

# PROSTORNI RASPORED I GUSTOĆA PONIKAVA JUGOISTOČNOG VELEBITA

## SPATIAL DISTRIBUTION AND DENSITY OF DOLINES IN THE SOUTHEASTERN VELEBIT AREA

JELENA MARKOVIĆ<sup>1</sup>, NEVEN BOČIĆ<sup>2</sup>, MLADEN PAHERNIK<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Smoljanac 44/1, 53 231 Plitvička jezera, e-mail: jelena.markovic2@hotmail.com

<sup>2</sup> Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno matematički fakultet, Geografski odsjek, Marulićev trg 19/II, 10 000 Zagreb /  
*University of Zagreb, Faculty of Science, Department of Geography*, e-mail: nbocic@geog.pmf.hr

<sup>3</sup> Hrvatsko vojno učilište „Dr. Franjo Tuđman“, Ilica 265b, 10 000 Zagreb / *Croatian Military Academy*  
*„Dr. Franjo Tuđman“*, e-mail: mladen.pahernik@morh.hr

UDK: 551.448(497.5)(234 Velebit)=111=163.42

Primljeno / *Received*: 2016-10-7

Prethodno priopćenje  
*Preliminary communication*

Ponikve pripadaju među najznačajnije krške oblike koji se stoga smatraju i dijagnostičkim oblicima krša. Njihov prostorni raspored i gustoća važan su pokazatelj stupnja okršenosti nekog prostora, ali i njegova cjelokupnoga geomorfološkog razvoja. Cilj ovoga rada je utvrditi prostorni raspored i gustoću ponikava te analizirati utjecaj geološke građe i morfometrijskih karakteristika terena (hipsometrija, nagib padina, vertikalna raščlanjenost) na prostorni raspored ponikava na području jugoistočnog Velebita. Prvi je put na području krša Hrvatske uspoređen prostorni raspored ponikava s prostornim rasporedom ulaza u speleološke objekte i to samo na dijelu jugoistočnog Velebita – Crnopcu. Podaci o položaju ponikava preuzeti su s topografskih karata 1:25 000. Svi podaci su digitalizirani i računalno analizirani s pomoću ArcGIS 10.1 programskog paketa u GIS laboratoriju GO PMF-a u Zagrebu. Istraživanjem je ustanovljen snažan utjecaj morfometrijskih parametara reljefa na gustoću ponikava. Najznačajnija pojava ponikava vezana je za područja nadmorskih visina 1000 – 1200 m, nagiba padina manjeg od 2° i vertikalne raščlanjenosti reljefa 100 – 200 m/km<sup>2</sup>. Također, najveća gustoća ponikava zabilježena je u karbonatnim naslagama jurske starosti te je utvrđeno da zone glavnih rasjeda nemaju značajniji utjecaj na povećanje gustoće ponikava. Usporedbom prostornog rasporeda i gustoće ponikava i ulaza u speleološke objekte utvrđen je njihov visok stupanj korelacije.

**Ključne riječi:** ponikva, krš, špilje i jame, geomorfologija, gustoća ponikava, Velebit, Dinarski krš, Hrvatska

Dolines are considered to be among the most prominent karst formations, which is why they can serve as diagnostic forms of karst. Their spatial distribution and density are important indicators of an area's degree of karstification, as well as of an overall geomorphological development. The aim of this paper is to determine the spatial distribution and the density of dolines, and also to analyse the influence of geological structure and morphometric features of the terrain (hypsometry, slope inclination, relative relief) on the spatial distribution of dolines in the area of southeastern Velebit. Moreover, for the first time with regards to the Croatian karst, the spatial distribution of dolines was compared with the spatial distribution of entrances into caves in the southeastern Velebit's area of Crnopac. The data on the dolines' position were adopted from 1:25,000 scaled topographic maps. All data were digitalised and analysed with ArcGIS 10.1 software in the GIS laboratory of the Geographic Department of the Faculty of Science in Zagreb. The research showed a strong influence of morphometric parameters of the relief on dolines' density. The most prominent occurrence of dolines is linked with the areas ranging from 1000 to 1200 meters of altitude, slope inclination lower than 2° and the relative relief of 100 – 200 m per km<sup>2</sup>. Furthermore, the highest density of dolines was recorded in the Jurassic carbonate layers, while it was determined that the zones of main faults do not have a significant influence on the increase of dolines' density. A high degree of correlation was determined by comparing spatial distributions and density of dolines and entrances into caves

**Keywords:** doline, karst, caves and pits, geomorphology, doline density, Velebit, Dinaric karst, Croatia

## Uvod

Krški i fluviokrški reljef zauzimaju 43,7% površine Hrvatske (BOGNAR I DR., 2012.). Ponikve su najtipičniji površinski krški oblik koji se smatra i dijagnostičkim oblikom krša (FORD, WILLIAMS, 2007.). To su zatvorene udubine, najčešće cirkularnog ili eliptičnog ocrta te ljevkastog, zdjelastog ili bunarastog presjeka (SAURO, 2005.). Prema dominantnom procesu, ponikve mogu biti korozijske, urušne te one nastale slijeganjem i sufozijom (FORD, WILLIAMS, 2007.). Ova tri procesa mogu zajedno djelovati, ali korozija ima ključnu ulogu u nastanku ponikava u kršu. Prostorni raspored i gustoća ponikava jedan su od važnih pokazatelja stupnja okršenosti nekoga prostora.

S obzirom na njihov značaj, u razumijevanju geomorfologije krša ponikve su predmet brojnih geomorfoloških istraživanja veznih za njihovu morfogenezu (WILLIAMS, 1985.; MIHEVC, 1998.; GAMS, 2000.; SAURO, 2003.; 2005.) ili morfometriju (WILLIAMS, 1971.; 1972.; JENNINGS, 1975.; BONDESAN I DR., 1992.; DENIZMAN, 2003.; LYEW-AYEE I DR., 2007.; PENTEK I DR., 2007.). Upravljanje velikim brojem morfometrijskih podataka iz karata postalo je jednostavnije s pojavom geografskih informacijskih sustava (GIS) i digitalnih modela reljefa (DMR) (FORD, WILLIAMS, 2007.). Istraživanja odnosa prostornog rasporeda ponikava i speleoloških objekata su malobrojna (npr. SHOFNER I DR., 2001.; ŠUŠTERŠIĆ, 2006.).

Na prostoru Hrvatske prostorni raspored i gustoću ponikava istražuju V. Klein (1976.) na području Ličko-goranske regije, D. Mihljević (1994.) na području Baljevačke zaravni kod Ličkog Petrovog Sela, D. Mihljević (1995.) na prostoru Učke i Čićarije, S. Faivre (1992.; 1999.) te S. Faivre i P. Reiffsteck (1999.; 2002.) na području Velebita, M. Pahernik (2000.) na području Velike Kapele, S. Faivre i M. Pahernik (2007.) na otoku Braču, N. Buzjak (2006.) na području Žumberka i Samoborskoga gorja, N. Bočić (2009b) na području Sunjske zaravni te T. Telbisz i dr. (2009.) na području Biokova. Sveobuhvatnu prostornu analizu ponikava na čitavom području Hrvatske analizira M. Pahernik (2012.). Prostorni raspored i gustoća ponikava jugoistočnog Velebita do sada je analizirana u okviru istraživanja provedenog za cijelo područje Velebita (FAIVRE, 1999.; FAIVRE, REIFFSTECK, 1999.).

## Introduction

Approximately 43.7 % of the Republic of Croatia's area consists of karst and fluviokarst relief (BOGNAR ET AL., 2012). Dolines are the most typical surface karst form, and also considered to be a diagnostic karst form (FORD, WILLIAMS, 2007). They are closed depressions with a circular or an elliptical outline and a funnel-shaped, bowl-shaped or well-shaped concave profile (SAURO, 2005). Depending on the dominant process, several types can be distinguished – namely, corrosion dolines, collapse dolines or those created through suffosion (FORD, WILLIAMS, 2007). Although all three processes may be active simultaneously, corrosion has a key role in the formation of dolines in karst. Spatial distribution and density of dolines are among most important indicators of the degree of karstification of an area.

Considering to their significance in the understanding of karst geomorphology, dolines are in focus of numerous geomorphological researches with regards to their morphogenesis (WILLIAMS, 1985; MIHEVC, 1998; GAMS, 2000; SAURO, 2003; 2005) or morphometry (WILLIAMS 1971; 1972; JENNINGS, 1975; BONDESAN ET AL., 1992; DENIZMAN, 2003; LYEW-AYEE ET AL., 2007; PENTEK ET AL., 2007). Managing large amounts of morphometric data from maps has become much simpler with the development of geographic information systems (GIS) and digital models of relief (DMR) (FORD, WILLIAMS, 2007). There are only a few studies on relations between spatial distribution of dolines and caves (e.g. SHOFNER ET AL., 2001; ŠUŠTERŠIĆ, 2006).

In the area of Croatia, the spatial distribution and the density of dolines were studied by V. Klein (1976) in the area of Lika and Velebit, D. Mihljević (1994) in the area of Baljevac plateau near Ličko Petrovo Selo, D. Mihljević (1995) in the area of Učka and Čićarija, S. Faivre (1992; 1999) and S. Faivre and P. Reiffsteck (1999; 2002) in the area of Velebit, M. Pahernik (2000) in the area of Velika Kapela, S. Faivre and M. Pahernik (2007) on the island of Brač, N. Buzjak (2006) in the area of Žumberak and Samobor hills, N. Bočić (2009b) in the area of Slunj plateau, and T. Telbisz et al. (2009) in the area of Biokovo mountain. A comprehensive spatial analysis of dolines in the whole territory of Croatia was made by M. Pahernik (2012). Spatial distribution and density of dolines in southeastern Velebit had been previously been analysed within the framework of research undertaken for the whole area of Velebit (FAIVRE, 1999; FAIVRE, REIFFSTECK, 1999).

Cilj ovoga rada je utvrditi prostorni raspored i gustoću ponikava te analizirati utjecaj geološke građe i morfometrijskih karakteristika terena (nagib padina, hipsometrija, vertikalna raščlanjenost) na prostorni raspored ponikava na području jugoistočnog Velebita te utvrditi stupanj povezanosti prostornog rasporeda ponikava (kao površinskog pokazatelja stupnja okršenosti) i prostornog rasporeda ulaza u speleološke objekte (kao podzemnog pokazatelja stupnja okršenosti) na izdvojenom dijelu jugoistočnog Velebita – masivu Crnopca. To je prvi put da se na nekom prostoru u Hrvatskoj uspoređuju gustoća ponikava i gustoća ulaza u speleološke objekte.

### Metode rada i izvori podataka

Podaci o prostornom rasporedu ponikava prikupljeni su na temelju osam listova topografskih karata mjerila 1:25 000 (Izvor 1.). Ponikve su digitalizirane po načelu jedna točka – jedna ponikva, odnosno tako da su se unosile točke koje predstavljaju dno ponikve. Nastala prostorna baza podataka poslužila je kao osnova za daljnju analizu. Pri analizi gustoće ponikava primijenjena je jednostavna metoda koja predstavlja vrijednost broja pojave unutar kruga radijusa  $r$ , čije se središte nalazi na lokaciji  $t$ . Lokacije  $t$  definirane su ćelijama pravilne rasterske mreže unutar istraživanog područja, a za radijus je određena vrijednost od 564 m što odgovara površini kruga  $1 \text{ km}^2$  (PAHERNIK, 2012.).

Zatim je provedena morfometrijska analiza temeljnih parametara reljefa jugoistočnog Velebita (hipsometrija, nagib padina, vertikalna raščlanjenost) na temelju digitalnog modela reljefa (DEM-a) veličine jedinične ćelije  $50 \times 50 \text{ m}$  iz baze prostornih podataka Geografskog odsjeka PMF-a u Zagrebu (Izvor 2.). Hipsometrijska obilježja dobivena su razvrstavanjem visinskih podataka jediničnih ćelija DEM-a u visinske razrede raspona 200 m. Podaci o nagibima padina dobiveni su analizom DEM-a metodom  $3 \times 3$  kvadrata te su kategorizirani u standardnih šest kategorija nagiba (LOZIĆ, 1996.). Vertikalna raščlanjenost izračunata je kao razlika u vrijednosti najviše i najniže točke u jediničnoj površini od  $1 \text{ km}^2$  (krug radijusa 564 m sa središtem u svakoj jediničnoj ćeliji DEM-a). Dobiveni rezultati uspoređeni su s prostornim rasporedom ponikava.

Kao podloga za procjenu utjecaja geološke građe na genezu ponikava, korištena je Osnovna

The aim of this paper is to determine the spatial distribution and the density of dolines, as well as to analyse the influence of geological structure and morphometric features of terrain (slope inclination, hypsometry, and relative relief) on the spatial distribution of dolines in the area of southeastern Velebit. Moreover, the paper aims to determine the degree of correlation between the spatial distribution of dolines (as a surface indicator of karstification degree) and the spatial distribution of entrances into caves (as an underground indicator of karstification degree) in the isolated area of southeastern Velebit – the Crnopac massif. This is the first time that density of dolines and density of caves' entrances are compared in an area in Croatia.

### Methods and data sources

The data on the spatial distribution of dolines were acquired by eight segments of topographic maps scaled 1:25,000 (Source 1). Dolines were digitalized on the principle of “one dot – one doline”, whereas the inserted dots represent the bottoms of dolines. The created database served as a basis for further analysis. A simple kernel method was used in analysing the dolines density, determining the number of occurrences within a circle with a “ $r$ ” radius, and a centre on a “ $t$ ” location. The “ $t$ ” locations were defined by cells of a regular raster network set within the research area, whereas the radius was set to be 564 m, which corresponds to a circle with an area of  $1 \text{ km}^2$  (PAHERNIK, 2012.).

Furthermore, a morphometric analysis of the basic parameters of southeast Velebit's relief was carried out (hypsometry, slope inclination, relative relief) based on a digital elevation model (DEM) with a basic unit of cell  $50 \times 50 \text{ m}$ , from the spatial database of the Department of Geography at the Faculty of Science in Zagreb (Source 2). The hypsometric features were acquired by grouping the elevation data of the DEM's units of cells into elevation classes ranging 200 m. The slope inclination data were acquired by analysing the DEM by a  $3 \times 3$  squares analysis, and were categorized into 6 standard inclination categories (LOZIĆ, 1996). The relative relief was calculated as a difference between the values of the highest and the lowest point within the unit's area of  $1 \text{ km}^2$  (the circle with a radius of 564 m and a centre in each of the DEM's units of cells). The acquired data were compared with the spatial distribution of the dolines.

geološka karta 1:100 000, listovi Obrovac (IVANOVIĆ I DR., 1967.) i Knin (GRIMANI I DR., 1966.). Uspoređen je broj i gustoća ponikava po litostratigrafskim jedincima (uopćeno), a radi procjene utjecaja glavnih rasjeda na nastanak ponikava primijenjena je *buffer* metoda kojom su obuhvaćene sve ponikve u pojasu udaljenosti 500 m od rasjeda prikazanih na Osnovnim geološkim kartama.

Kao pokazatelj odnosa procesa površinskog i podzemnog okršavanja, gustoća ponikava uspoređena je s gustoćom ulaza u istražene speleološke objekte. Podaci o položaju ulaza dobiveni su iz arhiva speleoloških objekta Speleološkog odsjeka Hrvatskog planinarskog društva Željezničar iz Zagreba (Izvor 3.). S obzirom na to da su na prostoru jugoistočnog Velebita sustava speleološka istraživanja provedena jedino na području Crnopca, ova analiza odnosi se samo za taj prostor. Međutim, iako je to samo 7,7% (26,9 km<sup>2</sup>) površine jugoistočnog Velebita, riječ je o značajnom području koje je geološki homogeno i speleološki sustavno istraživano te se rezultati mogu smatrati dovoljno reprezentativnim. Za izračun kvantitativne korelacijske veze primijenjena je klasična metoda izračuna gustoće pojave unutar jedinične površine od 1 km<sup>2</sup>. Za to je primijenjena blok metoda funkcije susjedstva unutar *Spatial Analyst* ekstenzije. Time je područje istraživanja pokriveno s matricom 6 × 6 ćelija čije su vrijednosti atributa – broj promatranih pojava osnova za izračun linearne korelacije odnosno koeficijenata same korelacije. Za prostorni prikaz postojeće veze između promatranih pojava lokalnom funkcijom rasterske analize oduzete su vrijednosti rastera gustoće ponikava i gustoće speleoloških objekata. Dobiveni raster fokus metodom rasterske analize susjedstva generaliziran je na ćelije veličine 50 × 50 metara iz kojeg su prikazane izolije jednakih razlika u gustoći pojave ponikava i speleoloških objekata. Sve računalne analize izrađene su s pomoću ArcGIS 10.1 programskog paketa u GIS laboratoriju Geografskog odsjeka PMF-a u Zagrebu.

### Geomorfološko-geološki okvir

Gorski hrbat – masiv Velebita najduža je planina Hrvatske. Pruža se povinutoga grebena od NW prema SE u duljini od 145 km. S obzirom na morfološke i strukturne karakteristike, najčešće se dijeli na sjeverni, srednji, južni i jugoistočni

Basic geologic map scaled 1:100,000, excerpts Obrovac (IVANOVIĆ ET AL., 1967) and Knin (GRIMANI ET AL., 1966) was used as a base for the assessment of the influence of geology on the dolines' genesis. Number and density of dolines were compared within lithostratigraphic units (generally), and a *buffer* method which included all the dolines within 500 m from the faults visible on basic geological maps was used in assessing the influence of the main faults on the formation of dolines.

As an indicator of the relation of the surface and underground processes of karstification, the dolines' density was compared with the density of entrances into the explored caves. The data on positions of entrances were acquired from the archive of caves of the "Željezničar" Croatian Mountaineering Society's Speleological section from Zagreb (Source 3). Due to the fact that in the area of southeastern Velebit the speleological researches were conducted only in the area of Crnopac, this analysis was limited to that area. However, although the area encompasses only about 7.7 % (26.9 km<sup>2</sup>) of the area of southeastern Velebit, its significance lies in its geologic homogeneity and in the fact that it was systematically explored, so the results can be regarded as sufficiently representative. A classical method of calculating the density of a phenomenon within 1 km<sup>2</sup> area unit was employed to calculate quantitative correlation. For that purpose, a block method of the neighbourhood function within *Spatial Analyst* extension was used. Thus, the research area was covered by a 6x6 cell matrix, with cell attribute values (the number of the observed objects) being the basis for calculating linear correlation coefficient. For the purpose of a spatial display of the existing relations between the observed objects, the raster values of doline density and speleological density were extracted. By using the focus method of raster analysis, the resulting raster was generalized to cells sized 50 x 50 m showing isolines of equal differences in the occurrence of dolines and caves. All computer analyses were made by using ArcGIS 10.1 software in the GIS laboratory of the Department of Geography at the Faculty of Science in Zagreb.

### Geomorphological-geological frame

The Velebit mountain range is the longest mountain in Croatia. Its bended ridge stretches approximately 145 km in the NW-SE direction. In relation to morphologic and structural features, it

dio. Gorski hrbat jugoistočnog Velebita sastoji se od masiva Crnopca (V. Crnopac, 1403 m), Tremzine (Oklinjak, 1187 m) i Koma (Golić, 1003 m) te dijela sjevernodalmatinske krške zaravni oko rijeke Krupe (Sl. 1., Sl. 2A). Granice istraživanog područja definirane su prema prirodnim obilježjima prostora pa tako veći dio istočne i južne granice prati tok rijeke Zrmanje. Na krajnjem zapadu granica počinje pratiti tok rijeke Dobarnice prema sjeveru, a zatim se pruža padinama južnog Velebita preko Prezida (763 m) prema Gračačkom polju. Granica se prema istoku nastavlja preko prijevoja Malovan, uz rub Brezovca i Vagana nakon čega skreće prema jugoistoku do vrela Zrmanje. Tako definirano područje istraživanja ima površinu od 349,2 km<sup>2</sup>.

Prema I. Grimani i dr. (1966.; 1975.) te A. Ivanović i dr. (1967.; 1976.), istraživano područje izgrađuju stijene trijaskе, jurske, kredne i paleogensko-neogenske starosti uz sporadično pojavljivanje kvartarnih naslaga (Sl. 2B). Stijene trijaskе starosti izgrađuju manji dio istraživanoga područja. To su pješčenjaci i vapnenci donjeg trijasa, karbonatne stijene s lećama klastita srednjeg trijasa te dolomiti i vapnenci gornjeg trijasa. Stijene jurske starosti pojavljuju se u dvije zone, a čine ih vapnenci i dolomiti donje jure, vapnenci s ulošcima dolomita srednje jure te vapnenci i vapnenačke breče gornje jure. Najveći dio istraživanog područja izgrađuje karbonatne stijene kredne starosti i to vapnenci donje krede te gornjokredni vapnenci s ulošcima dolomita. Na sjeverozapadnom dijelu istraživanog područja, u kontinuiranom pojasu, starije naslage diskordantno su prekrivene paleogensko-neogenskim karbonatnim brečama (tzv. Jelar ili Velebitske breče). Dalje prema jugoistoku čine mrežu većih i manjih denudacijskih ostataka. Naslage kvartara sporadično se pojavljuju kao aluvijalne i sedrene naslage u dolinama Zrmanje i Krupe te kao rezidualne naslage u većim krškim udubinama.

Zbog prevladavajuće karbonatne građe, područje jugoistočnog Velebita karakterizira razvijen krški morfogenetski tip reljefa. Od površinskih oblika ističu se različiti tipovi grižina, ponikve te krške uvale. Speleološki gledano najistraženije područje jugoistočnog Velebita je masiv Crnopca (Bočić, 2009a). Ostali dijelovi ovoga područja, izuzev južnog dijela kanjona Zrmanje, speleološki su relativno slabije poznati. Sustavna speleološka istraživanja Crnopca započela su 70-ih godina prošlog stoljeća. Do danas je ovdje istraženo oko 200 speleoloških

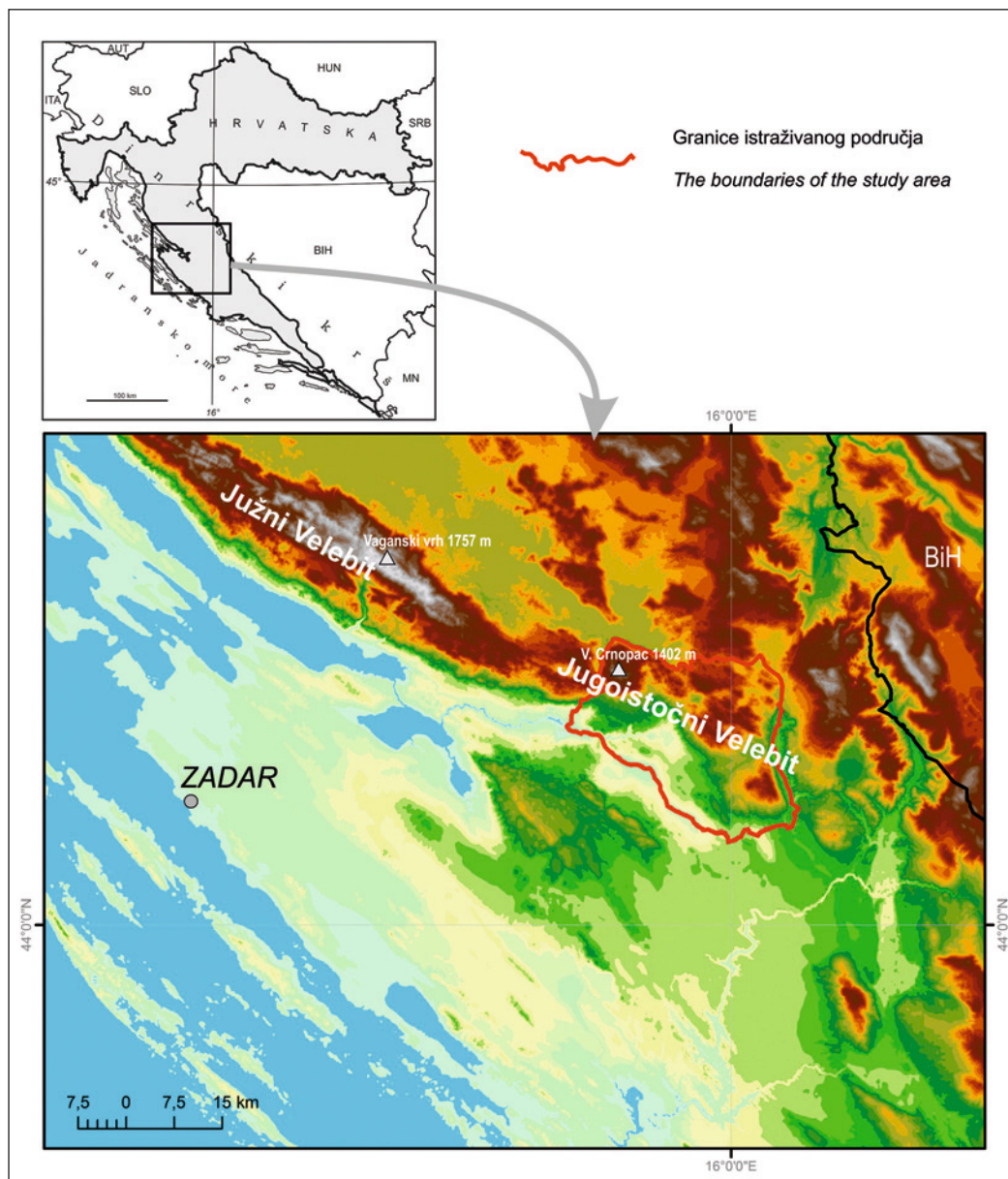
is usually divided into northern, central, southern and southeastern part. The ridge of southeastern Velebit consists of the massifs Crnopac (V. Crnopac, 1403 m), Tremzine (Oklinjak, 1187 m) and Koma (Golić, 1003 m), as well as the Northern Dalmatian karst plateau around the river Krupa (Fig. 1, Fig. 2A). The boundaries of the studied area were defined in accordance to the natural features of the area; thus, most of the eastern and southern border follows the river Zrmanja's flow. On the westernmost end, the boundary follows the flow of Dobarnica river towards north, then further extends to the slopes of southern Velebit over Prezid (763 m) and towards Gračac polje. The boundary continues towards east over the Malovan saddle, following the edges of Brezovac and Vagan, and diverging towards the well of Zrmanja in the southeast. Thus defined, the research area has approximately 349.2 km<sup>2</sup>.

According to I. Grimani et al. (1966; 1975) and A. Ivanović et al. (1967, 1976), the research area consists of Triassic, Jurassic, Cretaceous and Paleogene-Neogene rocks, with intermittent zones of Quaternary deposits (Fig. 2B). Triassic rocks form only a small part of the research area. These are predominantly sandstones and carbonates from the Lower Triassic, carbonate rocks with clastic lenses from Middle Triassic, and dolomites and carbonates from the Upper Triassic epoch. Rocks from Jurassic appear in two zones and include Lower Jurassic carbonates and dolomites, Middle Jurassic carbonates with dolomite inserts and Upper Jurassic carbonates and carbonate breccias. Most of the research area consists of Cretaceous carbonate rocks, namely Early Cretaceous carbonates and Late Cretaceous carbonates with dolomite inserts. In the northwestern part of the research area, in the continuous belt, the older strata are partially covered with the Paleogene-Neogene carbonate breccias (the so called Jelar or Velebit breccias). Further towards the southeast they make up a network of large and small denudation remnants. The Quaternary strata sporadically appear as alluvial and tuff layers in the valleys of Zrmanja and Krupa, as well as residual layers in larger karst hollows.

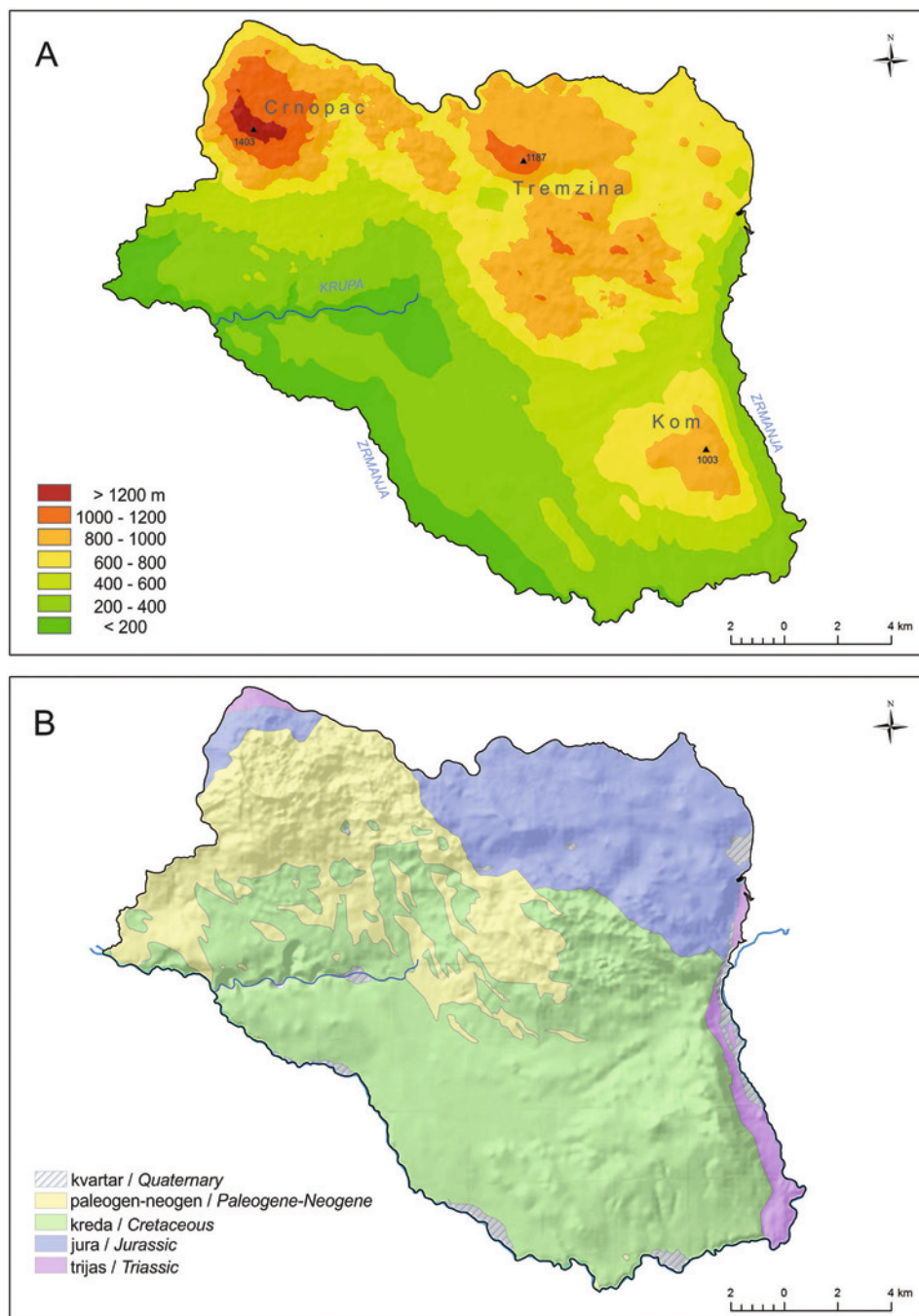
Due to its prevailing carbonate structure, the area of southeastern Velebit is characterized by karst morphogenetic type of relief. Surface formations include various types of karrens, dolines and karst valleys. In terms of speleology, the most researched area of the southeastern Velebit is the massif Crnopac (Bočić, 2009a). Other parts of this area, with an exception of southern part of the canyon

objekata, od kojih su za njih 184 poznati točni podaci. Njihova prosječna gustoća na ovome području (~26,9 km<sup>2</sup>) je oko 6,7 speleoloških objekata na km<sup>2</sup>. Ovdje se nalazi najdulji špiljski sustav Hrvatske te cijelih Dinarida: Kita Gaćešina – Draženova puhaljka (duljina 32 115 m, dubina -737 m; URL 1.). Uz to, na području Crnopca istraženi su i brojni drugi speleološki objekti koji se ističu svojim dimenzijama.

of Zrmanja, are speleologically less known. The systematic speleological researches of Crnopac began in the 1970s. Up to now, around 200 caves have been explored in the area, with precise data available for 184 of them (vertical caves prevail). Their average density in this area (~26.9 km<sup>2</sup>) is about 6.7 caves per square kilometer. The area includes the longest cavy system in Croatia and in the Dinarides: Kita Gaćešina – Draženova puhaljka (32.115 meters in length and -737 meters deep; URL 1). Moreover, many other noticeably large caves were explored in the area of Crnopac.



Slika 1. Geografski položaj istraživanog prostora  
 Figure 1 Geographic position of the research area



Slika 2. Osnovne crte reljefa jugoistočnog Velebita (A) i pregledna geološka karta jugoistočnog Velebita (B),  
Izvor: GRIMANI I DR., 1966.; IVANOVIĆ I DR., 1967.

Figure 2 Basic outlines of southeastern Velebit relief (A) and a general geological map of southeastern Velebit (B);  
Source: GRIMANI ET AL., 1966; IVANOVIĆ ET AL., 1967

## Rezultati

### *Prostorni raspored i gustoća ponikava*

Na istraživanom području površine 349,2 km<sup>2</sup> utvrđene su 3684 ponikve, što čini prostornu gustoću ponikava od 10,6 pon/km<sup>2</sup>. Izuzme li se područje na kojem nema razvijenih ponikava, na površini od 249,8 km<sup>2</sup> gustoća ponikava iznosi 14,8 pon/km<sup>2</sup>. Karta prostornog rasporeda ponikava (Sl. 3A) upućuje na to da je područje sa značajnom pojavom ponikava orijentirano pravcem SZ-JI. Određena odstupanja postoje na južnom podnožju Crnopca i na području planine Kom gdje je ta orijentacija SI-JZ. Najviše ponikava vezano je za sjeverni i istočni dio istraživanog područja, tj. za zone Crnopca i Tremzine. Također, uočeno je nekoliko područja izrazito linearnog pružanja ponikava koje tvore jasno izražene morfolineamente. Osobito se ističe duga linija ponikava koji se pruža Razdoljem sa SI prema JZ.

Na temelju izračunatih vrijednosti određeno je sedam razreda gustoće ponikava (Tab. 1., Sl. 3B). Najveći udio u ukupnoj površini od 28,46% zauzima razred u kojem nema zabilježenih ponikava. Ponajprije se to odnosi na područje uz granicu na JI te veći dio sjevernodalmatinske zaravni na jugozapadu. Prema udjelu u ukupnoj površini slijede razred gustoće ponikava 5 – 20 pon/km<sup>2</sup> s 27,03% i razred 1 – 5 pon/km<sup>2</sup> s 26,73%, a koji se odnose na više diskontinuiranih područja krške zaravni i gorskog hrpta. Razred 20 – 50 pon/km<sup>2</sup> zauzima 13,92% površine, a obuhvaća osim područja hrpta JI Velebita i neka područja zaravni rijeke Zrmanje, sjeverno od rijeke Krupa te područje Tavana i Semenjaka na jugu. Površinu od 8,8 km<sup>2</sup> (2,51%) zauzima razred 50 – 70 pon/km<sup>2</sup>, koji se odnosi na više diskontinuiranih područja hrpta. Gustoća ponikava 70 – 100 pon/km<sup>2</sup>

## Results

### *Spatial distribution and density of dolines*

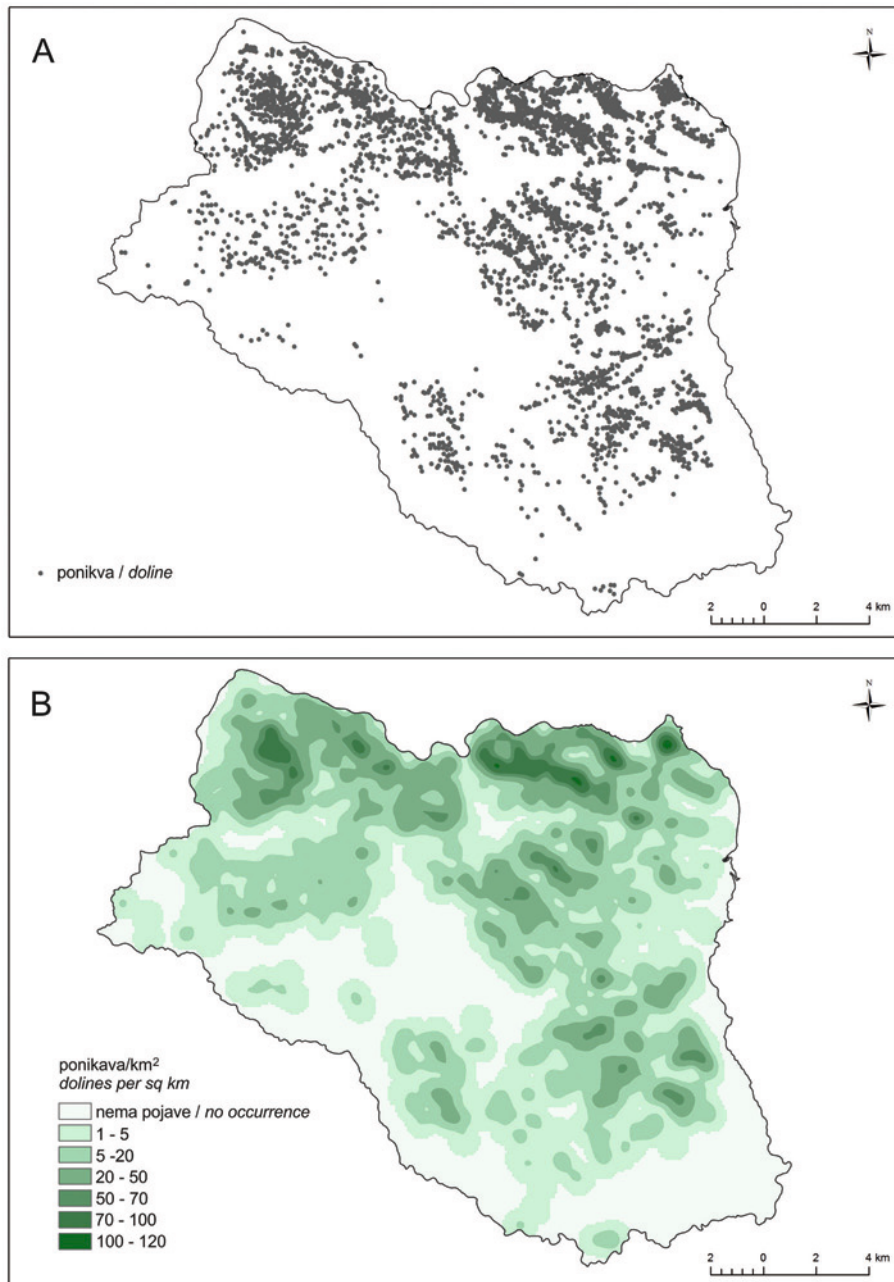
Within the research area of 349.2 km<sup>2</sup> a total of 3.684 dolines were found, which makes the density of 10.6 dolines per km<sup>2</sup>. If the area with no developed dolines is excluded, the remaining area of 249.8 km<sup>2</sup> has a density of 14.8 dolines per km<sup>2</sup>. The map of spatial distribution of dolines (Fig. 3A) indicates that an area with a significant occurrence of dolines is oriented in the NW-SE direction. There are some deviations in the southern foothill of Crnopac, as well as in the area of mountain Kom where the orientation is NE-SW. Most of the dolines appear in the northern and eastern parts of the research area, i.e. in the zones of Crnopac and Tremzina. It was also observed that several areas have a prominent linear direction of dolines forming clearly expressed morpholineaments. An especially long line of dolines extending through Razdolje from NE to SW stands out.

Based on calculation, seven classes of doline density were determined (Tab. 1, Fig. 3B). The largest share (28.46%) in the total area has a class with no dolines. It primarily refers to an area near the border in the SE and most of the Northern Dalmatian plateau in the SW. According to their share in the total area, the following classes of doline density are 5 – 20 dol/km<sup>2</sup> (27.03%) and 1 – 5 dol/km<sup>2</sup> (26.73%) and refer to several discontinuous areas of the karst plateau and the mountain ridge. The class 20 – 50 dol/km<sup>2</sup> takes up 13.92 % of the area and besides the ridge of SE Velebit also includes some areas in the plateau of the river Zrmanja, north of river Krupa, and the area of Tavan and Semenjak in the south. The class 50 – 70 dol/km<sup>2</sup> includes the area of 8.8 km<sup>2</sup> (2.51%) and refers to several discontinuous areas of the ridge. The density of 70 – 100 dol/km<sup>2</sup>

Tablica 1. Površine razreda gustoće ponikava  
Table 1 The areas of doline density classes

Rb. No.	Gustoća (pon/km <sup>2</sup> ) <i>Doline density (dol/km<sup>2</sup>)</i>	Površina (km <sup>2</sup> ) <i>Area (km<sup>2</sup>)</i>	Udio (%) <i>Share (%)</i>
1	0	99,4	28,46
2	1 – 5	93,3	26,73
3	5 – 20	94,4	27,03
4	20 – 50	48,6	13,92
5	50 – 70	8,8	2,51
6	70 – 100	4,4	1,27
7	100 – 120	0,3	0,08





Slika 3. Prostorni raspored (piktogram) ponikava (A) i gustoća ponikava (B) jugoistočnog Velebita  
 Figure 3 Spatial distribution (pictogram) of dolines (A) and doline densities (B) in the southeastern Velebit

zabilježena je osim uz jezgre najveće koncentracije ponikava na SI i na području Crnopca na SZ te Mrkića tavana i Brkljačeve drage. Zauzima tek 4,43 km<sup>2</sup> površine. Površinu od 0,3 km<sup>2</sup> zauzima razred najveće gustoće ponikava 100 – 120 pon/km<sup>2</sup>. Najveća prostorna gustoća od 116,47 pon/km<sup>2</sup> zabilježena je na području uvale Vagan na krajnjem SI. Na istraživanom području ističu se još tri „otoka“ gustoće ponikava veće od 100

has, besides the cores of the most concentration of dolines in the NE, also been recorded in the area of Crnopac in the SW, as well as the areas of Mrkićatavan and Brkljačeve drage. It takes up only 4.43 km<sup>2</sup> of area. The class of the highest dolines density 100 – 200 dol/km<sup>2</sup> includes an area of 0.3 km<sup>2</sup>. The highest spatial density of 116.47 dol/km<sup>2</sup> was recorded in the area of Vagan valley in the northeasternmost part of the area.

pon/km<sup>2</sup>, a to su područje Brezovca, Crne doline i Kontić-gaja. Područje s gustoćom većom od 20 pon/km<sup>2</sup> zauzima 17,78% površine istraživanog područja.

### *Utjecaj morfometrijskih parametara reljefa na prostorni raspored ponikava*

#### *Hipsometrija*

U analizi visinskih obilježja reljefa izdvojeno je sedam hipsometrijskih razreda (Tab. 2., Sl. 4A) raspona po 200 m. Najniža vrijednost nadmorske visine iznosi 9 m, a odnosi se na dijelove visine tok Zrmanje u blizini ušća Dobarnice, dok je najviši vrh ovoga područja Veliki Crnopac s 1403 m. Prosječna visina prostora iznosi 552 m.

Visinski katovi jasno odražavaju lučno savijanje hrpta jugoistočnog Velebita iz pravca SZ-JI u pravac gotovo S-J. Najveći udio u površini istraživanoga područja zauzima hipsometrijski razred 200 – 400 m (26,12%). Iznad 1200 m izdižu se samo vršni dijelovi Crnopca na sjeverozapadu istraživanog područja. Najniži hipsometrijski razred (< 200 m) obuhvaća područja uz rijeku Zrmanju i njezine pritoke. Analizom gustoće ponikava po hipsometrijskim razredima ustanovljeno je da je najveća gustoća ponikava od 30,7 pon/km<sup>2</sup> razvijena na nadmorskoj visini 1000 – 1200 m. Slijedi razred 800 – 1000 m s 22 pon/km<sup>2</sup> koji s 1455 ponikava prednjači i apsolutnim brojem ponikava. Područja viša od 1200 m imaju gustoću ponikava od čak 18,5 pon/km<sup>2</sup>.

Three more “islands” of high doline density stand out in the research area – the zones of Brezovca, Crnadolina and Kontić-gaj. The area with density higher than 20 dol/km<sup>2</sup> takes up 17.78% of the research area.

### *Influence of morphometric parameters of relief on the spatial distribution of dolines*

#### *Hypsometry*

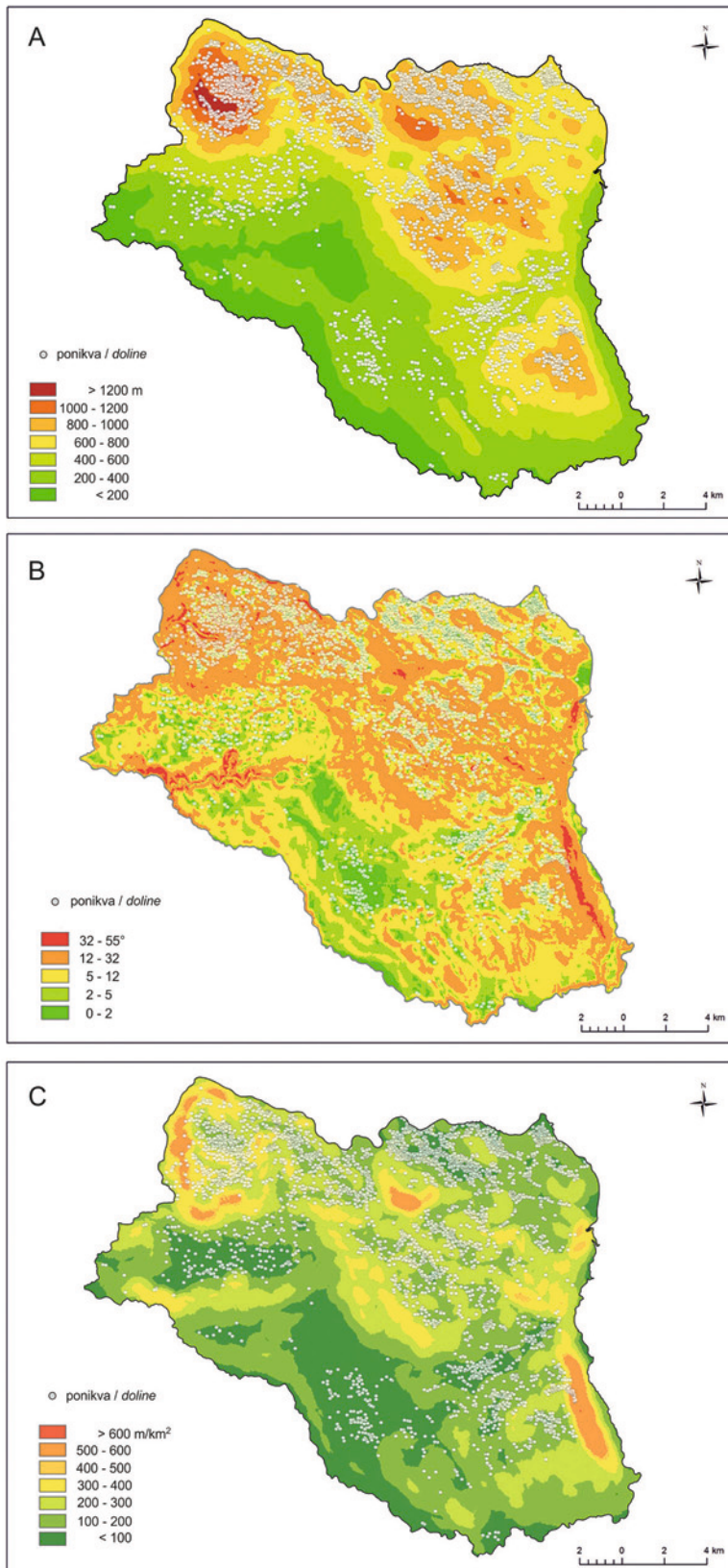
In the analysis of elevation features of relief, a total of seven hypsometric classes were defined (Tab. 2, Fig. 4A) with a range of 200 meters. The lowest altitude value is 9 m, and refers to the parts near the flow of the river Zrmanja, in the vicinity of the mouth of Dobarnica, while the highest point of the area is Veliki Crnopac with the altitude of 1,403 m. The average elevation of the area is 552 m.

The hypsometric classes clearly reflect the bowl-like deflection of the ridge of southeastern Velebit from NW-SE to almost N-S direction. The class of 200-400 m takes up most of the research area (26.12%). Only the highest parts of Crnopac are above 1,200 m, in the NW of the research area. The lowest hypsometric class (<200 m) includes the area by the river Zrmanja and its tributaries.

Through the analysis of doline density by hypsometric classes it was found that the highest doline density of 30.7 dol/km<sup>2</sup> occurs on altitudes of 1,000 – 1,200 m. The class that follows is 800 – 1,000 m with 22 dol/km<sup>2</sup> which also has the highest total number of dolines, 1.455. The zones above 1,200 m have a high doline density which amounts to 18.5 dol/km<sup>2</sup>.

Tablica 2. Broj, udio i gustoća ponikava po hipsometrijskim razredima  
Table 2 Number, share and density of dolines per hypsometric classes

Nadmorska visina (m) <i>Hypsometric classes (m)</i>	Udio površine (%) <i>Share of area (%)</i>	Broj ponikava <i>Number of dolines</i>	Udio ponikava (%) <i>Share of dolines (%)</i>	Gustoća ponikava (pon/km <sup>2</sup> ) <i>Density of dolines (dol/km<sup>2</sup>)</i>
< 200	10,51	11	0,30	0,3
200 – 400	26,12	260	7,06	2,9
400 – 600	17,85	411	11,16	6,6
600 – 800	22,81	1161	31,51	14,6
800 – 1000	18,93	1455	39,50	22,0
1000 – 1200	3,32	356	9,66	30,7
> 1200	0,46	30	0,81	18,5



Slika 4. Prostorni raspored ponikava u odnosu na visinske razrede (A), kategorije nagiba padina (B) i kategorije vertikalne raščlanjenosti reljefa (C)

Figure 4 Spatial distribution of dolines in relation to elevation classes (A), slope inclination categories (B) and categories of relative relief (C)

*Nagibi padina*

Padine su osnovni element reljefa te je stoga određivanje nagiba padina jedan od bitnih elemenata analize reljefa. Nagibi padina u velikoj mjeri odražavaju strukturne značajke terena i dobar su indikator recentnih ili potencijalnih procesa na padinama (MARKOVIĆ, 1983.). Analizom digitalnog modela reljefa utvrđen je maksimalni nagib padina JI Velebita od 49,32°, pa je prema tome određeno pet kategorija nagiba padina (Tab. 3., Sl. 4B). Prostorni raspored pojedinih kategorija nagiba padina jasno odražava konture raščlanjenog reljefa jugoistočnog Velebita. Podjednako su zastupljene kategorije nagiba padina 12° – 32° i 5° – 12°, što upućuje na to da 75% površine čine jako nagnuti i nagnuti tereni. Slijede kategorije 2° – 5° i 0° – 2° koje su uglavnom zastupljene na jugozapadnom dijelu istraživanog područja. Najmanji udio pripada kategoriji 32° – 55° koja se odnosi na vrlo strme padine kanjona Krupe, istočnu padinu Koma te poneke dijelove gorskog hrpta.

Dobiveni rezultati odnosa gustoće ponikava i nagiba padina unutar jedinične površine pokazuju silazni trend s porastom nagiba padina. Najveći broj ponikava (1492 ponikve) zabilježen je u kategoriji nagiba padina 5° – 12°, no najveća gustoća ponikava (23,5 pon/km<sup>2</sup>) pripada kategoriji nagiba 0° – 2°.

*Slope inclinations*

Slopes are one of relief's basic elements, which is why determining slope inclinations represents one of the crucial elements of relief analysis. Slope inclinations provide a valuable insight into the structural features of terrain and are a good indicator of recent or potential processes on slopes (MARKOVIĆ, 1983). The analysis of digital model of relief was used to determine maximum inclination of SE Velebit slopes which is 49.32°, and according to it, five categories of slope inclinations were defined (Tab. 3, Fig. 4B). Spatial distribution of slope inclination categories clearly reflects the contours of the relative relief of the southeastern Velebit. Categories of slope inclinations that range 12°-32° and 1°-12° are equally present, which indicates that 75% of the area includes very inclined and inclined terrains. The following categories are 2°-5° and 0°-2°, which are present in the southwestern part of the research area. The smallest percentage of terrain is taken up by the category 32°-55° which refers to very steep slopes of the canyon of Krupa, eastern slope of Kom and some parts of the mountain ridge.

The acquired results of relation between doline density and slope inclination within a unit of area show the descending trend as the slope inclinations rise. The largest number of dolines (1.492) was recorded in the slope inclination category 5° - 12°, but the highest doline density (23.5 dol/km<sup>2</sup>) turned out to be in the category 0° - 2°.

Tablica 3. Broj, udio i gustoća ponikava po kategorijama nagiba padina  
Table 3 Number, share and density of dolines per categories of slope inclination

Kategorije nagiba padina (°) <i>Categories of slope inclination (°)</i>	Udio površine (%) <i>Share of area (%)</i>	Broj ponikava <i>Number of dolines</i>	Udio ponikava (%) <i>Share of dolines (%)</i>	Gustoća ponikava (pon/km <sup>2</sup> ) <i>Density of dolines (dol/ km<sup>2</sup>)</i>
0 – 2	6,12	502	13,63	23,5
2 – 5	17,36	1185	32,17	19,6
5 – 12	36,97	1492	40,50	11,6
12 – 32	38,17	502	13,63	3,8
32 – 55	1,37	3	0,08	0,6

*Vertikalna raščlanjenost*

Vertikalna raščlanjenost reljefa morfometrijski je parametar reljefa koji predstavlja razliku između najviše i najniže točke unutar promatrane površine. U lokalnim okvirima vertikalna raščlanjenost je parametar intenziteta razvitka egzogenih procesa (LOZIĆ, 1995.). Utvrđeno je da najniža vrijednost vertikalne raščlanjenosti reljefa istraživanoga područja iznosi 6 m/km<sup>2</sup>, a najviša vrijednost 604 m/km<sup>2</sup>. Na temelju utvrđenog raspona između najviše i najniže vrijednosti, određeno je sedam kategorija vertikalne raščlanjenosti reljefa po 100 m/km<sup>2</sup>. Prosječna vertikalna raščlanjenost JI Velebita iznosi 185,63 m/km<sup>2</sup> što prema standardnoj raspodjeli kategorija vertikalne raščlanjenosti za područje Hrvatske (LOZIĆ, 1995.) smješta ovo područje u kategoriju umjereno raščlanjenog reljefa. Kategorije vertikalne raščlanjenosti reljefa JI Velebita pokazuju mozaičan prostorni raspored (Sl. 4C).

Najveći udio površine od 40,11% zauzima razred vertikalne raščlanjenosti 100 – 200 m/km<sup>2</sup>, a slijedi razred 200 – 300 m/km<sup>2</sup> s 27,16% (Tab. 4.). Ove dvije kategorije vertikalne raščlanjenosti međusobno se isprepleću i pokrivaju veći dio površine istraživanoga područja (67,27%). Najmanju površinu zauzimaju najviši razredi vertikalne raščlanjenosti. Najveću gustoću kao i apsolutan broj ponikava ima razred 100 – 200 m/km<sup>2</sup> (12,1 pon/km<sup>2</sup>, 1693 ponikve) koji ujedno zauzima i najveću površinu vertikalne raščlanjenosti JI Velebita. Slijede razredi < 100 m/km<sup>2</sup> i 200 – 300 m/km<sup>2</sup>. Mala gustoća ponikava veže se za razrede 300 – 400, 400 – 500 i 500 – 600 m/km<sup>2</sup>. Na području vertikalne raščlanjenosti > 600 m/km<sup>2</sup> nije razvijena nijedna ponikva.

*Relative relief*

Relative relief is a morphometric parameter which is defined by the difference between the highest and the lowest point within an observed area. On a small scale, relative relief is a parameter of intensity of exogenic processes development (LOZIĆ, 1995). It was found that the lowest value of relative relief in the research area is 6 m/km<sup>2</sup>, and the highest 604 m/km<sup>2</sup>. Based on the determined range between the highest and the lowest value, seven categories of relative relief of relief ranged 100 m/km<sup>2</sup> were defined. The average relative relief of southeastern Velebit is 185.63 m/km<sup>2</sup> which, according to the standard division of relative relief categories for the area of Croatia (LOZIĆ, 1995), places this area in the category of moderately articulated relief. The categories of relative relief in the SE Velebit indicate a mosaic-like spatial distribution (Fig. 4C).

The highest share of the area, 40.11%, is taken up by the relative relief class of 100 – 200 m/km<sup>2</sup>, followed by the class of 200 – 300 m/km<sup>2</sup> with 27.16 % (Tab. 4). These two categories of relative relief are intertwined and cover most of the research area (67.27%). The highest classes of relative relief take up the smallest area. The highest density and the highest total number of dolines are in the category 100 – 200 m/km<sup>2</sup> (12.1 dol/km<sup>2</sup>, 1,693 dolines) which also takes up most of the area of relative relief in the SE Velebit. The categories that follow are < 100 m/km<sup>2</sup> and 200 – 300 m/km<sup>2</sup>. Low density of dolines is related to the categories 300 – 400 m/km<sup>2</sup>, 400 – 500 m/km<sup>2</sup> and 500 – 600 m/km<sup>2</sup>. In the relative relief category above 600 m/km<sup>2</sup> there are no any doline developed.

Tablica 4. Broj, udio i gustoća ponikava po razredima vertikalne raščlanjenosti reljefa  
Table 4 Number, share and density of dolines by categories of relative relief

Razredi vertikalne raščlanjenosti (m/km <sup>2</sup> ) <i>Categories of relative relief (m/km<sup>2</sup>)</i>	Udio površine (%) <i>Share of area (%)</i>	Broj ponikava <i>Number of dolines</i>	Udio ponikava (%) <i>Share of dolines (%)</i>	Gustoća ponikava (pon/km <sup>2</sup> ) <i>Density of dolines (dol/km<sup>2</sup>)</i>
< 100	20,72	851	23,10	11,8
100 – 200	40,11	1693	45,96	12,1
200 – 300	27,16	925	25,11	9,8
300 – 400	8,81	180	4,89	5,9
400 – 500	2,44	26	0,71	3,1
500 – 600	0,76	9	0,24	3,4
> 600	0,002	0	0	0

### Utjecaj geološke građe na prostorni raspored ponikava

Više od polovice površine istraživanog područja (54,52%) izgrađuju karbonatne naslage kredne starosti. Po udjelu u ukupnoj površini slijede naslage paleogena i neogena s 21,73%, među kojima prevladavaju vapnenačke breče paleogena-neogena (Velebitske, tj. Jelar breče). S 19,47% udjela slijede jurski vapnenci i dolomiti. Naslage trijasa zauzimaju udio od 2,64%. Naslage kvartara zauzimaju tek 1,65%, površine, a pokrivaju diskontinuirana područja doline Zrmanje i Krupe, Malopopinsko polje i neke krške udoline Velebita. Usporedbom stratigrafskih jedinica s prostornim rasporedom ponikava utvrđeno je da je najviše ponikava razvijeno u jurskim naslagama (Tab. 5., Sl. 5A). Naslage jure karakterizira i najveća gustoća ponikava od 20,2 pon/km<sup>2</sup>. Na vapnenačkim brečama tercijara razvijeno je 1168 ponikava, što čini gustoću ponikava naslaga paleogena/neogena od 15,4 pon/km<sup>2</sup>. Kredne naslage karakterizira gustoća od samo 6 pon/km<sup>2</sup>, a tek po jedna ponikva zabilježena je u naslagama kvartara i trijasa.

Osim litoloških karakteristika, na prostorni raspored ponikava velik utjecaj imaju i rasjedi te pukotinski sustavi. Radi utvrđivanja brojnosti ponikava razvijenih u blizini rasjeda, buffer metodom utvrđeni su pojasevi udaljenosti 500 m od rasjeda (Sl. 5B). Utvrđeno je da se 21,9% ponikava nalazi uz rasjede, odnosno unutar 500 m od glavnih rasjeda. Samo za šest rasjeda utvrđeno je više od 50 ponikava unutar *buffer zone* od 500 m. Najviše (78) ih je utvrđeno uz rasjed orijentacije SZ-JI na području Koma.

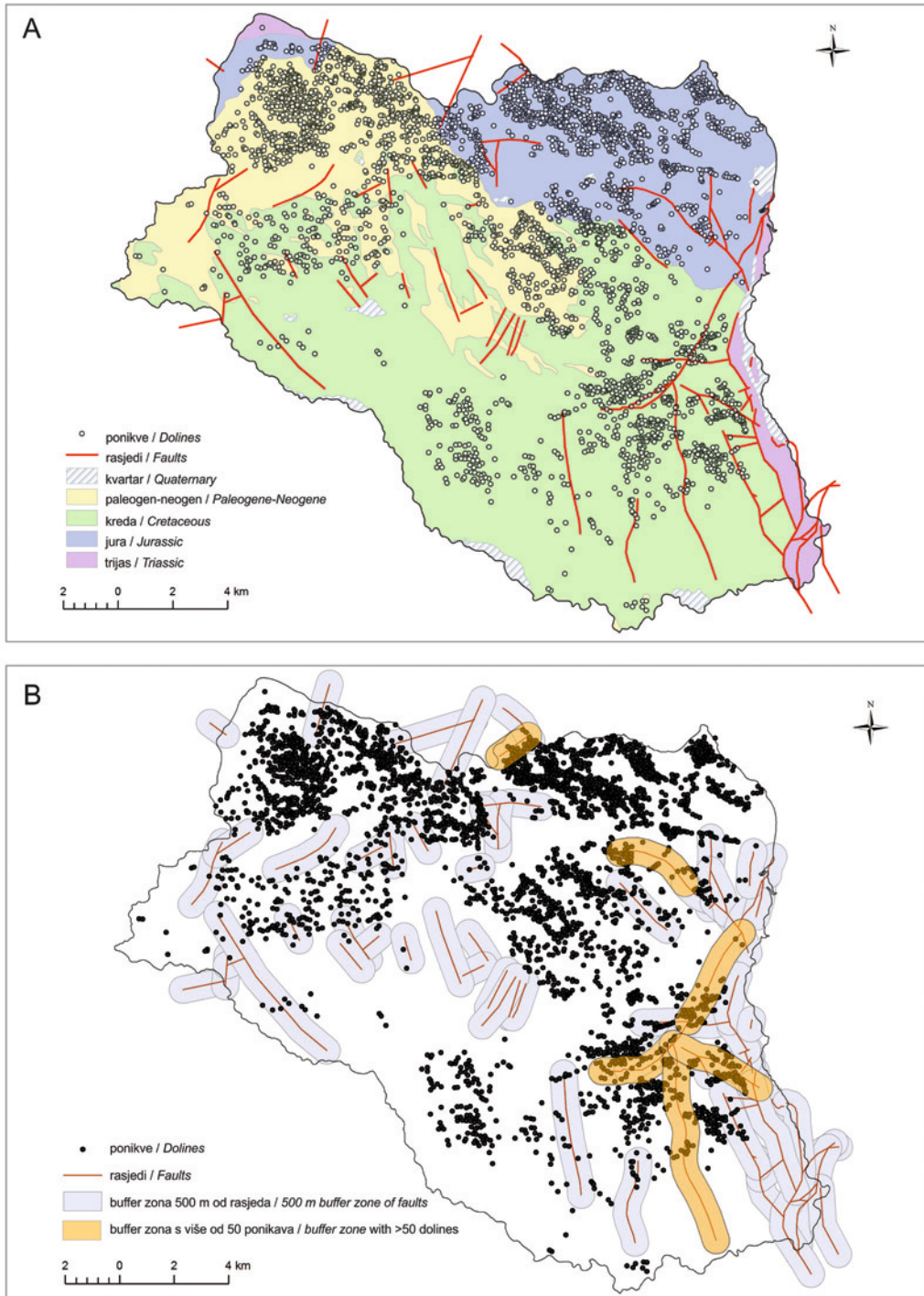
### Influence of geological structure on spatial distribution of dolines

More than half of the research area (54.52%) consists of Cretaceous carbonate layers. With respect to the share in total area, they are followed by Paleogene and Neogene layers that take up 21.73 % and are predominantly carbonate breccias (Velebit or Jelar breccias). Jurassic carbonates and dolomites comprise 19.47% of the area and the Triassic strata take up 2.64 %. Quaternary strata take up merely 1.65% of the area and cover discontinuous zones in the valleys of Zrmanja and Krupa, in Malopopinsko polje and some karst valleys of Velebit. The comparison of stratigraphic units with spatial distribution of dolines showed that most dolines developed in Jurassic strata (Tab. 5, Fig. 5A). These strata are also characterized by the highest doline density 20.2 dol/km<sup>2</sup>. A total of 1,168 dolines developed on Tertiary carbonate breccias, which means that the doline density in Paleogene/Neogenestrata is 15.4 dol/km<sup>2</sup>. Cretaceous layers are characterized by doline density of mere 6 dol/km<sup>2</sup>, while only one doline was observed in both Quaternary and Triassic layers.

Besides lithological features, spatial distribution of dolines is largely influenced by faults and fissure systems. In order to determine the number of dolines developed in the vicinity of faults, buffer method was used to define belts 500 meters from faults (Fig. 5B). It was determined that 21.9% of dolines are near faults, or more precisely, within 500 meters from the main faults. More than 50 dolines were observed to be within the 500 meters buffer zone of only six faults. Most of the dolines (78) were found near the faults oriented in NW-SE direction, in the area of Kom.

Tablica 5. Broj, udio i gustoća ponikava po stratigrafskim jedinicama na području JI Velebita  
Table 5 Number, share and density of dolines in stratigraphic units of SE Velebit area

Era <i>Era</i>	Period <i>Period</i>	Udio površine (%) <i>Share of area (%)</i>	Broj ponikava <i>Number of dolines</i>	Udio ponikava (%) <i>Share of dolines (%)</i>	Gustoća ponikava (pon/km <sup>2</sup> ) <i>Density of dolines (dol/km<sup>2</sup>)</i>
Kenozoik <i>Cenozoic</i>	Kvartar <i>Quaternary</i>	1,65	1	0,03	0,2
	Paleogen/Neogen <i>Paleogene/Neogene</i>	21,73	1168	31,71	15,4
Mezozoik <i>Mesozoic</i>	Kreda <i>Cretaceous</i>	54,52	1139	30,92	6,0
	Jura <i>Jurassic</i>	19,47	1375	37,32	20,2
	Trijas <i>Triassic</i>	2,64	1	0,03	0,1



Slika 5. Pregledna geološka karta jugoistočnog Velebita s prostornim rasporedom ponikava (A) i odnos najznačajnijih rasjeda i prostornog rasporeda ponikava (B)  
 Izvor: GRIMANI I DR., 1966.; IVANOVIĆ I DR., 1967.

Figure 5 General geological map of the southeastern Velebit with spatial distribution of dolines (A) and the relation of the most important faults and the spatial distribution of dolines (B)  
 Source: GRIMANI ET AL., 1966; IVANOVIĆ ET AL., 1967

*Odnos prostornog rasporeda ponikava i speleoloških objekata Crnogorac*

Za usporedbu prostornog rasporeda ponikava kao površinskih krških oblika i speleoloških objekata, kao podzemnih krških oblika, odabrano je područje Crnogorac, sjeverozapadni dio JI Velebita. To je područje vrlo okršeno te se odlikuje brojnim površinskim i podzemnim krškim oblicima. Prostor Crnogorac jedino je područje JI Velebita s brojnim poznatim speleološkim objektima, a područje se sustavno speleološki istražuje već nekoliko desetljeća. Sustavna speleološka istraživanja Crnogorac započela su 70-ih godina prošlog stoljeća, a do sada su samo unutar granica užega istraživanog područja zabilježeni podaci o 184 speleološka objekta. Za potrebe analize uzeti su samo podaci o položaju ulaza u speleološke objekte bez obzira na njihovu vrstu, morfološki tip i dimenzije. Kernel metodom izračunata je gustoća ulaza u speleološke objekte te je uspoređena s prostornim rasporedom i gustoćom ponikava. Najveća gustoća speleoloških objekata od 116,72 so/km<sup>2</sup> odnosi se na dio masiva SI od Velikog Crnogorac. Gustoćom speleoloških objekata od 50 – 100 so/km<sup>2</sup> ističe se i područje Velikog i Malog Bata na zapadu. Središnji dio Crnogorac osim najvećom gustoćom speleoloških objekata ističe se i najvećom gustoćom ponikava od 93 pon/km<sup>2</sup>, a karte gustoće ponikava i ulaza u speleološke objekte u većoj se mjeri preklapaju.

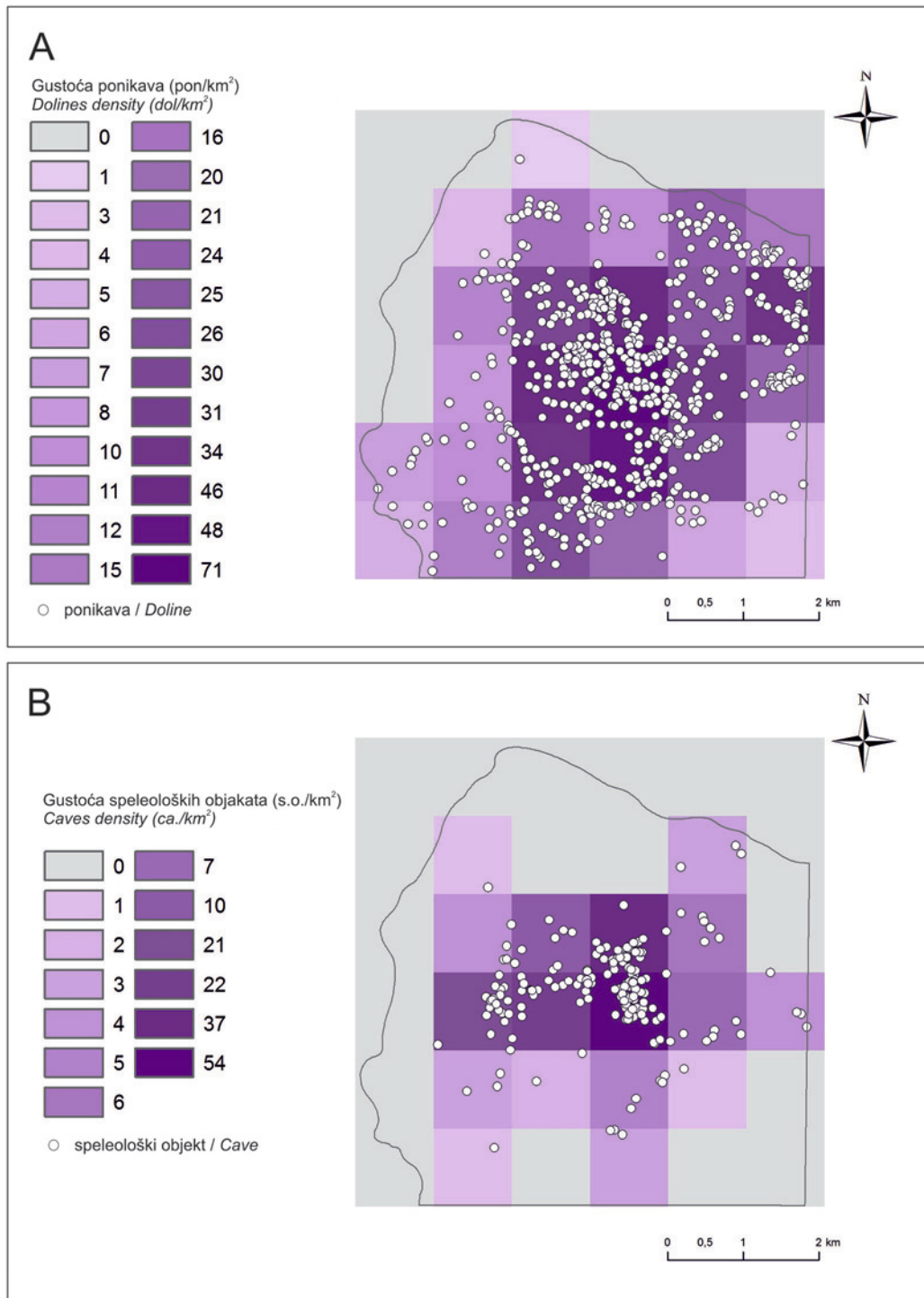
Iz piktograma gustoće pojave ponikava i speleoloških objekata na km<sup>2</sup> (Sl. 6., Sl. 9B) i regresijskog pravca uočava se postojanje određene veze između promatranih pojava. Bez obzira na opisane razlike, u prikupljanju lokacija promatranih pojava vidljivo je da postoji generalni trend ovisnosti u prostornoj gustoći promatranih pojava. To potvrđuje i izračunati koeficijent determinacije  $r^2 = 0,52$ , odnosno Pearsonov koeficijent korelacije od +0,72. Na temelju koeficijenta determinacije može se zaključiti da je 52% zbroja ukupnih kvadrata odstupanja protumačeno promatranom vezom, odnosno u našem slučaju da postoji nešto preko polovice od ukupnih čimbenika koji zajednički utječu na prostorni razmještaj i razvitak kako ponikava tako i speleoloških objekata.

*The relation of spatial distribution of dolines and caves of Crnogorac*

The area of Crnogorac, NW part of the southeastern Velebit, was chosen to compare the spatial distribution of dolines as surface karst forms and caves as underground karst forms. This area is intensely karstified featuring numerous surface and underground karst formations. Moreover, the area of Crnogorac is the only area of SE Velebit with many known caves and it was explored for several decades. Systematic speleological explorations of Crnogorac started in 1970s, with the result of 184 registered caves only within the borders of the narrow research area. For the purposes of the analysis, only the data on the position of entrances into caves were used, regardless of their type, morphologic form and dimensions. Kernel method was used to calculate the density of entrances into caves, which was subsequently compared to the spatial distribution and density of dolines. The highest density of caves, 116.72 so/km<sup>2</sup>, was recorded in the part of massif on the NE of Veliki Crnogorac. The areas of Veliki Bat and Mali Bat in the west also stand out with high density of caves, 50 – 100 so/km<sup>2</sup>. Besides the highest density of caves, the central part of Crnogorac has the highest density of dolines, 93 dol/km<sup>2</sup>, and density maps of dolines and entrances into caves generally overlap.

Pictograms of doline and cave density per square kilometre (Fig. 6, Fig. 9B) and the regression line indicate the existence of a relation between the observed phenomena. Regardless of the described differences in gathering of data of the observed phenomena locations, it is obvious that there is a general trend of codependency in their areal density. It is confirmed by the calculated determination coefficient  $r^2 = 0.52$ , as well as Pearson's coefficient of correlation of +0.72. Based on the determination coefficient it can be concluded that 52% of the sums of total squares of deviations were interpreted with the observed relation, or in our case that there is over half of total factors that jointly influence spatial distribution and the development of both dolines and caves.





Slika 6. Prostorni raspored i gustoća ponikava (A) i speleoloških objekata (B) na području Crnopca izračunata blok metodom

Figure 6 Spatial distribution and density of dolines (A) and caves (B) in the area of Crnopac calculated with block method

## Rasprava

Provedenim istraživanjem utvrđeno je da se na području jugoistočnog Velebita površine 349,2 km<sup>2</sup> nalazi 3684 ponike. S. Faivre (1999.) je na prostoru cijelog Velebita (oko 3000 km<sup>2</sup>) utvrdila oko 40 000 ponikava. Dakle, jugoistočni Velebit zaprima oko 11,6% površine cijelog Velebita, a ovdje se nalazi oko 9,2% svih ponikava Velebita. Utvrđena prosječna gustoća ponikava jugoistočnog Velebita iznosi 10,6 pon/km<sup>2</sup>. Radi usporedbe, S. Faivre (1992.; 1995.) je za područje Sjevernog Velebita i Senjskog utvrdila gustoću od 19 pon/km<sup>2</sup>, M. Pahernik (2000.) je za prostor SZ dijela Velike Kapele utvrdio gustoću od 27,5 pon/km<sup>2</sup>, N. Bočić i dr. (2010.) su za prostor Slunjske zaravni utvrdili gustoću od čak 42,5 pon/km<sup>2</sup>, dok su N. Bočić i M. Pahernik (2011.) za područje Biokova utvrdili gustoću od 18,4 pon/km<sup>2</sup>. Točkasti uzorak prostorne distribucije ponikava potom je omogućio izračun gustoće ponikava po jedinici površine (1 km<sup>2</sup>) prema jednostavnoj kernel metodi. Najveća prostorna gustoća od 116,5 pon/km<sup>2</sup> zabilježena je na području uvale Vagan u sjeveroistočnom dijelu istraživanog područja. Primjenom iste kernel metode, M. Pahernik (2012.) je utvrdio maksimalnu gustoću ponikava na Sjevernom Velebitu od 120 pon/km<sup>2</sup> te na Velikoj Kapeli 243 pon/km<sup>2</sup>. Navedeni podaci upućuju da se istraživano područje u okviru hrvatskoga krša ističe znatnom gustoćom ponikava.

Rezultati istraživanja pokazali su da visina reljefa, nagib i vertikalna raščlanjenost reljefa znatno utječu na prostorni raspored ponikava. Osim izravnog utjecaja, morfometrijski parametri utječu i na klimatske čimbenike koji se odražavaju u intenzitetu pojave ponikava. Analizom gustoće ponikava po razredima morfometrijskih pokazatelja ustanovljeno je da su najpovoljniji uvjeti za razvoj ponikava na području JI Velebita na nadmorskim visinama 1000 – 1200 m, raščlanjenosti reljefa 100 – 200 m/km<sup>2</sup> i nagiba padina manjeg od 2° (Sl. 7.). Regionalna istraživanja ponikava u Hrvatskoj pokazala su da je najznačajnija veza između gustoće ponikava i morfometrijskih obilježja reljefa ustanovljena s nagibom padina i vertikalnom raščlanjenosti reljefa (PAHERNIK, 2012). Na području Velebita također je naglašena i hipsometrija (FAIVRE, 1999.), što se potvrdilo i u ovim istraživanjima.

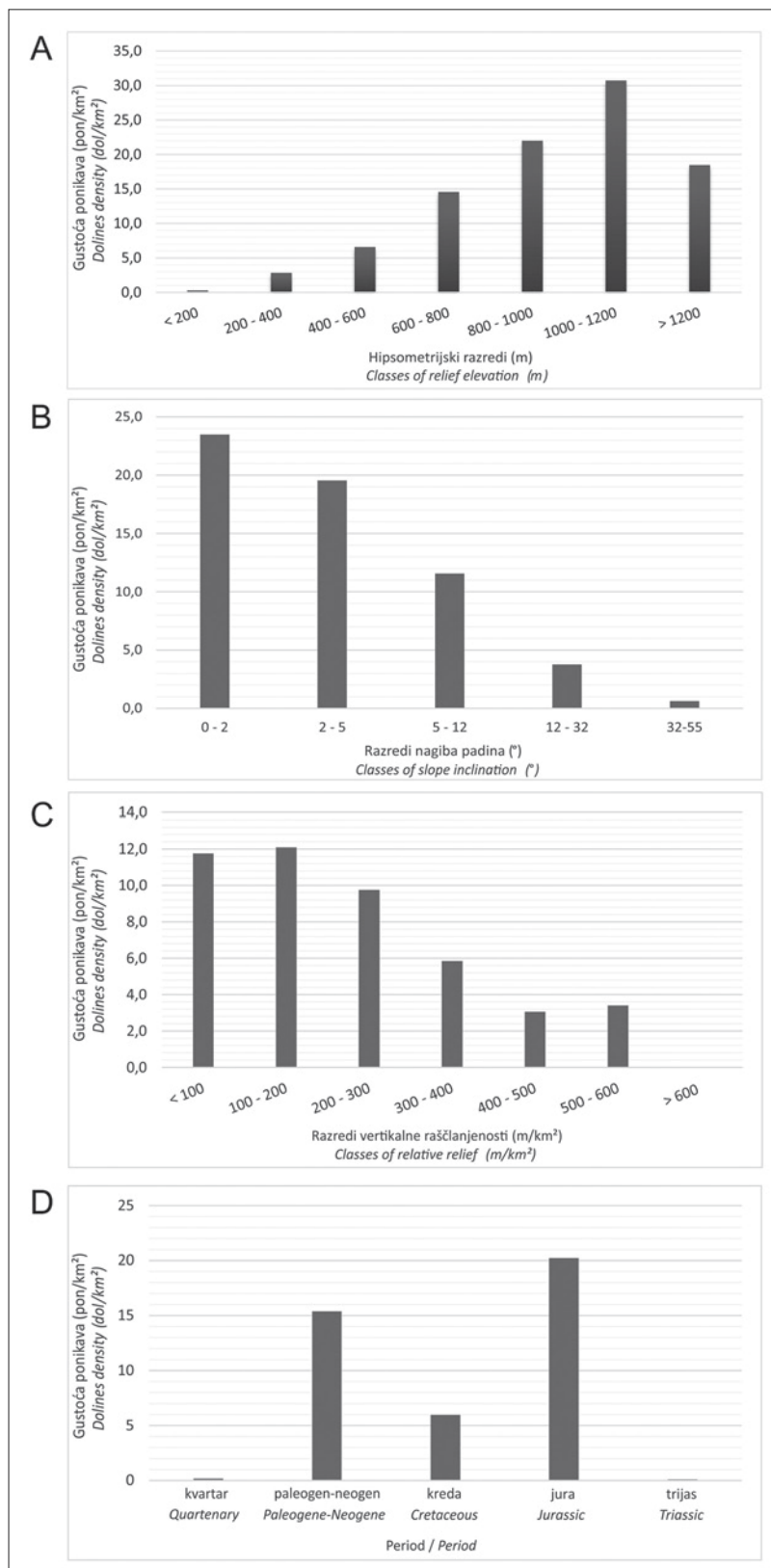
Histogram gustoće ponikava prema hipsometrijskim razredima pokazuje da gustoća ponikava raste s nadmorskom visinom do 1200 m (Sl. 7A). Najveću gustoću od 30,7 pon/km<sup>2</sup> imaju

## Discussion

The research showed that there are 3,684 dolines in the southeastern Velebit area of 349.2 km<sup>2</sup>. In the whole area of Velebit (around 3,000 km<sup>2</sup>), S. Faivre (1999) found about 40,000 dolines. Thus, southeastern Velebit encompasses around 11.6% of Velebit's area and includes around 9.2% of all the Velebit's dolines. The average density of dolines in the southeastern Velebit was determined to be 10.6 dol/km<sup>2</sup>. For comparison, S. Faivre (1992; 1995) determined the density of 19 dol/km<sup>2</sup> for the area of Northern Velebit and Senj ridge, M. Pahernik (2000) determined the density of 27.5 dol/km<sup>2</sup> for the NW area of Velika kapela, N. Bočić et al. (2010) determined the density of 42.5 dol/km<sup>2</sup> for the area of Slunj plateau, while N. Bočić and M. Pahernik (2011) found that the density of dolines in the area of Biokovo is 18.4 dol/km<sup>2</sup>. The dotted pattern of spatial distribution of dolines subsequently enabled the calculation of doline density per unit of area (1 sq km) with a simple kernel method. The highest spatial density of 116.5 dol/km<sup>2</sup> was found in the area of Vagan valley in the NE of the research area. Using the same kernel method, M. Pahernik (2012) determined the maximum doline density of 120 dol/km<sup>2</sup> in Northern Velebit and 243 dol/km<sup>2</sup> in Velika Kapela. The data above indicate that considering Croatian karst area, the research area stands out as the one with a significant doline density.

The results of research showed that altitude, inclination and relative relief significantly influence spatial distribution of dolines. Besides the direct influence, morphometric parameters also influence the climatic factors that are reflected in the intensity of the occurrence of dolines. The analysis of doline density by categories of morphometric indicators showed that the most favourable conditions for the development of dolines in the area of SE Velebit are on altitudes 1,000 – 1,200 m, with relief articulation of 100 – 200 m/km<sup>2</sup> and an inclination below 2° (Fig. 7). Regional research of dolines in Croatia showed that the most important relation between doline density and morphometric features of relief was determined by slope inclination and relative relief (PAHERNIK, 2012). In the area of Velebit, hypsometry is also pronounced (FAIVRE, 1999) which was confirmed by this research.

The histogram of doline density by hypsometric classes indicates that the density increases with altitude up to 1,200 m (Fig. 7A). The highest density of 30.7 dol/km<sup>2</sup> is in the parts of SE Velebit ridge on altitudes 1,000 – 1,200 m. Doline density



Slika 7. Prikaz gustoće ponikava prema hipsometrijskim razredima (A), razredima nagiba (B) i vertikalne raščlanjenosti (C) te osnovnim litostratigrafskim jedinicama (D)

Figure 7 The display of doline density by hypsometric classes (A), inclination classes (B), relative relief (C) and basic litostratigraphic units (D)

dijelovi hrpta JI Velebita na visini 1000 – 1200 m. Iznad 1200 m gustoća ponikava pada na 18,5 pon/km<sup>2</sup> te se odnosi isključivo na najviše dijelove masiva Crnopca. S obzirom na to da je ovo područje velikih raspona nadmorskih visina (9 – 1404 m), gustoća ponikava po hipsometrijskim razredima upućuje na važnost mikroklimatskog utjecaja na nastanak ponikava. Odnosi temperature i oborina važni su s obzirom na dužinu i intenzitet korozije. Niže temperature i veća količina oborina u vršnim dijelovima Velebita, a osobito njezina ravnomjernija raspodjela tijekom godine, uvjetuju znatno manje isparavanje kao i topljenje snijega što ima izravan utjecaj na intenzivnije djelovanje korozije u ponikvama i uvalama (PERICA, 1998.). Smanjenje broja ponikava na površinama višim od 1200 m može se djelomično pripisati i većim nagibima padina tih područja, što uvjetuje povećani koeficijent površinskog otjecanja.

Histogram gustoće ponikava po razredima nagiba padina pokazuje da gustoća ponikava pada s porastom nagiba padina (Sl. 7B). Najveću gustoću ima razred padina nižih od 2°, dok su na padinama strmijim od 32° zabilježene samo tri ponikve. Općenito govoreći, najveću gustoću ponikava imaju blago nagnute padine do 12° na kojima dominira procjeđivanje vode i korozijski proces u unutrašnjosti karbonatnoga stijenskog kompleksa. Smanjenje gustoće ponikava na padinama viših nagiba pripisuje se manjim zadržavanjem oborina i vode snježnice te vezom viših kategorija nagiba i aktivnih tektonskih zona (PAHERNIK, 2012.). S. Faivre i M. Pahernik (2007.) ističu da se na području vanjskih Dinarida na padinama strmijim od 12° ponikve javljaju tek sporadično što nije slučaj na području jugoistočnog Velebita. Čak 13,7% ponikava nastalo je na jako nagnutim i vrlo strmim terenima što upućuje na važnost utjecaja litoloških i strukturno-tektonskih uvjeta na nastanak krških površinskih oblika.

Distribucija vrijednosti vertikalne raščlanjenosti padina pokazuje da razred 100 – 200 m/km<sup>2</sup> ima najveću gustoću ponikava (Sl. 7C). Područja vertikalne raščlanjenosti do 100 m/km<sup>2</sup> imaju nešto manju gustoću ponikava od 11,8 pon/km<sup>2</sup>, što je vjerojatno posljedica znatno manje površine. Općenito gledajući, razredi vertikalne raščlanjenosti do 200 m/km<sup>2</sup> imaju najveću gustoću ponikava, ali prednjače i apsolutnim brojem ponikava te obuhvaćaju 69,06% ponikava JI Velebita. Kategorije raščlanjenosti reljefa veće od 200 m/km<sup>2</sup> karakterizira pad broja i gustoće ponikava, dok u razredu 600 – 700 m/km<sup>2</sup> nije

decreases to 18.5 dol/km<sup>2</sup> above 1,200 m and is limited to the highest parts of Crnopac massif. Since that is an area with a broad range of altitudes (9 – 1,404 m), doline density by hypsometric classes indicates the importance of microclimatic influence on the formation of dolines. Relations of temperatures and precipitation are important in terms of duration and intensity of corrosion. Lower temperatures and higher precipitation in the highest parts of Velebit, and especially a more uniform distribution of the precipitation over a year, cause a significantly lower evaporation as well as melting of snow, which directly causes a more intensive corrosion in dolines and valleys (PERICA, 1998). A lower number of dolines on surfaces above 1,200 m may be partially attributed to higher slope inclinations of these areas, which affects the increased coefficient of surface runoff.

The histogram of doline density by slope inclination classes indicates that the density decreases with the increase of slope inclination (Fig. 7B). The highest density is in the class of slopes lower than 2°, while on those steeper than 32° only three dolines were recorded. Generally speaking, the highest doline density is on mildly inclined slopes up to 12°, which are dominated by water percolation and corrosion within carbonate rock complex. The lowering of doline density on slopes with higher inclinations is attributed to shorter periods of retention of water from rainfall and snowmelt, as well as to the relation of higher inclination categories with active tectonic zones (PAHERNIK, 2012). S. Faivre and M. Pahernik (2007) argue that in the area of the Outer Dinarides, on slopes steeper than 12°, dolines appear sporadically, which is not the case in the area of southeastern Velebit where 13.7% of dolines were formed on intensely inclined and very steep terrains. This indicates the importance of the influence of lithological and structural-tectonic conditions on the development of karst surface formations.

The distribution of slope relative relief values indicates that the highest doline density is in the class 100 – 200 m/km<sup>2</sup> (Fig. 7C). The density of dolines is lower, 11.8 dol/km<sup>2</sup>, in zones of relative relief up to 100 m/km<sup>2</sup>, probably due to their smaller area. Generally speaking, the highest density of dolines is in classes of relative relief up to 200 m/km<sup>2</sup>, where the absolute number of dolines is also the highest and which include 69.06 % of the SE Velebit's dolines. The categories of relief articulation higher than 200 m/km<sup>2</sup> are also characterized by the decrease in number and density of dolines, while in the class 600 – 700 m/km<sup>2</sup> no dolines were found.

zabilježena nijedna ponikva. Slično kao i u slučaju nagiba padina, nastanku ponikava pogodovao je slabije raščlanjen reljef.

Litološki sastav JI Velebita karakterizira dominacija karbonatnih naslaga u čitavome istraživanom prostoru. Usporedbom prostornog rasporeda ponikava s generaliziranom geološkom kartom utvrđen je najveći razvoj ponikava na jurskim sedimentima. Zbog generalizacije litostratigrafskih jedinica teško je odrediti razliku u broju ponikava među detaljnijim jedinicama, međutim jurske naslage jugoistočnog Velebita karakterizira dominacija vapnenaca i vapnenačkih breča visokog udjela  $\text{CaCO}_3$  (do 98%; IVANOVIĆ I DR., 1976.), dok se dolomiti javljaju u manjoj mjeri. Najveća gustoća ponikava od 20,2 pon/km<sup>2</sup> zabilježena je u naslagama jure, slijede Velebitske (Jelar breče) paleogena/neogena s 15,4 pon/km<sup>2</sup> i kredni sedimenti (vapnenci i vapnenačke breče) sa 6 pon/km<sup>2</sup> (Sl. 8D). Jedan od najokršnijih dijelova istraživanoga područja – Crnopac nije i područje s maksimumom gustoće. Razlog je najvjerojatnije to što je središnji dio Crnopca obilježen brojnim dubokim i velikim ponikvama. Najveće ponikve duboke su i do 80 m te dosežu do 200 m u promjeru (Bočić, 2009a). Upravo zbog veće površine ponikava smanjuje se njihov broj, a time i gustoća na ovome području građenom od paleogensko-neogenskih karbonatnih Jelar breča. U tom slučaju broj ponikava nije najbolji pokazatelj stupnja okršnosti već bi puno bolji pokazatelj bila površina i volumen ponikava. Slično je utvrđeno (TELBISZ I DR., 2009.) na području Biokova.

Većina regionalnih geomorfoloških istraživanja u Hrvatskoj također su pokazala da se najveća gustoća ponikava javlja u karbonatnim naslagama jure i krede (PAHERNIK, 2012.). Tako N. Bočić (2009b) za područje Slunjske zaravni mjeri najveću gustoću ponikava u karbonatnim stijenama gornje jure (60,6 pon/km<sup>2</sup>) i donje krede (53,1 pon/km<sup>2</sup>), dok M. Pahernik (1997.) za prostor Velike Kapele navodi podatak od 40,9 pon/km<sup>2</sup> na vapnencima kredne starosti i na 32,9 pon/km<sup>2</sup> na karbonatima jurske starosti.

Usporedba prostornog rasporeda ponikava s glavnim rasjedima uputila je na tek lokalni značaj rasjeda na povećani broj ponikava. Slično su utvrdili S. Faivre (1999.) za prostor cijelog Velebita te N. Bočić i dr. (2010.) za prostor Slunjske zaravni. Razlog tome najvjerojatnije je činjenica da su na geološkim kartama prikazani samo najznačajniji rasjedi s velikim

As in case of slope inclinations, the formation of dolines was facilitated by less articulated relief.

The lithological structure of the SE Velebit is characterized by the dominance of carbonate layers in the entire research area. By comparing spatial distribution of dolines with a generalized geological map, the most prominent development of dolines was determined to be in Jurassic strata. The generalization of lithostratigraphic units makes it difficult to differentiate the numbers of dolines in more detailed units; however, the Jurassic strata of the southeastern Velebit are characterized by the domination of carbonates and carbonate breccias with a high share of  $\text{CaCO}_3$  (up to 98%; IVANOVIĆ ET AL., 1976), while dolomites appear less frequently. The highest doline density of 20.2 dol/km<sup>2</sup> was recorded in Jurassic strata, followed by Velebit (Jelar) breccias with 15.4 dol/km<sup>2</sup> and Cretaceous sediments (carbonates and carbonate breccias) with 6 dol/km<sup>2</sup> (Fig. 8D). Crnopac, one of the most karstified zones within the research area, is not a zone of maximum density. The most probable reason is the fact that the central part of Crnopac features many deep and large dolines. The largest dolines are up to 80 m deep and reach up to 200 m in radius (Bočić, 2009a). Therefore, it is due to bigger surface area of dolines that their number and density are decreased in this area which consists of Paleogene-Neogene carbonate Jelar breccias. In this case, the number of dolines is not the best indicator of the degree of karstification – a much better one would be their surface area and volume. Similar conclusions were reached for the area of Biokovo (TELBISZ ET AL., 2009).

Most regional geomorphological studies in Croatia showed that the highest density of dolines appears to have been in Jurassic and Cretaceous carbonate layers (PAHERNIK, 2012). Thus, in the area of Slunj plateau N. Bočić (2009b) records the highest density of dolines in Upper Jurassic (60.6 dol/km<sup>2</sup>) and Lower Jurassic (53.1 dol/km<sup>2</sup>) carbonate rocks, while M. Pahernik (1997) mentions 40.9 dol/km<sup>2</sup> in Cretaceous carbonates and 32.9 dol/km<sup>2</sup> in Jurassic carbonates in the area of Velika Kapela.

The comparison of spatial distribution of dolines with the main faults indicated a merely local influence of faults on the increased number of dolines. Similar conclusions were reached by S. Faivre (1999) for the whole Velebit area and N. Bočić et al. (2010) for the area of Slunj plateau. The reason for that is most probably the fact that geological maps show only the most prominent

pomacima u čijim zonama vladaju uvjeti kompresije (FAIVRE, REIFFSTECK, 1999.). Uz to, uz zone većih regionalnih rasjeda često se vežu povećani nagibi padina i veće vrijednosti vertikalne raščlanjenosti reljefa. S druge strane, rasjedi i pukotine neotektonske etape uglavnom nisu prikazani, a vjerojatno imaju značajni utjecaj na prostorni raspored ponikava što se očituje u brojnim vidljivim morfolineamentima. Nešto drukčiji rezultati dobiveni su analizom prostornog rasporeda ponikava SZ dijela Velike Kapele (PAHERNIK, 2000.). Utvrđeno je da se zone povećane gustoće ponikava vežu uz zone starijih rasjeda dinarskog pružanja, dok su u zonama rasjeda neotektonske etape gustoće ponikava manje. Dosadašnja istraživanja prostornog rasporeda ponikava na prostoru Velebita također su pokazala njihovu povezanost s orijentacijom naprezanja i deformacija unutar strukturnih blokova što dokazuje da je tektonika važan čimbenik koji utječe na prostorni raspored ponikava (FAIVRE, 1999.; FAIVRE, REIFFSTECK, 1999.; 2002.). Ove odnose bi na području jugoistočnog Velebita trebalo detaljnije istražiti usporedbom s rezultatima terenskoga strukturno-geološkog kartiranja (npr. ŠUŠTERŠIČ, 2006.).

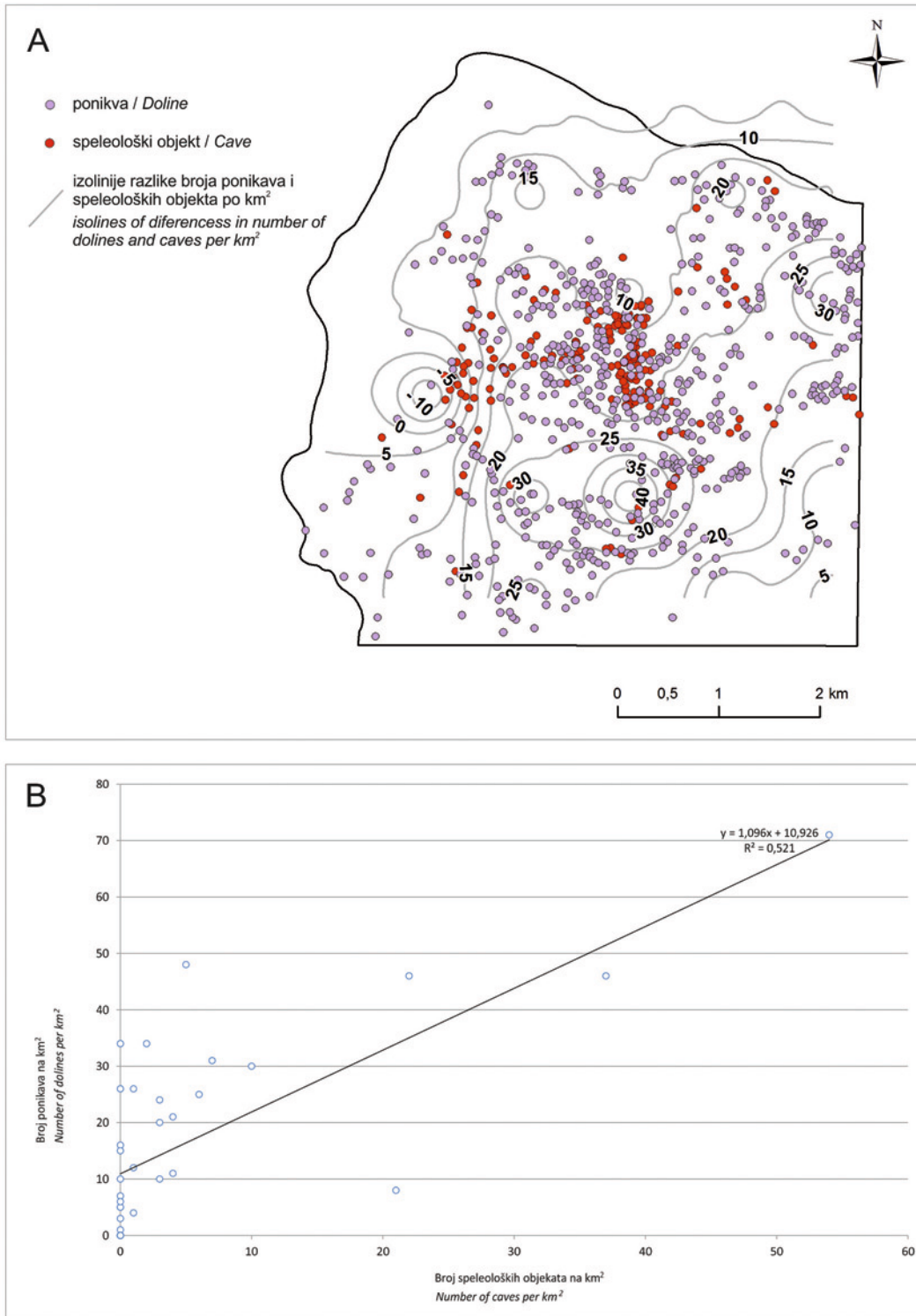
Prostorni odnos ponikava i ulaza u speleološke objekte pokazuju značajnu korelaciju. Prosječno se na svakih 10,9 ponikava po km<sup>2</sup> pojavljuje jedan ulaz u speleološki objekt (Sl. 8B). Na karti (Sl. 8A) koja prikazuje prostorne razlike u gustoći njihove pojave stoga je najznačajnija korelacija u zoni izolinije vrijednosti 10. Veće vrijednosti upućuju na zone u kojima prevladavaju ponikve, a manje vrijednosti izolinija na zone u kojima prevladavaju speleološki objekti. Značajna korelacija najvjerojatnije je povezana s činjenicom da su ponikve i ulazi u speleološke objekte Crnopca (među kojima prevladavaju jamski ulazi) svojim postankom vezani za iste ili slične uvjete, a to su korozijsko djelovanje procjedne vode u vadonoj i posebno epikrškoj zoni.

Slično istraživanje na području države Tennessee proveli su A. G. Shofner i dr. (2001.). Usporedili su tzv. *indeks ponikava* s brojem i ukupnom duljinom špilja na mreži blokova 2,5' x 2,5' geografske širine i dužine. Zaključeno je da su na regionalnoj razini područja povoljna za razvitak ponikava ujedno i povoljnija za razvitak špilja, ali na lokalnoj razini ova veza značajno oslabljuje.

faults with significant shifts and with the conditions of compression in their zones (FAIVRE, REIFFSTECK, 1999). Moreover, zones of large regional faults are usually related to high slope inclinations and high values of relative relief. It must be added that faults and fractures of the neotectonic period are generally not shown although they probably have a strong influence on spatial distribution of dolines. This is reflected in many visible morpholineaments. Somewhat different results were acquired by analysing spatial distribution of dolines in the NW part of Velika Kapela (PAHERNIK, 2000). It was determined that zones of high doline densities are related to zones of old faults that have Dinaric extension, while in fault zones from neotectonic period the doline density is lower. Earlier studies of the spatial distribution of dolines in the area of Velebit also showed their relation with the orientation of pressures and deformations within the structural blocks, which indicates that tectonics is an important factor that influences the spatial distribution of dolines (FAIVRE, 1999; FAIVRE, REIFFSTECK, 1999; 2002). These relations should be studied in more detail in the area of southeastern Velebit by comparing the acquired results with the results of field structural-geological mapping (e.g. ŠUŠTERŠIČ, 2006).

Comparison of positions of dolines and entrances into caves indicates a significant correlation. On average, there is one entrance into cave on each 10.9 dolines per km<sup>2</sup> (Fig. 8B). On the map (Fig. 8A) that shows spatial differences in density of their occurrence the most significant correlation is in the zone of isoline valued 10. Higher values of isolines indicate zones where dolines are dominant; while lower values show those that caves are more common. This significant correlation is most probably related to the fact that, when it comes to their genesis, dolines and entrances into caves of Crnopac (among which the entrances into caves are most common) are related to the same or similar conditions – solutational activity of percolating water in vadose zone and especially in epikarst zone.

Similar research was done in the area of the state of Tennessee by A. Shofner et al. (2001). They compared the so called *doline index* with the number and the total length of caves in a network with blocks of 2.5' x 2.5' of longitude and latitude. They concluded that on a regional level the areas favourable for the development of dolines are at the same time more favourable for the development of caves, but on a local level this relation becomes significantly weaker.



Slika 8. Korelacija pojave ponikava i speleoloških objekata. Pozitivne vrijednosti pokazuju prevagu ponikava, a negativne nedostatak ponikava u odnosu na speleološke objekte. Najveća korelacija je u zoni izolinije 10 (A). Linearna ovisnost pojave speleoloških objekata prema ponikvama (B).

Figure 8 Correlation of the positions of dolines and caves. Positive values indicate domination of dolines, while the negative ones show less dolines than caves. The biggest correlation is in the zone of isoline 10 (A) Linear dependence of the occurrence of caves on dolines (B).

Ovdje treba napomenuti da podaci o speleološkim objektima Crnopca nisu potpuni, tj. nisu njihovo realno stanje već obuhvaćaju samo poznate i istražene speleološke objekte. Za pretpostaviti je da će daljnjim speleološkim istraživanjima toga prostora ova veza jačati u skladu s dobivenim trendom, odnosno smjerom linearne regresije. Na temelju toga možemo zaključiti da provedena analiza odnosa gustoće pojave ponikava i speleoloških objekata može poslužiti i za usmjeravanje daljnjih speleoloških istraživanja u ovome području.

### Zaključak

Provedenim istraživanjima utvrđene su osnovne karakteristike prostornog rasporeda i gustoće ponikava na području jugoistočnog Velebita površine 349,2 km<sup>2</sup>. Na tom su području zabilježene 3684 ponikve, što čini prostornu gustoću ponikava od 10,6 pon/km<sup>2</sup>. Gustoća ponikava na prostoru gdje su one razvijene (249,8 km<sup>2</sup>, ako se izuzme neokršeno područje bez ponikava) iznosi 14,8 pon/km<sup>2</sup>. Površinom najzastupljeniji razred gustoće ponikava je 5 – 20 pon/km<sup>2</sup> koji zauzima 27,03% jugoistočnog Velebita. Vrijednost prosječne (10,6 pon/km<sup>2</sup>), a posebno maksimalne gustoće (116,47 pon/km<sup>2</sup>) ponikava upućuje da je području jugoistočnog Velebita izrazito okršeno i pripada područjima s dobro razvijenim krškim reljefom.

Utvrđeno je da se gustoća ponikava povećava s nadmorskom visinom te je najveća u pojasu visine 1000 – 1200 m gdje iznosi 30,7 pon/km<sup>2</sup>. Iznad toga pojasa gustoća se smanjuje. Gustoća ponikava smanjuje se s porastom nagiba te je najizraženija u zoni nagiba do 2° (23,5 pon/km<sup>2</sup>). Slično nagibima padina gustoća ponikava se smanjuje s povećanjem vertikalne raščlanjenosti reljefa gdje je najveća gustoća u zonama raščlanjenosti 100 – 200 m/km<sup>2</sup> (11,8 pon/km<sup>2</sup>) i > 100 m/km<sup>2</sup> (12,1 pon/km<sup>2</sup>). Ovi rezultati slični su rezultatima prethodnih istraživanja provedenih na području hrvatskoga krša te posebno Velebita, a upućuju na značaj morfometrijskih parametara reljefa u istraživanju ponikava.

Uspoređujući prostorni raspored ponikava s geološkom građom utvrđeno je da je najveća gustoća ponikava u područjima izgrađenim na karbonatnim naslagama jurske starosti (20,2 pon/km<sup>2</sup>), a ne na karbonatnim brečama paleogensko-neogenske starosti (15,4 pon/km<sup>2</sup>) koje su poznate

At this point, it has to be noted that the data on caves of Crnopac are not complete, i.e. they do not represent their real state but include only caves that are known and explored. It can be assumed that with further speleological research of the area this relation will grow stronger, in accordance with the perceived trend (linear regression). Therefore, it can be concluded that the conducted analysis of relation of densities of dolines and caves may serve as a guidance for further speleological explorations in this area.

### Conclusion

The conducted research resulted in determining basic characteristics of spatial distribution and density of dolines in southeastern Velebit area of 349.2 km<sup>2</sup>. A total of 3,684 dolines were recorded in that area, which makes the average spatial density 10.6 dol/km<sup>2</sup>. The density of dolines in the area where they actually developed (249.8 km<sup>2</sup>, if the non-karstified area without dolines is excluded) is 14.8 dol/km<sup>2</sup>. The most common category of doline density is 5 – 20 dol/km<sup>2</sup> which takes up 27.03 % of the southeastern Velebit. The values of average (10.6 dol/km<sup>2</sup>) and especially of maximum density (116.47 dol/km<sup>2</sup>) indicate that the area of southeastern Velebit is significantly karstified and belongs to the areas with well-developed karst relief.

It was found that the doline density increases with altitude and reaches its maximum in the elevation belt of 1,000 – 2,000 m, where it is 30.7 dol/km<sup>2</sup>. Above this belt the density decreases. The doline density also decreases with the increase of inclination and is most prominent in the inclination zone of under 2° (23.5 dol/km<sup>2</sup>). As with slope inclinations, the doline density is reduced with an increase of relative relief where the highest density is in articulation zones of 100 – 200 m/km<sup>2</sup> (11.8 dol/km<sup>2</sup>) and > 100 m/km<sup>2</sup> (12.1 dol/km<sup>2</sup>). These results are similar to those from previous studies conducted in the area of Croatian karst, especially Velebit, and indicate the significance of morphometric parameters of relief in researching dolines.

By comparing spatial distribution of dolines with geological structure it was determined that the highest density of dolines is in areas that consist of Jurassic carbonate layers (20.2 dol/km<sup>2</sup>) and not on the Paleogene-Neogene carbonate breccias (15.4 dol/km<sup>2</sup>) which are known for their intense



po izrazitoj okršenosti. Razlog je najvjerojatnije taj što su na područjima karbonatnih breča palogensko-neogenske starosti ponikve većeg promjera te im je stoga gustoća nešto manja.

Zone glavnih rasjeda nemaju značajniji utjecaj na povećanje gustoće ponikava najvjerojatnije zbog kompresijskih uvjeta te povećanih nagiba i vertikalne raščlanjenosti reljefa u zonama rasjeda. S obzirom na to da je u ranijim istraživanjima utvrđena veza između prostornog rasporeda ponikava i orijentacije stijenskog naprezanja za pretpostaviti je da na njihovu pojavu značajan utjecaj imaju i strukturni elementi što tek treba istražiti terenskim metodama.

Usporedbom prostornog rasporeda i gustoće ponikava i ulaza u speleološke objekte utvrđen je njihov visok stupanj korelacije (+0,72), a može se pretpostaviti da će daljnjim speleološkim istraživanjima ova veza i ojačati. Takav rezultat je očekivan jer je riječ o oblicima koji nastaju radom procjedne vode u vadoznoj zoni. Daljnja istraživanja ponikava na području jugoistočnog Velebita trebalo bi usmjeriti u detaljnije određivanje njihovih morfometrijskih karakteristika (površina, dubina, volumen) i morfoloških tipova. Zatim, terenskim kartiranjem trebalo bi detaljnije istražiti ulogu strukturnih elemenata na prostorni raspored ponikava. Istraživanja bi trebalo usmjeriti i na međusobni prostorni odnos pojave ponikava i suhih dolina, posebno u južnom, nižem dijelu jugoistočnog Velebita. U istraživanju odnosa ponikava i speleoloških objekata trebalo bi uzeti u obzir i osnovne morfometrijske i morfološke parametre speleoloških objekata (duljina, dubina, vrsta i tip).

## Zahvale

Ovaj rad izrađen je u sklopu projekta potpore Sveučilišta u Zagrebu pod nazivom: Geomorfološko-geološki uvjeti i dinamika okršavanja na odabranim lokalitetima Dinarskog krša u Hrvatskoj – 202799. Autori zahvaljuju Speleološkom odsjeku Hrvatskog planinarskog društva Željezničar iz Zagreba na ustupljenim podacima o položajima ulaza u speleološke objekte te neovisnim recenzentima koji su svojim komentarima značajno unaprijedili kvalitetu ovoga rada.

karstification. The reason for that is probably a larger radius of dolines in areas with Paleogene-Neogene carbonate breccias, which is why the spatial density is lower.

Main fault zones do not appear to have a significant influence on the increase of doline density, most probably because of conditions of compression and the increased inclinations and relative relief. Considering that in earlier studies the relation between the spatial distribution of dolines and the orientation of rock straining was found, it may be assumed that their occurrence is significantly influenced by structural elements; however, that is to be determined by field methods.

By comparing spatial distribution and density of dolines and entrances into caves, a high degree of correlation (+0.72) was found, and it can be assumed that further speleological explorations will prove this relation to be even stronger. Such a result is expected since the forms in question are those that form through activity of percolated water in vadose zone. Further research of dolines in the area of southeastern Velebit should be directed to a more detailed definition of their morphometric characteristics (area, depth, volume) and morphological types. Furthermore, the role of structural elements in spatial distribution of dolines should be studied in more detail through terrain mapping. Moreover, the studies should be focused on spatial relation of the occurrences of dolines and dry valleys, especially in the southern, lower part of southeastern Velebit. Basic morphometric and morphological parameters of caves (length, depth, class and type) should be considered when studying the relations between dolines and caves.

## Acknowledgements

This paper was written as a part of the support project of the University of Zagreb named *Geomorphological-geological conditions and dynamics of karstification in the selected localities of the Dinaric karst in Croatia – 202799*. The authors would like to thank the Speleological section of the Croatian Mountaineering Society “Željezničar” from Zagreb for the data on positions of entrances into caves, as well as independent reviewers whose comments have significantly improved the quality of the paper.

## IZVORI / SOURCES

Izvor 1. / Source 1, *Arhiva speleoloških objekata*, Speleološki odsjek HPD Željezničar, Speleološki klub Željezničar, Zagreb.

Izvor 2. / Source 2, *Digitalni model reljefa*, veličina jedinične ćelije 50 x 50 m, Baza prostornih podataka Geografskog odsjeka Prirodoslovno matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Izvor 3. / Source 3, *Topografske karte mjerila 1:25000*, listovi 470-2-3 (Gračac), 470-2-4 (Gračac), 470-4-1 (Gračac), 470-4-2 (Gračac), 470-4-4 (Gračac), 471-1-3 (Drvar), 471-3-1 (Drvar), 471-3-3 (Drvar), 471-4-4 (Drvar), Vojnogeografski institut, Beograd, 1977. – 1979.

URL 1: *Hrvatski speleološki poslužitelj*, <http://speleologija.hr/>, 5. 5. 2016.

## LITERATURA / BIBLIOGRAPHY

BOČIĆ, N. (2009a): Cerovačke caves and other karst phenomena of the Crnopac massif, u: *International interdisciplinary scientific conference Sustainability of Karst Environment Dinaric Karst and other Karst Regions – Excursion guidebook: Natural and cultural attractions of Dinaric karst of Lika and Velebit*, (ur. Lukić, A., Bočić, N.), Centar za krš, Gospić, 12-18.

BOČIĆ, N. (2009b): *Geomorfološke značajke prostora Slunjske zaravni*, Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geografski odsjek, Zagreb, pp. 270.

BOČIĆ, N., PAHERNIK, M. (2011): Ponikve Parka prirode Biokovo – prostorna analiza, u: *Znanstveno-stručni skup „Biokovo na razmeđu milenija: razvoj parka prirode u 21. stoljeću“ Knjiga sažetaka*, (ur. Protrka, K., Škrabić, H., Srzić, S.), Javna ustanova „Park prirode Biokovo“, Makarska, 68.

BOČIĆ, N., PAHERNIK, M., BOGNAR, A. (2010): Geomorfološka obilježja Slunjske zaravni, *Hrvatski geografski glasnik*, 72 (2), 5-26.

BOGNAR, A., FAIVRE, S., BUZJAK, N., PAHERNIK, M., BOČIĆ, N. (2012): Recent landform evolution in the Dinaric and Pannonian Region of Croatia, u: *Recent Landform Evolution*, (ur. Lóczy, D., Stankoviansky, M., Kotarba, A.), Springer, Heidelberg – London – New York, 313-344.

BONDESAN, A., MENEGHEL, M., SAURO, U. (1992): Morphometric analysis of dolines, *International Journal of Speleology*, 21, 1-55, DOI: <http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.21.1.1>

BUZJAK, N. (2006): *Geomorfološke i speleomorfološke značajke Žumberačke gore i geokološko vrednovanje endokrškog reljefa*, Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geografski odsjek, Zagreb, pp. 200.

DENIZMAN, C. (2003): Morphometric and spatial distribution parameters of karstic depressions, Lower Suwannee River Basin, Florida, *Journal of Cave and Karst Studies*, 65 (1), 29-35.

FAIVRE, S. (1992): Analiza gustoće ponikava na Sjevernom Velebitu i Senjskom bilu, *Senjski zbornik*, 19, 13-24.

FAIVRE, S. (1995): Neke temeljne strukturno-geomorfološke značajke sjevernog Velebita i Senjskog bila, u: *Zbornik radova 1. Hrvatskog geografskog kongresa*, (ur. Pepeonik, Z.), Hrvatsko geografsko društvo, Zagreb, 156-169.

FAIVRE, S. (1999): *Landforms and tectonics of the Velebit mountain range (Outer Dinarides, Croatia)*, Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geografski odsjek, Zagreb, pp. 360.

FAIVRE, S., PAHERNIK, M. (2007): Structural influences on the spatial distribution of dolines, Island of Brač, Croatia, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 51 (4), 487–503, DOI: 10.1127/0372-8854/2007/0051-0487

FAIVRE, S., REIFFSTECK, P. (1999): Spatial distribution of dolines as an indicator of recent deformations on the Velebit mountain range (Croatia), *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 2, 129-142.

FAIVRE, S., REIFFSTECK, P. (2002): From doline distribution to tectonic movements example of the Velebit mountain range, Croatia, *Acta Carsologica*, 31 (3), 139-154.

- FORD, D., WILLIAMS, P. D. (2007): *Karst Hydrogeology and Geomorphology*, John Wiley & Sons, West Sussex, England, pp. 562.
- GAMS, I., (2000): Doline morphogenetic processes from global and local viewpoints, *Acta Carsologica*, 29 (2), 123-138.
- GRIMANI, I., ŠIKIĆ, A. K., ŠIMUNIĆ A. (1966): *Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000, list Knin L33-141*, Institut za geološka istraživanja, Zagreb, Savezni geološki institut, Beograd.
- GRIMANI, I., JURIŠA, M., ŠIKIĆ, A. K., ŠIMUNIĆ A. (1975): *Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000, Tumač za list Knin L33-141*, Institut za geološka istraživanja, Zagreb, Savezni geološki institut, Beograd.
- IVANOVIĆ, A., SAKAČ, K., SOKAČ, B., VRŠALOVIĆ-CAREVIĆ, I., ZUPANIČ, J. (1976): *Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000, Tumač za list Obrovac L33-140*, Institut za geološka istraživanja, Zagreb, Savezni geološki institut, Beograd.
- IVANOVIĆ, A., SAKAČ, K., MARKOVIĆ, S., SOKAČ, B., ŠUŠNJAR, M., NIKLER, L., ŠUŠNJARA, A. (1967): *Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000, List Obrovac L33-140*, Institut za geološka istraživanja, Zagreb, Savezni geološki institut, Beograd.
- JENNINGS, J. N. (1975): Doline Morphometry as a Morphogenetic Tool: New Zealand Examples, *New Zealand Geographer*, 31 (1), 6-28.
- KLEIN, V. (1976): Gustoća ponikva Ličko-goranske regije, *Geografski glasnik*, 38 (1), 357-377.
- LOZIĆ, S. (1995): Vertikalna raščlanjenost reljefa kopnenog dijela Republike Hrvatske, *Acta Geographica Croatica*, 30, 17-28.
- LOZIĆ, S. (1996): Nagibi padina kopnenog dijela Republike Hrvatske, *Acta Geographica Croatica*, 31, 41-50.
- LYEW-AYEE, P., VILES, H. A., TUCKER, G. A. (2007): The use of GIS-based digital morphometric techniques in the study of cockpit karst, *Earth Surface Processes and Landforms*, 32 (2), 165-179, DOI: 10.1002/esp.1399
- MARKOVIĆ, M. (1983): *Osnovi primenjene geomorfologije*, Geoinstitut, Posebna izdanja, knjiga 8, Beograd, pp. 172.
- MIHEVC, A. (1998): Dolines, their Morphology and Origin. Case Study: Dolines from the Kras, West Slovenia (The Skocjan Karst), *Supplementi di Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, Volume III, T. 4, 69-74.
- MIHLJEVIĆ, D. (1994): Analysis of spatial characteristics in distribution of sink-holes, as an geomorphological indicator of recent deformations of geological structures, *Acta Geographica Croatica*, 29, 29-36.
- MIHLJEVIĆ, D. (1995): *Geomorfološke značajke gorskog hrpta Učke, gorske skupine Ćićarije i Istarskog pobrđa*, Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geografski odsjek, Zagreb, pp. 377.
- PAHERNIK, M. (1997): *Recentni krški procesi i njihov utjecaj na oblikovanje reljefa gorske skupine Velike Kapele*, Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geografski odsjek, Zagreb, pp. 164.
- PAHERNIK, M. (2000): Prostorni raspored i gustoća ponikava SZ dijela Velike Kapele – rezultati računalne analize susjedstva, *Geoadria*, 5, 105-120.
- PAHERNIK, M. (2012): Prostorna gustoća ponikava na području Republike Hrvatske, *Hrvatski geografski glasnik*, 74 (2), 5-26.
- PENTEK, K., VERESS, M., LOCZY, D. (2007): A morphometric classification of solution dolines, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 51 (1), 19-30, DOI: 10.1127/0372-8854/2007/0051-0019
- PERICA, D. (1998): *Geomorfologija krša Velebita*, Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geografski odsjek, Zagreb, pp. 220.
- SAURO, U. (2003): Dolines and sinkholes: Aspect of evolution and problems of classification, *Acta carsologica*, 32 (2), 41-52.
- SAURO, U. (2005): Closed Depressions, u: *Encyclopedia of caves*, (ur. Culver, D., White, W.), Elsevier, Amsterdam, 108-127.

SHOFNER, A. G., MILLS, H. H., DUKE, E. J. (2001): A simple map index of karstification and its relationship to sinkhole and cave distribution in Tennessee, *Journal of Cave and Karst Studies*, 63 (2), 67-75.

ŠUŠTERŠIČ, F. (2006): Relationships between deflector faults, collapse dolines and collector channel formation: some examples from Slovenia, *International Journal of Speleology*, 35 (1), 1-12, DOI: <http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.35.1.1>

TELBISZ, T., DRAGUŠICA, H., NAGY, B. (2009): Doline Morphometric Analysis and Karst Morphology of Biokovo Mt (Croatia) Based on Field Observations and Digital Terrain Analysis, *Hrvatski geografski glasnik*, 71 (2), 5-22.

WILLIAMS, P. W. (1971): Illustrating morphometric analysis of karst with examples from New Guinea, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 15, 40-61.

WILLIAMS, P. W. (1972): The analysis of spatial characteristic of karst terrains, u: *Spatial Analysis in Geomorphology*, (ur. Chorley, R. J), Methuen & Co., London, 135-163.

WILLIAMS, P. W. (1985): Subcutaneous hydrology and the development of doline and cockpit karst, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 29 (4), 463-482.