

Primljeno / Received
15-09-2020 / 2020-09-15Prihvaćeno / Accepted
25-10-2020 / 2020-10-25

Neven Bočić

Geomorfologija krša na području Oštarije–Tounj i njezin značaj u geomorfološkoj evoluciji šireg područja

Karst geomorphology in the Oštarije–Tounj area and its significance in the geomorphological evolution of the broader area

Područje Oštarije–Tounj nalazi se na kontaktu dviju velikih geomorfoloških cjelina: Ogulinsko–plašćanske zavale i Unsko–koranske zaravni, uz sjevernu granicu dinarskoga krša u Hrvatskoj. Radi se o izrazito okršenom terenu s brojnim površinskim i podzemnim krškim oblicima. Cilj je ovoga istraživanja utvrditi značajke krškoga reljefa te uvjete i procese njegova oblikovanja u svrhu sagledavanja interakcije dviju velikih cjelina prilikom njihova geomorfološkoga razvoja. Korištene su metode opće i specifične digitalne morfometrijske analize reljefa te geomorfološko kartiranje. U okviru morfogenetskoga pristupa analizirani su morfostrukturni uvjeti okršavanja te prostorni raspored i značajke krških i fluviokrških reljefnih oblika. Utvrđeno je nekoliko suhih dolina koje upućuju na to da je ovaj prostor bio važan koridor površinskoga otjecanja iz područja Ogulinsko–plašćanske zavale prema Unsko–koranskoj zaravni. Tektonskim izdizanjem uske zone između ovih dviju cjelina nastao je orografski prag koji je onemogućio daljnje površinsko otjecanje te stvorio uvjete za razvoj podzemnih krških provodnika. U radu se daje i prijedlog modela morfogeneze Ogulinsko–plašćanske zavale sažetoga naziva „zaravnjavanje i zatvaranje”.

Ključne riječi: krš, fluviokrš, strukturalna geomorfologija, Ogulinsko–plašćanska zaval, Hrvatska, Dinarski krš

The Oštarije–Tounj area lies in the contact zone of two large geomorphological units: the Ogulin–Plaški basin and the Una–Korana plateau, along the northern edge of Dinaric karst in Croatia. This is a highly karstified landscape, with numerous surface and subterranean karst forms. The objective of this study was to determine the significance of the karst relief and the processes of its formation, with the aim of examining the interaction of these two large units during their geomorphological evolution. General and specific digital geomorphometric analyses were used, with geomorphological mapping. Within the morphogenetic approach, the morphostructural conditions of karstification, spatial distribution and significance of karst, and fluviokarst relief forms were analysed. Several dry valleys were established, indicating that this area was the important corridor for surface runoff from the Ogulin–Plaški basin towards the Una–Korana plateau. Tectonic up-lifting of the narrow zone between these two units created an orographic barrier, which hindered any further surface runoff and created the conditions for the development of karst subterranean watercourses. This paper provides a proposal of the morphogenesis model of the Ogulin–Plaški basin, summarised with the description “flattening and closure”.

Key words: karst, fluviokarst, structural geomorphology, Ogulin–Plaški basin, Croatia, Dinaric karst

Uvod

Područje između naselja Oštarije i Tounj najniži je dio orografskog praga između Ogulinsko-plašćanske zavale i prostrane Unsko-koranske zaravni. Obje cjeline imaju svoja specifična geomorfološka obilježja i recentnu kršku hidrografiju, ali je njihov razvoj međusobno povezan. To se posebno ističe u geomorfologiji i hidrografiji krša na širem području Oštarija i Tounja.

Među najstarijim poznatim geomorfološkim istraživanjima u širem području su ona Hranilovića (1901), Gorjanović-Krambergera (1914) i Poljaka (1925/1926). Sustavna geološka istraživanja ovog područja koja obuhvaćaju i geomorfološku problematiku proveo je Bahun (1968; 1970). O geološkim i hidrogeološkim obilježjima šireg prostora od Vrbovskog do Slunja Bahun piše 1968. (Bahun, 1968). Među najvažnijim je rezultatima tog rada podjela ovog područja na četiri hidrogeološke zone. Zatim, 1970. Bahun objavljuje rad o geološkoj osnovi i razvoju Ogulinsko-plašćanske zavale (Bahun, 1970). Kao model morfogeneze zavale pretpostavlja pojačanu mehaničku eroziju u tjemenu prostrane antiklinale, sve do dolomitne jezgre. Samo zaravnavanje vapnenačkog dijela dna zavale Bahun povezuje s korozijom u razdoblju čestih inundacija. Ovdje posebno valja istaknuti da već Bahun naglašava da je sjeverni dio Ogulinsko-plašćanske zavale najvjerojatnije nakon pliocena bio površinski odvodnjavan koridorom od ponora Zagorske Mrežnice, preko Skradnika do izvora Kukače (Bahun, 1970). Geološku građu ovog područja za potrebe OGK lista Ogulin detaljno istražuju Velić i Sokač (1981) te Velić i dr. (1982). Geomorfološka istraživanja ovog i okolnih područja obavljaju Pahernik (1998; 2000) na području Velike Kapele i cijelog Gorskog kotara (Pahernik, 2005), Pejić (2013) na širem prostoru Ogulinsko-plašćanske zavale, Bočić i dr. (2015) na području Unsko-koranske zaravni, Pavlič (2017) u dolini Ogulinske Dobre te Kovač Konrad (2018) na području drenaznog bazena izvora Zagorske Mrežnice. O georazno-likosti i krajobrazima Ogulinsko-plašćanske zavale pišu Butorac i Buzjak (2020).

Introduction

The area lying between the present-day settlements of Oštarije and Tounj is the lowest point of the orographic barrier between the Ogulin-Plaški basin and the vast Una-Korana plateau. Each of these units has their own specific geomorphological properties and recent karst hydrography, though their development is connected. This is particularly true for the geomorphology and hydrography of the karst in the broader area surrounding Oštarije and Tounj.

Some of the earliest geomorphological research conducted in this general area was that by Hranilović (1901), Gorjanović-Kramberger (1914), and Poljak (1925/26). Systematic geological research of this area, including geomorphological analysis, was conducted by Bahun (1968; 1970), who also wrote about the geological and hydrogeological characteristics of the broader area from Vrbovsko to Slunj (Bahun, 1968). That research resulted in a division of this area into four hydrogeological zones. In 1970, he published a study on the geological basis and development of the Ogulin-Plaški basin (Bahun, 1970), presenting the assumption of mechanical erosion at the crest of a spacious anticline, down to the dolomite rock in the core, as the morphogenetic model of the basin. He associated the flattening of the limestone part of the bottom of the basin with corrosion during frequent periods of inundation. It should particularly be noted that he stressed that after the Pliocene, the northern part of the Ogulin-Plaški basin was likely surface drained through a corridor from the Zagorska Mrežnica ponor, to the Kukača spring via Skradnik (Bahun, 1970). The geological structure of this area was investigated in detail for the basic geological map (Ogulin sheet) by Velić and Sokač (1981) and Velić et al. (1982). Further geomorphological research of this area and surrounding areas was performed by Pahernik (1998; 2000) for the Velika Kapela region and later for the whole of Gorski Kotar (Pahernik, 2005), while Pejić (2013) examined the broader area of the Ogulin-Plaški basin, Bočić et al. (2015) the area of the Una-Korana plateau, Pavlič (2017) the Ogulinska Dobra valley, and Kovač Konrad (2018) the area of the catchment basin of the Zagorska Mrežnica spring. Butorac and Buzjak (2020) pub-

Prvi detaljni pregled dotad poznatih speleoloških objekata objavio je Josip Poljak (Poljak, 1935). U tom radu, među ostalima, opisuje špilje Tounjčicu i Ambararac (koju naziva Krpeljača ili Mrežnički ponor). O istraživanjima špilje Tounjčice nakon Drugoga svjetskog rata piše Posarić (1961). Špilja u kamenolomu Tounj (ŠKT) otkrivena je 1983. godine zbog urušavanja stropa uslijed rada kamenoloma. Špilju su istraživali članovi SO PDS Velebit i to najintenzivnije u razdoblju od 1986. do 1991. (Barišić, 1989; 1990a; 1990b; Lacković, 1987). Tijekom tih istraživanja članovi SO HPD Željezničar nastavili su istraživanja u špilji Tounjčici (Jalžić, 1989b). Na jugozapadnoj strani brda Krpel poznata speleološka istraživanja traju od 1955. Prikaz speleoloških istraživanja jame Mandelaje daju Božičević (1955), Lukić (1983; 1987), Jalžić (1989a; 2004) i Novak (2013). O istraživanjima drugih speleoloških objekata u okolini Oštarija piše Bočić (1997). Geospeleološka istraživanja ŠKT provode Lacković (1993) koji piše o geološkim uvjetima njezina nastanka, Babić i dr. (1996) istražuju freatičke speleotHEME unutar špilje, a Vračar (2000) prikazuje osnovna geomorfološka obilježja špilje. Bočić (2011) istražuje geomorfologiju špilje i njezine okolice u svrhu njezina vrednovanja i zaštite.

Cilj je ovoga istraživanja utvrditi prevladavajuće oblike krškoga reljefa te uvjete i procese razvoja krša na površini i u podzemlju na području Krpelskoga praga između naselja Oštarije i Tounj, a u svrhu jasnijega sagledavanja interakcije Ogulinsko-plašćanske zavale i Unsko-koranske zaravni u njihovu geomorfološkom razvoju.

Geomorfološko-geološki okvir istraživanog područja

Istraživano područje (sl. 1A, B) nalazi se na dodiru dviju mezogeomorfoloških regija (Bognar, 1999): Ogulinsko-plašćanske zavale (2.1.5) i Unsko-koranske zaravni (2.1.6). Ogu-

lished an article on the geodiversity and landscapes of the Ogulin-Plaški basin.

The first detailed overview of the known caves at the time was given by Poljak (1935), who described the Tounjčica and Ambararac caves (which he called the Krpeljača or Mrežnički ponor). Research on the Tounjčica cave was conducted after World War II by Posarić (1961). The Tounj quarry cave (ŠKT) was discovered in 1983 following the collapse of a ceiling during quarrying works. The cave was investigated by members of the SO PDS Velebit during the 1986–1991 period (Barišić, 1989; 1990a, 1990b; Lacković, 1987). During those explorations, members of the SO HPD Željezničar continued researching Tounjčica cave (Jalžić, 1989b). On the southwestern side of Krpel hill, speleological research has been ongoing since 1955. An overview of the speleological research of Mandelaja pit was given by Božičević (1955), Lukić (1983; 1987), Jalžić (1989a; 2004), and Novak (2013). Research on some other caves in the Oštarije was presented by Bočić (1997). Geospeleological research of the ŠKT cave was conducted by Lacković (1993), who described the geological conditions of its creation, Babić et al. (1996), who examined the phreatic speleothems within the cave, and Vračar (2000), who gave an overview of the fundamental geomorphological properties of the cave. Bočić (2011) analysed the geomorphology of the cave and its surroundings for the purpose of its valorisation and protection.

The objective of this study was to determine the predominant forms of karst relief, and the conditions and processes for the development of karst on the surface and underground in the area of the Krpel barrier between the settlements of Oštarije and Tounj, with the aim of obtaining a clearer overview of the interactions between the Ogulin-Plaški basin and the Una-Korana plateau during their geomorphological development.

Geomorphological-geological framework of the study area

The study area (Fig. 1A, B) is situated in the contact zone between two meso-geomorphological regions (Bognar, 1999): the Ogulin-Plaški basin (2.1.5) and the Una-Korana plateau (2.1.6). The

**Geomorfologija
krša na području
Oštarije–Tounj
i njezin značaj u
geomorfološkoj
evoluciji šireg
područja**

**Karst
geomorphology
in the Oštarije–
Tounj area and its
significance in the
geomorphological
evolution of the
broader area**

linsko-plašćanska zavalata zatvorena je krška depresija složene geološke građe i geomorfoloških obilježja. Površine je oko 170 km². Izdužena je dinarskim pravcem u duljini od oko 30 km. Ovdje teku površinske tekućice koje poniru uglavnom uz sjeveroistočni rub zavale (Ogulinska Dobra, Zagorska Mrežnica, Munjava i Dretulja) (Bahun, 1970). Unsko-koranska krška zaravan odlikuje se manjom raščlanjenošću i vrlo malim nagibima padina. Mikromorfološko obilježje zaravni je pojava brojnih, i do 50 m duboko usječenih, dolina i kanjona (suhih i aktivnih) te velika gustoća pojave ponikava (i preko 100 ponikava/km²) (Bočić i dr., 2010; 2015; Pahernik, 2012). Ove dvije cjeline međusobno su orografski odvojene gorskim nizom dinarskoga pravca pružanja koji u ovom radu nazivamo Krpleski prag. Istraživano područje obuhvaća središnji, najniži dio Krpelskoga praga između naselja Oštarije i Tounj, tj. između ponorske zone Zagorske Mrežnice i izvorišta Tounjčice i Kukače (sl. 1C).

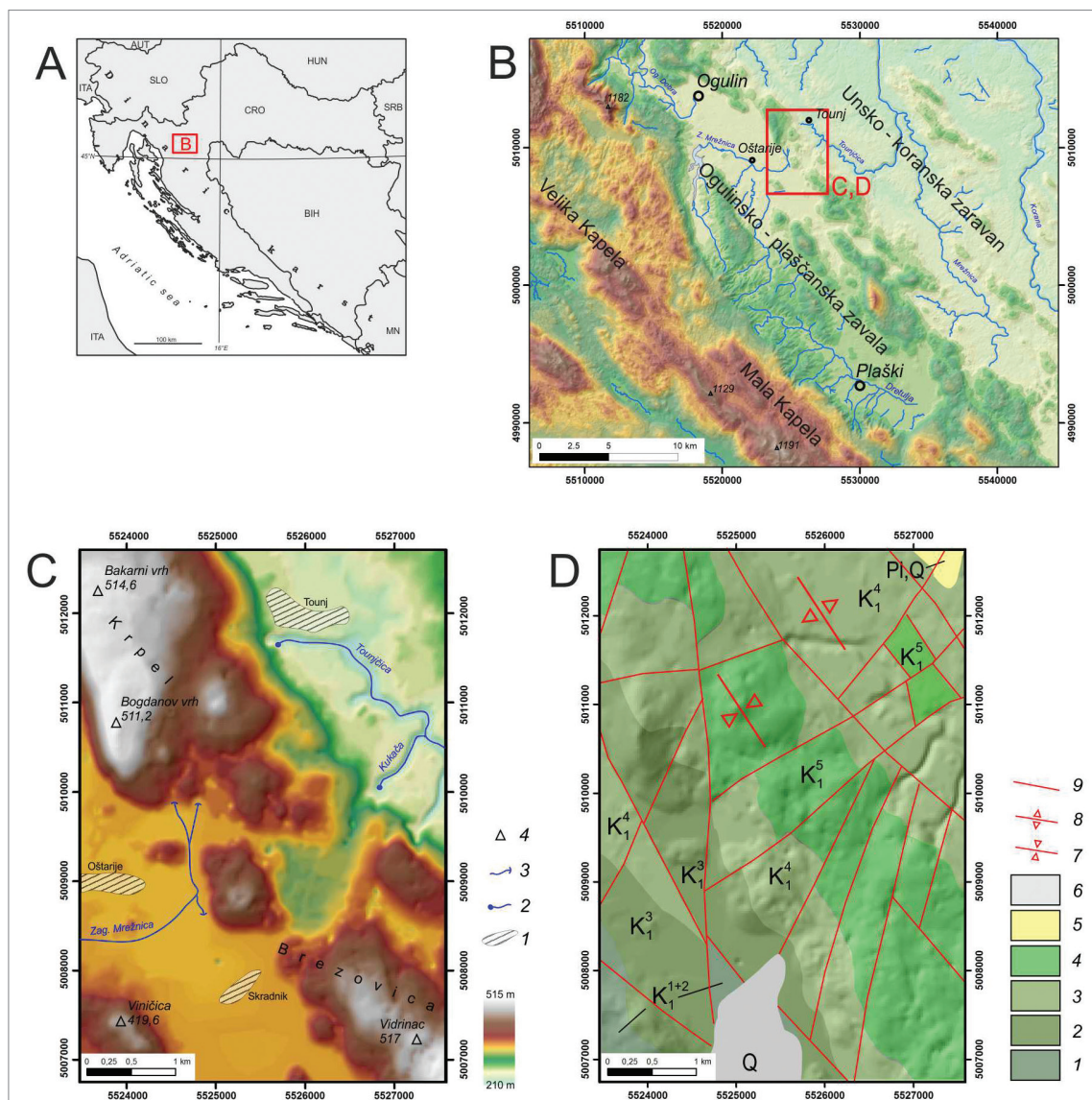
Istraživani prostor se prema Prelogović i dr. (2001) nalazi između dvaju regionalno značajnih aktivnih rasjeda. Rasjed Čabar-Vrbovsko-Ogulin-Bihać, nastavak je Idrijskoga rasjeda u Sloveniji, pruža se upravo Ogulinsko-plašćanskom zavalom. Na njegovoj trasi se kod Ogulina i Plaškog pojavljuju lokalne ekstenzijske strukture. Rasjed Stari trg-Tounj-Bihać pruža se jugozapadnim rubom Unsko-koranske zaravni, a upravo kod Tounja ima naglašenu horizontalnu komponentu pomaka (Prelogović i dr., 2001).

Prema Osnovnoj geološkoj karti 1 : 100 000 list Ogulin (Velić i Sokač, 1981; Velić i dr., 1982) istraživano područje pripada strukturnoj jedinici Ogulin-Tobolić, tj. njezinim sjeveroistočnim strukturama: sinklinali Gojak-Tobolić i antiklinali Tounj (sl. 1D). Ove strukture imaju dinarski pravac pružanja, a naknadno su poremećene blok-tektonikom s poprečnim i dijagonalnim rasjedima i pukotinama. U geološkoj građi zapadno i jugozapadno od istraživanoga područja prevladavaju slabo propusne i nepropusne stijene: siltiti, pješčenjaci i siltiti skita (T_1), dolomiti i dolomitični vapnenci gornjega trijasa (2T_3), dolomiti dogera (J_2) i dolomiti gornjega malma

Ogulin-Plaški basin is a closed, karst depression with a complex geological structure and geomorphological characteristics, and a surface area of about 170 km². It is elongated in the Dinaric orientation (NW-SE), over a length of about 30 km. The surface watercourses here (Ogulinska Dobra, Zagorska Mrežnica, Munjava, and Dretulja rivers) sink along the northeastern edge of the basin (Bahun, 1970). The Una-Korana karst plateau is characterised by having a smaller vertical range and very small slopes. The micro-morphological properties of the plateau include the appearance of numerous deeply cut (up to 50 m) valleys and canyons (both dry and active) and a high density of dolines (more than 100 dolines/km²) (Bočić et al., 2010; 2015; Pahernik, 2012). These two units are orographically separated by a series of hills extending along the Dinaric orientation, which are referred to here as the Krpel barrier. The study area encompasses the central, lowest part of the Krpel barrier between the settlements of Oštarije and Tounj, i.e. between the ponor zone of the Zagorska Mrežnica River and the Tounjčica and Kukača springs (Fig. 1C).

According to Prelogović et al. (2001), the study area lies between two regionally significant, active fault lines. The Čabar-Vrbovsko-Ogulin-Bihać fault is a continuation of the Idrija fault in Slovenia, and extends along the Ogulin-Plaški basin. Near Ogulin and Plaški, local extension structures are found along its route. The Stari trg-Tounj-Bihać fault line runs along the southwestern edge of the Una-Korana plateau, and shows a distinctive slip rate at Tounj (Prelogović et al., 2001)

According to the Ogulin sheet of the Basic geological map (1:100,000) (Velić and Sokač, 1981; Velić et al., 1982), the study area belongs to the Ogulin-Tobolić structural unit, more specifically to its northeastern structures: the Gojak-Tobolić syncline and the Tounj anticline (Fig. 1D). These structures lie along the predominant Dinaric orientation, and were subsequently disturbed by block tectonics with lateral and diagonal fault lines and fractures. To the west and southwest of the study area, the geological structure is dominated by poorly permeable and impermeable rocks: siltites, sandstones, and Scythian siltites (T_1); dolomite and dolomitic limestone of Upper Triassic (2T_3); Middle Jurassic dolomites (J_2); and Late Jurassic dolomites (3J_3). These rocks form



Sl. 1. A, B – položaj istraživanoga područja, C – pregledna karta istraživanoga područja (legenda: 1 – naselja, 2 – veći izvori, 3 – veći ponori, 4 – važniji vrhovi), D – pregledna geološka karta istraživanoga područja (legenda: 1 – vapnenci i dolomiti neokoma (K_1^{1+2}), 2 – mikritni vapnenci barema (K_1^3), 3 – foraminifersko-algalni vapnenaci apta (K_1^4), 4 – foraminiferski vapnenaci alba (K_1^5), 5 – pijesci i šljunci (Pl, Q), 6 – proluviji (Q), 7 – os sinklinale Gojak-Tobolić, 8 – os antiklinale Tounj, 9 – rasjed; izrađeno prema OGK list Otočac, Velić i Sokač, 1981)

Fig. 1 A, B – location of the study area, C – map of the study area (legend: 1 – settlements, 2 – large springs, 3 – large ponors, 4 – significant peaks), D – geological map of the study area (legend: 1 – Neocomian limestone and dolomite (K_1^{1+2}), 2 – Barremian micrite limestone (K_1^3), 3 – Aptian foraminiferous algal limestone (K_1^4), 4 – Albanian foraminiferous limestone (K_1^5), 5 – sands and gravels (Pl, Q), 6 – proluvium (Q), 7 – Gojak-Tobolić syncline axis, 8 – Tounj anticline axis, 9 – fault line; compiled according to the Otočac sheet of the Basic geological map, Velić and Sokač, 1981)

(3J_3). One predstavljaju hidrogeološku barijeru. Samo istraživano područje (dijelovi sinklinale Gojak-Tobolić i antiklinale Tounj) izgrađeno je od plitkomorskih vapnenaca i dolomita neokoma (K_1^{1+2}), mikritnih vapnenaca barema (K_1^3), foraminifersko-algalnih vapnenaca apta

the hydrogeological barrier. The study area (parts of the Gojak-Tobolić syncline and Tounj anticline) are constructed of shallow-sea Neocomian limestone and dolomite (K_1^{1+2}), Barremian micrite limestone (K_1^3), Aptian foraminiferous algal limestone (K_1^4), and Aptian foraminiferous limestone (K_1^5). In the

Geomorfologija
krša na području
Oštarije–Tounj
i njezin značaj u
geomorfološkoj
evoluciji šireg
područja

Karst
geomorphology
in the Oštarije–
Tounj area and its
significance in the
geomorphological
evolution of the
broader area

(K_1^4) te foraminiferskih vapnenaca alba (K_1^5). U krajnjem sjeveroistočnom dijelu pojavljuju se pliokvartarne naslage pijesaka i šljunaka, dok se u južnom dijelu istraživanoga područja nalaze kvartarne proluvijalne naslage (sl. 1D).

Prema hidrogeološkim značajkama šire je područje Ogulinsko-plašćanske zavale Bahun (1968) podijelio na 4 zone: gornje sabirno područje, gornje usporo područje, donje sabirno područje i donje usporo područje. Vode iz gornje sabirne zone alogeno i autogeno se prikupljaju, izviru u dodirnoj zoni gornjega sabirnog i gornjega uspornog područja te nastavljaju tok kao površinske tekućice. Za istraživano područje važne su Zagorska Mrežnica i Munjava. U dodirnoj zoni gornjega uspornog i donjeg sabirnog područja dolazi do poniranja površinskih tekućica i stvaranja ponorske zone. Ta je zona alogeni ulaz u sustav podzemnoga otjecanja donje sabirne zone. Osim alogeno, ti se provodnici prihranjuju izravno (autogeno) procjeđivanjem s površine. U dodirnoj zoni donje sabirne i donje usporne zone dolazi do istjecanja podzemnih tokova na površinu. U ovoj su zoni smješteni jači krški izvori (Tounjčica, Kukača), tj. završetci podzemnoga sustava otjecanja te se daljnje otjecanje dijelom odvija površinskim tekućicama.

Trasiranjem ponora Zagorske Mrežnice (Bahun, 1968) utvrđeno je da se ova voda pojavljuje na izvorima Tounjčice, ali i obližnje Kukače te također na izvoru Bistrica na sjeveru (izvan granica istraživanoga područja). To upućuje na znatnu okršenosť i dobro razvijen krški vodonosnik.

Od 1959. godine prirodno otjecanje rijeke Zagorske Mrežnice izmijenjeno je uslijed izgradnje hidroenergetskoga sustava Gojak. Izgradnjom brane i akumulacijskoga jezera Sabljaci vode iz Zagorske Mrežnice tunelom se preusmjeravaju u akumulaciju Bukovnik na rijeci Dobri te dalje hidrotehničkim tunelom prema HE Gojak (Knežević, 1995). Na taj način vode Zagorske Mrežnice više ne poniru kod Oštarija, osim povremeno prilikom ispuštanja vode na brani Sabljaci.

far northeastern part, there are Plio-Quaternary deposits of sand and gravel, while Quaternary proluvial deposits are found in the southern part of the study area (Fig. 1D).

According to the hydrogeological properties defined by Bahun (1968), the broader area of the Ogulin-Plaški basin is divided into four zones: upper collection area; upper retention area; lower collection area; and lower retention area. Water from the upper collection area is collected allogenicly and autogenicly, springs in the contact zone between the upper collection and upper retention areas, and continue to flow as a surface watercourse. The significant watercourses in the study area are the Zagorska Mrežnica and Munjava rivers. At the contact zone between the upper collection and lower collection areas, these surface watercourses sink, creating a ponor zone. This zone is an allogenic entrance point into the underground flow system in the lower collection zone. In addition to allogenic inputs, these conduits are also fed directly (autogenicly) by percolation from the surface. In the contact zone between the lower collection and lower retention zones, there is the upwelling of underground water flows onto the surface. In this zone, we find the abundant karst springs (Tounjčica, Kukača) as the ends of the subterranean flow system, and most water from here flows into surface watercourses.

By dye-tracing the Zagorska Mrežnica ponor, Bahun (1968) found that this water appears at the Tounjčica spring, the nearby Kukača spring, and also the Bistrica spring to the north (outside the study area). This indicates substantial karstification in the area, and a well-developed karst conduit.

Since 1959, the natural flow of the Zagorska Mrežnica River has been altered, following the construction of the Gojak hydroelectric plant. The construction of the dam and resulting creation of the Sabljaci Reservoir redirected water from the Zagorska Mrežnica River via tunnel to the Bukovnik Reservoir on the Dobra River, and further via the hydrotechnical tunnel to the Gojak hydroelectric plant (Knežević, 1995). For this reason, the Zagorska Mrežnica River no longer sinks near Oštarije, except occasionally when water is released at the Sabljaci Dam.

Metode rada

Rad se temelji na morfometrijskom i morfogenetskom pristupu u okviru geomorfološke analize reljefa. Opća i specifična morfometrijska analiza te analiza karakterističnih morfoloških profila izrađena je na temelju digitalnog modela reljefa (DEM) veličine jedinične ćelije 25 x 25 m. DEM je izrađen vektorizacijom visinskih podataka s topografskih karata 1 : 25 000, listovi 369-2-3 i 369-4-1 (VGI, 1974-1976; Frangeš, 2012). Kao parametri opće morfometrijske analize korištene su visine (hipsometrija), nagibi padina, vertikalna raščlanjenost reljefa i ekspozicija padina. Za analizu ekspozicije korištene su standardne kategorije orijentacije, dok su za analizu visina, nagiba i vertikalne raščlanjenosti kategorije prilagođene istraživanom terenu. Za sve morfometrijske analize korišten je programski paket ArcGIS 10 s ekstenzijama Spatial i 3D Analyst. Nagib padina računat je alatom *Slope*, korištenjem metode 3x3 kvadrata, tj. jediničnih ćelija DEM-a. Zbog rezolucije DEM-a dobivene maksimalne vrijednosti nagiba padina ne pokazuju realno stanje. Na terenu su zabilježeni nagibi i veći od računalno dobivenih 35,2°, uključujući i strmce nagiba preko 55°. Međutim, radi se o površinski manjim područjima koja se prostorno nalaze unutar računalno dobivenih maksimuma, tako da njihov izostanak iz kartografskoga prikaza ne utječe značajno na rezultate analize. Vertikalna raščlanjenost računata je funkcijom *Focal Statistics* kao visinska razlika najviše i najniže točke u krugu radijusa 150 m. Ovaj radijus odabran je nakon niza testiranja jer najuravnoteženije prikazuje vertikalnu raščlanjenost ovoga prostora s obzirom na njegovu veličinu i znatnu mikroraščlanjenost reljefa. To znači da je u ovom istraživanju mjerna jedinica vertikalne raščlanjenosti reljefa m/0,07 km². U okviru opće morfometrije analizirana su i četiri karakteristična morfološka profila čije je pružanje okomito na orografsku os (NW-SE) istraživanoga područja.

Morfogenetska analiza obuhvatila je analizu krškoga i fluviokrškoga reljefa te morfostrukturnih značajka koje su mogle utjecati na razvoj krša. Analiza morfostrukturnih značajka temeljila se na interpretaciji morfometrijskih podataka i terenskom kartiranju. Kao geomorfološki markeri poslužile su značajke zaravnjenih površina i orijentacije grebe-

Methods

This study was based on a morphometric and morphogenetic approach within the geomorphological analysis of the relief. General and specific morphometric analyses and an analysis of the characteristic morphological profile were based on a digital elevation model (DEM) with unit cell size of 25 x 25 m. The DEM was created by vectorising elevation data from 1:25,000 topographic maps, and sheets 369-2-3 and 369-4-1 (VGI, 1974-1976; Frangeš, 2012). General morphometric analysis parameters included elevation (hypsometry), slope, relative relief, and slope aspect. Standard orientation categories were used to analyse aspect, while the analysis of elevation, slope and relative relief were adapted to the terrain. The ArcGIS 10 package with Spatial and 3D Analyst extensions was used for all morphometric analyses. Slope was calculated using the *Slope* tool, based on a 3x3 quadrature method, i.e. DEM unit cells. Due to the DEM resolution, the maximum obtained slope values do not accurately represent the actual situation in the field, where higher slopes were recorded than the 35.2° obtained in the analysis, including steep slopes over 55°. However, these are areas of small surface area which are spatially situated within the computer calculated maximums, such that their omission from the map will not significantly affect the results of the analysis. Relative relief was calculated using the Focal Statistics tool for the difference in elevation between the highest and lowest points in a 150 m radius. This radius was selected after a series of tests, as it provided the most balanced overview of the relative relief of this area with regard to its size and the substantial micro-indentation of the relief. Accordingly, the unit measure for relative relief of the relief in this study was m/0.07 km². The general morphometry analysis also included four characteristic morphological profiles that extend perpendicular to the orographic axis (NW-SE) of the study area.

The morphogenetic analysis included an analysis of the karst and fluviokarst relief, and the morphostructural parameters that could affect the development of karst. The analysis of the morphostructural properties was based on an interpretation of the morphometric data and field mapping. The properties of flattened areas and ridge orientation were used as geomorphological markers, while the spatial distribu-

**Geomorfologija
krša na području
Oštarije-Tounj
i njezin značaj u
geomorfološkoj
evoluciji šireg
područja**

Karst
geomorphology
in the Oštarije-
Tounj area and its
significance in the
geomorphological
evolution of the
broader area

na, dok su kao indikatori aktivne tektonike korišteni prostorni raspored ponora, izvora, ponikva u nizu, laktastih skretanja dolina i dr. Krška zaravan ovdje je promatrana kao najstarija te bazična površina cijeloga reljefa (Gams, 1998; Bočić i dr., 2010). Na temelju prikupljenih podataka istraživano područje podijeljeno je na morfostrukturne cjeline i morfostrukture, tj. relativno homogene reljefne cjeline prvenstveno strukturno-tektonskoga postanka (Gerasimov i Mescherikov, 1968) koje su međusobno odijeljene morfolineamentima koji predstavljaju trase utvrđenih i pretpostavljenih rasjeda. Egzogeni geomorfološki analiza obuhvaćala je terenski rad i specifičnu morfometriju u okviru koje je analiziran prostorni raspored gustoća ponikava. Podaci o položaju ponikava preuzeti su s topografske karte 1 : 25 000 (VGI, 1974–1976; Frangeš, 2012). U okviru terenskoga rada vršeno je geomorfološko kartiranje prema prihvaćenoj metodologiji (Gams i dr., 1985), ali je naglasak stavljen na krški i fluviokrški morfo-genetski tip reljefa te na morfostrukturne značajke koje su utjecale na razvoj krša. Svi kartografski pri-lozi prikazani su u 5. zoni Gauss-Krugerovog koor-dinatnog sustava.

Podaci o geomorfologiji najvažnijih speleoloških objekata dobiveni su iz njihovih nacrti (Špilja u kamenolomu Tounj – Barišić, 2011; jama Mandelaja – Novak, 2013). Podatci o tlocrtnoj duljini i dubini obiju prikazanih špilja te stvarnoj duljini Špilje u kamenolomu u Tounju preuzeti su iz navedenih izvora. Stvarna duljina jame Mandelaje izmjerena je tako da su, za sve kanale kojima je u nacrtu prikazan profil (76 % svih kanala), izmjerene tlocrtna i stvarna duljina te je tako dobiven odnos ovih dvaju parametara. Iz toga odnosa izračunata je približna stvarna duljina cijele špilje. Postupci izračuna ostalih temeljnih i izvedenih morfometrijskih parametara prikazani su u Piccini (2011).

Rezultati i rasprava

Opća morfometrija

Hipsometrijska obilježja istraživanoga područja (sl. 2A) upućuju na postojanje triju jasno de-

tion of ponors, springs, serial dolines, elbow-shaped river valleys, etc. were used as indicators of tectonic activity. The karst plateau here was viewed as the oldest element, and as the basic surface of the landscape (Gams, 1998; Bočić et al., 2010). On the basis of the collected data, the study area was divided into morphostructural units and morphostructures, i.e. relatively homogenous relief units primarily of structural or tectonic genesis (Gerasimov and Mescherikov, 1968) that are separated by morpholineaments that represent the routes of identified and assumed fault lines. Exogenic geomorphological analysis included field work and specific morphometrics, including the analysis of the spatial distribution of doline density. Data on doline positions were taken from the 1:25,000 topographic map (VGI, 1974-1976; Frangeš, 2012). Field work also included geomorphological mapping according to the accepted methodology (Gams et al., 1985), although the emphasis was placed on the karst and fluviokarst morphogenetic types of relief, and on the morphostructural properties influencing the development of karst. All maps are shown in the 5th zone of the Gauss-Kruger coordinate system.

Data on geomorphology of the most significant caves were obtained from cave surveys (Tounj quarry cave – Barišić, 2011; Mandelaja pit – Novak, 2013). Data on the length and depth of both caves and the actual length of the Tounj quarry cave were taken from those sources. The actual length of the Mandelaja pit was measured, such that the survey length and actual length were measured for all channels with a profile shown in the survey (76% of all channels), and this was used to obtain the ratio of these two parameters. That relationship was then used to calculate the approximate actual length of the entire cave. The calculation procedures of other basic and calculated morphometric parameters are shown in Piccini (2011).

RESULTS AND DISCUSSION

General morphology

Hypsometric characteristics of the study area (Fig. 2A) indicates the presence of three clearly defined

finiranih hipsometrijskih zona pravca pružanja NW-SE. *Jugozapadna* je zona u srednjih visina (300–350 m) i visinski vrlo ujednačena. *Središnja* je najviša zona, ali s velikim visinskim razlikama unutar zone (od 250 do > 500 m). Ta je zona i prostorno najheterogenija. Najviša je u sjevernom dijelu (Bakarni vrh, 514,6 m), što je i najviša točka istraživanoga prostora, dok je najniža u središnjem dijelu gdje je visine samo oko 250 m. Treća, *sjeveroistočna* zona, najniža je i gotovo cijela ispod 250 m (najniža je zabilježena točka na 199 m). Ukupni raspon visina područja je 315,6 m, prosječna visina iznosi 329,5 m, a najzastupljeniji je upravo razred s rasponom 300–350 m.

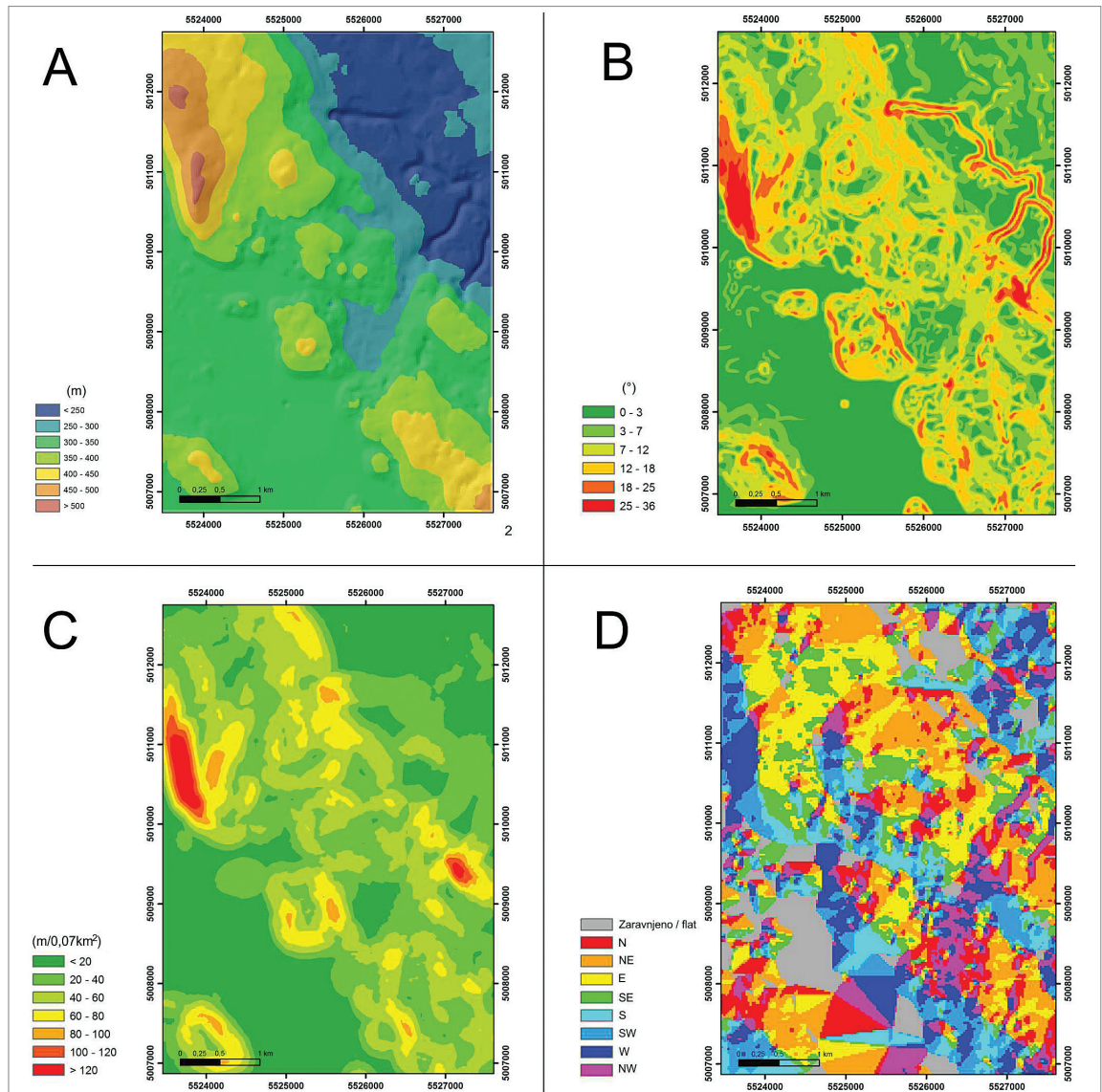
Nagibi padina na istraživanom području u rasponu su od 0° do 35,2°, dok je prosječni nagib 7,2°. Analiza nagiba padina (sl. 2B) također upućuje na postojanje triju zona s orijentacijom NW-SE. *Jugozapadna* je zona najhomegenija. Uz iznimku područja huma Viničica, ovdje prevladavaju najniže kategorije nagiba koje upućuju na zaravnen reljef (denudacijski i akumulacijski). Najveće vrijednosti nagiba vežu se za *središnju* zonu, i to za njezine rubne dijelove (npr. zapadnu padinu uzvišenje Krpel), a najvjerojatnije su uvjetovane strukturno-tektonskim procesima. Iako su ovdje prisutne padine s najvećim nagibima, znatan udio zauzimaju i padine malih nagiba smještene na različitim nadmorskim visinama. To upućuje na vjerojatnu tektonsku fragmentiranost nekad veće zaravnjene površine. U *sjeveroistočnoj* zoni prostorno prevladavaju niže kategorije nagiba, ali je značajna prisutnost i svih ostalih kategorija koje se ponajprije mogu vezati za erozijsko djelovanje paleo i recentno aktivnih vodenih tokova.

Vertikalna raščlanjenost istraživanoga područja (sl. 2C) u rasponu je od 0 do 165,2 m/0,07 km², a prosječna raščlanjenost iznosi 34,4 m/0,07 km². Prevladavaju kategorije male raščlanjenosti (< 20 i 20–40 m/0,07 km²), a najmanje su zastupljene najviše kategorije. U *jugozapadnoj* zoni, uz iznimku huma Viničica, potpuno prevladava najniža kategorija. U *sjeveroistočnoj* zoni prevladavaju dvije kategorije najniže raščlanjenosti, s tim da ukupna raščlanjenost ne prelazi 60 m/0,07 km². Blago povećanje raščlanjenosti vezano je za kanjone i suhe doline toga područja. Kao i kod nagiba padina,

hypometric zones, with a NW-SE orientation. The *southwest* zone has a moderate elevation (300–350 m) that is highly uniform. The *central* zone is the highest, but also features large elevation differences within the zone (from 250 to >500 m). This is the most spatially heterogeneous zone. It is highest towards the north (Peak Bakarni 514.6 m), where the highest peak of the study area is found, while it is lowest in the middle part, where the elevation is only about 250 m. The third, *northeast* zone is the lowest, and is less than 250 m in elevation virtually throughout (and the lowest point is 199 m). The total elevation range of the area is 315.6 m, the average elevation is 329.5 m, and the majority of the area falls within the 300–350 m range.

Slopes in the study area ranged from 0° to 35.2°, with an average slope of 7.2°. The slope analysis (Fig. 2B) also indicates the presence of three zones with a NW-SE orientation. The *southwest* zone is the most homogenous, with the exception of the area of the Viničica hill, and is dominated by lower slope categories indicating a flattened relief (denudation and accumulation). The highest values of slope were found in the *central* zone, particularly along its edges (e.g. the western slope of Krpel hill), most often caused by structural and tectonic processes. There are higher slopes here, though the majority are small slopes situated at various elevations. That indicates the likely tectonic fragmentation of a once larger plateau area. In the *northeast* zone, lower slope categories are dominant, though with a significant presence of all other categories. This can be associated with erosion activity of paleo and recently active watercourses.

Relative relief of the study area (Fig. 2C) ranged from 0 to 165.2 m/0.07 km², with an average vertical range of 34.4 m/0.07 km². Low range categories dominated (<20 and 20–40 m/0.07 km²), while the highest categories were least frequent. The *southwest* zone was completely dominated by the lowest category, with the exception of Viničica hill. The *northeast* zone was dominated by two lower range categories, and total relative relief did not exceed 60 m/0.07 km². A slight increase of relative relief was associated with canyons and dry valleys in the area. As with slope, the *central* zone had the largest range and highest values of relative relief. Higher (and



Sl. 2. Opća morfometrijska obilježja istraživanoga područja: A – hipsometrija, B – nagibi padina, C – vertikalna raščlanjenost reljefa i D – ekspozicija padina

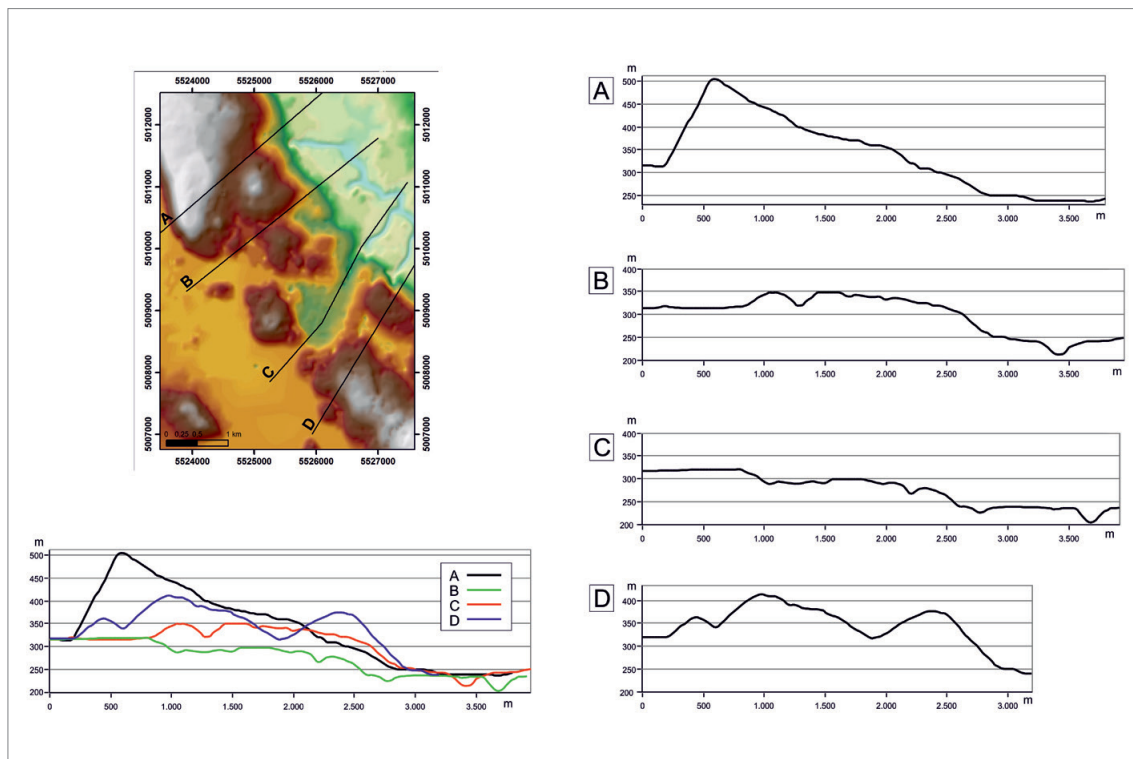
Fig. 2 General morphological traits of the study area: A – hypsometry, B – slope, C – relative relief, and D – slope aspect

središnja zona ima najveći raspon i najviše vrijednosti. Više (i najviše) vrijednosti vezane su za dodir *središnje* prema ostalim zonama, dok su niže vrijednosti prostorno povezane s njezinim središnjim pojasom. Najniže vrijednosti središnje zone nalaze se u samom njezinu središnjem dijelu. Kao i kod nagiba, i vertikalna raščlanjenost upućuje na dvije tektonski aktivne zone dinarske orijentacije.

Prostorna distribucija *ekspozicija* padina upućuje na postojanje primarnoga (NE i E) i sekun-

the highest) values were associated with the contact lines of the *central* zone with the other zones, while the lower values were associated with its middle belt. The lowest values in the central zone, as with slope, were found in the very centre of the zone. As with the slopes, the relative relief indicates two tectonic active zones of Dinaric orientation.

Slope aspect spatial distribution indicates the presence of primary (NE and E) and secondary (SW and W) maxima, with a uniform distribution



Sl. 3. Karakteristični morfološki profili istraživana područja
Fig. 3 Characteristic morphological profiles of the study area

darnoga (SW i W) maksimuma te podjednaku zastupljenost ostalih kategorija (sl. 2D). Oba maksimuma posljedica su dinarske orijentacije orografske osi glavnih uzvišenja u širem istraživanom području. Specifično je što kod obaju maksimuma uz NE i SW ekspoziciju velik udio imaju E, odnosno W, što bi moglo biti povezano s neotektonskim odnosima i promjeni orijentacije stresa (Prelogović i dr., 2001). Kategorija zaravnjenih padina prostorno je najizraženija u jugozapadnoj i sjeveroistočnoj zoni. Međutim, i u središnjoj se zamjećuje nekoliko relativno manjih površina zaravnjenih padina.

Uz prikazane morfometrijske značajke, **morfološki profili** (sl. 3) dodatno naglašavaju neke specifičnosti istraživana terena. Na profilima A i D jasno se razaznaje morfološka granica između središnje i jugozapadne zone. Granica središnje i sjeveroistočne zone također se može prepoznati, ali je nešto slabije izražena. Ovakve jasne morfološke granice mogu upućivati na utjecaj aktivne tektonike. Uspoređujući sva četiri profila, vidljivo

of the remaining categories (Fig. 2D). Both maxima are the result of the Dinaric orientation of the orographic axis of the main elevations throughout the study area. It is interesting that at both maxima, in addition to the NE and SW aspect, a large share have E or W as well, which could be associated with neo-tectonic relations and changes in stress orientation (Prelogović et al., 2001). The category of flattened slopes was spatially most present in the southwest and northeast zones. However, in the central zone, there were more though relatively small flattened slope areas.

With the above morphometric properties, the **morphological profiles** (Fig. 3) further emphasised some of the specificities of the study area. In profiles A and D, there is a clear distinction of the morphological boundaries between the central and southwest zone. The boundary of the central and northeast zones can also be determined, although it is less prominent. These clear morphological boundaries may suggest the influence of active tectonics. In comparing all four profiles, the central

je da *središnja* zona nije homogena: profili A i D su visoki i raščlanjeni, dok su B i C znatno niži. To ukazuje da ju u svom srednjem dijelu *središnja* zona najvjerojatnije relativno tektonski spuštenu (manje izdignuta). Također, profili B i C se međusobno znatno razlikuju. Dok profil B najvjerojatnije markira koridor nekadašnje više razine površinskoga otjecanja, profil C predstavlja najniži mogući koridor između *jugozapadne* i *sjeveroistočne* zone. Navedene značajke još su bolje vidljive na zajedničkom prikazu svih četiriju profila (sl. 3, dolje lijevo).

Morfogeneza površinskog krša

Morfostrukturalna obilježja reljefa

Na istraživanom se području pružaju dva važna rasjeda dinarskog pružanja koja imaju odraz u reljefu: Tounjski (TOU)¹ i Oštarijski (OŠT). Oni su dijelovi regionalnih rasjeda i rasjednih zona kako su ih definirali Prelogović i dr. (2001). Tounjski rasjed dio je rasjedne zone Stari trg–Tounj–Bihać, dok je Oštarijski rasjed najvjerojatnije sjeveroistočni ogranak regionalnoga rasjeda Čabar–Vrbovsko–Ogulin–Bihać. Trase ovih (ali i ostalih) rasjeda pretpostavljene su na temelju više geomorfoloških indikatora. To su prvenstveno ravne padine velikih nagiba, ponorske zone, nizovi izvora i laktasta skretanja tekućica (sl. 2, 3). Na temelju strukturalno-geomorfoloških (Prelogović i dr., 2001) i geomorfoloških (Bočić i dr., 2010) istraživanja na širem prostoru može se pretpostaviti da ovi rasjedi imaju horizontalnu komponentu pomaka. Ovu pretpostavku podupiru i neka uočena morfološka obilježja istraživanog terena (npr. laktasto skretanje Zagorske Mrežnice u ponorskoj zoni te pojava paralelnih suhih dolina u izvorišnoj zoni Tounjčice i Kukače). Geomorfološki indikatori upućuju na moguću desnu horizontalnu komponentu pomaka 600–700 m u zoni Tounjskog rasjeda. Rasjedi TOU i OŠT razdvajaju tri morfostrukturalne cjeline: Oštarijsku (OŠ), Krpelsku (KR) i Tounjsku (TO) morfostrukturu (vidjeti sl. 8).

¹ Nazivi rasjeda i morfostrukturalna su lokalnog karaktera i primjenjuju se samo u ovom radu.

zone is seen as inhomogeneous: profiles A and D have high elevation range and relative relief, while this is substantially lower in profiles B and C. This indicates that in its middle area, the *central* zone is likely tectonically lowered (or less raised). Profiles B and C also differ from one another. While profile B most likely marks the corridor of what was once a higher level of surface runoff, profile C shows the lowest possible corridor between the *southwest* and *northeast* zones. This characteristic is even more evident in the overlap of all four profiles (Fig. 3, bottom left).

Morphogenesis of the surface karst

Morphostructural characteristics of the relief

Two important fault lines of Dinaric orientation run through the study area and are reflected in the relief: Tounj (TOU)¹ and Oštarije (OŠT). They are part of the regional fault lines and fault zones, as defined by Prelogović et al. (2001). The Tounj fault line is part of the Stari trg–Tounj–Bihać fault zone, while the Oštarije fault line is likely the northeastern branch of the regional Čabar–Vrbovsko–Ogulin–Bihać fault line. The routes of these (and other) fault lines are assumed on the basis of multiple geomorphological indicators. These are primarily even and steep slopes, ponor zones, series of springs, and elbow-shaped river bends (Fig. 2, 3). On the basis of the structural geological (Prelogović et al., 2001) and geomorphological (Bočić et al., 2010) research conducted in the broader area, it can be assumed that these faults have a slip rate. This assumption is also supported by several observed morphological characteristics of the study area (such as the elbow-shaped bend in the Zagorska Mrežnica River in the ponor zone, and the presence of parallel dry valleys in the zone of Tounjčica and Kukača springs). Geomorphological indicators suggest a possible right slip rate of 600–700 m in the zone of the Tounj fault line. The TOU and OŠT faults lines delineate three morphostructural units: the Oštarije (OŠ); Krpel (KR); and Tounj (TO) morphostructures (for details see Fig. 8).

¹ The names of the faults and morphostructures are of a local character and are used only in this paper.

Oštarijska morfostruktura (OŠ) kao dio prostrane zavale predstavlja relativno spuštenu strukturu. U strukturno-geološkom smislu radi se o sjeveroistočnom krilu antiklinale s osi pružanja NW-SE. Odnos reljefa i geološke strukture u inverznom je odnosu, tj. radi se o zavali - antiklinali. U geomorfološkom smislu ovo je dio krške zaravni unutar Ogulinsko-plašćanske zavele.

Krpelska morfostruktura (KR, u orografskom smislu Krpelski prag) je raščlanjeno i izduženo uzvišenje, relativno izdignuto u odnosu na ostale jedinice. U strukturno-geološkom smislu radi se o sinklinali čija je os pružanja sukladna s osi pružanja uzvišenja. Odnos reljefa i geološke strukture također je inverzan jer je riječ o morfostrukturi tipa uzvišenje - sinklinala. Ova morfostruktura je najheterogenija s nizom geomorfoloških indikatora koji upućuju na aktivnu tektoniku. Na pružanje dijagonalnih rasjeda upućuju morfolineamenti vidljivi na morfometrijskim kartama, posebno nagiba i orijentacije padina (sl. 2) te suhe doline i ponikve u nizu (sl. 8). Ti pretpostavljeni rasjedi imaju generalno pružanje sjever-jug, ali su njihove trase sigmoidalno svijene (Schreurs, 1994; Dauteuil i Mart, 1998), najvjerojatnije uslijed transpresijskih uvjeta koji su posljedica desnog horizontalnog pomaka glavnih rasjeda (Prelogović i dr., 2001). Za očekivati je da ti dijagonalni rasjedi također imaju horizontalnu komponentu pomaka, ali to još treba dodatno istražiti. Pretpostavljenim dijagonalnim rasjedima ova jedinica je podijeljena na tri manje morfostrukture: Krpel (Krp), Kalača (Kal) i Brezovica (Brez) (sl. 8). Krpel (Krp) je najviša morfostruktura i naglašenog je asimetričnog profila (sl. 3 – profil A). Jugozapadni dio je uzak visoki greben, a niži sjeveroistočni dio fragment je krške zaravni. Sam greben nije kontinuiran, već je podijeljen u tri dijela koji su međusobno tlocrtno zamaknuti. To upućuje na moguću rotaciju blokova u smjeru kazaljke na satu. Morfostruktura Kalača (Kal) relativno je spuštena u odnosu na ostale dijelove Krpelske morfostrukture, što se ponajprije očituje u prekidu glavnog grebena, tj. naglog smanjivanja njegove visine u tom području. Sastoji se od nekoliko manjih uzvišenja te krške uvale Košare. Navedena uzvišenja imaju slabo izražene grebene, ali su ona približno meridionalnog pružanja. Razlog

The *Oštarije morphostructure* (OŠ), as a part of the wider basin, is a relatively down-lifted structure. In the structural geological sense, this is the northeastern wing of an anticline with a NW-SE oriented axis. The relationship of the relief and the geological structure is inversely proportionate, i.e. this is a basin-anticline. In the geomorphological sense, this is part of the karst plateau within the Ogulin-Plaški basin.

The *Krpel morphostructure* (KR—orographically this is the Krpel barrier) is indented, elongated and relatively raised in relation to the other units. In the structural geological sense, this is a syncline with an axis orientation that is in line with the orientation of the elevation axis. The relationship between relief and geological structure is also inversely proportionate, as this is a morphostructure of the elevation-syncline type. This morphostructure is the most heterogeneous, with a series of geomorphological indicators indicating active tectonics. The morpholineaments visible on the morphometric maps, particularly slope and slope orientation (Fig. 2) and the dry valleys and series of dolines (Fig. 8), indicate a diagonal fault lines. These assumed fault lines have a general north-south orientation, though their routes are sigmoidally skewed (Schreurs, 1994; Dauteuil and Mart, 1998), likely following the transpression conditions resulting from the right horizontal slip of the main fault line (Prelogović et al., 2001). It can be expected that these diagonal fault lines also have a slip rate, although this requires further study. The assumed diagonal faults of this unit are divided into three smaller morphostructures: Krpel (Krp); Kalača (Kal); and Brezovica (Brez) (Fig. 8). Krpel (Krp) is the highest morphostructure and has a pronounced asymmetric profile (Fig. 3 – profile A). The southwestern part is a narrow, high ridge, while the lower northeastern side is a fragment of the karst plateau. The ridge itself is not continuous, but divided into three parts which are shifted in plan-view. This suggests a possible rotation of blocks in a clockwise direction. The Kalača (Kal) morphostructure is lower in comparison to the remaining parts of the Krpel morphostructure, seen above entirely in the interruption of the main ridge, with a sudden drop in elevation in that part. It is formed of several smaller elevations and the Košare karst uvala. These elevations have poorly prominent ridges, which are approximately meridional in orientation. This

**Geomorfologija
krša na području
Oštarije–Tounj
i njezin značaj u
geomorfološkoj
evoluciji šireg
područja**

**Karst
geomorphology
in the Oštarije–
Tounj area and its
significance in the
geomorphological
evolution of the
broader area**

može biti u rotaciji blokova uslijed lijevih horizontalnih pomaka duž dijagonalnih rasjeda. Morfostruktura Brezovica (Brez) je slično kao i Krpel (Krp) viši je dio cijele Krpelske morfostrukture (KR). Sastoji se od dvaju nizova grebena dinarske orijentacije između kojih se nalazi izdužena krška uvala.

Tounjska morfostruktura (TO) hipsometrijski je najniži dio istraživanog područja i kao takva dio je većeg područja Unsko-koranske zaravni. U dijelu koji se odnosi na istraživano područje u strukturalno-geološkom smislu radi se o antiklinali, a kako je cijelo područje relativno spuštено, reljef i geološka struktura su u inverznom odnosu, tj. radi se o plitkom udubljenju – antiklinali. Na krškoj zaravni teku površinske tekućice Tounjčice i Kukače. Njihovi kanjoni s dubinom ureza 30–50 m također upućuju na relativno izdizanje, ali u odnosu na erozijsku bazu na sjeveroistoku. Glavni tok, Tounjčica, nakon otprilike 1 km toka laktasto skreće prema jugoistoku te teče usporedo s glavnim morfostrukturama.

Egzogena obilježja reljefa

Najznačajniji egzogeni morfogenetski procesi koji su utjecali i utječu na oblikovanje reljefa istraživanog područja su krški i fluviokrški.

Najbrojniji i najprepoznatljiviji **krški reljefni oblici** svakako su ponikve. Na temelju topografske karte mjerila 1 : 25 000 (VGI, 1974–1976; Frangeš, 2012) utvrđeno je 1077 ponikava, tj. 41,4 ponikava/km². Njihova prostorna distribucija nije jednaka (sl. 4). Najzastupljenija je kategorija sa srednjim vrijednostima (31–60 ponikava/km²) koja obuhvaća više od 30 % istraživanog područja. Kategorije viših i nižih vrijednosti imaju sve manju prostornu zastupljenost. Prostori najveće gustoće ponikva (71,4 ponikava/km²) su u *sjeveroistočnoj* dijelu istraživanog područja. To je posebno izraženo uz same kanjone, dok se udaljavanjem od njih postupno smanjuje. U *središnjem* dijelu također je povećana gustoća ponikava (47,7 ponikava/km²), a njihovi maksimumi vežu se za područja najmanjih nagiba padina. Najniže vrijednosti (uključujući i područja

may be due to a rotation in the blocks following a left slip along the diagonal fault line. The Brezovica (Brez) morphostructure is similar to the Krpel (Krp) morphostructure, as a higher part of the entire Krpel morphostructure (KR). It is composed of two series of ridges with a Dinaric orientation, separated by an elongated karst uvala.

The Tounj morphostructure (TO) is hypsometrically the lowest part of the study area and, as such, makes up the largest area of the Una-Korana plateau. The part lying within the study area is an anticline in a structural geology sense, and since the entire area is relatively lower, the relief and geological structure are inversely proportional, i.e. this is a shallow depression-anticline. The surface watercourses Tounjčica and Kukača flow through this karst plateau. Their canyons cut 30–50 m deep, which also indicates a relative rise, though in relation to the erosional base to the northeast. The main watercourse, the Tounjčica River, makes an elbow-shaped bend towards the southeast after about 1 km, and then flows parallel to the main morphostructures.

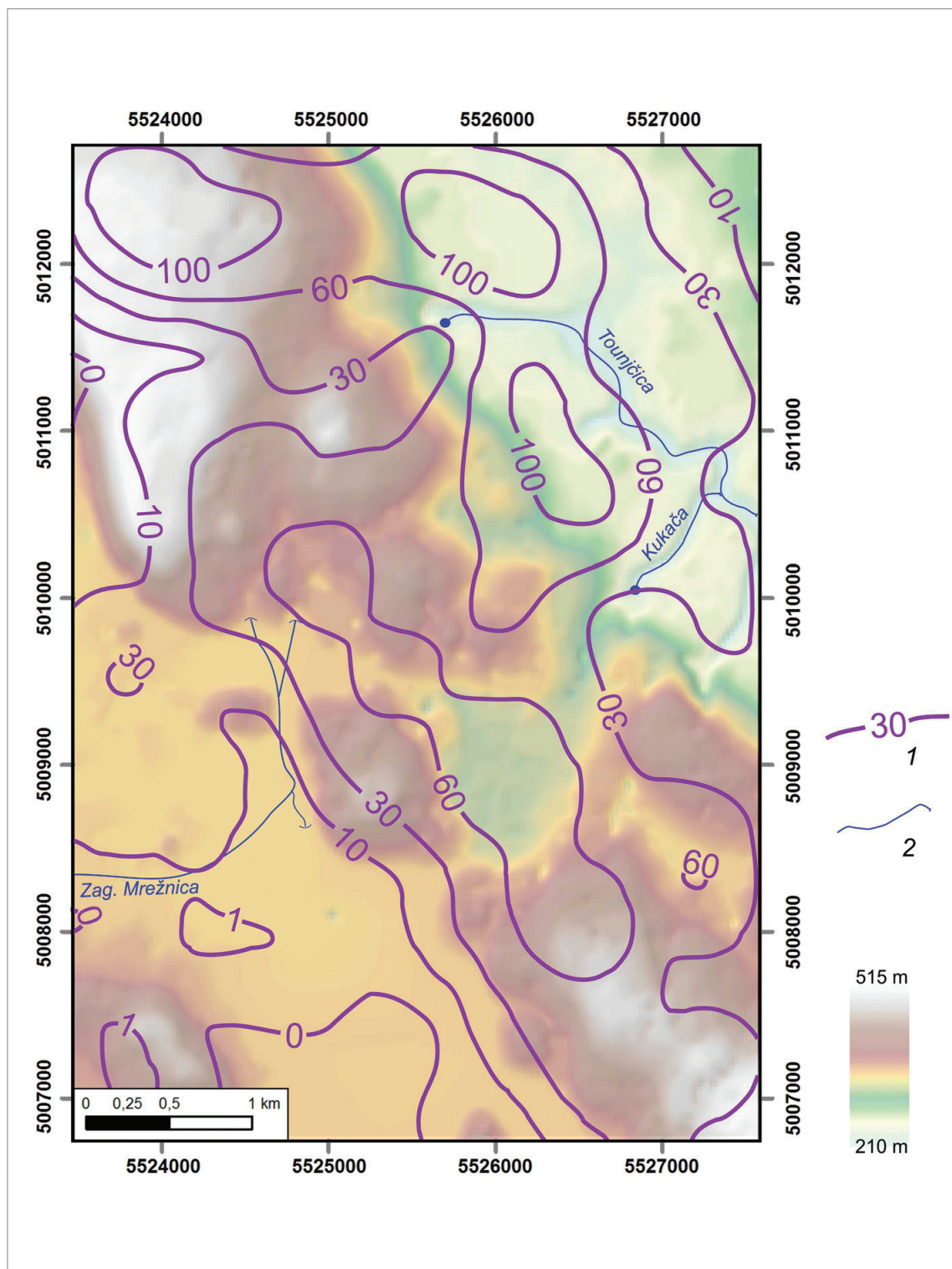
Exogenic properties of the relief

The most significant exogenic morphogenetic processes influencing and affecting the shaping of the relief in the study area are karstic and fluviokarstic.

The most numerous and recognisable **karst relief forms** are certainly the dolines. Based on the 1:25,000 topographic map (VGI, 1974–1976; Frangeš, 2012), 1077 dolines were established at a density of 41.4 dolines/km². Their spatial distribution is not uniform (Fig. 4). The most frequent category (31–60 dolines/km²) covered more than 30% of the study area. Categories with lower and higher values had lower spatial representation. The area with the highest density of dolines (71.4 dolines/km²) was in the northeastern part of the study area. This was particularly pronounced along the canyons, and gradually decreased with increasing distance. In the central area, there was also an increased density of dolines (47.7 dolines/km²), and their maximums are found in areas with the lowest slopes. The lowest values (including areas with 0 dolines/km²) were found in the southwestern part

**Geomorfologija
krša na području
Oštarije–Tounj
i njezin značaj u
geomorfološkoj
evoluciji šireg
područja**

Karst
geomorphology
in the Oštarije–
Tounj area and its
significance in the
geomorphological
evolution of the
broader area



Sl. 4. Prostorna gustoća ponikava (N=1077) istraživanog područja (1 – izolinije gustoće ponikava, 2 – glavne tekućice)
Fig. 4 Spatial density of dolines (N=1077) in the study area (1 - density contour of dolines, 2 - main watercourse)

s 0 ponikava po km²) nalaze se na *jugozapadnom dijelu* istraživanog područja (7,8 ponikava/km²). Veličina ponikava nije detaljnije istraživana, ali je na topografskim kartama uočeno da su u *sjeveroistočnom* dijelu ponikve manjih dimenzija (promjera do 30 m), dok ih u *središnjem* dijelu ima i znatno većih (promjera 80, 100, pa čak i 150 m). U *središnjem* dijelu također je uočena pojava spojenih ponikava i ponikava u nizu.

Uz ponikve se na istraživanom području nalaze i dvije krške depresije koje se mogu svrstati u kategoriju uvala. To su uvala Košare (dimenzija 900 x 600 m) i uvala Kamenica (dimenzije 400 x 100 m). Dno uvale Kamenica na nadmorskoj je visini od oko 310 m, dok je dno uvale Košare na 280 m, što je ispod razine ponorske zone Zagorske Mrežnice.

Fluviokrški reljef odlikuje se kombinacijom djelovanja krških i fluvijalnih procesa, tj. značajnom pojavom riječnih dolina na okršenom terenu (Gunn, 2006), pa je razvoj takvog reljefa u tijesnoj vezi s hidrogeološkim obilježjima istraživanog prostora. Na istraživanom području zabilježeni su brojni fluviokrški oblici, ali njihov prostorni raspored nije ujednačen (sl. 5A i 8). U *jugozapadnom dijelu*, tj. na uzvodnoj (predponorskoj) strani sustava nalaze se doline Zagorske Mrežnice i Munjave (sl. 5A, I. zona). To su plitke koritaste doline s vodenim tokom. Na kontaktu sa *središnjim* (višim) dijelom područja stvaraju se uvjeti za razvoj kontaktnog krša (Gams, 1986; 2001). Dolazi do poniranja površinskih tekućica i oblikovanja ponorskih dolina (sl. 5A, II. zona). Ovdje se nalaze slijepe ponorske doline Zagorske Mrežnice te ponorska dolina proširenog dna Munjave. Slijepe doline nastaju bočnom korozijskom u inundacijskom nivou zbog smanjenog propusnog kapaciteta ponora, a doline proširenog dna nastaju na prijelazu iz fluviokrške doline u otvorenu kršku zaravan (Mihevc, 1991). Dolina Zagorske Mrežnice završava dvjema slijepim dolinama koje se nazivaju Ambarac. U obje slijepe doline nalazi se stjenoviti strmac, a u zapadnom Ambarcu nalazi se i otvor u 191 m dugačku špilju (Poljak, 1935; Bočić, 1997). Ambarci su jedan od najvažnijih lokaliteta pravih slijepih ponorskih dolina u kršu Hrvatske te su kao takvi izni-

of the study area (7.8 dolines/km²). Doline size was not examined in detail, though on the topographic maps, it was observed that the dolines were smaller (diameter to 30 m) in the northeastern section, while they were substantially larger in the central part (80, 100, and even 150 m in diameter). In the central part, conjoined dolines and series of dolines were also observed.

In addition to dolines, two karst depressions in the study area can be categorised as uvalas. These are the Košare uvala (900 x 600 m) and the Kamenica uvala (400 x 100 m). The bottom of the Kamenica uvala is at an elevation of about 310 m, while the bottom of the Košara uvala is at 280 m, which is lower than the level of the ponor zone of the Zagorska Mrežnica River.

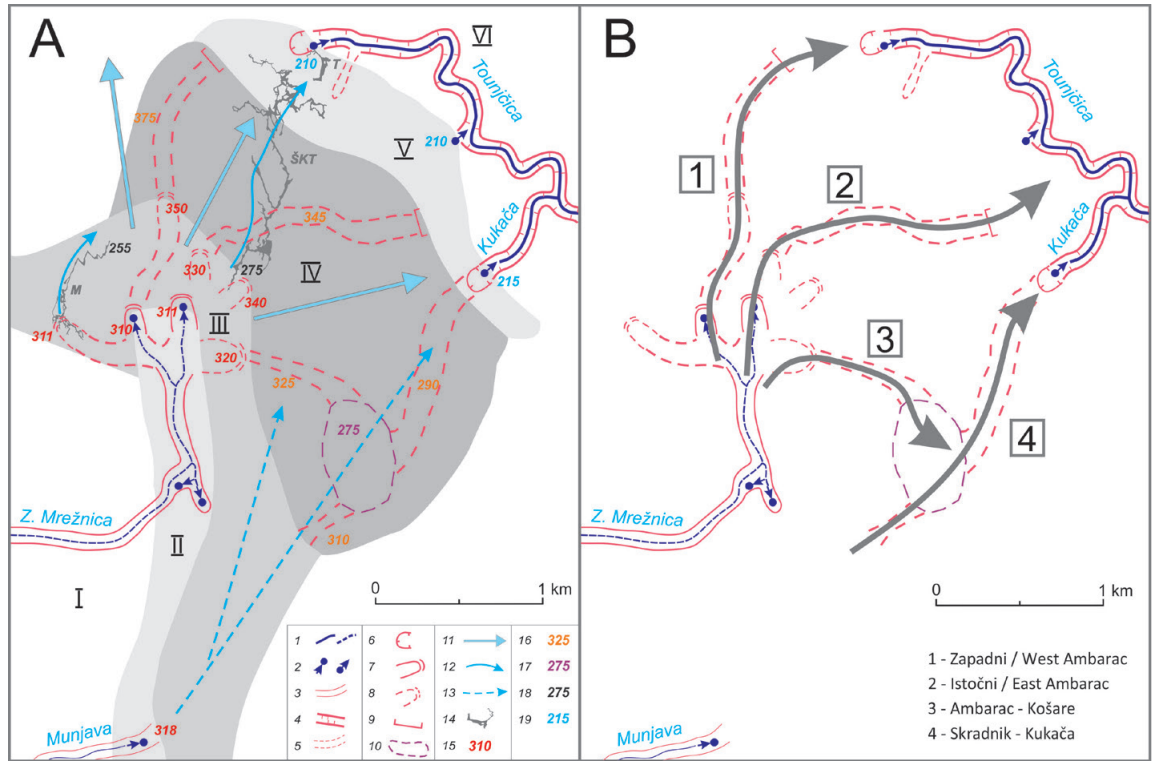
The **fluviokarst relief** is marked by a combination of actions of karst and fluvial processes, with a significant presence of river valleys in karstic terrain (Gunn, 2006). Therefore, this relief is closely associated with the hydrogeological properties of the study area. Numerous fluviokarst forms were observed in the study area, though their distribution was not uniform (Fig. 5A and 8). In the *southwest* part, i.e. the upstream (pre-ponor) side of the system, are the valleys of the Zagorska Mrežnica and Munjava rivers (Fig. 5A, I zone). These are shallow, channel-like valleys with active water flow. At the contact area with the *central* area (which is higher), the conditions are in place for the development of contact karst (Gams, 1986; 2001). Surface watercourses sink here and form ponor valleys (Fig. 5A, II zone). Here we find the blind valley of the Zagorska Mrežnica River, and the wide-bottom ponor valley of the Munjava River. Blind valleys are formed by side corrosion at the inundation level, due to the reduced reception capacity of the ponor, while valleys with widened bottoms occur at the transition between a fluviokarst valley and an open karst plateau (Mihevc, 1991). The Zagorska Mrežnica valley ends with two blind valleys called Ambarac. In both, there are rocky cliffs, while in the western side of Ambarac, there is an entrance to a 191 m long cave (Poljak, 1935; Bočić, 1997). Ambarac is one of the most important localities for true blind valleys in karst in Croatia and, as such, is a feature of exceptional geomorphological value. The ponors of the Zagorska Mrežnica

mna geomorfološka vrijednost. Ponori Zagorske Mrežnice i Munjave čine II., tj. aktivnu ponorsku zonu u ovom fluviokrškom sustavu. Zona se nalazi na visinama između 310 i 318 m. Na nju se nastavlja III. zona, tj. zona reliktnih ponorskih dolina (sl. 5A, III. zona). Utvrđene su najmanje četiri reliktna ponorske zone različitog stupnja razvoja, a nalaze se u rasponu visina od 311 m do približno 340 m. One reliktna ponorske doline koje se nalaze na većim visinama znatnije su destruirane denudacijskim procesima te su i teže prepoznatljive u reljefu. Izuzetak je krajnji južni dio ove zone gdje nisu prepoznate reliktna (kao ni aktivna) ponorske doline Munjave jer se radi o dolini proširenog dna koja završava proluvijalnom plavinom. Nije isključeno postojanje paleoponorske zone sjeveroistočno od današnjeg ponora, ali geomorfološki tragovi za sada nisu pronađeni. U višem, *središnjem* dijelu nema aktivnih površinskih tokova. Ovdje su zabilježene četiri suhe, tj. okršene doline te je to zona suhih dolina (sl. 5A, IV. zona). Dvije se generalno pružaju od juga prema sjeveru i prate trase dijagonalnih rasjeda svinutih trasa, dok se druge dvije pružaju od zapada prema istoku. Relativnim izdizanjem *središnje* morfostrukture došlo je do intenzivnijeg okršavanja tog prostora te su nekadašnje aktivne fluviokrške doline izgubile svoju funkciju. One se nalaze u rasponu visina od 290 m (na jugoistoku) do 375 m (na sjeverozapadu). Njihov položaj, oblik i visine upućuju na to da one nisu nastajale istovremeno, već je vjerojatno najstarija ona sjeverozapadna, a najmlađa ona jugoistočna. Na kontaktu *središnjeg* višeg dijela i niže zaravni nalazi se zona izvora. Karakterizirana je pojavom aktivnih izvorišnih obluka Tounjčice i Kukače koji se nalaze na samoj rasjednoj zoni Tounjskog rasjeda. U njihovom zaleđu nalazi se i nekoliko suhih i reliktnih izvorišnih obluka (sl. 5A, V. zona). Na *sjeveroistočnom*, najnižem dijelu istraživanog područja, nastavljaju se fluviokrške doline (sl. 5A, VI. zona). To su aktivne kanjonske doline Tounjčice i Kukače koje su relativno uske (120–150 m) i dubokog ureza u odnosu na razinu okolne zaravni (30–50 m). Ovdje se također uočavaju suhe i reliktna fluviokrške doline koje predstavljaju morfološki trag guste hidrografske mreže koja je ovdje egzistirala (Bočić i dr., 2015).

and Munjava valleys create an active ponor zone in this fluviokarst system. This zone lies at an elevation between 310 and 318 m. Zone III continues on, as a zone of relict ponor valleys (Fig. 5A, III zone). At least four relict ponor zones of varying degrees of development have been established here, lying within an elevation range of 311 to 340 metres. Those relict ponor valleys lying at higher elevations are more deteriorated by denudation processes, and are more difficult to recognise in the relief. The exception is the far south part of this zone, where no relict (or active) ponor valleys of the Munjava River were detected, as this is a valley with an expanded bottom that ends with a proluvial fan. It cannot be ruled out that there may have been paleo-ponor zones north-east of the present-day ponor, though no such geomorphological evidence has been found to date. In the higher, *central* part, there are no active surface watercourses. Four dry (karstified) valleys are recorded, making this the zone of the dry valleys (Fig. 5A, IV zone). Two of these dry valleys extend from south to north, and follow the course of the diagonal fault line along a bent route, while the other two run from west to east. With the relative lifting of the central morphostructure, this area became more intensively karstified, and the former active fluviokarst valleys lost their function. They are situated in an elevation range from 290 m (in the southeast) to 375 m (in the northwest). Their position, form, and elevation indicate that they did not form simultaneously, and that the valley to the northwest is likely the oldest, while the one in the southeast is likely the youngest. The spring zone is found in the contact zone of the *central* higher part and the lower plateau. It is characterised by the appearance of the active pocket valleys Tounjčica and Kukača, which lie along the same fault zone of the Tounj fault line. Behind them are several dry and relict pocket valleys (Fig. 5A, V zone). In the *northeast* part, at the lowest section of the study area, the fluviokarst valleys continue (Fig. 5A, VI zone). These are active canyon valleys of the Tounjčica and Kukača Rivers, which are relatively narrow (120–150 m) and deeply cut in comparison to the surrounding plateau (3050 m). Here there are also dry and relict fluviokarst valleys that indicate the morphological traces of a once dense hydrographic network (Bočić et al., 2015).

**Geomorfologija
krša na području
Oštarije–Tounj
i njezin značaj u
geomorfološkoj
evoluciji šireg
područja**

Karst
geomorphology
in the Oštarije–
Tounj area and its
significance in the
geomorphological
evolution of the
broader area



Sl. 5. A – Fluviokrška geomorfologija istraživanog područja (I – zona površinskog dotjecanja, II – aktivna ponorska zona, III – reliktna ponorska zona, IV – zona suhih dolina, V – izvorišna zona, VI – zona površinskog otjecanja; 1 – površinski vodeni tokovi, aktivni i povremeni, 2 – aktivni ponori, aktivni izvori, 3 – aktivne plitke fluviokrške doline, 4 – aktivne kanjonske fluviokrške doline, 5 – suhe fluviokrške doline, 6 – izvorišni obluci, 7 – aktivne ponorske doline, 8 – reliktna ponorske doline, 9 – viseća doline, 10 – veća krška depresija, 11 – utvrđene podzemne veze, 12 – utvrđene podzemne veze u špiljama, 13 – pretpostavljene podzemne veze, 14 – špiljski kanali (T – Tounjčica, ŠKT – Špilja u kamenolomu Tounj, M – jama Mandelajaja), 15 – nadmorske visine aktivnih i reliktnih ponorskih dolina, 16 – nadmorske visine suhih dolina, 17 – nadmorska visina dna krške depresije, 18 – nadmorske visine špiljskih kanala, 19 – nadmorske visine izvora); B – Geomorfološki utvrđeni koridori površinskog paleootjecanja

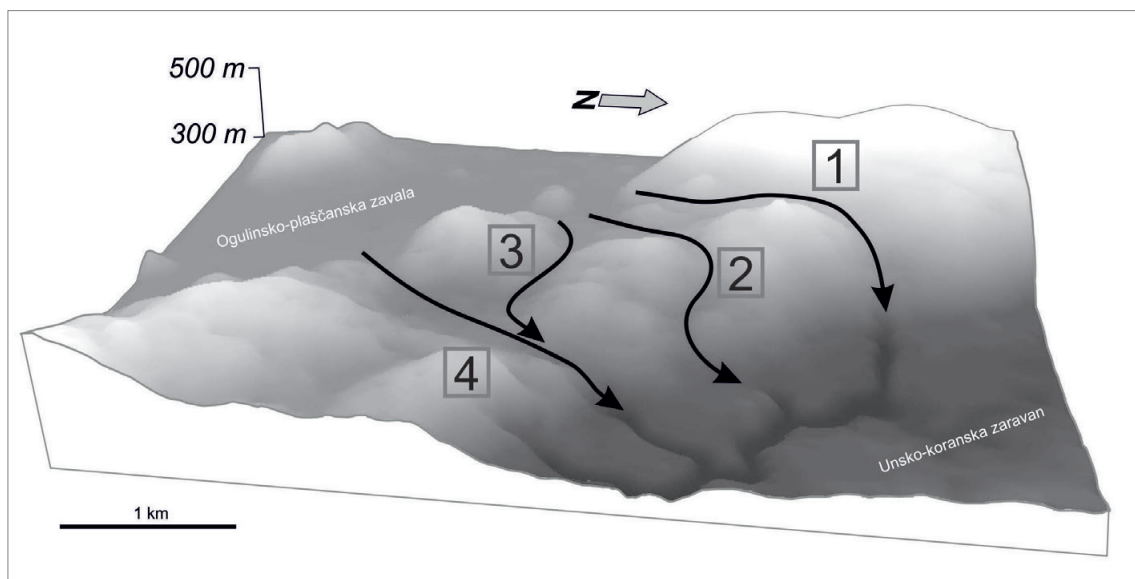
Fig. 5 A – Fluvio-karst geomorphology of the study area (I – zone of surface runoff, II – active ponor zone, III – relict ponor zone, IV – dry valley zone, V – spring zone, VI – zone of surface runoff; 1 – surface watercourses, both active and temporary, 2 – active ponors, active springs, 3 – active shallow fluvio-karst valleys, 4 – active canyon fluvio-karst valleys, 5 – dry fluvio-karst valleys, 6 – pocket valleys, 7 – active ponor valleys, 8 – relict ponor valleys, 9 – hanging valleys, 10 – larger karst depressions, 11 – confirmed underground connections, 12 – confirmed underground water flow in caves, 13 – assumed underground connections, 14 – cave channels (T – Tounjčica, ŠKT – Špilja u kamenolomu Tounj, M – Mandelajaja pit), 15 – elevation of active and relict ponor valleys, 16 – elevation of dry valleys, 17 – elevation of the bottom of karst depressions, 18 – elevation of cave channels, 19 – elevation of springs); B – Geomorphologically confirmed corridors of surface paleo-flow

Na temelju prostornog rasporeda krških i fluvio-krških oblika (prvenstveno suhih dolina) utvrđena su četiri koridora površinskog paleootjecanja iz prostora sjevernog dijela Ogulinsko-plašćanske zaravni prema prostoru Unsko-koranske zaravni (sl. 5B, 6). Tri koridora (1 – Zapadni Ambarac, 2 – Istočni Ambarac i 3 – Ambarac-Košare) započinju u recentnoj ponorskoj zoni Zagorske Mrežnice. Prva dva pružaju se do same Unsko-koranske zaravni, dok se 3. pruža u smjeru istok-jugoistok te se u uvali Košare spaja s četvrtim koridorom. Četvrti koridor Skradnik-Kukača je najjužistočniji i također se pruža do prostora Unsko-koranske zaravni.

On the basis of the spatial distribution of karst and fluvio-karst forms (primarily dry valleys), four corridors of surface paleo-flow were established running from the northern part of the Ogulin-Plaški basin towards the Una-Korana plateau (Fig. 5B, 6). Three corridors (1 – Western Ambarac, 2 – Eastern Ambarac and 3 – Ambarac-Košare) begin in the recent ponor zone of the Zagorska Mrežnica River. The first two extend all the way to the Una-Korana plateau, while the third runs in the direction east-southeast and connects with the fourth corridor in the Košare uvala. The fourth corridor Skradnik-Kukača is the most southeastern and it also extends to the Una-Korana plateau.

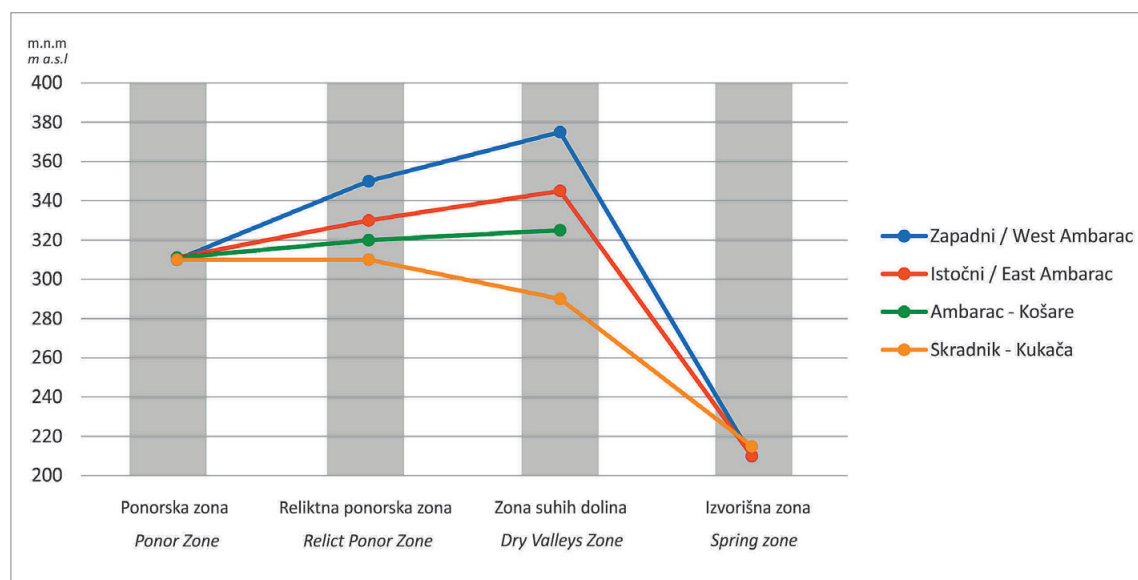
**Geomorfologija
krša na području
Oštarije–Tounj
i njezin značaj u
geomorfološkoj
evoluciji šireg
područja**

Karst
geomorphology
in the Oštarije–
Tounj area and its
significance in the
geomorphological
evolution of the
broader area



Sl. 6. 3D prikaz geomorfološki utvrđenih koridora površinskog paleootjecanja iz Ogulinsko-plašćanske zavale prema Unsko-koranskoj zaravni (za legendu vidjeti sliku 5B)

Fig. 6 3D view of the geomorphologically determined corridors of surface paleo-flow from the Ogulin-Plaški basin towards the Una-Korana plateau (see figure 5B for the legend)



Sl. 7. Prostorni odnos nadmorskih visina ključnih točaka na utvrđenim koridorima površinskog paleootjecanja

Fig. 7 Spatial relationships of altitudes of key points of the established corridors of surface paleo-flow

Ovi koridori nastali su usijecanjem površinskih tokova te su kao takvi imali funkciju svojevrsnih probojnica (*watergaps*), tj. danas imaju funkciju napuštenih probojnica (*windgaps*). Nastanak takvih formi veže se za aktivnu tektoniku, tj. izdizanje orografske barijere i kompenza-

These corridors arose from the cutting of surface watercourses into the rock, and served as an active river gorges (water gap), while today they have the function of inactive river gorges (wind gaps). The creation of such structures is associated with active tectonics, i.e. the up-lifting of the orographic bar-

cijsko usijecanje vodenih tokova (npr. Burbank i dr., 1999). Kad se pogleda prostorni odnos nadmorskih visina ključnih točaka na utvrđenim koridorima površinskog paleootjecanja (sl. 6, 7), vidljivo je da je najveća visina koridora na sjeverozapadu te se smanjuje prema jugoistoku. To može značiti da su najstariji koridori oni na sjeverozapadu, a najmlađi na jugoistoku ili su svi koridori uglavnom bili istovremeno aktivni, ali je najveći intenzitet izdizanja bio na sjeverozapadu.

Speleološki objekti i njihov geomorfološki značaj

Špilja u kamenolomu Tounj (ŠKT) i susjedni speleološki objekti

Špilja u kamenolomu Tounj (ŠKT, sl. 5A i 8) nema poznate prirodne ulaze, već su oni nastali uslijed rada kamenoloma u Tounju, u blizini trase Tounjskog rasjeda. Danas špilja ima dva ulaza, a oba se nalaze u najnižoj razini kamenoloma na nadmorskoj visini od približno 255 i 265 m. Prema morfološkoj klasifikaciji (Čepelak i Garašić, 1982) ova špilja ima značajke razgranatog i etažnog speleološkog objekta. Špilja se morfološki može podijeliti na sjeverni i južni dio. Sjeverni je dio splet kanala bez naglašenog pružanja, dok južni dio čini jedan glavni kanala generalnog pružanja prema jugu koji ima tek nekoliko sporednih kanala. Morfometrijski parametri prikazani su u tablici 1. Stvarna duljina špilje iznosi 8639 m i kao takva zauzima 5. mjesto po duljini speleoloških objekata u Hrvatskoj. Visinski parametri (dubina i visinska razlika) vrlo su niski. Najjužnija i najsjevernija točka špilje ujedno su i najudaljenija mjesta u špilji (ekstenzija), a linija koja ih spaja ima orijentaciju 002 – 182°. ŠKT ima relativno veliku gustoću kanala, što je posebno naglašeno u sjevernom dijelu špilje. Vrlo niski indeks vertikalnosti i visoki indeks horizontalnosti upućuju na špilju s pretežito horizontalnim kanalima. Vrlo visok indeks horizontalnosti imaju i neke od najduljih svjetskih špilja (Piccini, 2011). Relativno niski indeksi linearnosti i hori-

rier and compensational erosion by watercourses (e.g. Burbank et al., 1999). In examining the spatial relationship of elevations of key points in the established corridors of surface paleo-flow (Figs. 6, 7), it is evident that the highest elevations of the corridor are in the northwest, and decrease towards the southeast. This could indicate that the oldest corridors are those in the northwest, and the youngest in the southeast, or that all corridors were active at the same time though the lifting intensity was highest in the northwest.

Speleological structures and their geomorphological significance

Tounj quarry cave (ŠKT) and nearby speleological structures

The Tounj quarry cave (ŠKT, Figs. 5A, 8) has no known natural entrance, instead the entrance was created following works in the quarry, near the route of the Tounj fault line. Today, the cave has two entrances, both at the lowest point of the quarry at elevations of approximately 255 and 265 metres. According to the morphological classification (Čepelak and Garašić, 1982), this cave has the characteristics of a branching, multi-layer cave. Morphologically, the cave can be divided into the northern and southern parts. The northern part is a system of channels without uniform orientation, while the southern part is made up of one main channel with a general southerly orientation, and only a few secondary channels. The morphometric parameters are shown in Table 1. The length of the cave is 8,639 m, making it the 5th longest in Croatia. Its elevation parameters (depth and height difference) are very small. The southernmost and northernmost points are also the most distant points in the cave (extension), and the line connecting them has the orientation 002–182°. ŠKT has a relatively high density of channels, which is particularly evident in the northern part of the cave. A very low vertical index and high horizontal index indicates a cave with mostly horizontal channels. Some of the world's longest caves have a very high horizontal index (Piccini, 2011). A relatively low linearity index

zonalne kompleksnosti posljedica su toga što je morfološka struktura špilje složena od dva bitno različita dijela (sjeverni i južni).

Špilja u kamenolomu Tounj sastoji se od kanala i dvorana različitog tipa (Bočić, 2011). Dominiraju freatički kanali, odnosno provodnici. Odstupanja od pravilnog ovalnog ocrta uglavnom su pod utjecajem kosih tektonskih pukotina na nastanak dijelova glavnog kanala. U špilji su također zabilježeni i vadozni provodnici te pukotinski kanali (tipologija kanala prema Palmer, 2007). Kako su se tijekom geneze mijenjali lokalni uvjeti, došlo je do razvoja kanala kombinirane morfologije, najčešće onih tzv. tipa ključanice. Jedno od najvažnijih geospeleoloških obilježja ove špilje jest pojava tzv. freatskih ili obložnih sigaa (Lacković, 1993; Babić i dr., 1996). Za razliku od većine ostalih vrsta sigaa koje nastaju u vadoznim uvjetima, ove sigaa nastale su u freatskim uvjetima.

Prema podacima u Lacković (2003), Barudžija i Korač (2011) i Bočić (2011) u špilji su uočeni neki dominantni setovi pukotina. U središnjem, a posebno u sjevernom dijelu najčešće su pukotine NW-SE. Te su pukotine paralelne s osi utvrđene sinklinale na površini (Velić i Sokač, 1981) i u podzemlju (Lacković, 1993). Dominantni pravac pružanja utvrđenih setova pukotina u južnom dijelu špilje je NNE-SSW. Osim navedenih uočene su i pukotine pružanja N-S i NE-SW.

ŠKT je po funkciji protočni speleološki objekt. Kroz njega protječe vodeni tok koji se u špilji pojavljuje u kanalima u južnom dijelu. On teče generalno prema sjeveru, a u sjevernom dijelu špilje grana se u dva kraka. Zapadni krak prolazi kroz tzv. Suho korito, nastavlja teći prema sjeveru te izvire na izvoru Tounjčice podno željeznikog podzida. Istočni krak teče kroz Mamutovu dvoranu te izvire kroz špilju Tounjčicu. Vodeni tok se u špilji pojavljuje na oko 270 m visine, a izlazi iz špilje na oko 215 m. Na duljini od 1580 m (tlocrtna udaljenost ulaznog i izlaznog sifona, $Az = 10^\circ$) svladava visinsku razliku od 55 m, što predstavlja hidraulički gradijent od maksimalnih 28,7 m/km ($\sim 2,9\%$ ili 2°). Na otprilike polovici te udaljenosti (Djevičanski kanal) nalazi se zona s izraženijim padom vodenog toka, dok je uzvodno i nizvodno pad manji od prosjeka.

and horizontal complexity are due to the fact that the morphological structure of this cave includes two highly different sections (north and south).

The Tounj quarry cave consists of channels and halls of varying type (Bočić, 2011). Phreatic channels (or conduits) dominate. Deviations from a regular oval shape are primarily due to the influences of diagonal tectonic fractures on the formation of parts of the main channel. Vadose conduits and fracture channels were also observed in the cave (channel typology according to Palmer, 2007). During its genesis, the local conditions changed, resulting in the development of channels with combined morphology, most often of the keyhole type. One of the most important geospeleological properties of these caves is the appearance of phreatic or coated speleothems (Lacković, 1993; Babić et al., 1996). Unlike most other types of speleothems that form under vadose conditions, these were formed under phreatic conditions.

According to Lacković (2003), Barudžija and Korač (2011) and Bočić (2011), several dominant sets of fractures have been observed in the cave. In the central, and particularly in the northern part, the most common fractures are NW-SE. These fractures are parallel with the axis of the confirmed syncline on the surface (Velić and Sokač, 1981) and underground (Lacković, 1993). The dominant orientation of the established sets of fractures in the southern part of the cave is NNE-SSW. Additionally, fractures with an orientation N-S and NE-SW are also present.

In terms of its function, ŠKT is a cave with active water flow. The water course appears in the cave in the channels in the southern part, and in general flows northwards, where the cave breaks into two arms. The western arm passes through the Suho korito channel, continues northwards and wells up at the Tounjčica spring under the railway retaining wall. The eastern arm flows through the Mammoth hall, and wells up through the Tounjčica cave. The watercourse appears in the cave at an elevation of 270 m, and exits the cave at an elevation of about 215 metres. Over a length of 1580 m (map distance of the inflow and outflow siphons, $Az=10^\circ$), the watercourse has an elevation difference of 55 m, representing a hydraulic gradient up to 28.7 m/km ($\sim 2.9\%$ or 2°). At about half this distance (*Djevičan-*

Tab. 1. Osnovni i izvedeni morfometrijski parametri Špilje u kamenolomu Tounj i jame Mandelaja kod Oštarija
Tab. 1 Basic and calculated morphometric parameters in the Tounj Quarry cave and the Mandelaja pit near Oštarije

Parametar /Parameter	Oznaka /Label	Opis - Izračun /Description - Calculation	Vrijednost /Value	
			Špilja u kamenolomu Tounj /Tounj quarry cave	Mandelaja /Mandelaja pit
Duljina – tlocrtna / Plan length	Lp	Zbroj duljine svih kanala u tlocrtnoj projekciji / The sum of the lengths of all the channels in plan	⁽¹⁾ 8487 m	⁽³⁾ 2641 m
Duljina – stvarna / Real length	Lr	Zbroj stvarne duljine svih kanala / The sum of the real length of all channels	⁽²⁾ 8639 m	2835 m
Vertikalna razlika / Vertical range	Rv	Visinska razlika najviše i najniže točke / Elevation difference of highest and lowest point	⁽¹⁾ 78 m	⁽³⁾ 96 m
Dubina Depth / Negative drop	Dn	Visinska razlika najvišeg ulaza i najniže točke / Elevation difference of entrance and lowest point	⁽¹⁾ 47 m	⁽¹⁾ 96 m
Ekstenzija / Extension	Ex	Tlocrtna udaljenost najudaljenijih točaka špilje / Plan distance outermost points of the cave	1640 m	719 m
Površina minimalnog pravokutnika / Area of minimum rectangle	A	Površina najmanjeg opisanog pravokutnika / The area of the smallest possible rectangle	1 km ² (1,59 x 0,63 km)	0,19 km ² (0,71 x 0,27 km)
Gustoća kanala / Passage Network Density	Den	$Den = Lp / A$	8,49 m/km ²	13,55 m/km ²
Indeks vertikalnosti / Verticality index	Vi	$Vi = Rv / Lr$	0,009	0,034
Indeks horizontalnosti / Horizontality index	Hi	$Hi = Lp / Lr$	0,982	0,932
Indeks linearnosti / Linearity index	Li	$Li = (Ex^2 - Rv^2) / 2 / Lr$	0,190	0,252
Indeks horizontalne kompleksnosti / Horizontal complexity index	Hci	$Hci = Lp / Ex$	5,175	3,672

Izvori: 1 – Barišić, 2011; 2 – Rnjak, 2017; 3 – Novak, 2013; ostalo – izmjereno i izračunato na temelju podataka i nacрта (Barišić, 2011; Novak, 2013), a prema metodologiji prikazanoj u Piccini (2011).

Sources: 1 – Barišić, 2011; 2 – Rnjak, 2017; 3 – Novak, 2013; other – measured and calculated on the basis of data and maps (Barišić, 2011; Novak, 2013), and according to the methodology described in Piccini (2011).

U južnom (uzvodnom) dijelu špilje glavni kanal nalazi se malo iznad vodnog lica. U sjevernom (nizvodnom) dijelu špilje u spletu kanala izražena je reliktna etaža na 30–40 m iznad recentnoga vodenog toka. Ako usporedimo nadmorsku visinu južnog dolaznog sifona (270 m) s nadmorskom visinom ponorske zone Ambarac (310 m), može se uočiti da je na tlocrtnoj udaljenosti od oko 350 m visinska razlika oko 40 m, odnosno hidraulički gradijent je 114,3 m/km (~11,4 % ili 6,5°).

U izvorišnom obluku Tounjčice nalazi se špilja Tounjčica (duljina 465 m; Barišić, 2011). Ulaz joj je dimenzija 25 x 8 m, a morfološki se sastoji od tri glavna dijela. Prvi dio čini Glavni kanal koji je zapravo niz dvorana koje se nižu od ulaza prema SSW. Drugi je dio potopljeni sifonski nastavak glavnog kanala koji se pruža prema Mamutovoj dvorani u ŠKT. Treći je dio sporedni Desni zazidani kanal. Voda iz potopljenog dijela pritječe u glavni kanal kojim teče sve do ulaza. Dio izvire iz špilje kroz ulaz, a dio se odvaja lijevo u Desni zazidani kanal iz kojeg otječe prema obližnjem stalnom izvoru. Prema morfološkom tipu špilja pripada kategoriji razgranatih speleoloških objekata iako je njezina morfološka kompleksnost znatno manje izražena u odnosu na ŠKT. Morfološka obilježja kanala upućuju na freatski razvoj. Hidrografska povezanost špilje Tounjčice i ŠKT opravdano je bila pretpostavljena. U međuvremenu je ona i fizički dokazana. Speleoroniooci su 2019. godine uspjeli preroniti iz sifona Tounjčice u Mamutovo jezero u ŠKT (Prpić, 2019). Time je dokazano da su te dvije špilje dio jedinstvenog sustava trenutne duljine 9104 m (KSHPS, 2020). Iznad ulaza u Tounjčicu nalazi se ulaz u špilju Mala Tounjčica koja je duljine 68 m (Lindić i Lindić, 1995). Njezin kanal pruža se prema jugu na visini od oko 20 m iznad kanala Tounjčice te predstavlja njezinu reliktnu fazu. Genetski je najvjerojatnije dio reliktna etaže unutar ŠKT.

ski kanal), there is a zone with a more pronounced drop in water flow profile, while upstream and downstream, the drop is lower than the average.

In the southern (upstream) part of the cave, the main channel is situated a little above the water table. In the northern (downstream) part of the cave, within the network of channels, there is a relict level at 30–40 m above the recent water table. In comparing the elevation of the southern inflow siphon (270 m) with the elevation of the Ambarac ponor zone (310 m), it is evident that over the line distance of 350 m, the difference in elevation is about 40, and so that hydraulic gradient is 114.3 m/km (~11.4 % or 6.5°).

In the Tounjčica pocket valley, we find Tounjčica cave (length 465 m; Barišić, 2011). The cave entrance is 25 x 8 m in size, and morphologically, the cave consists of three main parts. The first part is the Main channel, which is in fact a series of halls that extend from the entrance towards the SSW. The second part is the submerged siphon of the main channel, which extends towards the Mammoth hall in ŠKT. The third part is the secondary channel (*Desni zazidani kanal*). Water from the submerged part flows into the main channel that flows all the way to the entrance. A part wells out of the cave through the entrance, while another part flows to the left in the right walled channel and then flows towards the nearby permanent spring. In terms of morphological type, the cave belongs to the category of branching caves, even though its morphological complexity is less pronounced than in the ŠKT. The morphological properties of the channel suggest its phreatic development. The hydrographic connections between the Tounjčica and ŠKT caves were long assumed, and in the meantime have been physically proven. In 2019, speleo-divers succeeded in diving from the Tounjčica siphon into Mammoth Lake in ŠKT (Prpić, 2019). This proves that these two caves are part of a single system that currently has a known length of 9,104 m (KSHPS, 2020). Above the entrance into the Tounjčica cave is the entrance to the Mala Tounjčica cave, which is 68 m long (Lindić and Lindić, 1995). Its channel extends southwards at an elevation about 20 m above the Tounjčica channel, and is a relict phase of that cave. It is likely a relict level within the ŠKT cave.

Jama Mandelaja i susjedni speleološki objekti

Jama Mandelaja (sl. 5A i 8) nalazi se nedaleko željezničke stanice u Oštarijama (Novak, 2013). Ulaz jamskog tipa nalazi se iznad samog oboda Ogulinsko-plaškanske zavale, u zoni Oštarijskog rasjeda na visini od 340 m. Od ulaza se pruža vertikalni i kosi kanal koji se na dubini od oko 40 m spaja na splet uglavnom horizontalnih kanala. Prema morfološkoj tipologiji ova jama pripada kategorijama razgranatih i etažnih speleoloških objekta. Morfološki se sastoji od dva glavna dijela. Južni dio (tzv. Stara i Nova Mandelaja) je razgranat, a sastoji se od aktivnih i reliktnih kanala. Kanali iz ponorske zone prema sjeveru konvergiraju i spajaju se u zajednički provodnik. Tu počinje drugi dio špilje, tzv. Akvatorij (Jalžić, 2004). Radi se o jednom glavnom aktivnom kanalu duljine 860 m koji se cijelom duljinom nalazi u razini vode temeljnice (na otprilike 250 m).

Morfometrijski parametri špilje prikazani su u tablici 1. Stvarna duljina špilje iznosi 2835 m, što je svrstava na 21. mjesto najduljih špilja Hrvatske. Dubina je ista kao i vertikalna razlika (96 m). Gustoća kanala nešto je veća nego kod ŠKT, ali najviše stoga što ŠKT ima jedan jako izduženi glavni kanal prema jugu što znatno povećava ekstenziju i površinu minimalnog pravokutnika. Svi izračunati morfometrijski indeksi približnih su vrijednost kao i kod ŠKT, što znači da se radi o pretežito dobro razvijenim horizontalnim kanalima. Prema nacrtu špilje može se pretpostaviti da su na nastanak kanala najviše utjecali sustavi pukotina orijentacije NW-SE i NNE-SSW, slično kao i kod ŠKT.

Jama Mandelaja ima funkciju protočnog speleološkog objekta. Nalazi se u samoj ponorskoj zoni i recentno voda u nju dolazi na dva mjesta na krajnjem jugoistoku špilje. Prema morfologiji kanala može se pretpostaviti da je voda u špilju ulazila i kroz zapadnije dolazne kanale. To je najvjerojatnije posljedica unazadnog povlačenja ponora unutar rasjedne zone Oštarijskog rasjeda. Kanali koji pripadaju reliktnoj etaži nalaze se oko 15–20 m iznad recentnog vodenog toka. Podzemni vodeni tok generalno teče prema sje-

Mandelaja pit and neighbouring speleological structures

The Mandelaja pit (Fig. 5A, 8) is situated near the railway station in Oštarije (Novak, 2013). The pit entrance is found just above the very edge of the Ogulin-Plaški basin, in the zone of the Oštarije fault line, at an elevation of 340 m. From the entrance, there is a vertical and steep channel that joins the network of mostly horizontal channels at a depth of about 40 m. In terms of its morphological type, this pit belongs to the category of branching and multi-level caves. Morphologically, it consists of two main parts. The southern part (Stara and Nova Mandelaja) is branching, and is consist of active and relict channels. The channels from the ponor zone converge towards the north and join into a single conduit. This is where the second part of the cave, Akvatorij, begins (Jalžić, 2004). This is one, main active channel that is 860 m long, which is at the level of the water table (at about 250 m) for its entire length.

The morphometric parameters of the cave are shown in Table 1. The length of the cave is 2,835 m, which makes it the 21st longest cave in Croatia. Its depth is the same as the vertical range (96 m). Channel density is somewhat higher than for the ŠKT cave, but is highest since ŠKT has only one, very elongated main channel extending towards the south, which significantly increases its extension and the area of the minimum rectangle. All the calculated morphometric indices are approximately the same as for ŠKT, meaning that these are primarily well-branched horizontal channels. According to cave map, it can be assumed that channel formation was mostly under the influence of the fracture system with a NW-SE and NNE-SSW orientation, like that found in ŠKT.

The Mandelaja pit is a cave with active water flow. It is situated in the ponor zone, and recently water entering it at two places in the most southeastern part of the cave. According to the cave morphology, it can be assumed that the water entered the cave through the western inflow channels. This is likely the consequence of the reverse retraction of the ponor within the fault zone of the Oštarije fault. The channels belonging to the relict level are about 15–20 m above the recent watercourse. The under-

veru i na linijskoj udaljenosti od 663 m svladava 13,5 m visinske razlike, što je hidraulički gradijent od 20,5 m/km, a to je znatno manje nego u ŠKT. Međutim, uzvodni dijelovi špiljskih kanala nalaze se na dubini od oko 40–45 m ispod ponorske zone u rubu zavale, dakle vodno lice već je u samoj ponorskoj zoni vrlo duboko. To upućuje na dobro razvijene krške provodnike na većoj dubini unutar same zavale, odnosno da se vode Zagorske Mrežnice gube u koritu puno prije same ponorske (i rasjedne) zone u rubu zavale. Također to može upućivati na aktivnu rasjednu tektoniku u rubu zavale. Na dinamiku ponorske/rasjedne zone upućuje i to da je dubina ulazne vertikale također oko 40 m iako se ona nalazi na oko 30 m iznad recentne razine zavale. Nedaleko od ulaza u Mandelaju nalazi se Jama iznad Mandelaje. Malih je dimenzija (dubina 29 m, duljina 40 m), ali je važna jer ima prostrani kanal najvjerojatnije freatskog nastanka koji se nalazi na visini od oko 345 m (oko 70 m iznad reliktna i oko 90 m iznad aktivne etaže u Mandelaji). Njezin položaj i morfologija također upućuju na aktivnu tektoniku te spuštanje razine krških provodnika.

Od desetak ostalih poznatih speleoloških objekata u okolici potrebno je još izdvojiti ponor špilju Ambarac (Poljak, 1935; Bočić, 1997). Nalazi se u slijepoj dolini istočnog Ambarca na visini od oko 310 m. Sastoji se od jednog glavnog i nekoliko sporednih kanala ukupne duljine 191 m. Ambarac je nastao kao jedan od glavnih ponora Zagorske Mrežnice. Danas je samo povremeno aktivan zbog hidrotehnički zahvata i izgradnje akumulacije Sabljaci. Međutim, i prije tih zahvata Ambarac je bio samo povremeni ponor za najviših vodostaja (Poljak, 1935).

Na temelju analiziranih morfoloških karakteristika odabranih speleoloških objekata može se zaključiti sljedeće: (i) zone horizontalnih i blago nagnutih kanala upućuju na dobro razvijene krške provodnike u tektonski stabilnijim uvjetima, (ii) zone povećanja hidrauličkog gradijenta upućuju na aktivnu tektoniku te (iii) razgranatiji dijelovi velikih speleoloških objekata nalaze se bliže izvorskim, tj. ponorskim zonama, odnosno nalaze se bliže zonama glavnih aktivnih rasjeda.

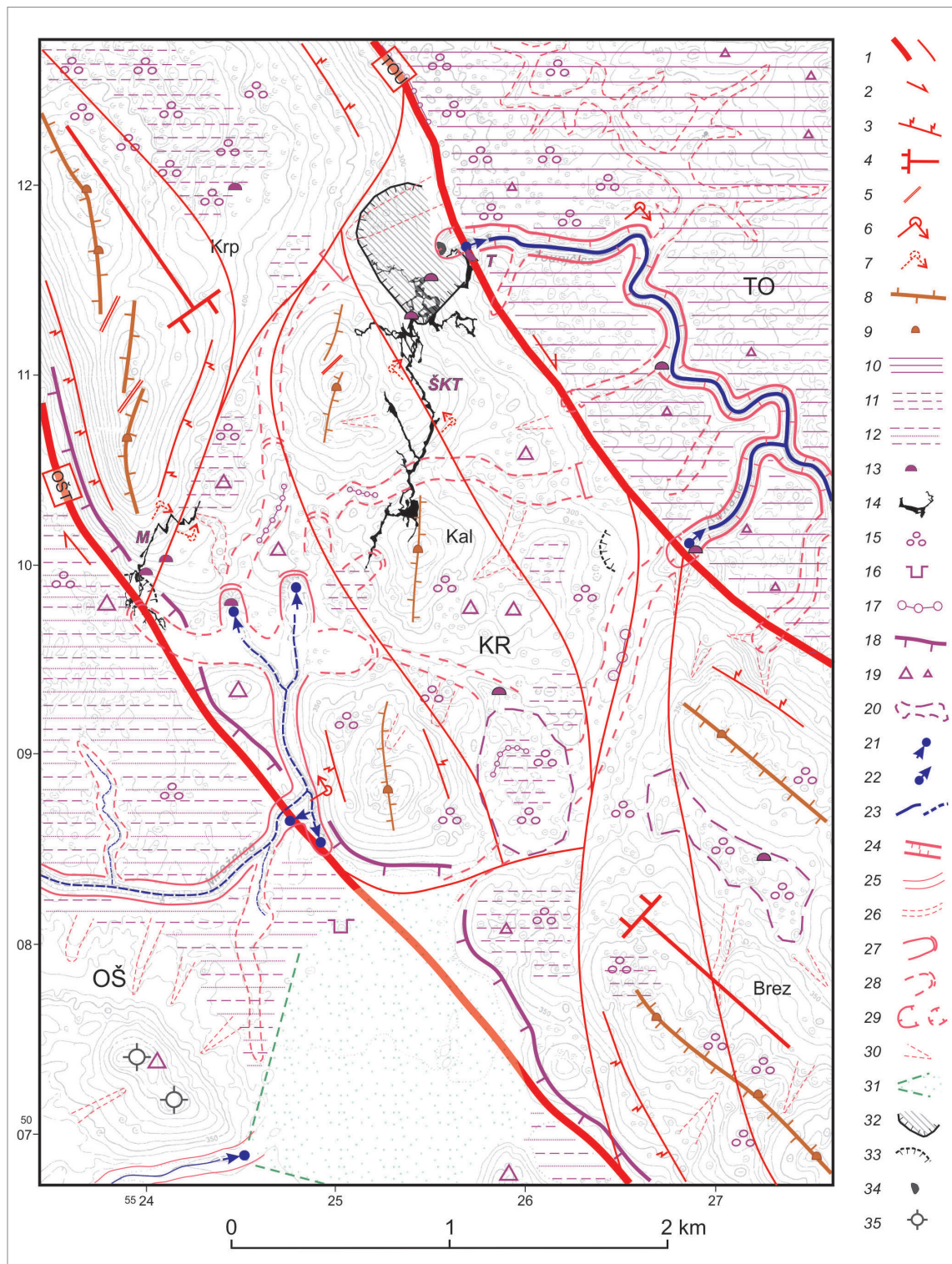
ground watercourse generally flows northwards, and passes a 13.5 m elevation difference over a linear distance of 663 m, giving a hydraulic gradient of 20.5 m/km, which is less than in ŠKT. However, the upstream sections of the cave channels are found at a depth of 40–45 m below the ponor zone, at the edge of the basin, so the water table is already very deep in the ponor zone. This indicates highly developed karst conduits at greater depths within the basin itself, i.e. that the waters of the Zagorska Mrežnica River are lost in the riverbed even before the ponor zone (and fault zone) at the edge of the basin. This can also indicate active fault tectonics at the edge of the basin. A dynamic ponor and fault zone is also indicated by the depth of the vertical entrance, also at 40 m, even though this is about 30 m above the recent level of the basin. Near the entrance to the Mandelaja pit is the pit above Mandelaja. This pit is small (depth 29 m, length 40 m) but significant due to the spacious channel, likely of phreatic genesis, situated at an elevation of about 345 m (about 70 m above the relict level and 90 m above the active level in Mandelaja). Its position and morphology also suggest active tectonics and a drop in the level of the karst conduits.

Of the ten other known caves in the area, the ponor cave Ambarac should be mentioned (Poljak, 1935; Bočić, 1997). It is situated in the blind valley of Eastern Ambarac at an elevation of about 310 m. It consists of one main channel and several secondary channels, with a total length of 191 m. Cave Ambarac was formed as one of the main ponors of Zagorska Mrežnica River. Today, it is only temporarily active due to hydrotechnical works and the creation of the Sabljaci Reservoir. However, even prior to those works, Ambarac was only a temporary ponor during the highest water levels (Poljak, 1935).

On the basis of the analysed morphological characteristics, the following can be concluded about these caves: (i) that the zone of horizontal and slightly sloped channels indicates good developed karst conduits in tectonically stable conditions; (ii) that the zone of increasing hydraulic gradient indicates active tectonics; and (iii) that the branching parts of the large caves are situated near spring and ponor zones, i.e. near the zones of the main active faults.

**Geomorfologija
krša na području
Oštarije–Tounj
i njezin značaj u
geomorfološkoj
evoluciji šireg
područja**

**Karst
geomorphology
in the Oštarije–
Tounj area and its
significance in the
geomorphological
evolution of the
broader area**



Sl. 8. Geomorfološka karta istraživanog područja
Fig. 8 Geomorphological map of the study area

**Geomorfologija
krša na području
Oštarije–Tounj
i njezin značaj u
geomorfološkoj
evoluciji šireg
područja**

**Karst
geomorphology
in the Oštarije–
Tounj area and its
significance in the
geomorphological
evolution of the
broader area**

1 – morfolineamenti i rasjedi s odrazom u reljefu: glavni, sporedni (pretpostavljeni),

2 – rasjedi s horizontalnim pomakom,

3 – rasjedni strmci,

4 – nagle promjene u visini glavnog grebena,

5 – nagle promjene u pružanju grebena,

6 – laktasta skretanja aktivnih dolina,

7 – laktasta skretanja špiljskih kanala,

8 – grebeni,

9 – vrhovi,

10 – krška zaravan,

11 – dio krške zaravni unutar zavale,

12 – manji izdignuti fragmenti krških zaravni,

13 – ulazi u speleološke objekte,

14 – špiljski kanali,

15 – ponikvasti krš,

16 – bunarasta ponikva,

17 – ponikve u nizu,

18 – obod zavale krškog polja,

19 – humci, veći i manji,

20 – krška uvala,

21 – ponor,

22 – izvor,

23 – površinski tok, stalni i povremeni,

24 – fluviokrški kanjon,

25 – aktivna dolina,

26 – suha i reliktna dolina,

27 – aktivna ponorska dolina,

28 – reliktna ponorska dolina,

29 – izvorišni obluk aktivni, reliktni,

30 – okršena jaruga,

31 – proluvijalna plavina,

32 – kamenolom aktivni,

33 – kamenolom neaktivni,

34 – podzid,

35 – antropogeni preoblikovani humak.

Nazivi rasjeda: TOU – Tounjski, OŠT – Oštarijski;

Nazivi morfostruktura: TO – Tounjska, KR – Krpelska, OŠ – Oštarijska, Krp – Krpel, Kal – Kalača, Brez – Brezovica;

Nazivi speleoloških objekta: T – Špilja Tounjčica, ŠKT – Špilja u kamenolomu Tounj, M – Mandelaja

1 – morpholineaments and fault lines reflected in the relief: main, secondary (assumed),

2 – strike-slip faults,

3 – fault caused steep slopes,

4 – sudden changes in elevation of the main ridge,

5 – sudden changes in the orientation of the ridge,

6 – elbow-shaped bends in active valleys,

7 – elbow-shaped bends in cave channels,

8 – ridges,

9 – peaks,

10 – karst plateau,

11 – part of the karst plateau within the basin,

12 – smaller up-lifted fragments of the karst plateau,

13 – cave entrances,

14 – cave channels,

15 – karst with dolines,

16 – well-like dolines,

17 – dolines in series,

18 – edge of the karst polje basin,

19 – karst cone hills, larger and smaller,

20 – karst cove,

21 – pit,

22 – spring,

23 – surface watercourse, permanent and temporary,

24 – fluviokarst canyon,

25 – active canyon,

26 – dry and relict valley,

27 – active ponor valley,

28 – relict ponor valley,

29 – pocket valley, active and relict,

30 – karstified gully,

31 – proluvial fan,

32 – active quarry,

33 – inactive quarry,

34 – retaining wall,

35 – anthropogenically formed hill.

Fault names: TOU – Tounj fault, OŠT – Oštarije fault;

Morphostructure names: TO – Tounj, KR – Krpel, OŠ – Oštarije, Krp – Krpel, Kal – Kalača, Brez – Brezovica;

Caves: T – Tounjčica cave, ŠKT – Tounj quarry cave, M – Mandelaja pit

Evolucija krškog reljefa

Na temelju analiziranih geomorfoloških obilježja reljefa predlaže se sljedeći geomorfološki model razvoja reljefa na istraživanom prostoru. Glavne faze razvoje reljefa prikazane su na slici 9 (brojevi u zagradama u tekstu odgovaraju brojevima na slici 9):

(1) Područja današnje Ogulinsko-plašćanske zavale i Unsko-koranske zaravni su spojena, tj. između njih nema orografske barijere. Najvjerojatnije se radi o jednoj cjelovitoj krškoj zaravni s djelomično razvijenom drenažnom mrežom. Otjecanje se odvijalo površinski prema sjeveroistoku.

(2) Uslijed jačanja kompresijskog tektonskog režima započinje izdizanje zone Krpelskog praga. Površinski tokovi konvergiraju te se pojačano usijecaju u manje izdignute dijelove praga. Jedno takvo je i današnje područje Oštarije-Tounj gdje se uslijed pojačane erozije formiraju probojnice (*watergaps*). Može se pretpostaviti da je ovaj proces započeo negdje na prijelazu pliocena u pleistocen.

(3) Zbog nastavka izdizanja zone Krpelskog praga dolazi do poniranja pojedinih tokova i stvaranja podzemnih krških provodnika koji preuzimaju funkciju od površinskih dolina. Doline sa svojim probojnicama postaju suhe te se stvaraju tzv. *windgaps*.

(4) U ovoj fazi dolazi do potpunog orografskog zatvaranja zavale, tj. njezina odvajanja od zaravni. Posljedično, svi tokovi u ovom području poniru, a na površini ostaju suhe doline s probojnicama. Tokovi koji već dulje vrijeme poniru formiraju prostrane slijepe doline, što upućuje na postupno smirivanje tektonske aktivnosti. Na nizvodnoj (izvorišnoj) strani počinju se formirati izvorišni obluci.

(5) Nastavlja se izdizanje zone Krpelskog praga, a uz nju se relativno izdiže i dno Ogulinsko-plašćanske zavale. To dovodi do povećanja hidrauličkog gradijenta u podzemlju što potiče daljnje okršavanje. Posljedično dolazi do snižavanja razine podzemnih tokova te do stvaranja nižih, mlađih provodnika. Također, u ovoj fazi

Evolution of the karst landscape

Based on the analysed geomorphological properties of the relief, the following geomorphological model of evolution of the karst landscape in the study area is given. The main phases of development of the relief are shown in Figure 9 (numbers of bullets correspond to the numbers indicated in Figure 9):

(1) The area of the present-day Ogulin-Plaški basin and the Una-Korana plateau are connected, i.e. there is no orographic barrier separating them. This is most likely a single karst plateau with a partially developed drainage network. Drainage occurs on the surface towards the northeast.

(2) Due to the strengthening of the compression tectonic regime, the Krpel barrier zone started to up-lift. Surface watercourses converged and begin to more intensively cut into the less-raised sections of the barrier. One such section is the present-day area of Oštarije-Tounj, where water gaps were formed due to the increased erosion. It can be assumed that this process began somewhere at the transition of the Pliocene to the Pleistocene.

(3) Due to the continued up-lifting of the Krpel barrier area, certain watercourses began to sink, creating underground karst conduits that took over the function from the surface valleys. Valleys with their water gaps dried out, becoming wind gaps.

(4) In this phase, the basin became completely orographically closed off, i.e. separated from the plateau. Consequently, all watercourses in the area sank, leaving only dry valleys with wind gaps on the surface. Watercourses sinking over a longer period of time formed blind valleys, indicating the gradual settling of tectonic activity. Downstream, on the spring side, pocket valleys formed.

(5) The raising of the Krpel barrier zone continued, and with it the bottom of the Ogulin-Plaški basin has also risen. This has led to an increase in the hydraulic gradient underground, which stimulates further karstification. Consequently, this also led to a reduction in the level of the underground water table, and to the creation of lower, younger conduits. In this phase, due to the lifting, the once active valleys slowly lost their function and became karstified.

uslijed izdizanja neke dotad aktivne slijepe doline gube funkciju i bivaju okršene.

(6) U ovoj fazi dolazi do tektonskog smirivanja terena. Nema znatnijega okršavanja u dubinu pa se posljedično dobro razvijaju slijepe doline i izvorišni obluci na površini te se također dalje razvijaju i proširuju postojeći aktivni provodnici.

(7) Reaktivacija tektonske aktivnosti dovodi do daljnjeg izdizanja dna zavale i zone Krpel'skog praga. To dovodi do ponovnog povećanja hidrauličkog gradijenta, što uzrokuje početak unazadnog pomicanja ponora.

(8) Glavna je značajka ove faze uznapredovalo okršavanje u podzemlju i na površini. Dolazi do unazadnog pomicanja ponornih zona te razvoja podzemnih provodnika koji preuzimaju funkciju od površinske drenažne mreže u kontaktnoj zoni dna zavale i Krpel'skog praga. Na površini se razvijaju krške depresije koje dijelom maskiraju tragove površinskog otjecanja iz dna zavale prema zaravni.

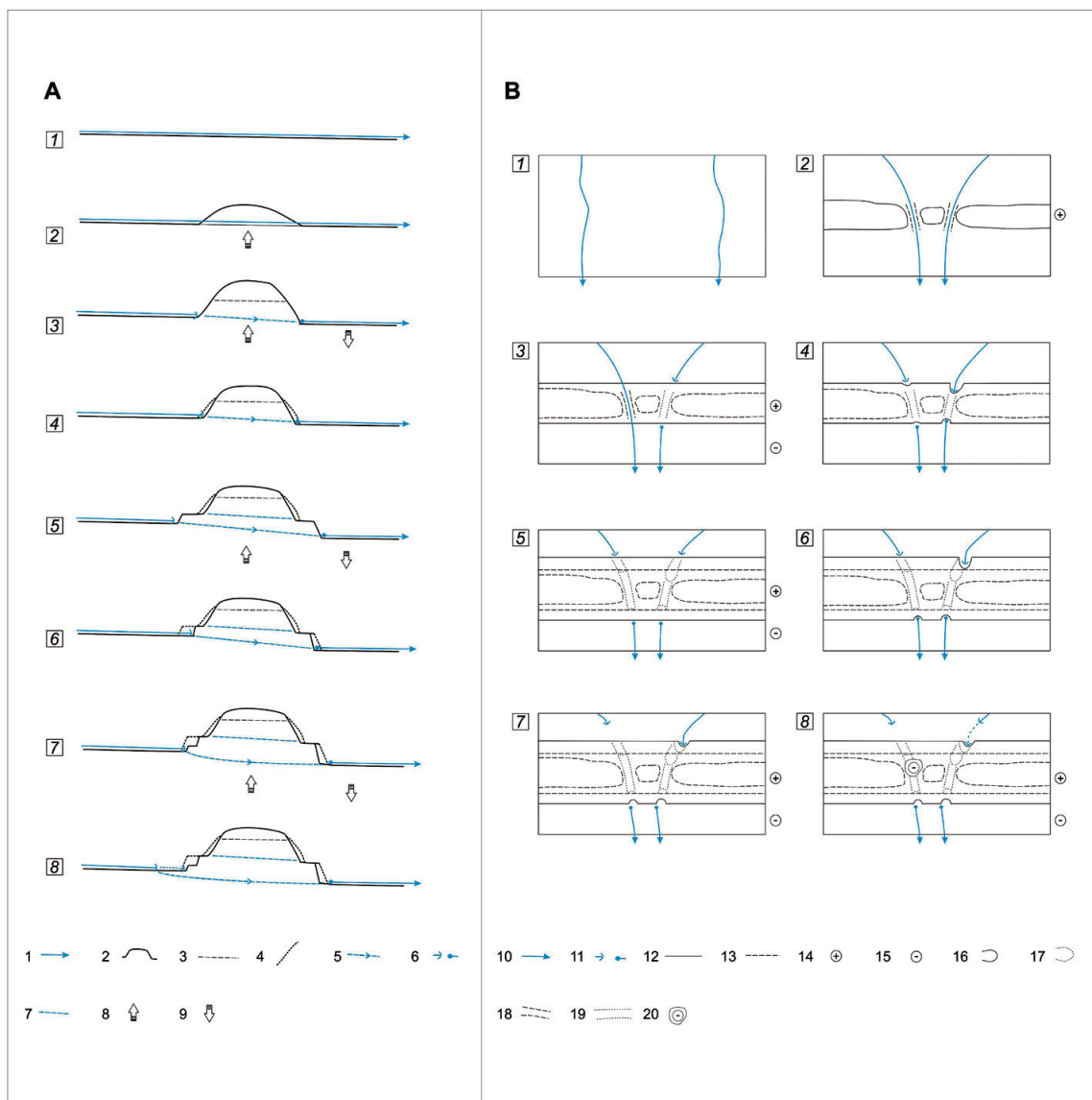
Iako se dosad smatralo da je prvotno bila formirana depresija Ogulinsko-plašćanske zavale čije dno je potom, uglavnom pod utjecajem čestih inundacija, uravnato (Bahun, 1970), navedeni model otvara mogućnost ponešto drugačijeg redosljeda morfogenetskih zbivanja. U prvom se redu tu misli na primarno krško denudacijsko zaravnavanje čitavog prostora na kojem se razvila i površinska drenažna mreža (Bočić i dr., 2015). Nakon toga uslijedilo je orografsko, tj. tektonsko odvajanje prostora zavale od dotadašnje zaravni uz stvaranje površinskih probojnica te kasnije i podzemnih provodnika. Slični slijed zbivanja na prostoru slovenskog Krasa utvrdio je Gams (1998). Međutim, daljnje korozijsko uravnavanje dna nikako nije isključeno. Na primjerima krških polja Jiloca i Gallocanta u Španjolskoj Gracia i dr. (2002; 2003) utvrdili su inicijalno neotektonsko oblikovanje zavala te daljnje korozijsko produbljivanje i zaravnjavanje dna krških polja. Pri tome su se formirale denudacijske površine na nekoliko razina. U Ogulinsko-plašćanskoj zavali također su uočene zaravnjene površine na nekoliko razina, ali ih tek treba istražiti.

(6) This was the phase of tectonic settling of the landscape. There was no significant karstification in the depths, and as a result, the blind valleys and pocket valleys developed on the surface, while existing active conduits continued to develop and expand.

(7) Reactivation of tectonic activities led to further up-lifting of the bottom of the basin and the zone of the Krpel barrier. This in turn led to a new increase in the hydraulic gradient, which causes the start of a reverse shift of the ponors.

(8) The main characteristic of this phase was the advanced karstification underground and on the surface. There was a reverse shift of the ponor zone, and development of underground conduits that took over the function of the surface drainage network in the contact zone between the bottom of the basin and the Krpel barrier. At the surface, karst depressions developed and in part covered up the traces of surface runoff from the bottom of the basin towards the plateau.

Although it was previously thought that the depression of the Ogulin–Plaški basin was formed first, and its bottom was then flattened under the influence of frequent inundations (Bahun, 1970), this model opens the possibility for a somewhat different series of morphogenetic events. Above all, this refers to the primary karst denudation and flattening of the entire area where the surface drainage network was developed (Bočić et al., 2015). This was then followed by an orographic, i.e. tectonic, separation of the basin area from the former plateau, with the creation of surface water gaps, and later underground conduits. A similar course of events was established by Gams (1998) for the Kras area in Slovenia. However, further corrosion flattening of the bottom should certainly not be excluded. For example, the Jiloca and Gallocanta karst poljes in Spain were determined to initially be neo-tectonically formed basins, subjected to subsequent corrosive deepening and flattening of the bottom of the karst poljes (Gracia et al., 2002; 2003). During this process, denudation surfaces were formed at several levels. In the Ogulin–Plaški basin, flattening of the surface at several levels has also been observed, though this requires further in-depth study.



Sl. 9. Shematizirani model razvoja reljefa istraživanog područja. Razvojne faze 1–8 (za objašnjenje vidi tekst) prikazane su u profilu (A) i tlocrtu (B). Legenda za profil (A): 1 – površinsko otjecanje, 2 – reljef, 3 – suhe doline, 4 – ponorske doline i izvorišni obluci, 5 – razina podzemnog otjecanja, 6 – ponor, izvor, 7 – reliktna razina podzemnog otjecanja, 8 – relativno tektonsko izdizanje, 9 – relativno tektonsko spuštanje. Legenda za tlocrt (B): 10 – smjer površinskog otjecanja, 11 – ponor, izvor, 12 – relativno izdignut teren, 13 – teren relativno izdignut u prethodnim fazama, 14 – relativno tektonsko izdizanje, 15 – relativno tektonsko spuštanje, 16 – aktivna ponorska dolina i izvorišni obluci, 17 – reliktna ponorska dolina i izvorišni obluci, 18 – aktivne probojnice, 19 – suhe probojnice, 20 – krška uvala

Fig. 9 Schematic model of the development of the relief in the study area. Development phases 1–8 (for explanations, see text) are shown in profile (A) and map view (B). Legend for profile (A): 1 – surface streams, 2 – relief, 3 – dry valley, 4 – ponor valley and pocket valleys, 5 – level of underground water flow, 6 – ponor, spring, 7 – relict level of underground water flow, 8 – relative tectonic up-lifting, 9 – relative tectonic down-lifting. Legend for map view (B): 10 – direction of surface runoff, 11 – ponor, spring, 12 – relative up-lifted terrain, 13 – terrain is relatively up-lifted in comparison to previous phases, 14 – relative tectonic up-lifting, 15 – relative tectonic down-lifting, 16 – active ponor valley and pocket valley, 17 – relict ponor valley and pocket valleys, 18 – water gaps, 19 – wind gaps, 20 – karst uvala

Zaključak

Istraživanje geomorfoloških značajka krša na području Oštarija i Tounja omogućilo je stvaranje

Conclusions

Researching the geomorphological characteristics of karst in the Oštarije and Tounj area has en-

konceptualnog morfogenetskog modela nastanka Ogulinsko-plašćanske zavale. U okviru tog modela najstarija pretpostavljena faza oblikovanja reljefa bila je arealno korozivno zaravnavanje širokog prostora Unsko-koranske zaravni koje je obuhvaćalo i prostor današnje Ogulinsko-plašćanske zavale. Na čitavom prostoru Unsko-koranske zaravni potom se razvila površinska hidrografska mreža. Oživljavanjem tektonskih aktivnosti vršila se destrukcija te postupna reorganizacija površinske hidrografske mreže u okršeno podzemlje. Tektonsko formiranje Krpelskog praga dovelo je do orografskog zatvaranja Ogulinsko-plašćanske zavale te koncentriranja površinskih tokova u nekoliko koridora. Jedan od tih koridora bilo je i područje Oštarije-Tounj. Daljnje izdizanje Krpelskog praga dovelo je do stvaranja potpune orografske barijere na odvodnom koridoru te do postupnog poniranja površinskih tekućica. Voda ponornica denudacijskim je radom stvorila krške podzemne provodnike čiji je razvoj bio usmjeren tektonskim diskontinuitetima. Daljnjim napredovanjem okršavanja stvaralo se više razina u krškom podzemlju od kojih je najniža aktivni provodnik, a oni iznad povremeno su aktivni ili su izgubili svoju funkciju. Iako Bahunov model (Bahun, 1970) *denudacijskog produbljivanja i inundacijskog korozivnog zaravnavanja* i dalje nije u potpunosti isključen, ova istraživanja upućuju i na mogućnost ponešto drugačijeg modela morfogeneze Ogulinsko-plašćanske zavale koji bi se mogao sažeti kao *zaravnavanje i zatvaranje*. Na temelju dostupnih podataka može se pretpostaviti da je proces počeo krajem pliocena ili početkom pleistocena, ali za daljnje rješavanje ovog geomorfološkog problema te preciznije smještanje ovih događaja na vremensku skalu bit će potrebna daljnja istraživanja.

Ovom prilikom zahvaljujem svim speleolozima i članovima speleoloških udruga koji su svojim istraživanjima pridonijeli prikupljanju podataka o speleološkim objektima analiziranim u radu. Bez njihovog dugotrajnog i požrtvovnog rada ne bi bilo ovih podataka niti njihove analize. Također zahvaljujem anonimnim recenzentima koji su svojim korisnim savjetima dodatno unaprijedili ovaj rad.

abled the creation of a conceptual, morphogenetic model of the formation of the Ogulin-Plaški basin. Within the framework of this model, the earliest assumed phase of relief shaping was the areal corrosive flattening of the broader area of the Una-Korana plateau, which also included the present-day Ogulin-Plaški basin. Throughout the entire Una-Korana plateau, a surface hydrographic network was developed. With the revival of tectonic activities, destruction and gradual reorganisation of the surface hydrographic network into the karstified underground conduits. The tectonic formation of the Krpel barrier led to the orographic closure of the Ogulin-Plaški basin, and a concentration of the surface watercourses into several corridors. One of these corridors was the area of Oštarije-Tounj. Further raising of the Krpel barrier led to the creation of complete orographic barrier of the drainage corridor, and to the gradual sinking of surface watercourses. The denudation action of the sinking rivers created underground karst conduits whose development was directed by tectonic discontinuities. Further karstification created multiple levels in the karst underground, where the lowest was the active conduit, and those above were temporarily active or lost their function. Though the Bahun model (Bahun, 1970) of *denudation deepening and inundation corrosive flattening* can still not be completely excluded, this study indicates the possibility of a somewhat different morphogenetic model of the Ogulin-Plaški basin that could be summarised as *flattening and closure*. Based on the available data, it can be assumed that this process began in the late Pliocene or early Pleistocene, but further research will be needed to further solve this geomorphological problem and to place these events more accurately on a time scale.

I would like to thank all the cavers and speleologists, members of speleological societies who contributed to the cave explorations and collection of data on the speleological objects analysed in this paper. Without their long and dedicated work, there would be no such data or analysis thereof. I would also like to thank the two anonymous reviewers who further improved this work with their useful remarks.

**Geomorfologija
krša na području
Oštarije-Tounj
i njezin značaj u
geomorfološkoj
evoluciji šireg
područja**

**Karst
geomorphology
in the Oštarije-
Tounj area and its
significance in the
geomorphological
evolution of the
broader area**

**Zahvala
Acknowledgement**

Literatura
Literature

- Babić, Lj., Lacković, D., Horvatinčić, N., 1996: Meteoric phreatic speleothems and the development of cave stratigraphy: an example from Tounj Cave, Dinarides, Croatia. *Quaternary science reviews* 15 (10), 1013–1022.
- Bahun, S., 1968: Geološka osnova krškog područja Slunj – Vrbovsko, *Geološki vjesnik* 21, 19–82.
- Bahun, S., 1970: Geološka osnova krške zavale Ogulin – Plaški, Krš Jugoslavije 7 (1), 1–20.
- Barišić, T., 1989: Nastavak istraživanja Špilje u kamenolomu Tounj i špilje Tounjčice, *Speleolog* 36/37, 75.
- Barišić, T., 1990a: Nastavak istraživanja u Špilji u kamenolomu Tounj i špilji Tounjčici, *Velebiten* 1/90, 15–20.
- Barišić, T., 1990b: Osam kilometara, *Velebiten* 4/90, 13–19.
- Barišić, T. (ur.), 2011, Špilja u kamenolomu – Tounj i špilje Tounjčice i Mala Tounjčica. *Speleološki nacrti*, KSHPS, SO Velebit, Zagreb.
- Barudžija, U., Korač, N., 2011: Geološka podloga špilje u kamenolomu Tounj, *Speleološki klub „Ozren Lukić”, Elaborat*, Zagreb, 1–29.
- Bočić, N., 1997: Neke nove jame u okolici Oštarija kraj Ogulina, *Speleo'zin* 6, 13–16.
- Bočić, N., 2011: Geomorfološka obilježja Špilje u kamenolomu Tounj i špilje Tounjčice s okolnim područjem, *Javna ustanova za upravljanje zaštićenim prirodnim vrijednostima Karlovačke županije, Elaborat*, Karlovac, 1–48.
- Bočić, N., Pahernik, M., Bogнар, A., 2010: Geomorfološke značajke Slunjske zaravnj. *Hrvatski geografski glasnik* 72, 5–26, doi.org/10.21861/hgg.2010.72.02.01.
- Bočić, N., Pahernik, M., Mihevc, A., 2015: Geomorphological significance of the palaeodrainage network on a karst plateau: The Una–Korana plateau, Dinaric karst, Croatia, *Geomorphology* 247, 55–65, doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.01.028.
- Bognar, A., 1999: Geomorfološka regionalizacija Hrvatske, *Acta Geographica Croatica* 34, 7–29.
- Božičević, S., 1955: Ponor Mandelaja kod Oštarija, *Speleolog* 1–2, 24–27.
- Burbank, D. W., McLean, J. K., Bullen, M., Abdrakhmatov, K. Y., Miller, M., M., 1999: Partitioning of intermontane basin by thrust-related folding, Tien Shan, Kyrgyzstan, *Basin Research* 11, 75–92, doi.org/10.1046/j.1365-2117.1999.00086.x
- Butorac, V., Buzjak, N., 2020: Geodiversity and Landscape Services in the Region of Ogulinsko-Plašćanska Zavala, Croatia, *Ekológia (Bratislava)* 39 (2), 130–144, doi:10.2478/eko-2020-0010
- Čepelak, M., Garašić, M., 1982: Tumač zapisnika speleoloških istraživanja, KSPSH, Zagreb.
- Dauteuil, O., Mart, Y., 1998: Analogue modeling of faulting pattern, ductile deformation, and vertical motion in strike-slip fault zones, *Tectonics* 17 (2), 303–310. doi:10.1029/97tc03410.
- Frangješ, S., 2012: Topografske karte područja Hrvatske u razdoblju 1946. do 1990. godine, u: Frangješ, S. (ur.): *Topografske karte na području Republike Hrvatske, Državna geodetska uprava*, Zagreb, 89–194.
- Gams, I., 1986: Kontaktni fluviookras, *Acta Carsologica* 14/15, 71–88.
- Gams, I., 1998: Geomorphogenetics of the Classical Karst – Kras, *Acta Carsologica* 27/2, 181–198.
- Gams, I., 2001: Notion and forms of contact karst, *Acta Carsologica*, 30 (2), 33–46.
- Gams, I., Zeremski, M., Marković, M., Lisenko, S., Bogнар, A., 1985: Uputstvo za izradu detaljne geomorfološke karte SFRJ 1: 100 000, Beograd.
- Gerasimov I. P., Mescherikov J. A., 1968: Morphostructure. In: *Geomorphology. Encyclopedia of Earth Science*. Springer, Berlin, Heidelberg, 731–732.
- Gorjanović-Kramberger, D., 1914: Nekadnji otvoreni tok Dobre i Krški ravnjak u Ogulinu, *Vijesti geološkog povjerenstva* 3–4, 101–106.
- Gracia, F. J., Gutiérrez, F., Gutiérrez, M., 2002: Origin and evolution of the Gallocanta polje (Iberian Range, NE Spain), *Zeitschrift für Geomorphologie* 46 (2), 245–262, DOI:10.1127/zfg/46/2002/245.
- Gracia, F. J., Gutiérrez, F., Gutiérrez, M., 2003: The Jiloca karst polje-tectonic graben (Iberian Range, NE Spain), *Geomorphology* 52, 215–231, doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00257-X.
- Gunn, J., 2006: Fluviokarst, in: Gunn, J. (ed): *Encyclopedia of caves and karst science*, Taylor and Francis, London, 751–753.
- Hranilović, H., 1901: Geomorfološki problemi iz hrvatskog krasa, *Glasnik hrvatskog naravoslovnog društva* 19, 93–133.
- Jalžić, B., 1989a: Nova istraživanja kanala „Aquatorium” u jami Mandelaji kod Oštarija, *Naše planine* 3–4, 89.
- Jalžić, B., 1989b: Nova otkrića u špilji Tounjčici, *Naše planine* 3–4/1989, 89.
- Jalžić, B., 2004: Aquatorium – novi kanal u jami Mandelaja kod Oštarija, *Subterranea Croatica* 3, 40–43.
- Knežević, R., 1995: Režim tekućica Ogulinsko-plašćanske zavale, u: Pepeonik, Z. (ur.): *Zbornik 1. Hrvatskog geografskog kongresa*, Zagreb, 170–180.
- KSHPS, 2020: Najveće hrvatske špilje. Komisija za speleologiju HPS, <https://www.hps.hr/specijalisticke-djelatnosti/speleologija/najvece-hrvatske-spilje/> [5. 4. 2020.]
- Kovač Konrad, P., 2018: Speleogenic factors and processes in karst conduits of Zagorska Mrežnica spring cave (Croatia), *Dissertation*, University of Nova Gorica.
- Lacković, D., 1987: Špilja u kamenolomu Tounj. *Speleolog* 34/35, 27–28.
- Lacković, D., 1993: Geološki uvjeti postanka Špilje u kamenolomu Tounj, *Diplomski rad*, PMF i RGNF Sveučilišta u Zagrebu, 1–42.
- Lacković, D., 2003: Sige – što su i kako nastaju?, *Katalog zbirke siga mineraloško-petrografskog odjela Hrvatskog prirodoslovnog muzeja*, Zagreb.
- Lindić, M., Lindić, J., 1995: Špilja Mala Tounjčica. *Speleolog* 42/43, 35–36.
- Lukić, O., 1983: Istraživanje Mandelaje, *Naše planine* 7–8, 181–182.
- Lukić, O., 1987: Iza sifona u Mandelaji, *Naše planine* 3–4, 93.
- Mihevc, A., 1991: Morfološke značilnosti ponornega kontaktnega krasa v Sloveniji, *Geografski vestnik* 63, 41–50.
- Novak, R., 2013: Mandelaja u Oštarijama, *Speleolog* 61, 47–50.
- Pahernik, M., 1998: Utjecaj klime i reljefa na intenzitet površinske korozije karbo-

- nata gorske skupine Velike Kapele, *Acta Geographica Croatica* 33, 47-57.
- Pahernik, M., 2000: Prostorni raspored gustoća ponikava SZ dijela Velike Kapele - rezultati računalne analize susjedstva, *Geoadria* 5, 105-120, doi.org/10.15291/geoadria.156.
- Pahernik, M., 2005: Geomorfologija Gorskog kotar – primjena geografsko informacijskog sustava u istraživanju reljefa, Disertacija, PMF, Sveučilište u Zagrebu, 1-278
- Pahernik, M., 2012: Prostorna gustoća ponikava na području Republike Hrvatske, *Hrvatski geografski glasnik* 74 (2), 5-26, doi.org/10.21861/HGG.2012.74.02.01.
- Palmer, A., 2007: *Cave Geology, Cave books*, Dayton.
- Pavlič, T., 2017: Geomorfološka obilježja doline Ogulinske Dobre, Diplomski rad, Geografski odsjek PMF-a, Zagreb, 1-46.
- Piccini, L., 2011: Recent developments on morphometric analysis of karst caves, *Acta Carsologica* 40 (1), 43-52, doi.org/10.3986/ac.v40i1.27.
- Pejić, N., 2013: Geomorfološke značajke Ogulinsko-plašćanske zavale, Diplomski rad, Geografski odsjek PMF-a, Zagreb, 1-47.
- Poljak, J., 1925/26: Geomorfologija i hidrografija okoliša Ogulina i Ogulinskog zagorja. *Glasnik Hrvatskog prirodoslovnog društva* 37/38, 111-137.
- Poljak, J., 1935: Pećine okolice Ogulina, Velike Paklenice i Zameta. *Rasprave geološkog instituta Kraljevine Jugoslavije* 5, 2-94.
- Posarić, I., 1961: Pećina Tounjčica, *Speleolog* 9, 10-13.
- Prelogović, E., Pribičević, B., Dragičević, I., Buljan, R., Tomljenović, B., 2001: Recentni strukturni sklop prostora Dinarića, Elaborat, RGNF, INA-Naftaplina, Elaborat, Zagreb, 1-30.
- Prpić, M., 2019: Tounjčica speleoronjenjem spojena sa Špiljom u kamenolomu Tounj, <https://sovelebit.wordpress.com/2019/04/01/tounjčica-speleoronjenjem-spojena-sa-spiljom-u-kamenolomu-tounj/> [2.4.2020.]
- Rnjak, G. (ur.), 2017: *Speleologija*, PDS Velebit, HPS, HGSS, SD Velebit, Zagreb.
- Schreurs, G., 1994: Experiments on strike-slip faulting and block rotation. *Geology* 22, 567-570.
- Velić, I., Sokač, B., 1981: Osnovna geološka karta 1:100000, list Ogulin, SGZ Beograd i GZ Zagreb.
- Velić, I., Sokač, B., Ščavničar, B., 1982: Osnovna geološka karta 1:100000, tumač za list Ogulin, SGZ Beograd i GZ Zagreb.
- Vračar, V., 2000: Geomorfološke karakteristike Špilje u kamenolomu Tounj, Diplomski rad PMF Sveučilišta u Zagrebu, 1-42.
- VGI, 1974–1976: Topografske karte mjerila 1 : 25 000, list 369-4-1, Vojnogeografski institut, Beograd.

**Geomorfologija
krša na području
Oštarije–Tounj
i njezin značaj u
geomorfološkoj
evoluciji šireg
područja**

Karst
geomorphology
in the Oštarije–
Tounj area and its
significance in the
geomorphological
evolution of the
broader area