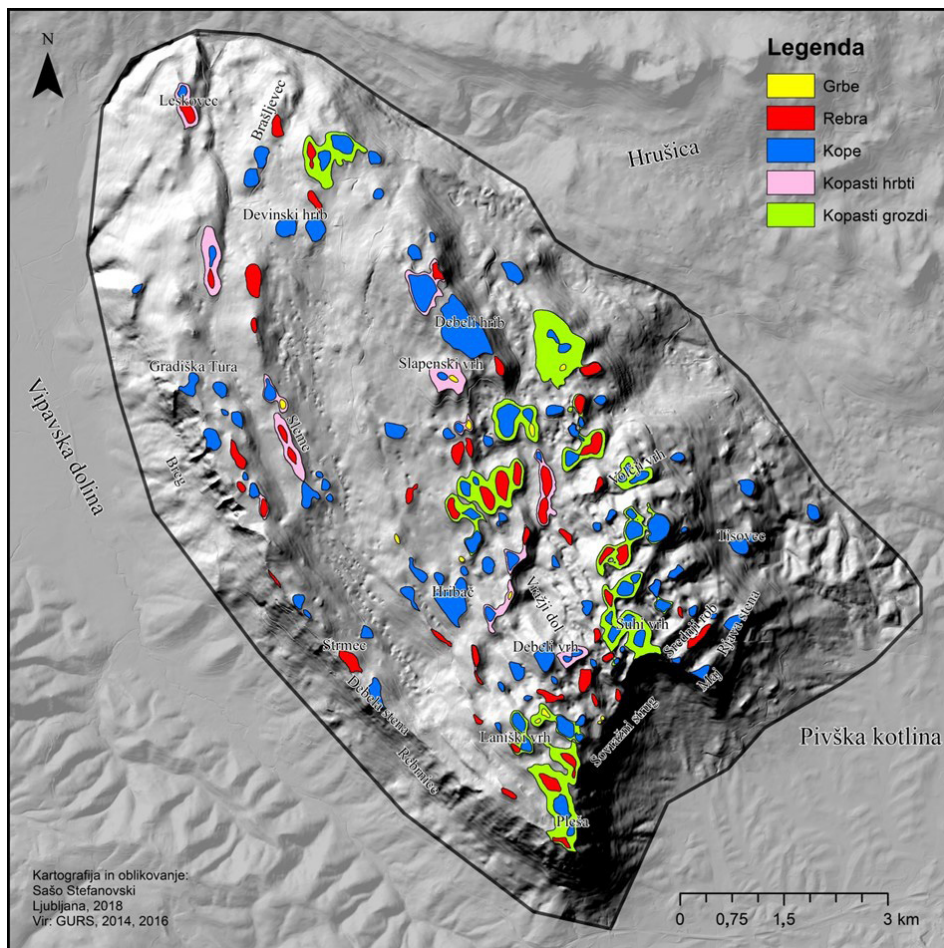
Preglednica 1: Rezultati klasifikacije.

| Območje | Število kop | Število reber | Število grb | Število grozdov | Število hrbtov | Skupna površina (km ²) | Delež območja (%) |
|--------------|-------------|---------------|-------------|-----------------|----------------|------------------------------------|-------------------|
| Nanos | 108 | 52 | 12 | 26 | 13 | 11,1 | 12,6 |
| Bela Krajina | 56 | 4 | 40 | 3 | 0 | 9,9 | 6,15 |
| Križna gora | 62 | 20 | 38 | 22 | 14 | 7,8 | 12 |
| Pivka | 60 | 4 | 29 | 11 | 7 | 11,3 | 20,9 |

Rezultati prepoznavanja geomorfni oblik in morfometrična analiza le teh nakazujeta na izjemno raznolikost kopastega krasa. Največje število vrhov smo prepoznali na Nanoški planoti, kar 160. Od tega jih 52 pade v skupino reber, kar je prav tako največ med vsemi območji. To se odraža tudi v najnižji vrednosti ovalnosti med vsemi območji. Med drugim območje Nanosa izstopa tudi zaradi največjega povprečnega naklona med vsemi območji in najmanjše povprečne površine vrhov, kar je lahko tudi vzrok za njihovo številčnost. Območja slabše kamninske prepustnosti so manjša kot

na ostalih območjih oziroma jih seka večje število con, ki so bolj prepustne za vertikalni odtok vode, kar se odraža na površju, ki je bolj razčlenjeno z vrhovi.

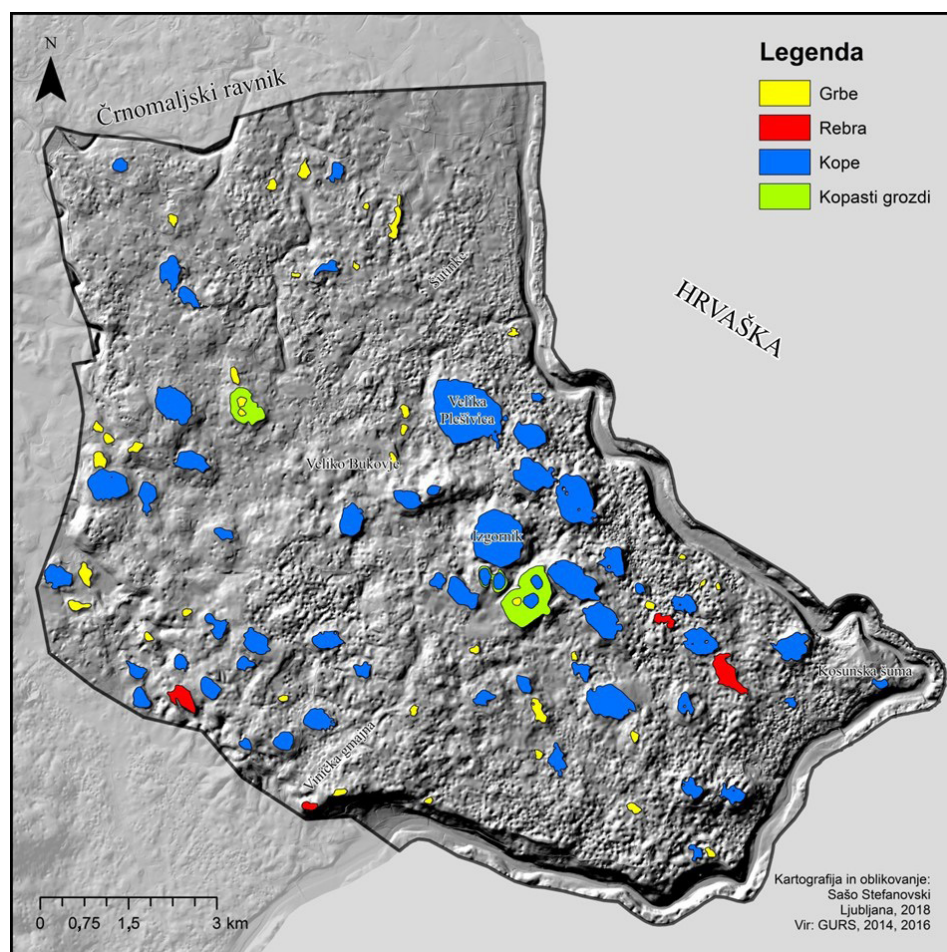
Slika 10: Rezultati klasifikacije na območju Nanosa.



Bela Krajina se od Nanosa povsem razlikuje. Število zaznanih vzpetin znaša 60, od tega se pojavljajo zgolj 4 rebra. Gre za območje, kjer kopaste oblike prekrivajo zgolj 6,15 % površja. Bela Krajina v primerjavi z ostalimi območji ni bila deležna tako intenzivnega tektonskega preoblikovanja, kar je opazno v razčlenjenosti površja, saj pravzaprav prevladujejo vrtače in ne kopaste oblike. Prepoznali smo zgolj 3 grozde, kar nakazuje, da se na območjih plitve vadozne cone vrhovi večinoma dvigujejo

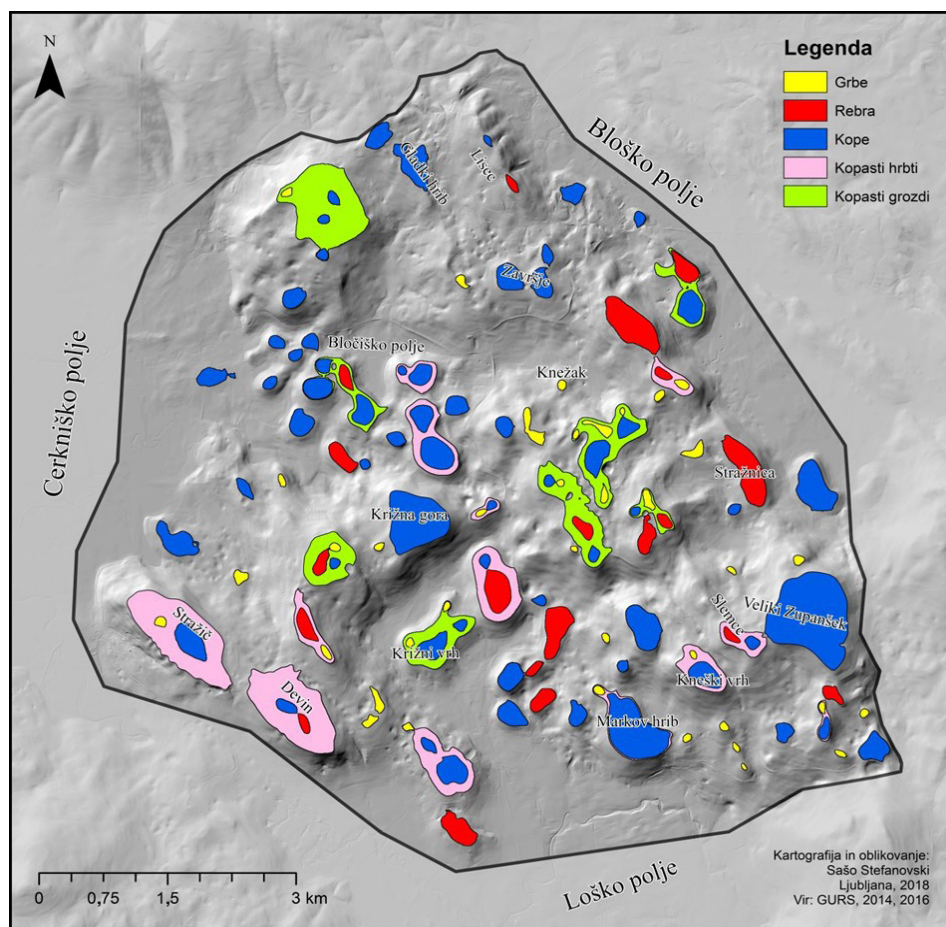
izolirano. To pa sovpada z ugotovitvami iz območij tropskega krasa. Povprečni naklon vrhov znaša zgolj 8,5, kar ponovno lahko povežemo z manj intenzivno tektoniko ter samim procesom preoblikovanja vrhov s strani eksogenih procesov. V Beli Krajini najdemo tudi najvišji in največji zaznani vrh. Velika Plešivica je visoka kar 127,4 m, njen vrh je uravnan in vrtačast. Primere vrtač na vrhovih smo zasledili zgolj v Beli Krajini. Vrtače so verjetno nastale še pred dvigom Velike Plešivice. Iz tega lahko tudi sklepamo, da nastanek izoliranih vrhov ni povezan zgolj s poglobljanjem kotanj med kopastimi vrhovi, vendar so ti lahko tudi tektonskega nastanka kot posledica vertikalnega izriva (ang. *pop-up*).

Slika 11: Rezultati klasifikacije na območju jugovzhodne Bele Krajine.



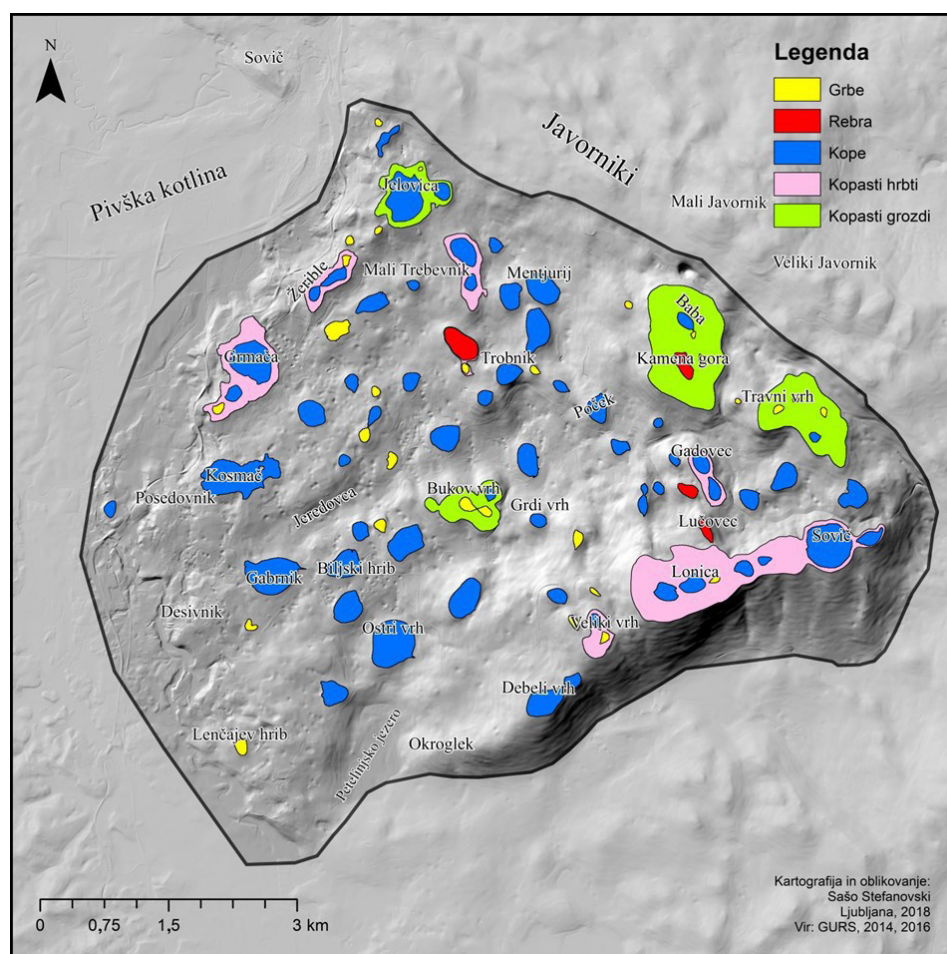
V povprečju so najvišji vrhovi na območju Križne gore s povprečno višino 26,2 m, kar je lahko posledica starosti visokega krasa na območju. Ob prehodu s planote na polje najdemo korozijske ostanke v obliki humov. Takšen primer je Žerovniški hum. Od izoliranih vrhov, ki so posledica tektonike, se najbolj razlikujejo po višini in naklonu, saj so precej položnejši in nižji. Območje Blok je zanimivo tudi iz litološkega vidika, saj smo na terenu prišli do ugotovitve, da se kopasti vrhovi pojavljajo tudi na triasnem dolomitu. Ti so zaradi manjše mehanske odpornosti položnejši kot vrhovi na apnencu. Severneje je dolomitno površje fluviokraško in ne kopasto. Razvoj kopastega krasa na dolomitu je odvisen od njegove sestave in pretrtosti. 20 od 82 vzpetin na območju uvrščamo med rebra. Sklepamo lahko, da je podolgovatost vrhov značilna za planotaste kraške predele, kjer so bile tektonske sile intenzivnejše.

Slika 12: Rezultati klasifikacije na območju Križne gore.



Na območju Zgornje Pivke kopaste oblike pokrivajo največ površja med vsemi proučevanimi območji, približno petino. Pivka izstopa zaradi orientacije vrhov. Največ jih je orientiranih v smeri SSV-JJZ, torej prečno na dinarsko smer. To je posledica lokalnih geoloških pogojev, saj na območju najdemo številne prelome, ki so prečni na dinarsko smer. Sicer območju lahko določimo podobne karakteristike kot na Bloški planoti. Gre za prehod iz plitvega krasa v globoki krasi, kar je vidno v morfometričnih značilnostih vrhov, saj načeloma strmine in višine oblik naraščajo z globino vadozne cone. Na območju so le štirje vrhovi v obliki reber, saj večinskega dela območja, glede na reliefne značilnosti, ne moremo opredeliti kot planotastega.

Slika 13: Rezultati klasifikacije na območju Zgornje Pivke.



Preglednica 2: Rezultati morfometrične analize.

| | | Nanos | Bela Krajina | Križna gora | Pivka |
|---------------|----------------------------|----------|--------------|-------------|----------|
| Vrhovi | Višina (m) | 23,3 | 22,3 | 26,2 | 23,9 |
| | Naklon (°) | 17,6 | 8,5 | 13,8 | 12,5 |
| | Površina (m ²) | 30977,6 | 136723,3 | 70725,3 | 60345,3 |
| | Ovalnost | 0,57 | 0,66 | 0,63 | 0,68 |
| | Orientacija | SSZ-JJV | SZ-JV | SZ-JV | SSV-JJZ |
| Grozdi | Višina (m) | 52,7 | 41,1 | 57,3 | 64,7 |
| | Naklon (°) | 18,5 | 10,8 | 15,3 | 13,1 |
| | Površina (m ²) | 227242,6 | 322633 | 303697,8 | 486609,1 |
| Hrbti | Ovalnost | 0,42 | / | 0,49 | 0,44 |
| | Orientacija | SSV-JJZ | / | SZ-JV | ZSZ-VJV |

5 RAZPRAVA IN ZAKLJUČKI

Od zadnjega sistematičnega proučevanja kopastega krasa je minilo več kot 30 let. V tem času je prišlo v geomorfološkem proučevanju do velikih sprememb, predvsem je opazen velik porast pri uporabi kvantitativnih metod. V našem primeru smo se proučevanja kopastega krasa lotili s pomočjo tehnologije GIS. Prepoznavanje in analiza kopastih oblik sta potekala s programskim orodjem *ArcMap 10.4.1* s pomočjo avtomatiziranega iterativnega zapolnjevanja kotanj inverznega DMV-ja. Z obdelavo DMV-ja smo prepoznali 366 kraških vrhov na štirih različnih območjih dinarskega krasa. Zaznali smo tudi 62 skupnih baz vrhov in 119 manjših dvigov površja, ki ne dosegajo višine 10 metrov.

Oblike smo nato klasificirali in jih poimenovali. Kraške vzpetine smo ločili glede na razmerje osi notranjih plastnic pri ekvidistanci 5 metrov. Vzpetine, katerih ovalnost je večja od 0,5, smo poimenovali kope, vrhovi, katerih vrednost je manjša ali enaka pragu 0,5, pa tvorijo skupino reber. Skupne baze vrhov smo poimenovali kopasti grozdi. Identificirali smo podtip kopastega grozda, kjer se vzpetine pojavljajo v nizu. Obliko smo poimenovali kopasti hrbet. Za vse kopaste oblike, ki niso dosegle višine 10 metrov, smo uporabili ime grbe.

Klasifikaciji je sledila morfometrična analiza prepoznanih geomorfoloških oblik. Ker smo želeli izpeljati celovitejšo analizo, smo analizirali štiri območja, ki se razlikujejo po globini vadozne cone, in rezultate primerjali. Višina vzpetin je odvisna od globine vadozne cone in stadija razvoja kopastega površja ter tektonike. Vzpetine se z naraščanjem globine vadozne cone višajo, saj se vmesne kotanje poglobljajo hitreje kot eksogeni procesi znižujejo vrhove, veliko vlogo pa ima tudi tektonika, ki je nekatere predele bolj dvignila kot druge. Najvišja zaznana vzpetina se nahaja v Beli Krajini (127,4 m visoka Velika Plešivica) in gre za osameli kopasti vrh. Lahko sklepamo, da

obstajata dva mehanizma nastanka osamljenih kopastih vrhov. Prvi primer predstavljajo korozijski vrhovi. Gre za vrhove, ki se zaradi različne prepustnosti kamnine počasneje nižajo kot njihova okolica. Primer korozijskega izoliranega vrha je Žerovniški hum na Cerkniskem polju. Drug primer so izolirani vrhovi, ki jih tektonsko lahko opredelimo kot vertikalne izrive. Oba tipa vrhov lahko ločimo glede na morfolometrične značilnosti, saj korozijski vrhovi ne dosegajo tako velikih višin, površin in naklonov kot tektonski. Naklon se zaradi istega razloga kot višina obenem večja z globino vadozne cone, prav tako pa se večja število kopastih grozdov. Zanimivo je tudi, da se ovalnost v povprečju z globino vadozne cone manjša, kar pa verjetno lahko pripišemo intenzivnejšemu delovanju tektonike. Vrhovi kažejo izrazito navezavo na lokalno geološko strukturo, saj so večinsko dinarsko usmerjeni, veliko je tudi vrhov, ki so usmerjeni prečno na dinarsko smer, na območju Zgornje Pivke celo prevladujejo. Na pojavnost vrhov vpliva tudi litologija. Kopaste vrhove najdemo na apnencu kot tudi na dolomitu. Na dolomitu se sicer pojavljajo izjemoma, torej na območjih, ki nimajo fluviokraškega značaja, kar lahko najverjetneje pripišemo pretrtosti dolomita in njegovi sestavi. Vrhovi na dolomitu so zaradi manjše mehanske odpornosti bolj položni kot tisti na apnencu (Gams, 2004; Ford, Williams, 2007).

Analiza predstavlja manjši vpogled v kompleksnost kopastega krasa, ob tem pa prikazuje tudi sodobno možnost geomorfološkega raziskovanja. Ob tem je treba poudariti, da mora geografsko proučevanje pokrajine vseeno temeljiti na terenskem delu v prepletu z GIS-i. V kontekstu kopastega krasa bi bila smiselna predvsem analiza povezanosti vrhov in vmesnih kotanj s strukturnimi razmerami območja ter geomorfološka analiza oblik. Avtomatizirane postopke, uporabljene v analizi, bi lahko zapisali v programskem jeziku Python, kar bi prineslo večjo časovno in procesorsko učinkovitost, s čimer bi lahko proučili večja območja. Eno izmed prihodnjih možnih raziskovalnih vprašanj je proučevanje vpliva, ki ga je pleistocenska poledenitev imela na oblike kopastega krasa. Potrebna pa je tudi omemba, da uporabljena metoda prepoznavanja kopastih oblik ni edina, zato bi bila potrebna primerjava z drugimi metodami. Kot primerna potencialna metoda se ponuja indeks topografske odprtosti (Yokohama in sod., 2002). V raziskavi smo proučevali zgolj štiri območja kopastega krasa v Sloveniji, obstaja torej še vrsta območij, ki čaka na geomorfološko proučevanje.

Literatura in viri

- Buser, S., 1973. Tolmač lista Gorica, L 33–78. Beograd, Zvezni geološki zavod, 50 str.
 Buser, S., 1974. Tolmač lista Ribnica, L 33–76. Beograd, Zvezni geološki zavod, 60 str.
 Bukovac, J., Poljak, M., Šušnjar, M., Čakalo, M., 1984. Tumač za list Črnomelj, L 33–91. Beograd, Zvezni geološki zavod, 63 str.

- Čalić, J., 2011. Karstic uvala revisited: Toward a redefinition of the term. *Geomorphology*, 134, 1–2, str. 32–42.
- Daneš, J. V., 1915. Das Karstgebiet Goensneg Sewoe in Java. *Věstník Královské české společnosti nauk, třída mathematicko-pírodovědecká*, 89 str.
- Ford, D., Williams, P. D., 2007. *Karst hydrogeology and geomorphology*. Chichester, Wiley, 576 str.
- Gams, I., 1961. H geomorfologiji Bele Krajine. *Acta Geographica*, 6, str. 191–240.
- Gams, I., 1965. H kvartarni morfogenezi ozemlja med Postojnskim, Planinskim in Cerknjskim poljem. *Geografski vestnik*, 37, str. 61–101.
- Gams, I., 2004. *Kras v Sloveniji v prostoru in času*. Ljubljana, Založba ZRC, 515 str.
- Grlj, A., 2014. *Uporaba digitalnega modela višin in izbranih večspektralnih izdelkov daljinskega zaznavanja za iskanje kraških kotanj in brezstropih jam Podgorskega krasa*. Magistrsko delo. Ljubljana, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo, 151 str.
- Habič, P., 1968. *Kraški svet med Idrijco in Vipavsko dolino: prispevek k poznavanju razvoja kraškega reliefa*. Ljubljana, ZRC SAZU, 243 str.
- Habič, P., 1980. Nekatere značilnosti kopastega krasa v Sloveniji. *Acta carsologica*, 9, str. 5–25.
- Habič, P., 1984. *Strukturne oblike v kraškem reliefu Dolenjske in Bele Krajine*. V: Plut, D., Ravbar, M. (ur.). *Dolenjska in Bela Krajina: 13. zborovanje slovenskih geografov*, str. 57–66.
- Habič, P., 1986. *Površinska razčlenjenost Dinarskega krasa*. *Acta carsologica*, 14/15, str. 39–58.
- Jennings, J. N., 1985. *Karst geomorphology*. Oxford, Basil Blackwell, 293 str.
- Lehmann, H., 1936. *Morphologische Studien auf Java*. *Geographische Abhandlungen*, 3, str. 3–22.
- Pleničar, M., 1970. *Tolmač za list Postojna*, L 33–77. Beograd, Zvezni geološki zavod, 58 str.
- Premru, U., 2005. *Tektonika in tektogeneza Slovenije: Geološka zgradba in geološki razvoj Slovenije*. Ljubljana, Geološki zavod Slovenije, 518 str.
- Ravbar, N., 2002. *Kitajska kraška terminologija (na izbranih primerih iz tropskega in subtropskega krasa)*. *Acta carsologica*, 31, 2, str. 189–208.
- Salomon, J. N., 2011. *A mysterious karst: the »chocolate hills« of Bohol (Philippines)*. *Acta carsologica*, 40, 3, str. 429–444.
- Stefanovski, S., 2018. *Uporaba digitalnega modela višin pri proučevanju kopastega krasa na izbranih območjih. Zaključna seminarska naloga*. Ljubljana, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo, 79 str. URL: <https://repozitorij.uni-lj.si/Dokument.php?id=115592&lang=slv> (citirano 12. 10. 2019).
- Stepišnik, U., 2011. *Fizična geografija krasa*. Ljubljana, Znanstvena založba Filozofske fakultete, 143 str.
- Stepišnik, U., 2017. *Dinarski kras: plitvi kras Zgornje Pivke*. Ljubljana, Znanstvena založba Filozofske fakultete, 115 str.

- Stepišnik, U., Stojilković, B., Hočevar, G., 2019. V: Stepišnik, U. (ur.). Geomorfološke značilnosti Severnega Velebita. Dinarski kras. Severni Velebit, str. 21–43.
- Sweeting, M. M., 1981. Karst geomorphology. Stroudsburg, Hutchinson Ross publishing company, 427 str.
- Yokohama, R., Shirasawa, M., Pike, R.J., 2002. Visualizing topography by openness: A new application of image processing to digital elevation models. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68, 3, str. 257–265. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/c3d9/a561fdb9e8c34a2b79152aea72b46090bb2e.pdf> (citirano 15. 6. 2019).

STUDY OF CONE KARST PINNACLES WITH THE USE OF DIGITAL ELEVATION MODEL

Summary

Since the last systematic analysis of the Dinaric cone karst was performed, more than 30 years have passed. During these last three decades the research tools in geomorphology have changed dramatically. Quantitative methods including GIS modelling are used more than ever before. The usefulness of GIS in geomorphology is based on objectiveness and the capability of analysing larger areas in a shorter period of time. In the research ArcMap 10.4.1 was used to detect cone karst pinnacles and their common bases which were further classified according to their morphometric characteristics. We used the Fill tool with the iteration of Z-limit values. The method was applied to four Dinaric Karst areas in Slovenia that differ in the depth of the vadose zone. The analysis was accomplished with five meter digital elevation model.

In all four study areas combined 366 karst pinnacles were detected along with 62 common bases and 119 smaller pinnacles which didn't reach the required height of 10 meters. The largest number of karst pinnacles (i.e. 160) were detected on the Nanos plateau, while the area with the highest coverage with pinnacles is Zgornja Pivka, where approximately 20 % of the study area is covered with cone karst landforms.

Morphometry based classification was the next methodological step. The pinnacles were classified based on the mean elongation of the inner lying contours at the 5 meter interval. Pinnacles with mean elongation greater than 0.5 were classified as *kope* (heaps*) while the other group was named *rebra* (ribs*). Clusters or common bases were named *grozdi* (clusters*) with a subtype named *hrbet* (back, hind part*), which represents the landform where the pinnacles are in a line which gives a ridge like impression. The smaller pinnacles with a height lesser than 10 meters were given the name *grbe* (humps*). Later the landforms were morphometrically analysed.

A correlation between the height of the pinnacles and the depth of the vadose zone does occur. Generally pinnacles that lie in an area with a deep vadose zone are greater in height, but that does not hold true for every single pinnacle. Tectonics and the stage of cone karst development in the area also play an important part. The highest detected isolated pinnacle appears in Bela Krajina with a relative height of 127.4 meters. Bela Krajina has a shallow vadose zone therefore we can assume that also tectonics played the crucial part in the formation. In other areas the isolated hills tend to be smaller and more gradual. This implies to the possibility of two different ways of isolated pinnacle formation. The higher and steeper isolated hills form due to the pop up structures, while the smaller gradual pinnacles are the remnants of the corrosion. The number of *grozdi* (clusters*) rises with the depth of the vadose zone along with slope steepness. The orientation of the hills is based on the geological structure of the area, therefore most of the pinnacles tend to have a Dinaric or crosswise orientation. Cone karst occurs on the limestone as well as on the dolostone, but is restricted to the areas with absent fluviokarst characteristics. Dolostone hills are more gradual compared to limestone hills due to their weaker erosion resistance.

(Translated by the authors)

* Free and approximate translation by the authors.