

# Geomorfološka i hidrološka obilježja manjih ponornica - primjeri s kordunskog krša

---

Rekić, Ena

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:953213>

Rights / Prava: [In copyright](#)/Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-13**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



**Ena Rekić**

**GEOMORFOLOŠKA I HIDROLOŠKA OBILJEŽJA MANJIH  
PONORNICA - PRIMJERI S KORDUNSKOG KRŠA**

**Diplomski rad**

**Zagreb  
2020.**

**Ena Rekić**

**GEOMORFOLOŠKA I HIDROLOŠKA OBILJEŽJA MANJIH  
PONORNICA - PRIMJERI S KORDUNSKOG KRŠA**

**Diplomski rad**

predan na ocjenu Geografskom odsjeku  
Prirodoslovno- matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu  
radi stjecanja akademskog zvanja  
magistra struke znanosti o okolišu

**Zagreb  
2020.**

Ovaj je diplomski rad izrađen u sklopu diplomskog sveučilišnog studija Znanosti o okolišu na Geografskom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Nevena Bočića i doc. dr. sc. Ivana Čanjevca.



Sveučilište u Zagrebu  
 Prirodoslovno – matematički fakultet  
 Geografski odsjek

Diplomski rad

## GEOMORFOLOŠKA I HIDROLOŠKA OBILJEŽJA MANJIH PONORNICA- PRIMJERI S KORDUNSKOG KRŠA

Ena Rekić

Kordunski krš predstavlja dodirno područje dviju megageomorfoloških regija: Panonske ne-krške i Dinarske krške. Otjecanjem vode dolazi do oblikovanja reljefa i pojave kontaktnog krša. Cilj rada bio je geološko-geomorfološkim i hidrološkim analizama istražiti uvjete nastanka i razvoja manjih ponornica i njihovih drenažnih bazena na četiri primjera. Geološko-geomorfološkim analizama istraživana je utjecaj geološke građe podloge na reljef koji je ponornica svojim tokom oblikovala. Proučavani su stijenski odnosi nepropusnih i propusnih naslaga, njihova visinska raspodjela, prostorni raspored te rasjedi i pukotinski sustavi. Na tako malom području istraživanja utvrđena su tri morfogenetska tipa reljefa : fluviodenudacijski, fluviokrški i krški. Hidrokemijska svojstva vode ovise o geološkoj građi podloge stoga su na primjeru Dunjak izmjereni fizikalno-kemijski parametri vode koji su odgovarali vrijednostima očekivanim za karbonatnu podlogu. Izmjeren je protok vode prije i nakon ulaska u krški vodonosnik koji je ukazivao na hidrološki period s malo padalina što je imalo utjecaj na koncentracije mjerenih fizikalno-kemijskih parametara vode.

65 stranica, 5 tablica, 41 grafički prilog, 66 bibliografskih referenci; izvornik na hrvatskom jeziku

**Ključne riječi:** geomorfologija, hidrologija, kontaktni krš, Kordun, ponornica, drenažni bazen

**Voditelji:** izv. prof. dr. sc. Neven Bočić  
 doc. dr. sc. Ivan Čanjevac

**Povjerenstvo:** izv. prof. dr. sc. Neven Bočić  
 doc. dr. sc. Ivan Čanjevac  
 izv. prof. dr. sc. Blanka Cvetko Tešović  
 izv. prof. dr. sc. Marija Gligora Udovič

Tema prihvaćena: 8.2.2018.

Rad prihvaćen: 10.9.2020.

Rad je pohranjen u Središnjoj geografskoj biblioteci Prirodoslovno - matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Zagrebu, Marulićev trg 19, Zagreb, Hrvatska

## BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb  
Faculty of Science  
Department of Geography

Master Thesis

### GEOMORPHOLOGICAL AND HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS OF SMALL SINKING STREAMS- EXAMPLES FROM KORDUN KARST

Ena Rekić

Kordun karst represents the meeting belt of two megageomorphological regions: Panonian non-karst and Dinaric karst. Water runoff has an impact on relief formation, resulting in contact karst formation. Research aim of this thesis was to establish conditions of formation and development of small sinking streams and their watersheds on four examples. Geological-geomorphological analysis were used to explore impact of bedrock geology on relief. The relationship between permeable and impermeable rocks, hypsometry, spatial distribution, faults and fracture systems were analyzed. In such a small area of research, 3 types of genetic relief were established: fluvioerosional, fluviokarstic and karstic. Hydrochemical water characteristics depend on bedrock geology, therefore, measured physico-chemical properties of Dunjak sinking stream were corresponding to values expected for carbonate bedrock. The water flow was measured before and after entering the karst aquifer, which indicated a hydrological period with little precipitation that had an impact on the concentrations of the measured physico-chemical parameters of the water.

65 pages, 5 tables, 41 figures, 66 references; original in Croatian

Keywords: geomorphology, hydrology, contact karst, Kordun, sinking stream, watershed

Supervisors: Neven Bočić, PhD, Associate Professor  
Ivan Čanjevac, PhD, Assistant Professor

Reviewers: Neven Bočić, PhD, Associate Professor  
Ivan Čanjevac, PhD, Assistant Professor  
Blanka Cvetko Tešović, PhD, Associate Professor  
Marija Gligora Udovič, PhD, Associate Professor

Thesis title accepted: 8.2.2018.

Thesis accepted: 10.9.2020.

Thesis deposited in Central Geographic Library, Faculty of Science, University of Zagreb, Marulićev trg 19, Zagreb, Croatia.

## Sadržaj

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Uvod .....  | 1  |
| 1.1   | Otjecanje vode u kršu .....                                       | 1  |
| 1.2   | Ulaz vode u krški sustav.....                                     | 2  |
| 1.3   | Kontaktни krš .....   | 3  |
| 1.4   | Dosadašnja istraživanja kontaktnog krša na području Korduna ..... | 4  |
| 2     | Područje istraživanja.....  | 6  |
| 2.1   | Geološka obilježja istraživanih lokaliteta .....                  | 11 |
| 2.1.1 | Dunjak.....   | 11 |
| 2.1.2 | Kučinić Selo.....   | 13 |
| 2.1.3 | Tatar varoš .....   | 14 |
| 2.1.4 | Kremenita Glava .....   | 16 |
| 3     | Metode istraživanja.....  | 19 |
| 3.1   | Definiranje drenažnog bazena ponornice .....                      | 19 |
| 3.2   | Morfometrija .....  | 20 |
| 3.3   | Geomorfološka obilježja i geološki uvjeti razvoja reljefa .....   | 22 |
| 3.4   | Analiza fizikalno-kemijskih parametara vode.....                  | 23 |
| 3.4.1 | <i>In-situ</i> mjerenje .....                                     | 23 |
| 3.4.2 | Prikupljanje uzoraka i laboratorijska analiza .....               | 24 |
| 3.5   | Hidrometrijska analiza .....                                      | 26 |
| 3.6   | Trasiranje.....   | 27 |
| 4     | Rezultati i rasprava .....  | 27 |
| 4.1   | Dunjak .....  | 27 |
| 4.1.1 | Definiranje drenažnog bazena ponornice.....                       | 27 |
| 4.1.2 | Morfometrija.....   | 27 |
| 4.1.3 | Geomorfološka obilježja i geološki uvjeti razvoja reljefa .....   | 30 |
| 4.1.4 | Analiza fizikalno-kemijskih parametara vode .....                 | 34 |
| 4.2   | Kučinić Selo .....  | 42 |
| 4.2.1 | Definiranje drenažnog bazena ponornice.....                       | 42 |
| 4.2.2 | Morfometrija .....  | 42 |
| 4.2.3 | Geomorfološka obilježja i geološki uvjeti razvoja reljefa .....   | 44 |
| 4.3   | Tatar Varoš.....  | 47 |
| 4.3.1 | Definiranje drenažnog bazena ponornice.....                       | 47 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.3.2 | Morfometrija.....   | 47 |
| 4.3.3 | Geomorfološka obilježja i geološki uvjeti razvoja reljefa ..... | 50 |
| 4.4   | Kremenita Glava .....   | 52 |
| 4.4.1 | Definiranje drenažnog bazena ponornice.....                     | 52 |
| 4.4.2 | Morfometrija.....   | 52 |
| 4.4.3 | Geomorfološka obilježja i geološki uvjeti razvoja reljefa ..... | 55 |
| 5     | Zaključak .....   | 58 |
| 6     | Literatura .....  | 60 |

# 1 Uvod

Područje Kordunskog krša odlikuje se specifičnim geomorfološkim i hidrološkim značajkama. To je prijelazno područje između Dinarske krške i Peripanonske ne-krške regije što je imalo utjecaj na oblikovanje reljefa i otjecanje vode na takvim područjima. Na istraživanom području postoji puno malih ponornica, a odabrane su one na sljedećim lokalitetima: Dunjak, Kučinić Selo, Tatar Varoš i Kremenita Glava. Razlozi odabira su približno jednaka veličina porječja, prethodna istraživanja, dostupnost te geografski položaj. Od navedenih lokaliteta Dunjak je izabran kao glavni primjer te su dodatno istražene neke hidrološke značajke.

Cilj rada je odrediti temeljne geološko-geomorfološke i hidrološke značajke te utvrditi uvjete nastanka i razvoja ponornica na istraživanom području.

Specifični ciljevi istraživanja:

- geološke i geomorfološke analize na četiri primjera drenažnih bazena ponornica na istraživanom području
- određivanje osnovnih fizikalno-kemijskih parametara vode prije i nakon ulaska u krški vodonosnik na primjeru Dunjak
- mjerenje brzine toka i protoka vode na ponoru i izvoru na primjeru Dunjak
- dokazivanje povezanosti ponora i izvora trasiranjem ponornice fluorescentom bojom na primjeru Dunjak
- određivanje uvjeta nastanka i razvoja manjih ponornica na temelju sinteze dobivenih geoloških, geomorfoloških i hidroloških podataka

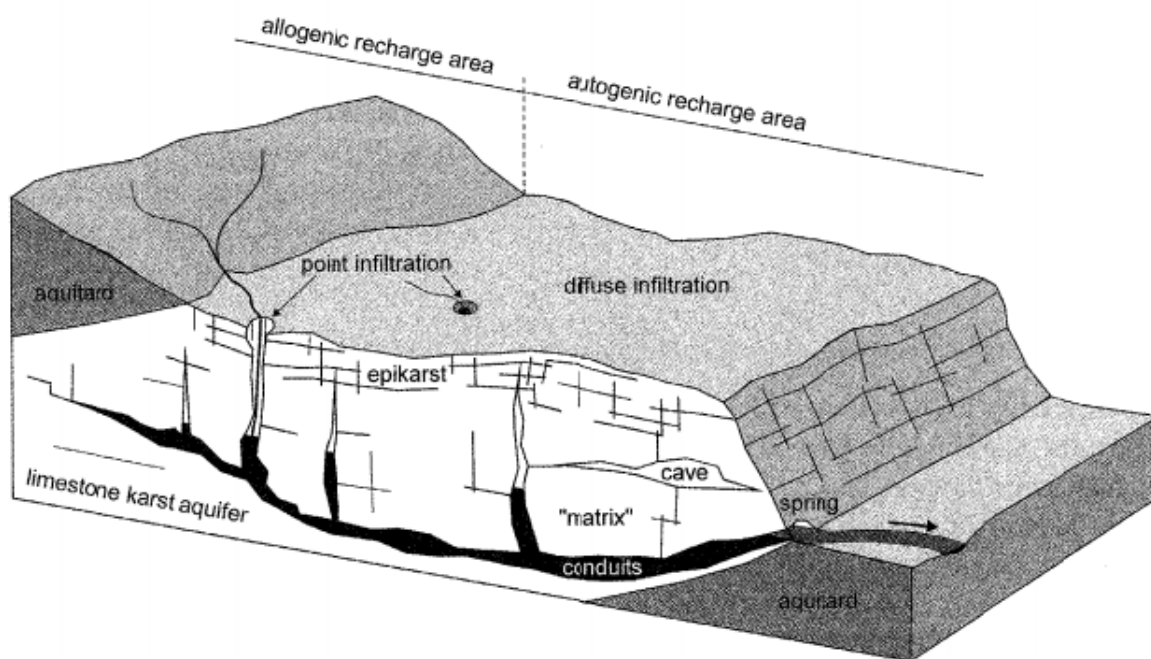
## 1.1 Otjecanje vode u kršu

Krška područja odlikuju se specifičnim geomorfološkim i hidrološkim značajkama koja je voda svojim djelovanjem oblikovala. Takva su područja najčešće građena od karbonatnih stijena, vapnenaca i dolomita. Glavne značajke takvih stijena su dobra topljivost i sekundarna poroznost. Što je veći stupanj okršenosti, to će rasti propusnost takvih stijena. Okršavanje je sveobuhvatni proces kojim nastaju krška područja. Pukotine koje su nastale tektonskim pokretima u karbonatnim stijenama usmjeravat će korozivno djelovanje vode s otopljenim

ugljkovim dioksidom iz zraka i tla zbog čega će doći do otapanja i sve većeg širenja pukotina. Navedene karakteristike krških terena onemogućuju zadržavanje vode na takvim površinama te će ovakva područja imat slabo razvijenu mrežu površinskih vodotoka (Ford i Williams, 2007). Zbog visoke stope infiltracije vode, posebno u dobro razvijenom kršu, površinski tok je rijetkost u usporedbi s ne-krškim područjima (Stevanović, 2015). Površinska i podzemna voda su hidraulički povezane putem brojnih krških formi koje olakšavaju izmjenu vode između površine i podzemlja (Katz i dr. 1997). Složeni podzemni sustav kanala kao i izmjena propusnih i nepropusnih slojeva stijena obilježja su gotovo svih krških sustava. Neizbježno obilježje voda tekućica u krškim područjima je djelomično ili potpuno poniranje u podzemlje (Bonacci, 1987). Vodonosnik je stijenska formacija koja ima svojstvo zadržavanja većih količina vode. Drenažni bazen podrazumijeva cijelo geografsko područje koje vodom prihranjuje bilo koje vodeno tijelo (rijeku, jezero, izvor, vodonosnik, itd.). U slučaju rijeka govorimo o porječjima, a u slučaju jezera o sljevovima (Riđanović, 1993). Drenažni bazen u kršu predstavlja složen dinamičan sustav u kojem heterogenost površinskih i podzemnih krških oblika, koji sudjeluju u cirkulaciji i pohranjivanju vode, čini istraživanja vrlo zahtjevnim. Režim otjecanja je neravnomjeran zbog neravnomjernosti ulaza i zbog retencijske sposobnosti vodonosnika koji ovise o obilježjima krškog terena.

## **1.2 Ulaz vode u krški sustav**

Postoje dva načina ulaska vode u krške sustave, autogeni i alogeni (Sl.1). Autogeni ulaz vode podrazumijeva vodu koja putem padalina dopijeva na površinu krša te se pukotinama difuzno procjeđuje u podzemlje. Alogeni ulaz vode odnosi se na vodu koja se skuplja na susjednim nepropusnim područjima i koncentrirano dotječe na krška područja putem površinskih tokova. Alogeni ulaz vode najčešće podrazumijeva ulaz vode putem ponora (Goldscheider i Drew, 2007). Osim autogenog i alogenog postoji i miješani oblik koji je kombinacija navedenih načina (Ford i Williams, 2007).



*Slika 1. Shematska ilustracija heterogenog krškog vodonosnika karakteriziranog alogenim i autogenim ulaskom vode (izvor: Goldscheider i Drew, 2007).*

### 1.3 Kontaktni krš

Kontakti krš je vrsta krša koja je formirana tamo gdje postoji alogeni unos vode iz fluvijalnog geomorfološkog sustava u krški geomorfološki sustav (Mihevc, 1991). Formiran je na hidrološki aktivnom kontaktu između površinskog i podzemnog otjecanja tekućice, kao posljedica horizontalnog ili vertikalnog rasporeda topljivih i netopljivih stijena. Faktori koji utječu na oblikovanje kontaktnog krša su: visinska razlika, protok tekućice, kemizam vode, količina transportiranog materijala, razina vodnog lica, permeabilnost topljivih stijena i tektonika (Gams, 2001). U užem smislu, kontaktnim kršem smatraju se reljefni oblici koji su nastali na kontaktu topljivih i netopljivih stijena. U širem smislu, to su pojave u reljefu nastale alogenim ulazom vode na kontaktu dviju različitih vrsta topljivih stijena (npr. vapnenca i dolomita) (Sauro, 2001). Iako su krški procesi dominantni, alogeni unos vode značajno utječe na krš i procese koji ga oblikuju. To za posljedicu ima morfološka obilježja fluvijalnog reljefa (Mihevc, 2001). Područje kontaktnog krša najčešće se dijeli u dva tipa, ponorski i izvorišni kontaktni krš.

Ponorski kontaktni krš je tip krša gdje voda dotječe iz ne-krškog drenažnog bazena na kršku površinu. Takav krš formira se tamo gdje je ne-krška površina na višoj nadmorskoj visini ili

gdje je hidraulički gradijent usmjeren na krško područje (Mihevc, 1991). Egzokrški reljefni oblici karakteristični za ponorski tip su slijepe doline, ponori i suhe doline, dok je pojava speleoloških objekata karakteristična za endokrške reljefne oblike. Špilje kontaktnog krša oblikuju tekućice alogenog dotoka i tako nastaju horizontalni kanali epifreatskog postanka (Gams, 2004). Špilje alogernih rijeka najčešće se nalaze na izlaznom dijelu slijepe doline i na granicama drugih tipova depresija kontaktnog krša s povremenim ili stalnim tokom vode. Takve špilje najčešće su duge, nemaju velike promjene u nagibu te imaju široke kanale kao rezultat mehaničke erozije i korozije (Gams, 1974).

Izvorišni dio kontaktnog krša formira se na kontaktu krškog i fluvijalnog geomorfološkog sustava, gdje vodno lice dolazi do površine i hidraulički gradijent je usmjeren iz krša van. Izvorišni obluci su tipičan reljefni oblik ovakvog tipa krša (Gunn, 2004).

#### **1.4 Dosadašnja istraživanja kontaktnog krša na području Korduna**

Herak (1951-1953) istražuje geološka obilježja područja Korane, pri čemu istražuje ovisnost specifične geološke građe s podzemnom hidrografskom mrežom. Također, opisuje i rijeku Glinu koja prolazi južnim dijelom istraživanog područja Dunjaka.

Korolija i dr. (1979) izrađuju Osnovnu geološku kartu 1 : 100 000 list Slunj, kojom je obuhvaćeno istraživano područje. Isti autori Korolija i dr. (1981) izdaju pripadajući tumač OGK 1 : 100 000 za list Slunj.

Garašić (1983) piše o Pećini kod Kućinić sela koju su detaljno istražili speleolozi iz SO PD JNA „Sutjeska“ iz Zagreba i napravili speleološki nacrt špilje. Također govori o površinskom i podzemnom toku tog područja.

Bočić (2003) u okviru Kordunskog krša, na primjeru ponornice Grabovac istražuje morfogenezu triju špilja u odnosu na njihov geomorfološki položaj. Također, na primjeru Slunjske zaravni analizirana je korelacija između razvoja slijepih i suhih fosilnih dolina i podzemnih špiljskih kanala na primjeru kontaktnog krša s krškim i fluviokrškim obilježjima reljefa.

Bočić (2004) piše o geomorfološkim uvjetima nastanka jame Ponor Jovac na kontaktnom kršu.



Bočić (2009) istražuje opće geomorfološke značajke Slunjske zaravni kao primjera prostrane krške zaravni Dinarskog krša. U sklopu doktorske disertacije prikazana je detaljna evolucija reljefa te strukturalna i egzogena geomorfološka obilježja područja Slunjske zaravni koje se nalazi u neposrednoj blizini istraživanih područja.

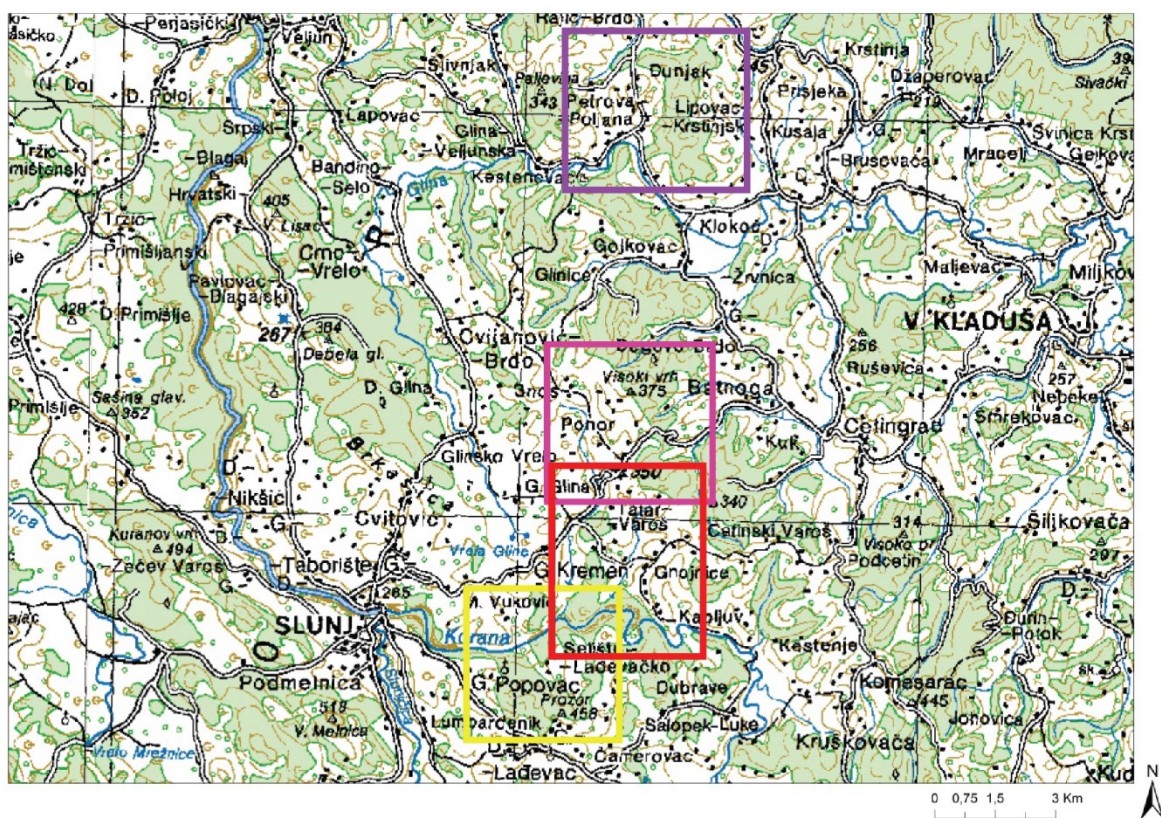
Paić (2014) u sklopu diplomskog rada istražuje geomorfološka obilježja krša na području Dunjaka. Primjenom geomorfoloških i speleoloških metoda utvrđeni su uvjeti oblikovanja i razvoja reljefa, izrađena je opća geomorfološka karta istraživanih područja i opisane su glavne faze speleogeneze speleološkog objekta Pećine.

Bočić i dr. (2015) pišu o geomorfološkom značaju paleodrenažne mreže na Unsko-Koranskoj zaravni. Glavni cilj istraživanja je produbljivanje razumijevanja ključne faze u evoluciji krških zaravni, a to je tranzicija iz fluvijalnih u krške dominantne procese oblikovanja.

Bočić i dr. (2016) daju pregled geomorfoloških obilježja Karlovačke županije koja ima specifičan geomorfološki položaj na kontaktu Panonskog bazena i Dinarida. U sklopu rada prikazane su klimatske, geološke, morfometrijske, morfogenetske i morfografske karakteristike istraživanih područja.

## 2 Područje istraživanja

Kordunski krš je dio unutarnjeg pojasa hrvatskog dinarskog krša (Herak i dr. 1969) te podrazumijeva većinom plitki krš s krškim i fluviokrškim karakteristikama (Roglić, 1974). Predstavlja prijelaz između Dinarida na jugozapadu i Peripanonske regije na sjeveroistoku. Kordunski krš dodirno je područje dviju megageomorfoloških regija, Dinarida i Panonskog bazena (Bognar, 2001). U sklopu geotektonske regionalizacije (Herak, 1991) istraživano područje nalazi se na jugozapadnom rubu Supradinarika uz tektonsku granicu prema Dinariku.

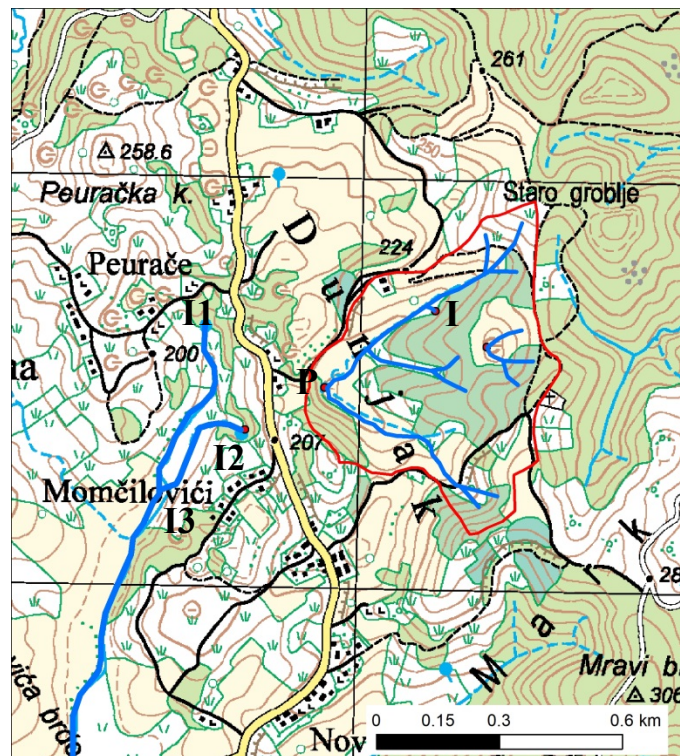


□ Dunjak      □ Kučinić Selo      □ Tatar Varoš      □ Kremenita Glava

*Slika 2. Topografska karta područja istraživanih lokaliteta (izvorno mjerilo 1: 200 000, HTRS96/TM, izvor: <https://geoportal.dgu.hr/>)*

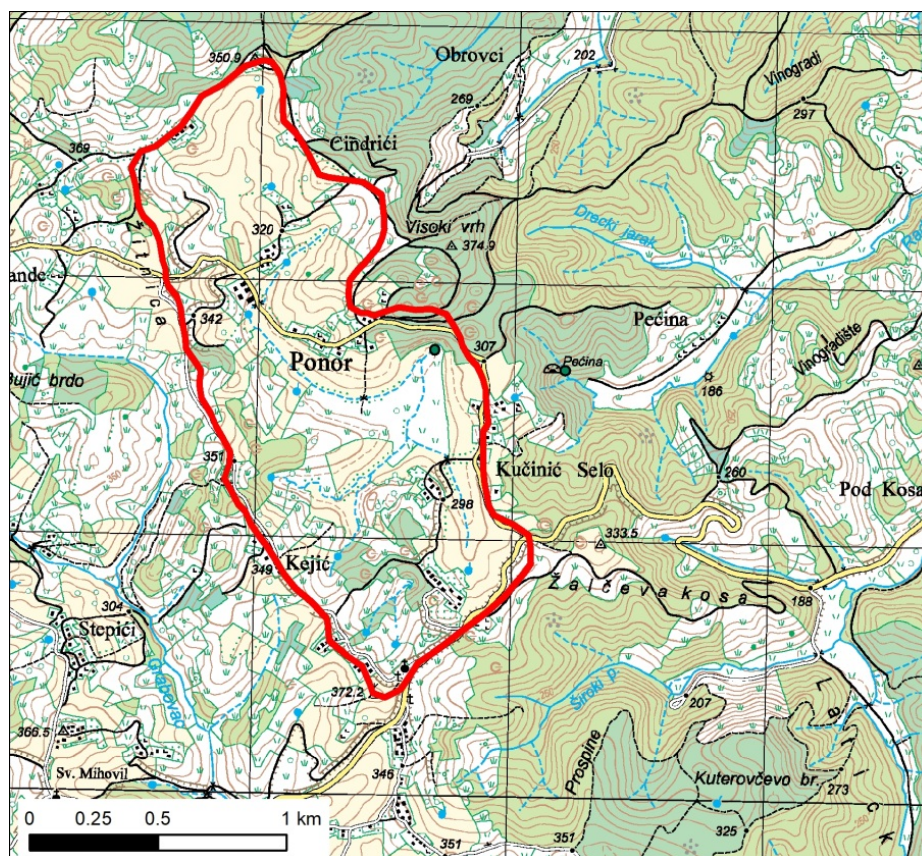
Istražena su 4 lokaliteta na području Kordunskog krša u sklopu ovog istraživanja (Sl.2). Od sjevera prema jugu: Dunjak, Kučinić Selo, Tatar Varoš i Kremenita Glava. Prema geomorfološkoj regionalizaciji Hrvatske (Bognar, 2001), istraživani lokaliteti pripadaju megageomorfološkoj regiji 1. Panonski bazen, makrogeomorfološkoj regiji 1.3. zavalu SZ Hrvatske, mezogeomorfološkoj regiji 1.3.8. Gorski masivi Petrove gore i Kremešnice s okolnim

pobrđima. U subgeomorfološku regiju 1.3.8.3. Cetingradsko pobrđe pripadaju svi lokaliteti osim Dunjaka, dok je Dunjak dio regije 1.3.8.4. Vojničko pobrđe. Obje subgeomorfološke regije nalaze se na samoj granici između dviju megagemorfoloških regija 1. Panonski bazen i 2. Gorska Hrvatska. Svi lokaliteti smješteni su unutar Karlovačke županije. Dunjak (Sl.3) je dio općine Vojnić i udaljen je oko 6 km sjeveroistočno od Slunja, Kučinić Selo (Sl.4) u općini Cetingrad nalazi se oko 3,5 km sjeveroistočno od Slunja, Tatar Varoš (Sl.5) u općini Cetingrad oko 4,5 km sjeveroistočno od Slunja te Kremenita Glava (Sl.6) smještena je oko 2 km istočno od Slunja i pripada gradu Slunju. Lokalitet Kremenita Glava dio je Slunjske zaravni (Bočić, 2003).

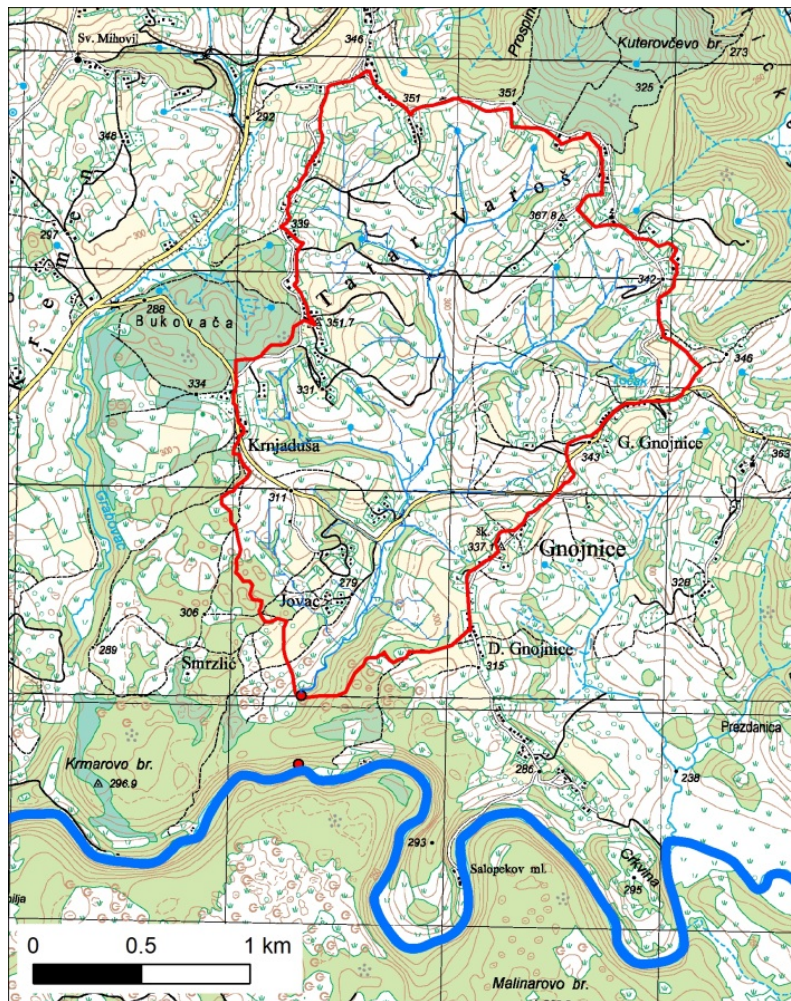


*Slika 3. Topografska karta istraživanog područja Dunjaka (izvorno mjerilo 1 : 25 000) s označenim položajem i obuhvatom drenažnog bazena i hidrološkom mrežom ponornice te mjestima uzorkovanja vode (I,P,II,I2,I3) (izvor: <https://geoportal.dgu.hr/>)*



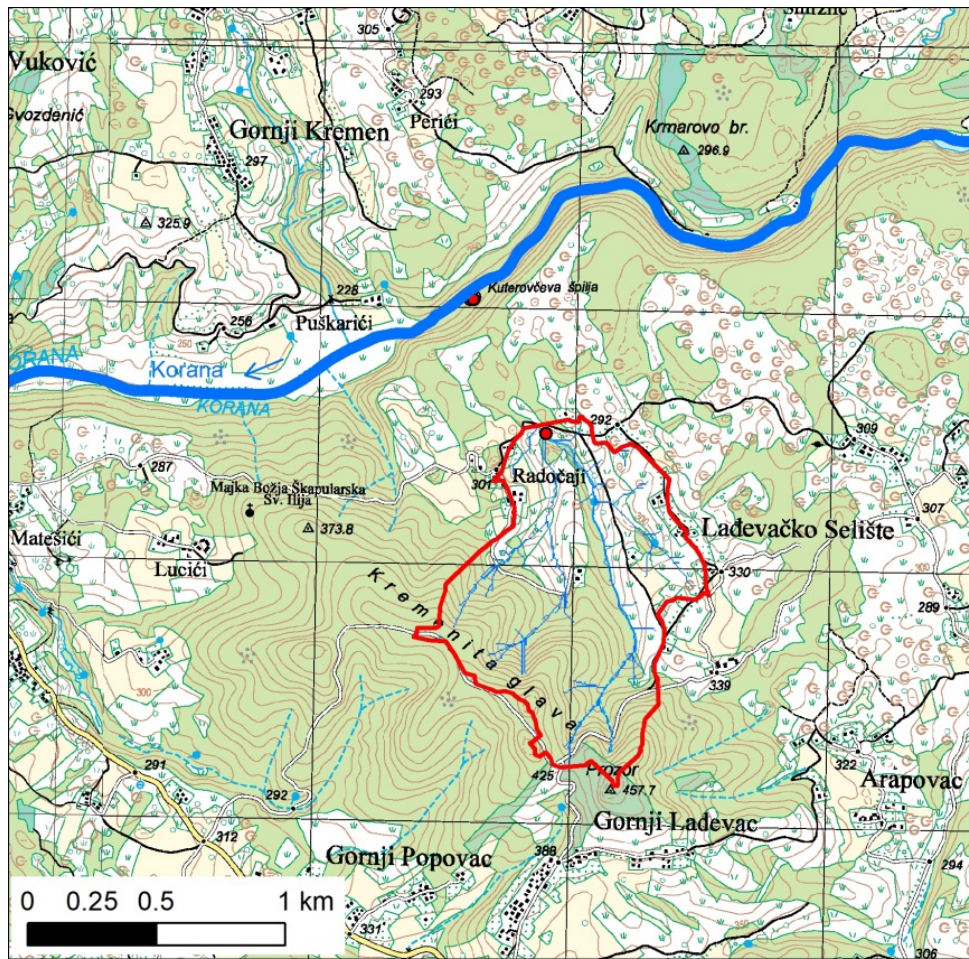


*Slika 4. Topografska karta istraživanog područja Kučinić Sela (izvorno mjerilo 1 : 25 000) s označenim položajem i obuhvatom drenažnog bazena ponorice (izvor: <https://geoportal.dgu.hr/>)*



*Slika 5. Topografska karta istraživanog područja Tatar Varoši (izvorno mjerilo 1 : 25 000) s označenim drenažnim bazenom i hidrološkom mrežom ponornice (izvor: <https://geoportal.dgu.hr/>)*



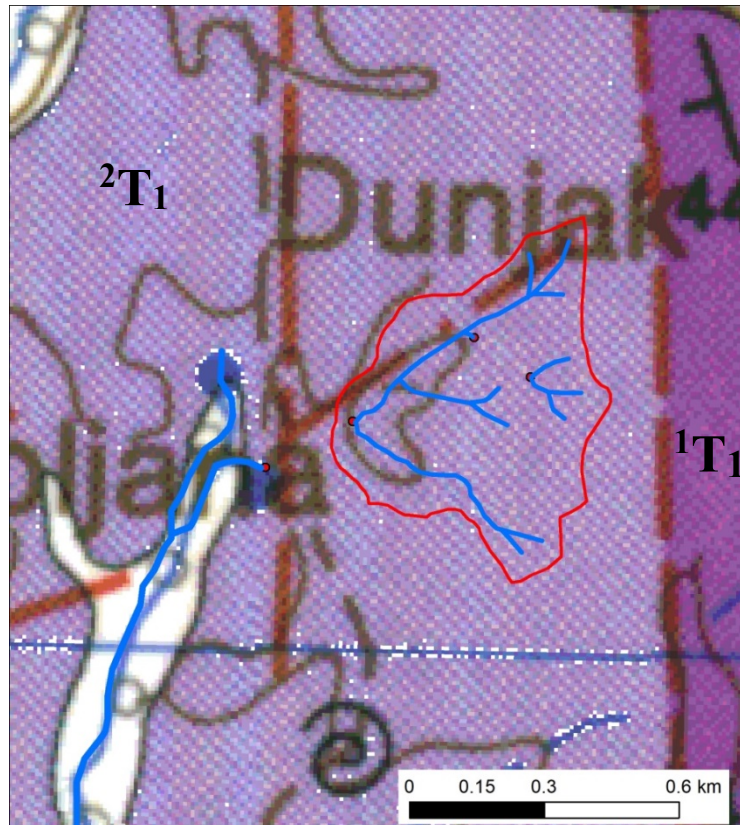


**Slika 6.** Topografska karta istraživanog područja Kremenite Glave (izvorno mjerilo 1 : 25 000) s označenim položajem i obuhvatom drenažnog bazena i hidrološke mreže ponornice (izvor: <https://geoportal.dgu.hr/>)

## 2.1 Geološka obilježja istraživanih lokaliteta

Geološka građa istraživanog područja prikazana je na Osnovnoj geološkoj karti 1:100 000, list Slunj (Korolija i dr., 1979) i detaljno opisana u pripadajućem tumaču (Sl.11) (Korolija i dr., 1981).

### 2.1.1 Dunjak



*Slika 7. Geološka karta istraživanog područja Dunjaka (izvor: Osnovna geološka karta 1:100 000, list Slunj, Korolija i dr., 1979)*

#### **<sup>1</sup>T<sub>1</sub> (Donji trijas; tinjčasti pješčenjaci i oolitični vapnenci)**

U njihovom sastavu dominiraju tipični crvenoljubičasti, tanko uslojeni tinjčasto škriljavi pješčenjaci s elementima intrabazenskih karbonatnih stijena. Karbonati su predstavljeni dolomitičnim kalkarenitima krupnijeg zrna, gdje u obliku leća prelaze lateralno ili vertikalno u klastite. Porast terigene komponente je vrlo karakterističan za donji trijas gdje se izmjenjuju pješčenjaci, siliti i peliti. U vrijeme oslabljenog donosa terigenog materijala talože se

karbonatni sedimenti kao i njihov detritus u pješčenjacima (Korolija i dr., 1981). Naslage sajskog nivoa pružaju se istočnim dijelom istraživanog područja.

### **<sup>2</sup>T<sub>1</sub> (Donji trijas; pješčenjaci, vapneni lapori i dolomiti)**

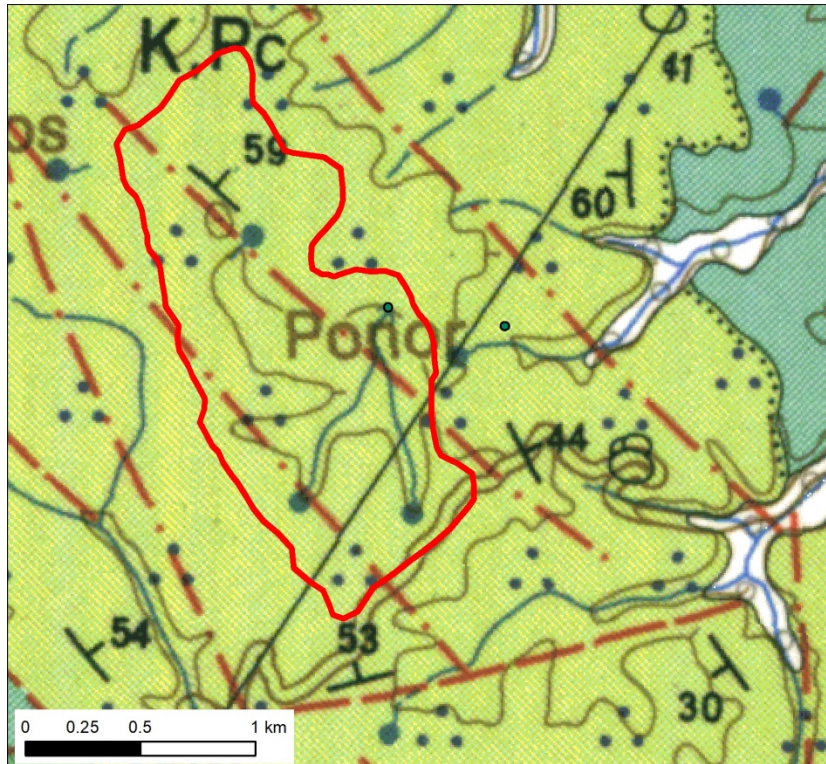
Prijelaz sajskih u kampilske naslage je kontinuiran s karakteristikama koje dosta variraju. Sastoje se od svijetlocrvenkastih dobro uslojenih tinjčastih pješčenjaka koji se izmjenjuju sa sivozelenkastim škriljavim laporima, gomoljastim laporima uz pojavu uložaka kristaliničnog vapnenca. Prema višim dijelovima lapori postupno prelaze u vapnene lapore, a ovi u vapnenice i dolomite. Među dolomitima mogu se razlikovati dva različita tipa. Jedan je pjeskovit biomikrit izgrađen od agregata mikrozrnatog kalcita, koji uklapa rijetka zrna kvarca i feldspata, te listiće muskovita. Drugi karbonatni predstavnik je siltozni kalcitski dolomit. Debljina kampilskih naslaga varira od 200-250 metara. Na kampilskim naslagama nalazi se cijeli drenažni bazen ponornice, kao i ponor te izvor (Sl.7).

### **A1 (Kvartar; aluvijalni nanos)**

Naslage aluvija razvijene su u dolini rijeke Gline te njenim pritocima i u dolini potoka Petkovac i Markovac. Ovi sedimenti su nastali mehaničkim usitnjavanjem okolnih stijena zbog čega njihov sastav često varira. Sastoje se od izmjene šljunaka, pijeska i pjeskovitih glina. Šljunci su pretežno građeni od valutica kvarca, dok rijeđe od karbonatnih valutica.



## 2.1.2 Kučinić Selo



*Slika 8. Geološka karta Kučinić Sela (izvor: Osnovna geološka karta 1:100 000, list Slunj, Korolija i dr., 1979)*

### **J<sub>3</sub><sup>2,3</sup> (Malm; vapnenci i dolomiti)**

Naslage malma nalaze se na samom jugozapadu, na kontaktnom rasjedu s K,Pc te sjeveroistoku istraživanog područja.

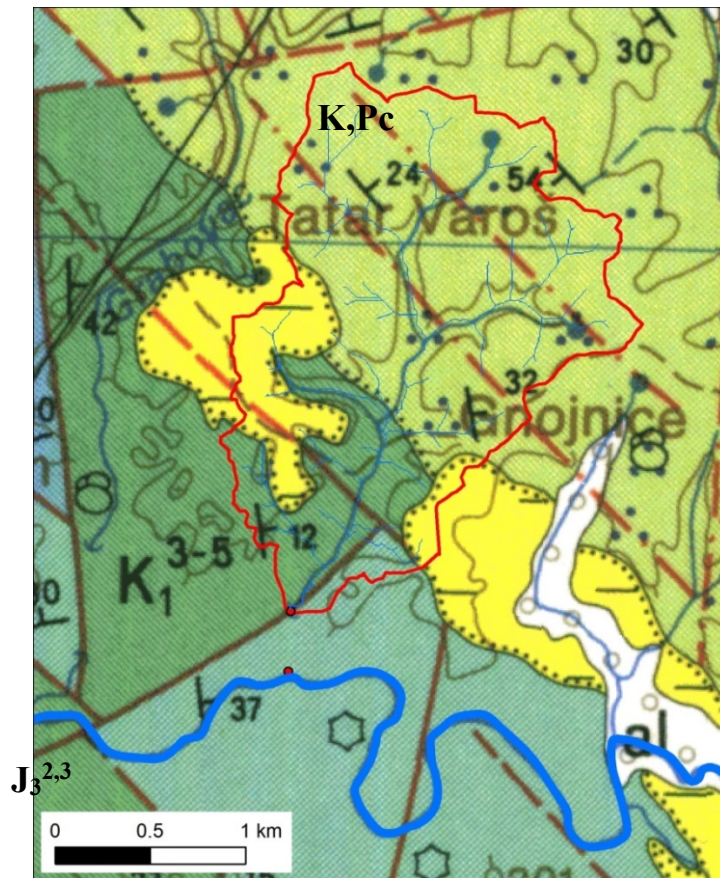
### **K,Pc (Gornja kreda-paleocen; pješčenjaci, lapori, vapnenci)**

Naslage fliša protežu se najvećim dijelom istraživanog područja. Drenažni bazen, ponor kao i izvor ponornice nalaze se na naslagama K,Pc (Sl.8).

### **Al (Kvartar; aluvijalni nanos)**

Naslage se nalaze u dolini pritoka Ruševice i Glinice na sjeveroistočnom i jugoistočnom dijelu istraživanog područja.

### 2.1.3 Tatar varoš



*Slika 9. Geološka karta Tatar Varoši (izvor: Osnovna geološka karta 1:100 000, list Slunj, Korolija i dr., 1979)*

#### **J<sub>2</sub> (Doger; dolomiti i vapnenci)**

Naslage se protežu od Tatar Varoši na sjeverozapad. Nalaze se u rasjednom odnosu s vapnencima malma i krede. Izgrađene su od sivosmeđih do tamnosivih kristaliničnih dolomita u kojima se mjestimično pojavljuju leće tamnosivih dobro uslojenih vapnenaca. U analiziranim karbonatnim stijenama dominiraju laminirani i mozaični kalcijski dolomiti. Vapnenački član predstavljen je oolitičnim kalkarenitima. Debljina naslaga dogera oko 500 metara.

#### **J<sub>3</sub><sup>2,3</sup> (Malm; vapnenci i dolomiti)**

Prevladavaju vapnenci, dok su dolomiti i dolomitični vapnenci rijedi. Dominiraju vapnenci s klipinama u kojima su brojno zastupane vapnenačke alge. Malmske naslage predstavljene su plitkovodnim karbonatnim sedimentima, za koje su karakteristični oolitični kalkareniti,

oolitični intraklastični kalkareniti, intraklastični kalkareniti i fosiliferni mikriti. Debljina naslaga kreće se do 500 metara. Izvor ponorice nalazi se u naslagama malma.

### **K<sub>1</sub><sup>3-5</sup> (Donja kreda; vapnenci s lećama dolomita)**

Naslage donje krede imaju najveće rasprostranjenje u široj okolici Slunja. Vapnenci su mikritski, rijetko oolitični, svijetlosmeđe do tamnosive boje. Dobro su uslojeni, izmjenjuju se lateralno i vertikalno s dolomitima, koji najčešće dolaze u formi nepravilnih uložaka. U sastav naslaga najčešće ulaze fosiliferni kalkareniti, biokalkareniti i fosiliferni mikriti. Dolomiti pripadaju mozaičnim kalcijским dolomitima. Debljina naslaga donje krede je oko 800 metara. Donji dio drenažnog bazena ponornice nalazi se na ovim naslagama. Ponor se nalazi na samom rasjednom kontaktu naslaga donje krede i malma.

### **K, Pc (Gornja kreda- paleocen; pješčenjaci, lapori, vapnenci)**

Pravcem sjeverozapad-jugoistok proteže se neprekinut pojas kredno-paleocenskih klastita. U njihovom sastavu dominiraju vapneni mjestimično škriljavi lapori i laporoviti vapnenci s tanjim ulošcima sitnozrnatih pješčenjaka. Unutar ovog razvoja nalaze se veće ili manje leće sitnozrnato do krupnozrnatih kalkarenita, koji lokalno prelaze u brečokonglomerate. Sedimenti pokazuju turbiditske karakteristike. Gornji i najveći dio drenažnog bazena nalazi se na naslagama K, Pc (Sl.9).

### **M<sub>2</sub> (Srednji miocen; tufitični lapori, pješčenjaci i vapnenci)**

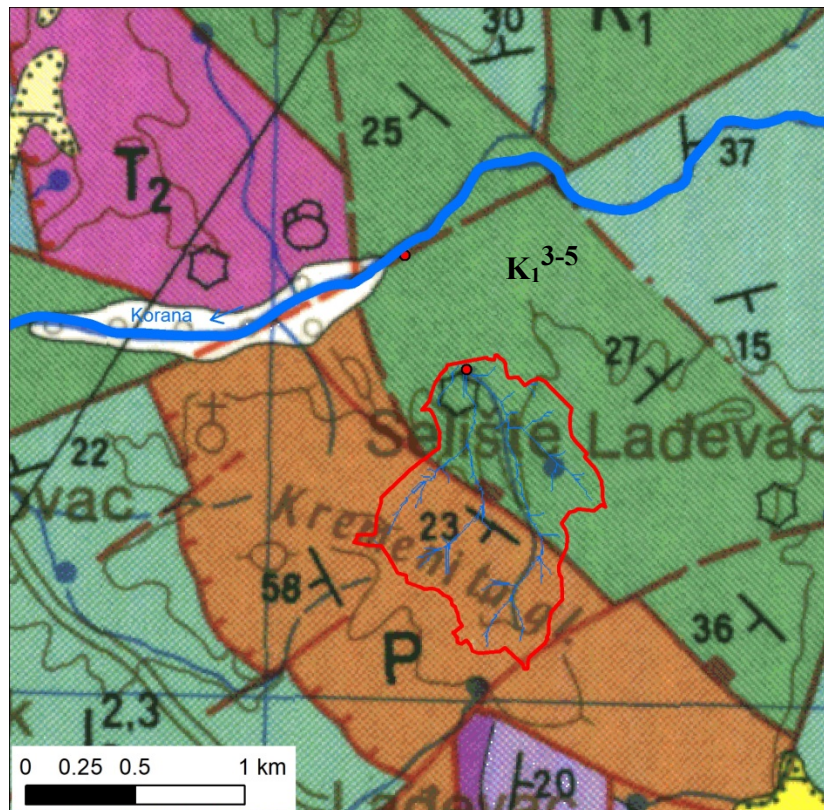
Sedimenti srednjeg miocena protežu se uz dolinu Korane. U bazi prevladavaju sitnozrnati, ponekad slabo zaobljeni šljunci i pijesci s lećama tufitične gline. Šljunci su mjestimično vezani u konglomerate. Vezivo je kalcitno, ponekad dosta laporovito. U južnim dijelovima lista prevladavaju bijeli i sivožuti vapnenci koji su određeni kao kalcilutiti. Najčešće se izmjenjuju s laporima koji su također određeni kao kalcilutiti. Debljina naslaga 250-300 metara. Rubni dijelovi na SZ i JI donjeg dijela drenažnog bazena nalaze se na naslagama srednjeg miocena.

### **A1 (Kvartar; aluvijalni nanos)**

Naslage aluvija nalaze se na jugoistočnom dijelu istraživanog područja u dolini pritoka i rijeke Korane.



#### 2.1.4 Kremenita Glava



*Slika 10. Geološka karta Kremenite Glave (izvor: Osnovna geološka karta 1:100 000, list Slunj, Korolija i dr., 1979)*

#### **P (Perm; škriljavci, pješčenjaci i konglomerati)**

Najstarije stijene istraživanog područja pripadaju klastičnom razvoju mlađeg paleozoika. U nižem dijelu gornjopaleozojskih naslaga prevladavaju sitno i srednjezrnati klastiti. Taj tzv. turbiditni paleozoik predstavljen je kontinuiranom serijom klastita u kojem se ritmički izmjenjuju šejli, siltiti, pješčenjaci i sitnozrnati konglomerati. Gornji dio drenažnog bazena nalazi se na naslagama perma (Sl.10).

#### **<sup>1</sup>T<sub>1</sub> (Donji trijas- skit; tinjčasti pješčenjaci i oolitični vapnenci)**

Naslage nalazimo na jugoistočnom dijelu istraživanog područja.

#### **<sup>2</sup>T<sub>1</sub> (Donji trijas-skit; pješčenjaci, vapneni lapori i dolomiti)**

Južni dio istraživanog područja.

## **T<sub>2</sub> (Srednji trijas; dolomiti i vapnenci)**

Karbonatne naslage (pretežno dolomiti) srednjeg trijasa predstavljene su laminarnim i mozaičnim dolomitima. Mozaični kalcitni dolomit izgrađuju nepravilna zrna i romboedri dolomita, rjeđe kalcita. U nekim uzorcima razabiru se reliktno kalkarenitne strukture prvobitne stijene, dok je kod mnogih ta struktura potpuno zbrisana. Najčešće su to sivi, gromadasti i drobljivi dolomiti koji sadrže više od 90%  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  komponente. Laminarni algalni kalcitni dolomiti izgrađeni su od nepravilno povijenih lamina kriptokristalastog i sitnozrnatog dolomita. Sadrže 70-80%  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  komponente, te su ovakve stijene stvarane u plitkom moru. Sjeverozapadni dio istraživanog područja.

## **J<sub>3</sub><sup>2,3</sup> (Malm; vapnenci i dolomiti)**

Jugozapad i sjeveroistok istraživanog područja.

## **K<sub>1</sub><sup>3-5</sup> (Donja kreda; vapnenci s lećama dolomita)**

Donji dio drenažnog bazena, ponor i izvor nalaze se na naslagama donje krede. Naslage su u kontaktnom rasjedu s permskim naslagama.

## **M<sub>2</sub> (Srednji miocen; tufitični lapori, pješčenjaci i vapnenci)**

Naslage srednjeg miocena nalaze se na jugoistočnom dijelu istraživanog područja.

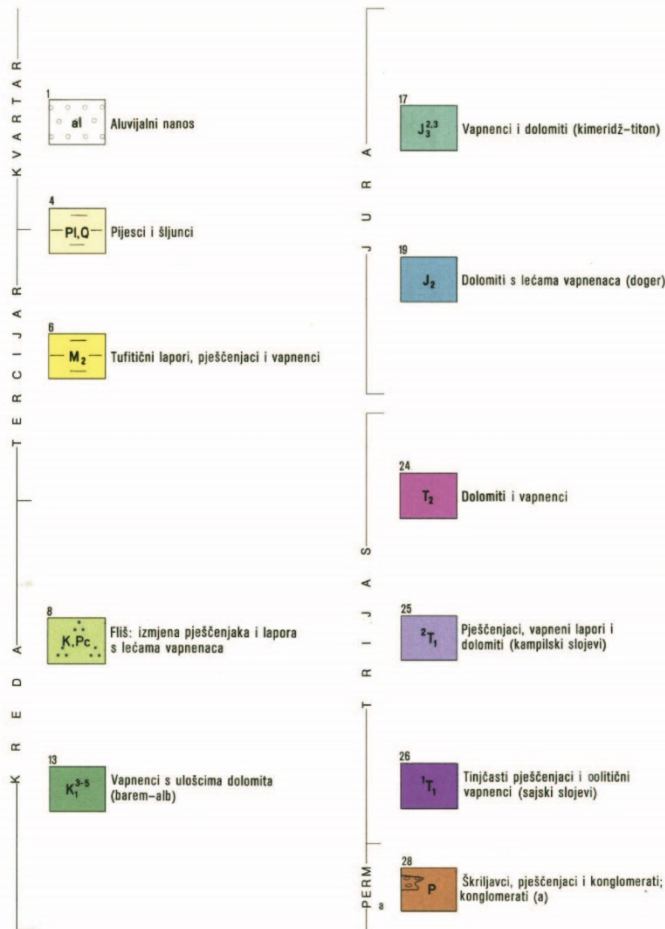
## **A<sub>1</sub> (Kvartar; aluvijalni nanos)**

Naslage se nalaze u dolini rijeke Korane na sjeverozapadnom dijelu istraživanog područja.

## **Pl,Q (Pliocen; pijesci i šljunci)**

Na sjeverozapadnom dijelu istraživanog područja dolaze kao erodirani ostaci. Debljina naslaga 50-80 metara.

LEGENDA KARTIRANIH JEDINICA



LEGENDA STANDARDNIH OZNAKA



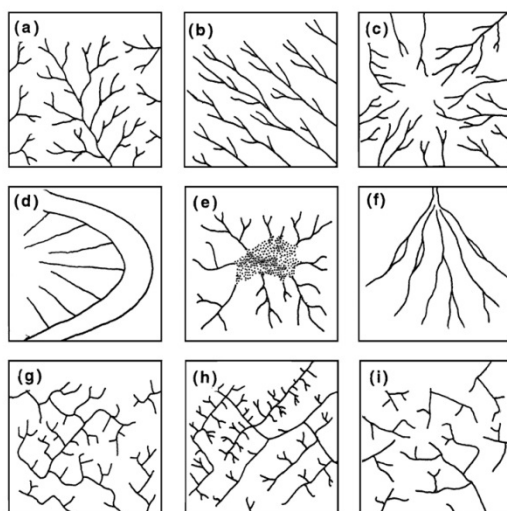
*Slika 11. Legenda kartiranih jedinica i standardnih oznaka (vezano za geološke karte lokaliteta) (izvor: Korolija i dr., 1981)*

### 3 Metode istraživanja

#### 3.1 Definiranje drenažnog bazena ponornice

Određivanje granica i površine drenažnog bazena je početna točka u svim hidrološkim analizama i jedan od ključnih koraka koji služi kao osnova za istraživanje, razumijevanje, zaštitu i upravljanje vodom u krškim područjima (Bonacci, 1987). Granice drenažnog bazena definiraju površinu prostora s kojeg voda otječe u jednu točku. Na nepropusnim naslagama granicu definiraju grebeni koji okružuju neku tekućicu.

Tip drenažne mreže predstavlja prostorni raspored korita tekućice. Postoji nekoliko dominantnih tipova drenažne mreže koji se dodatno mogu granati na prijelazne tipove tj. kombinacije dominantnih tipova (Sl.12). Razvoj tipa mreže ovisit će o nagibu padina, geološkoj građi i tektonici prostora (Twidale, 2004).



*Slika 12. Dominantni tipovi drenažnih mreža (izvor: Twidale, 2004)*

Delineacija drenažnog bazena i drenažna mreža napravljene su pomoću hidroloških alata (Fill, Flow direction, Basin, Flow accumulation) u ArcGIS-u na digitalnom modelu reljefa (DEM-u) rezolucije 5x5 metara te su korigirane usporedbom s topografskom kartom i geološkom građom podloge.

Cirkularnost je omjer opsega drenažnog bazena s omjerom kruga koji je površinom jednak površini drenažnog bazena, što ju čini jednom od značajki drenažnih bazena. Kako bi se dobio opseg kruga iste površine potrebno je izračunati polumjer kroz formulu za površinu kruga  $P =$

$r^2\pi$ , gdje je  $P$  površina,  $r$  polumjer, a  $\pi$  konstanta ( $\sim 3,14\dots$ ). Vrijednost dobivenog polumjera kruga iste površine postavimo u formulu za opseg kruga  $O = 2\pi r$ , gdje je  $O$  opseg,  $\pi$  konstanta i  $r$  polumjer. Opseg drenažnog bazena postavljen je u omjer s dobivenim opsegom kruga iste površine. Budući da drenažni bazeni teže savršenom krugu, oni s vrijednosti omjera bliže 1 smatraju se razvijenijima (Miller, 1953).

## 3.2 Morfometrija

Morfometrija je skup metoda kojima se određuju različiti veličinski parametri reljefa (Bočić i dr., 2016).

Hipsometrija je skup podataka i metoda kojima se analiziraju visinska obilježja reljefa, koja je u kombinaciji s ostalim morfometrijskim analizama izuzetno važan pokazatelj reljefne strukture. Hipsometrijska analiza temelji se na analizi digitalnog modela reljefa. Digitalni podaci reljefa uvelike olakšavaju postupke analize i povećavaju njezinu kvalitetu i točnost. Digitalni model reljefa predstavlja statističku reprezentaciju kontinuirane površine terena, a temelji se na velikom broju  $x$ ,  $y$  i  $z$  koordinata odabranih točaka u određenom koordinatnom sustavu (Pahernik, 2005).

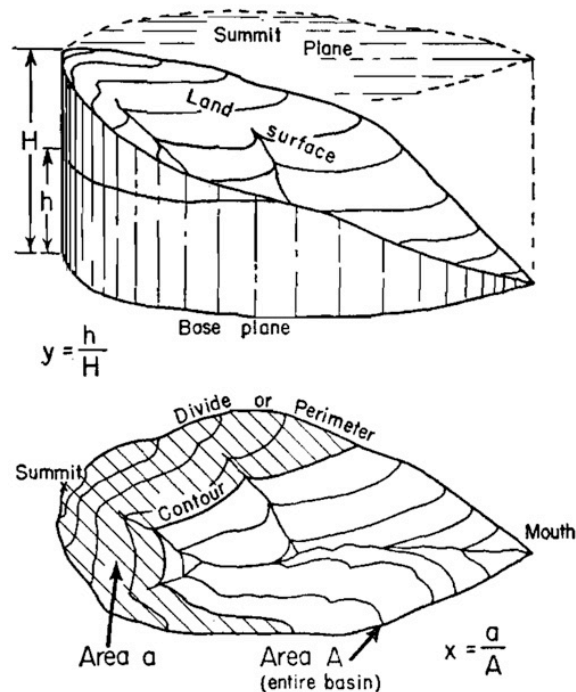
Hipsometrijsku krivulju drenažnog bazena definirao je Strahler (1952) kao razdiobu površina u analiziranom drenažnom bazenu u odnosu na razdiobu visina u bazenu, odnosno opisuje relativan odnos između površina iznad ili ispod neke referentne točke na određenoj nadmorskoj visini u drenažnom bazenu. Krivulja se konstruira na način da se za svaku promatranu točku unutar bazena (od izvorišta prema ušću ili obrnuto) izračuna relativna visina ( $h/H$ ) i relativna površina ( $a/A$ ), pri čemu je  $h$  nadmorska visina bazena u promatranj točki,  $H$  ukupna visina bazena (razlika između maksimalne i minimalne visine u bazenu),  $a$  površina bazena iznad promatrane točke na visini  $h$ , te  $A$  ukupna površina bazena (Sl.13). Vrijednosti relativne površine ( $a/A$ ) uvijek su u rasponu od 1,0 (na najnižoj točki bazena gdje je relativna visina  $h/H = 0$ ) do 0,0 (na najvišoj točki bazena gdje je  $h/H = 1.0$ ). Hipsometrijske krivulje moguće je izravno koristiti za usporedbu između drenažnih bazena bez obzira na njihovu veličinu. Krivulje su izrađene prema podacima iz atributne tablice digitalnog modela reljefa koja je napravljena pomoću alata „Build Raster Attribute Table“ u ArcGIS-u.



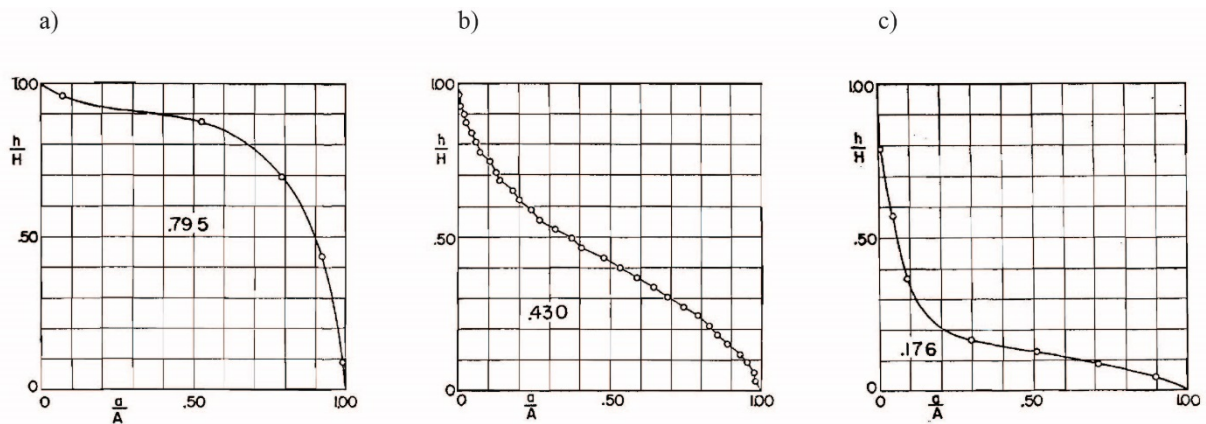
Hipsometrijski integral drenažnog bazena predstavlja način da se kvantitativno izrazi oblik hipsometrijske krivulje drenažnog bazena jer predstavlja površinu ispod hipsometrijske krivulje. Hipsometrijski integral ( $H_i$ ) izračunat je prema jednadžbi:

$$H_i = \frac{\text{srednja vrijednost visine bazena} - \text{najniža vrijednost visine bazena}}{\text{najviša vrijednost visine bazena} - \text{najniža vrijednost visine bazena}}$$

Vrijednosti  $H_i$  u rasponu su od 0,0 – 1,0. Hipsometrijska krivulja i integral su pokazatelji stadija u razvoju reljefa (Sl.14). Mlađi stadij razvoja reljefa ima krivulju konveksnog oblika i visoke vrijednosti  $H_i$ . Zreli i završni stadij imaju konkavnu te krivulju s-oblika i niže vrijednosti  $H_i$  (Perez-Pena i dr., 2009).



**Slika 13.** Prikaz glavnih parametara za konstrukciju hipsometrijske krivulje drenažnog bazena (izvor: Strahler, 1952)



*Slika 14. Prikaz izgleda hipsometrijske krivulje i vrijednosti integrala prema stadijima razvoja reljefa: a) mladi stadij b) zreli stadij c) završni stadij (izvor: Strahler, 1952)*

### 3.3 Geomorfološka obilježja i geološki uvjeti razvoja reljefa

Hidrološka i geomorfološka obilježja nekog prostora međusobno su povezana. Tako primjerice geomorfološka opažanja u kršu mogu dati važne informacije o podzemnim vodenim sustavima. Površinski krški oblici mogu otkriti mnogo o hidrogeologiji istraživanog prostora, no ne smiju se donositi zaključci isključivo temeljem reljefa. Geološki okvir istraživanog područja definira vanjske granice i unutarnje strukture vodonosnika i zato uvijek treba biti definiran kada se provodi istraživanje krške hidrogeologije (Goldscheider i Drew, 2007).

Kartiranjem se dobiva slika o prostornoj orijentaciji krških oblika koji mogu odraziti položaj fraktura i tako dati informacije o geometriji podzemne mreže kanala. Orijentacije dolina često prate smjer glavnih rasjeda i mogu predstavljati preferencijalne pravce razvoja špilja i podzemnog toka vode. Geomorfološka i topografska zapažanja pomažu u određivanju granica drenažnog bazena, u identifikaciji infiltracijskih procesa i zona autogenog i alogenog ulaza vode (Ford i Williams, 1989).

Kartiranje je napravljeno na orohidrografskoj podlozi pripremljenoj iz DEM-a. Reljefni oblici su prepoznati iz DEM-a, topografske karte i terenski te ucrtani na podlogu. Sve je rađeno prema metodologiji Gamsa (1968).

U ovom radu geološka obilježja su opisana u vidu propusnih i nepropusnih stijena, visinskih odnosa naslaga, prostornog rasporeda, rasjeda i pukotinskih sustava kako bi se reljefni oblici usporedili s geološkom građom podloge.

### 3.4 Analiza fizikalno-kemijskih parametara vode

Prema Bakalowicz (2005), hidrokemijske metode pripadaju među glavne metode istraživanja krških vodonosnika. One nam daju važne informacije o funkcioniranju krškog vodonosnika i upotpunjuju hidrodinamičke metode. Kemijski sastav vode može biti prirodni traser koji nam govori o strukturi i dinamici krškog vodonosnika. Dva glavna cilja hidrokemijskih analiza su prirodno trasiranje i procjena kvalitete vode. Za izučavanja procesa cirkulacije vode u kršu često se koriste prirodni traseri. Kemijska obilježja vode u kršu najvećim dijelom ovise o međudjelovanju sa stijenama u podzemlju, odnosno o geologiji podloge te vremenu i načinu putovanja vode kroz sustav (difuzno ili putem kanala). Nadalje, ovise o sljedećim faktorima: antropogenoj aktivnosti u vidu korištenja okolnog zemljišta u poljoprivredne svrhe, mehanizmu ulaska vode u vodonosnik (difuzno ili koncentrirano) te klimatskim obilježjima područja. Kemijski sastav na izvorima ovisi o karakteristikama drenažnog bazena tekućice (Jebreen i dr. 2018).

Na glavnom primjeru Dunjak napravljena je fizikalno-kemijska analiza uzoraka s nekoliko lokacija duž toka ponornice (Sl.3, Sl.18). Konduktivitet, temperatura i pH vode izmjereni su in-situ 21.3.2019. pomoću instrumenta ELMETRON multifunction meter CX-461 te su prikupljeni uzorci vode za laboratorijsku analizu pomoću multiparametarskog mjerača, fotometra HI83200-02 tvrtke HANNA instruments.

#### 3.4.1 *In-situ* mjerenje

Prema *Okvirnoj direktivi o vodama Europske Unije (2000/60/EZ)* nestabilni parametri poput pH, temperature i otopljenog kisika moraju se mjeriti na terenu što je moguće prije. Temperatura vode i pH izmjereni su na terenu, dok je otopljeni kisik određen laboratorijskom analizom.

pH je negativan logaritam aktiviteta  $H^+$  iona. Mjeri se na ljestvici 0-14 gdje pH 7 predstavlja neutralno stanje pri kojem je koncentracija  $H^+$  iona jednaka koncentraciji  $OH^-$  iona. Pri većim koncentracijama  $H^+$  iona pH će biti ispod 7, odnosno voda će biti kisela, a pri većim koncentracijama  $OH^-$  iona pH će biti iznad 7 te će voda biti alkalna. Vrijednosti pH voda u kršu uglavnom se kreću između pH 7 i 8.5 zbog otapanja vapnenaca i dolomita koji čine glavni izvor  $CO_3^{2-}$  i  $HCO_3^-$  iona (Boyd, 2000).

Temperatura vode predstavlja jedan od najvažnijih fizikalnih karakteristika rijeka i izvora, posebno u krškim područjima (Bonacci, 1987). Ona ukazuje na podzemne i površinske okolišne utjecaje i može biti koristan parametar u istraživanjima izvora (Bonacci i dr. 2008). Temperature izvora u kršu većinom su nižih vrijednosti te se kreću od 8 do 12 °C (Dedic i dr. 2015). Temperatura ima snažan utjecaj na mnoge fizikalne i kemijske karakteristike vode, primjerice na topljivost kisika i drugih plinova (Webb, 1996).

Električna provodljivost je sposobnost otopine da provodi električnu energiju. Provođenje struje u otopini prvenstveno ovisi o koncentraciji otopljenih ionskih vrsta (Hayashi, 2004).

### **3.4.2 Prikupljanje uzoraka i laboratorijska analiza**

#### **Nitrati ( $\text{NO}_3^-$ )**

Dušik je jedan od esencijalnih elemenata za ishranu biljaka, no neki njegovi oblici (nitrati dušik) u većim koncentracijama mogu uzrokovati zdravstvene probleme (Wolfe i Patz, 2002). Nitrati ioni nemaju sposobnost vezanja na adsorpcijski kompleks tla te su zbog toga podložni ispiranju u dublje slojeve tla i podzemnu vodu (Filipović, 2013). Osim zdravstvenih problema višak nutrijenata također može dovesti do negativnih utjecaja na okoliš kao što je eutrofikacija površinskih voda (WHO, 1999). Prema Nakić i dr. (2001.) najčešći antropogeni izvori onečišćenja u područjima vodocrpilišta upravo su nitrati koji su dospjeli u podzemne vode poljoprivrednim aktivnostima. Osim primjene dušičnih gnojiva na poljoprivrednim površinama, istjecanje iz septičkih jama i neodgovarajuće izgrađeni kanalizacijski sustavi, atmosferska depozicija i primjena organskih gnojiva doprinose onečišćenju nitratima (Wakida i Lerner, 2005). *Nitratna direktiva* (91/676/EEC) postavlja granicu od 50 mg/L  $\text{NO}_3^-$  za sve prirodne slatkovodne izvore podzemnih voda bez obzira na njihovu upotrebu, iako je poznato da koncentracije već od 4,4 – 8,8 mg/L  $\text{NO}_3^-$  (1 – 2 mg/L N ) mogu uzrokovati početak procesa eutrofikacije u oligotrofnim sredinama površinskih voda (James i dr., 2005).

## **Fosfati (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)**

Fosfor je biogeni element i esencijalan je za rast organizama. Javlja se u prirodnim i otpadnim vodama gotovo isključivo u obliku fosfata i to kao ortofosfati, kondenzirani fosfat (piro-, meta-, i drugi polifosfati) i organski vezani fosfor. Fosfati mogu prouzročiti probavne smetnje, a u prirodi uzrokuju eutrofikaciju voda u vodotocima. Fosfati u vode dolaze iz različitih izvora, velike količine dospijevaju pranjem i čišćenjem jer čine glavne sastavnice mnogih komercijalnih preparata za čišćenje, a donedavno i deterdženata. Ortofosfati su glavna sastavnica fosfornih mineralnih gnojiva, te primijenjeni kao gnojiva na poljoprivrednim tlima, unose se u površinske vode pritijecanjem erozijskog nanosa – suspenzije tla poslije jakih kiša i bujicama te manjim udjelom otapanjem snijega. Organski fosfati stvaraju se prvenstveno u biološkim procesima, a sastavni su dijelovi i organofosfornih insekticida (Sakač i dr., 2017). Prema *Uredbi o izmjenama i dopunama Uredbe o standardu kakvoće voda* (NN 80/2018) propisana granična vrijednost fosfata je 0,2 mgPO<sub>4</sub><sup>3-</sup>/L.

## **Otopljeni kisik**

Otopljeni kisik je masa molekula kisika otopljenih u volumenu vode (mg/L). Topljivost kisika ovisi o temperaturi, tlaku zraka i salinitetu (Matoničkin, 2008). Temperatura vode utječe na otopljeni kisik na način da se povećanjem temperature smanjuje topljivost kisika (Boudaghpour, 2011). Za krške sustave karakteristična je visoka koncentracija kisika zbog povezanosti s površinom i kratkog perioda prolaska kroz sustav. S povećanjem dužine toka podzemnih voda dolazi do opadanja količine otopljenog kisika (Mahler i Bourgeais, 2013).

## **Alkalitet**

Alkalitet je puferska sposobnost vode da se opire promjeni pH vrijednosti. Alkalitet vode primarno čine karbonatni i bikarbonatni ioni koji puferiraju vodu i sprječavaju velike promjene u pH vrijednosti na način da povećanjem koncentracije H<sup>+</sup> iona dolazi do reakcije vodikovih iona s bikarbonatima te se stvara ugljikov dioksid i voda pa je promjena pH vrijednosti jako mala. Otapanjem ugljikovog dioksida u vodi povećava se koncentracija bikarbonata ali otopljeni CO<sub>2</sub> ne služi kao direktan izvor alkaliteta. Primarni izvor alkaliteta u mnogim rijekama je karbonatna podloga, odnosno otapanje vapnenca (CaCO<sub>3</sub>) i dolomita (CaCO<sub>3</sub>·MgCO<sub>3</sub>). Karbonati su slabo topljivi u vodi bez otopljenog ugljikovog dioksida, stoga će povećanje koncentracije otopljenog CO<sub>2</sub> rezultirati većom topljivosti karbonata i time većim alkalitetom (Boyd, 2000). Prosječna vrijednost alkaliteta za krške sustave iznosi ~ 180 mg L<sup>-1</sup> (Gligora,

2007). Alkalitet je usko povezan s pH vrijednosti vode na način da pH raste s porastom alkaliteta. U vodama sa srednjim i visokim alkalitetom pH vrijednost najčešće će se kretati između 7 i 8.5 (Boyd, 2000).

### 3.5 Hidrometrijska analiza

Krški sustavi predstavljaju izazovne hidrogeološke okoliše, koji podrazumijevaju pukotine i kanale kojima se odvija prijenos vode, gdje kontinuirana interakcija između površinske i podzemne vode ima složene i jedinstvene karakteristike (Gill i dr. 2013; Chu i dr. 2016). Površinska i podzemna voda nerazdvojne su komponente u hidrološkom ciklusu jer dolazi do transformacije jedne u drugu (Banks i dr. 2009). Podzemni tok vode u krškim vodonosnicima često je karakteriziran velikom varijabilnošću dinamike protoka kao odgovorom na različite hidrološke uvjete u kratkom vremenskom razdoblju (Ravbar i dr., 2015). Protok, kao i razina vodnog lica mogu varirati nekoliko redova veličina u kratkom periodu (Goldscheider i Drew, 2007). Ovisnost o hidrološkim uvjetima također rezultira u varijaciji smjera toka, stoga i u doprinosu vode iz različitih dijelova vodonosnika određenom izvoru (Ravbar i dr., 2015).

Protok i brzina otjecanja jedni su od značajnijih elemenata tekućice. Protok (Q) je količina vode koja otječe u jedinici vremena (sekundi) kroz mokri profil tekućice. Iskazuje se u m<sup>3</sup>/s ili L/s. Brzina otjecanja (v) je put što ga čestica vode prijeđe u jedinici vremena. Izražava se u metrima u sekundi (m/s) (Riđanović, 1993).

Protok vode određen je na ponoru P i izvoru I2 jer je pretpostavljeno da su hidrološki povezani. Za određivanje protoka korištene su različite metode na navedenim lokacijama. Na ponoru je korištena metoda volumetrijskog mjerenja protoka  $Q = V/t$  (tzv. *bucket-stopwatch method*), pri čemu je Q protok, V volumen vode i t vrijeme. Volumetrijsko mjerenje primjenjivo je isključivo kod tekućica s malim protokom i predstavlja najefikasniji način mjerenja takvih protoka. Vrlo je jednostavna metoda jer potrebnu opremu predstavljaju samo kalibrirana posuda i štoperica (Rantz, 1982).

Na izvoru I2, korištena je metoda  $Q = v \cdot A$  (tzv. *velocity-area method*), gdje je Q protok vode, v srednja brzina tečenja i A površina poprečnog profila rijeke ispunjenog vodom (mokri profil). Ova metoda zahtjeva mjerenje brzine toka, širine profila rijeke i dubine rijeke na određenim vertikalnim sekcijama (Hersch, 1995).

### **3.6 Trasiranje**

Trasiranje bojom jedna je od najvažnijih metoda istraživanja krških vodonosnika. To je metoda kojom se prati podzemni tok umjetnim ili prirodnim traserima te se određuje smjer i brzina tečenja podzemne vode. Trasiranjem se može dokazati izravna povezanost dviju točaka, odrediti brzina i smjer otjecanja vode kroz podzemlje te identificirati granice drenažnog bazena. Fluorescentne boje pripadaju među najkorištenije tipove trasera zbog toga što imaju nisku granicu detekcije, nisu prisutne u prirodnim uvjetima, jako su topljive u vodi, u pravilu nisu štetne za okoliš te su relativno jeftine i lako za uporabu. Trasiranje fluorescentnim bojama često je jedina metoda koja nam može dati siguran dokaz veza u krškim podzemnim tokovima (Goldscheider i Drew, 2007). Stupanj okršnosti podzemnih puteva i hidrološki uvjeti određuju smjer i brzinu podzemnog toka i transport vode (White, 1988). Za potrebe ovog istraživanja korišten je fluorescentni traser u tabletama naziva „Fluorescent FLT Yellow/Green – Tablets“ proizvođača "Bright Dyes" koji je prema uputama i prema procijenjenom protoku prije puštanja otopljen u većoj količini vode. Traser je pušten u ponor koji je preferirano mjesto za unos jer voda ulazi direktno u aktivan kanal (Goldscheider i dr., 2008). Rezultati trasiranja i prisutnost trasera su bili praćeni i vidljivi vizualno bez laboratorijske analize uzroka.

## **4 Rezultati i rasprava**

### **4.1 Dunjak**

#### **4.1.1 Definiranje drenažnog bazena ponornice**

Topografska površina drenažnog bazena ponornice iznosi 0,295 km<sup>2</sup> te je ujedno površinom najmanji istraživani bazen. Opseg mu iznosi 2,362 km. Opseg kruga iste površine iznosi 1,93 km, te kada se 2 opsega stave u omjer dobije se vrijednost 1,22. Od svih istraživanih bazena najbliži je vrijednosti 1 jer je najmanji površinom i lako se drenira te ga to čini najrazvijenijim bazenom. Najviši dio drenažnog bazena iznosi 293 metra na jugoistočnom dijelu ruba bazena, a najniži 188 metara u području ponora, što čini visinsku razliku od 105 metara. Hidrološka mreža je paralelno-dendritičnog tipa.

#### **4.1.2 Morfometrija**

Na području drenažnog bazena, podaci su grupirani u hipsometrijske razrede prema rasponu nadmorskih visina od minimalne do maksimalne. S obzirom da se radi o području male površine

i malog raspona nadmorskih visina određeni su razredi malog raspona (20 m) i ima ih 6. Na temelju podataka DEM-a izračunati su udjeli i površine hipsometrijskih razreda.

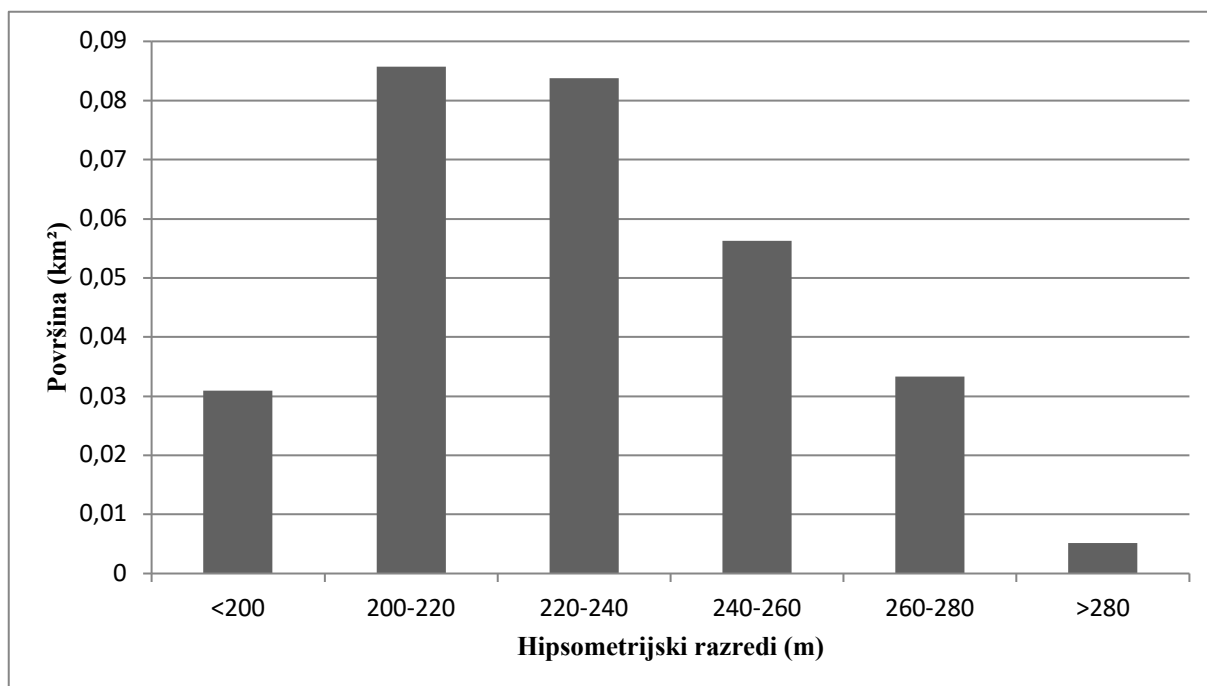
**Tablica 1.** Površine hipsometrijskih razreda i njihovi udjeli u ukupnoj površini istraživanog drenažnog bazena na Dunjaku

| <b>Hipsometrijski razredi (m)</b> | <b>Udio (%)</b> | <b>Površina (km<sup>2</sup>)</b> |
|-----------------------------------|-----------------|----------------------------------|
| <200                              | 10,47           | 0,031                            |
| 200-220                           | 29,05           | 0,086                            |
| 220-240                           | 28,40           | 0,084                            |
| 240-260                           | 19,07           | 0,056                            |
| 260-280                           | 11,28           | 0,033                            |
| >280                              | 1,73            | 0,005                            |
| <b>Ukupno</b>                     | <b>100,00</b>   | <b>0,295</b>                     |

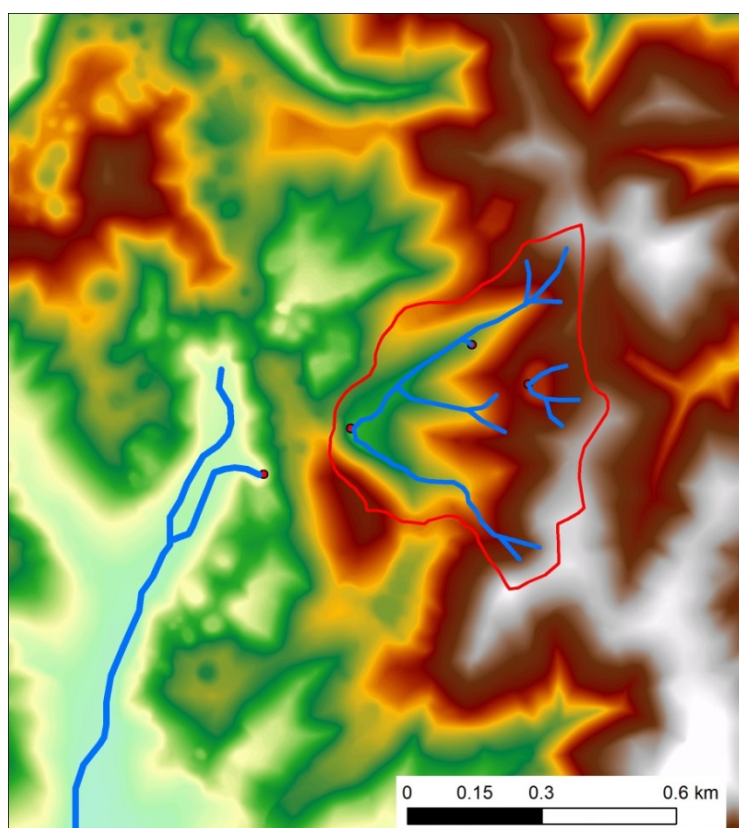
Na temelju dobivenih podataka (Tab.1, Sl.15) može se zaključiti kako razredi 200-220 m (0,086 km<sup>2</sup>) i 220-240 m (0,084 km<sup>2</sup>) zauzimaju gotovo dvije trećine istraživanog prostora te imaju podjednake udjele (29,05% i 28,40%). Sljedeći značajniji razred je 240-260m (0,056 km<sup>2</sup>) s udjelom od 19,07%. Najmanji udio ima hipsometrijski razred >280 (1,73%) koji obuhvaća rubne dijelove sjeveroistočnog i jugoistočnog dijela drenažnog bazena.

Na hipsometrijskoj karti (Sl.16) može se uočiti pojava slijepa doline na zapadu drenažnog bazena koja ukazuje na kontakt propusnih i nepropusnih naslaga, nakon čega slijedi pojava ponikava zapadno od doline.



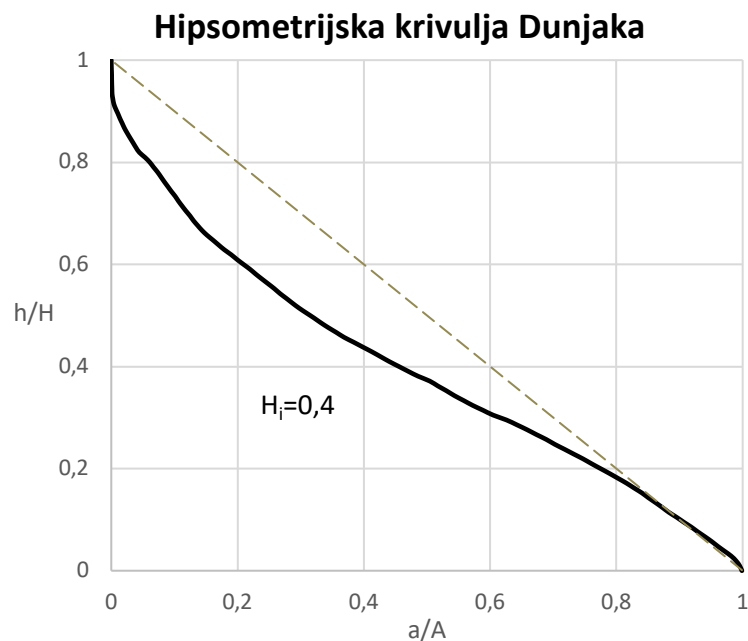


*Slika 15. Histogram površina hipsometrijskih razreda istraživanog drenažnog bazena na Dunjaku*



*Slika 16. Hipsometrijska karta istraživanog područja Dunjaka*

Hipsometrijska krivulja drenažnog bazena Dunjaka konkavnog je oblika, te  $H_i$  iznosi 0,4 što ukazuje da pripada bazenu u zreлом stadiju razvoja reljefa (Sl.17).

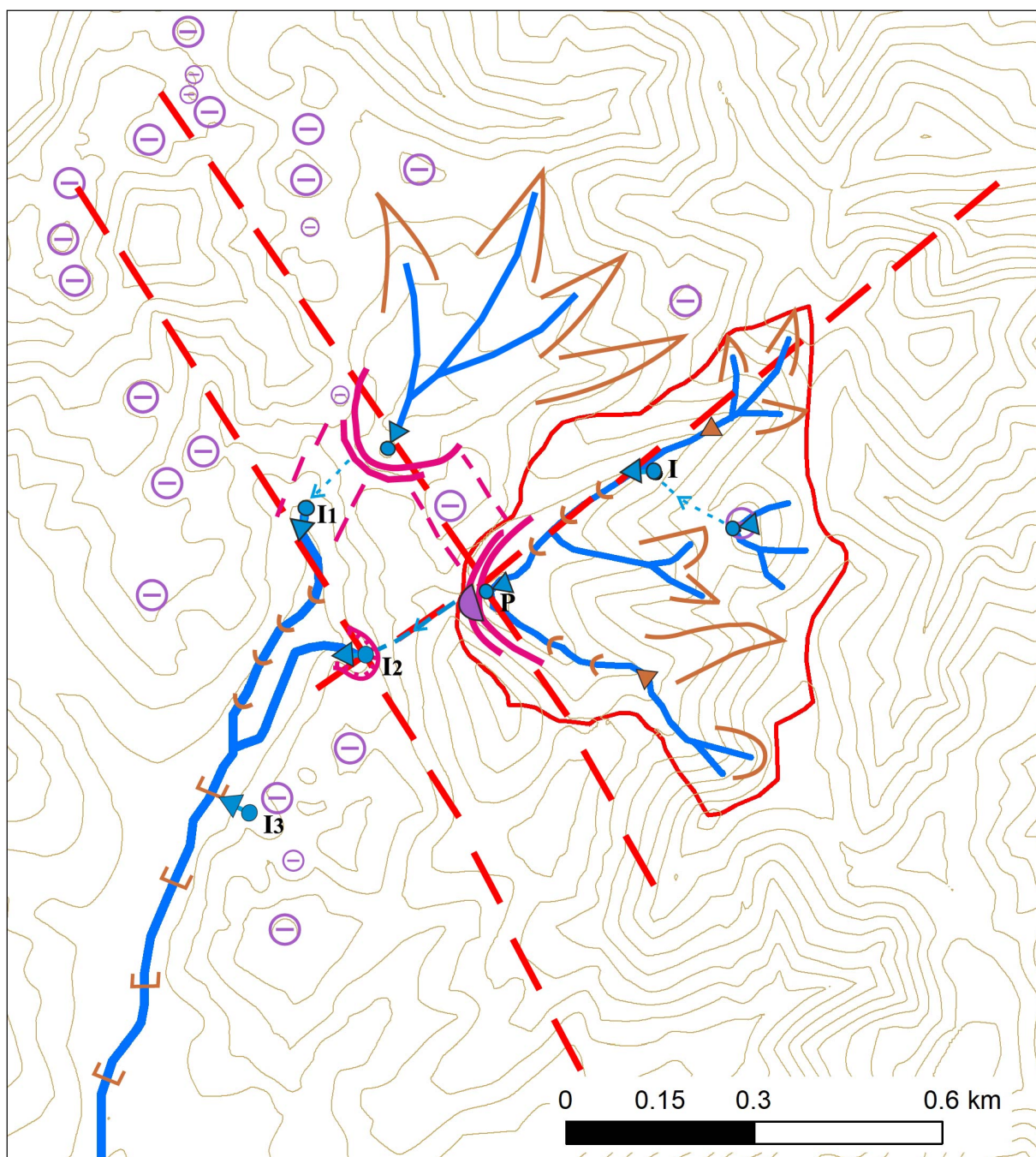


*Slika 17. Hipsometrijska krivulja drenažnog bazena Dunjaka*

#### 4.1.3 Geomorfološka obilježja i geološki uvjeti razvoja reljefa

Cijeli drenažni bazen ponornice građen je od kampilskih naslaga u kojima dominiraju nepropusni tinčasti pješčenjaci i propusni dolomiti koji se izmjenjuju. Izmjenom podloge, dolazi do razvoja različitih morfogenetskih reljefnih oblika. Na naslagama pješčenjaka formiran je površinski tok vode zbog čega dolazi do razvoja fluviudenudacijskih oblika reljefa u obliku jaruga, korita i doline tekućice. Alogenim dolaskom tekućice na propusne naslage dolomita, na samom kontaktu dolazi do poniranja te razvoja slijepih i suhих dolina. Dvije slijepo doline međusobno su povezane kratkom suhom okršenom dolinom, smjera SZ-JI (Sl.18). Suha dolina, smjera SI-JZ, nalazi se u nastavku slijepo doline te spaja ponor s izvorom I1. Suhe doline ostaci su nekadašnjih površinskih tokova prije nego je došlo do snižavanja razine vodnog lica i poniranja tekućice. Na istoku bazena nalazi se široka ponikva gdje voda ponire i izvire SZ od ponikve na glavnom toku. Krški reljef karakterizira pojava ponikava koje su široke i plitke zbog geološke građe podloge (dolomiti). Serija ponora u slijepoj dolini i hidrološki neaktivna špilja čiji se ulaz nalazi 12 m iznad ponora također ukazuju na postupno spuštanje razine vodnog lica. Uzroci mogu biti širenje volumena vodonosnika, snižavanje erozijske baze i neotektonsko izdizanje terena (Paić, 2014). Poput ponora, pojava izvora i izvorišnog obluka također je vezana

za rasjedni kontakt propusnih i nepropusnih stijena. Rasjedi omogućuju strukturnu predispoziciju (pukotinski sustavi i presjecišta pukotina) za nastanak navedenih oblika u kršu. Najznačajniji rasjedi istraživanog područja su dinarskog smjera pružanja (SZ-JI), kao i smjera SI-JZ koji ukazuje na neotektonske pokrete. Ponori i izvori nalaze se u blizini presjecišta dvaju rasjeda. U crtani simboli na geomorfološkim kartama objašnjeni su na pripadajućoj legendi (Sl.19)



*Slika 18. Geomorfološka karta Dunjaka (ekvidistanca =10m)*

## LEGENDA

### VRSTE RELJEFA:

#### I ENDOGENI

 Rasjed : utvrđen, pretpostavljen

#### II EGZOGENI

##### PADINSKI

###### 1. Denudacijski

 Jaruga  Derazijska dolina

###### 2. Akumulacijski

 Proluvijalna plavina



##### FLUVIODENUDACIJSKI

 Uska dolina V oblika  Uska koritasta dolina

 Uska dolina ravnog dna

#### FLUVIOKRŠKI

 Slijepa dolina  Izvorišni obluk

 Suha dolina  Kanjon

#### KRŠKI

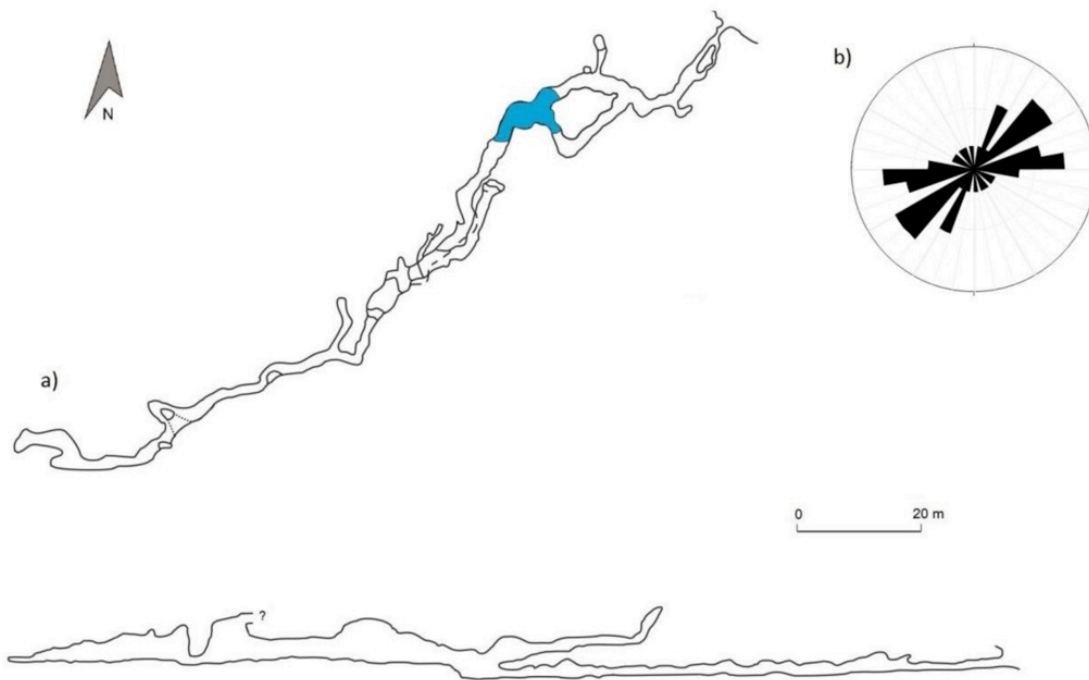
 Ponikva

 Špilja

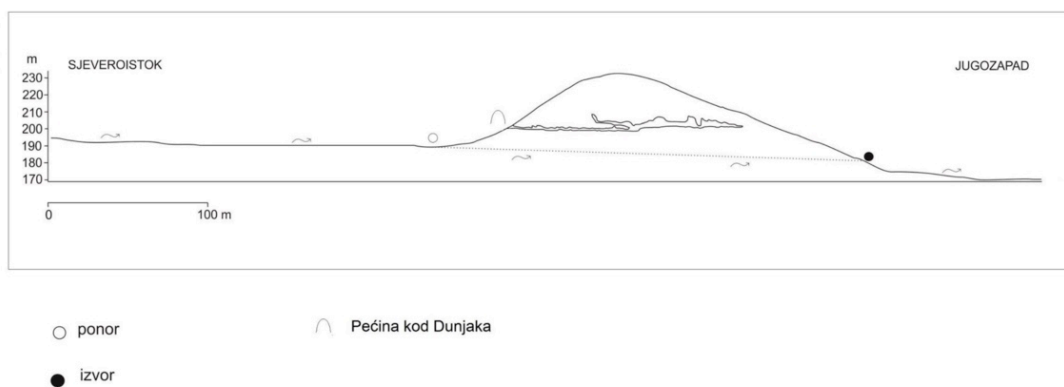


*Slika 19. Legenda geomorfoloških karata*

Speleološki objekt Pećina kod Dunjaka (Sl.20) duljine je 256 m. Ulaz u špilju nalazi na 200 metara nadmorske visine, što je 12 m visinske razlike od ponora u slijepoj dolini. Špilja nema hidrološku funkciju, trenutno u njoj vladaju vadozni uvjeti, ali se pretpostavlja da je nekoć njome tekla današnja ponornica zbog blizine ponora i smjera pružanja kanala. Prvi dio špilje čine kanali elipsastog poprečnog profila, a drugi dio špilje obilježavaju kanali izduženog poprečnog profila. Kanali nastali u freatskoj zoni nastaju korozivskim djelovanjem vode usmjerenim u svim smjerovima, što kao rezultat daje profile lećastih i elipsastih profila. Takvi profili zabilježeni su u prvom dijelu špilje i građeni su od vapnenca. 35 metara od ulaza nalazi se jezero čije dimenzije sezonski variraju (do maksimalno 30 m dužine). Završetkom jezera počinje druga morfološka cjelina obilježena izduženim poprečnim profilom kanala, karakteristično za epifreatsku zonu. Kanali cijele špilje oblikovani su u dolomitu. Dominantno pružanje kanala špilje je u pravcu SI-JZ i jednak je smjeru nagiba slojnih ploha u špilji te se podudara s pravcem pružanja rasjeda (SI-JZ) koji se nalazi SZ od špilje (Paić, 2014). Ispod špilje postoje kanali kojima teče recentni tok ponornice (Sl.21).



**Slika 20.** *Nacrt Pećine kod Dunjaka (a) i rozeta dijagram pružanja kanala (b) (izvor: Paić, 2014)*



**Slika 21.** *Profil Pećine kod Dunjaka s okolnim reljefom i hidrografijom (izvor: Paić, 2014).*

#### 4.1.4 Analiza fizikalno-kemijskih parametara vode

**Tablica 2.** Rezultati mjerenja različitih fizikalno-kemijskih parametara: temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), pH, električna provodljivost ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), otopljeni kisik ( $\text{mg}/\text{L}$ ), nitrati ( $\text{mg}/\text{L}$ ), ortofosfati ( $\text{mg}/\text{L}$ ) i alkalitet ( $\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ ) po lokacijama uzorkovanja vode I, P, I1, I2 i I3.

| Mjereni parametri                                      | I     | P    | I1    | I2    | I3    |
|--|-------|------|-------|-------|-------|
| t( $^{\circ}\text{C}$ )                                | 7.9   | 9.7  | 10.1  | 8.7   | 10.5  |
| pH   | 7.85  | 8    | 7.98  | 7.96  | 8.1   |
| El. provodljivost ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )          | 471.2 | 383  | 502.2 | 479.5 | 519.6 |
| dO <sub>2</sub> ( $\text{mg}/\text{L}$ )               | >10   | >10  | >10   | 8.4   | >10   |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ( $\text{mg}/\text{L}$ )  | 0.0   | 13.7 | 11.5  | 13.3  | 4.4   |
| PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ( $\text{mg}/\text{L}$ ) | 1.8   | 0.4  | 0.6   | 0.4   | 0.8   |
| Alk. ( $\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ )                    | 260   | 220  | 275   | 255   | 275   |

#### Temperatura i otopljeni kisik (dO<sub>2</sub>)

Na svim lokacijama uzorkovanja izmjerene su relativno niske temperature vode. Na izvoru I, izmjerena je najniža temperatura ( $7.9^{\circ}\text{C}$ ). Zbog površinskog toka i zagrijavanja vode, na ponoru (P) izmjerena je nešto viša temperatura ( $9.7^{\circ}\text{C}$ ) nego na izvoru (I). Na izvorima I1( $10.1^{\circ}\text{C}$ ) i I3 ( $10.5^{\circ}\text{C}$ ) temperature su bile više nego na I2 ( $8.7^{\circ}\text{C}$ ). Na svim postajama zabilježene su visoke koncentracije otopljenog kisika (više od  $10 \text{ mg}/\text{L}$  osim na izvoru I2 gdje je zabilježeno  $8.4 \text{ mg}/\text{L}$ ).

Temperatura vode utječe na otopljeni kisik na način da se povećanjem temperature smanjuje topljivost kisika, čime se smanjuje i koncentracija otopljenog kisika u vodi (Boudaghpour, 2011). Na svim postajama izmjerena je relativno niska temperatura vode (do maksimalnih  $10.5^{\circ}\text{C}$ ), što je utjecalo na povećanu topljivost kisika zbog čega su zabilježene visoke koncentracije otopljenog kisika (na svim postajama više od  $10 \text{ mg}/\text{L}$  osim na I2 gdje je koncentracija  $8.4 \text{ mg}/\text{L}$ ). Osim niske temperature vode, može se pretpostaviti da su visoki stupanj okršnosti i kratko zadržavanje vode u podzemlju faktori koji su utjecali na visoke koncentracije otopljenog kisika izmjenjenog nakon poniranja na izvorima jer je aeracija vode bila omogućena.

Voda koja je u ravnoteži s danom količinom plinovitog CO<sub>2</sub> pri niskim temperaturama sadrži više otopljenog CO<sub>2</sub> nego pri višim temperaturama vode. Stoga, hladna voda ima više ugljične



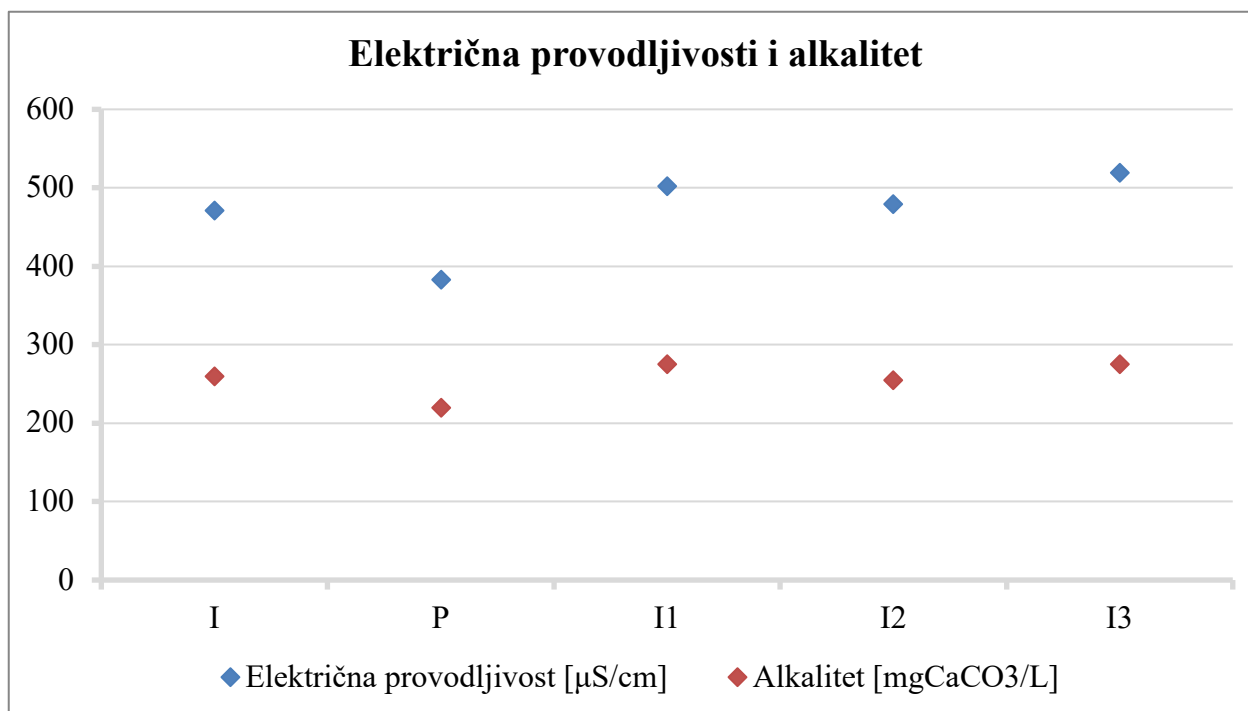
kiseline dostupne za otapanje podloge od tople vode (Peters, 1984). Otapanje karbonatne podloge utjecat će na ostale mjerene parametre poput pH, alkaliteta i električne provodljivosti.

## **pH**

Uzorkovana voda blago je alkalna (pH 7.85- 8.1). Najniža pH vrijednost 7.85 izmjerena je na izvoru (I), na ponoru P i izvorima I1, I2 i I3 redom su izmjerene vrijednosti: 8, 7.98, 7.96, 8.1. pH vode je izrazito važan parametar jer  $H^+$  ioni sudjeluju u mnogim geološki važnim reakcijama. Otapanje karbonatne podloge prati povećanje alkaliteta i pH (Bradley i Sprague, 1985; Boyd, 2000). Uzorkovana voda blago je alkalna na svim lokacijama zbog otapanja karbonatne podloge i prisutnosti karbonatnih i bikarbonatnih iona. Izmjerene vrijednosti pH prati visoki alkalitet vode (220-275 mgCaCO<sub>3</sub>/L).

## **Električna provodljivost i alkalitet**

Izmjerene su visoke vrijednosti električne provodljivosti na svim mjestima uzorkovanja vode te se kreću u rasponu od 383-519.6  $\mu$ S/cm (SI.22). Prema izmjerenim vrijednostima utvrđeno je da izvori I1, I2, I3 imaju malo više vrijednosti u odnosu na uzorkovane lokacije prije poniranja (I i P). Najviša vrijednost zabilježena je na izvoru I3 i iznosi 519.6  $\mu$ S/cm, a najniža vrijednost na ponoru P te iznosi 383  $\mu$ S/cm.



**Slika 22.** Vrijednosti električne provodljivosti ( $\mu\text{S/cm}$ ) i alkaliteta ( $\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ ) na primjeru Dunjak

Vrijednosti alkaliteta za prirodne vode kreću se od 0 do 500  $\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ . Vrijednosti od 150-300  $\text{mgCaCO}_3/\text{L}$  kategoriziraju se kao vode s visokim alkalitetom (Boyd, 2000). Kao posljedica dobre topljivosti stijena na mjernim postajama dobivene su visoke vrijednosti alkaliteta na svim uzorkovanim lokacijama (220-275  $\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ ).

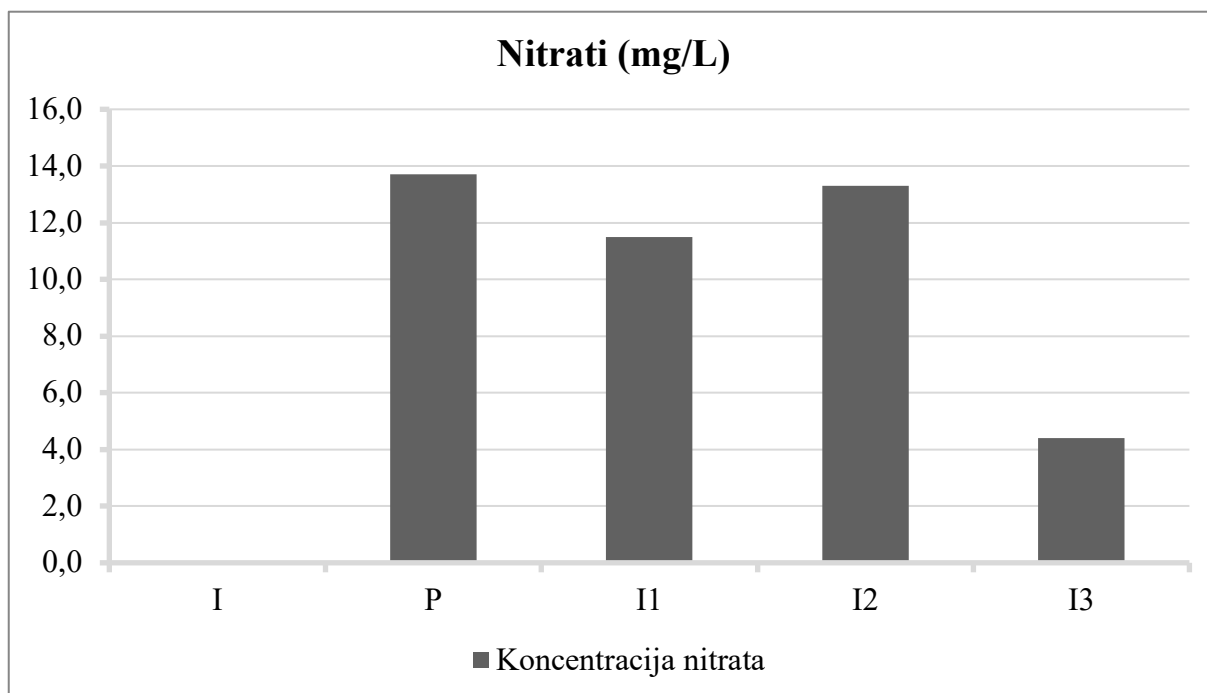
Litološka obilježja korita rijeke ima važnu ulogu u distribuciji otopljenih soli koje se određuju mjerenjem vrijednosti električne provodljivosti (Peters, 1984). Koncentracija otopljenih krutih tvari u prirodnim vodama rezultat je otapanja minerala iz tla i litološke podloge (Hem, 1959; Peters, 1984). Posljedično, provodljivost vode na mjestu uzorkovanja rijeke odražavat će geološku kompoziciju podloge drenažnog bazena uzvodno od mjesta uzorkovanja. Ioni polutanata antropogenog izvora također sudjeluju u provodljivosti (Kney i Brandes, 2007). U istraživanju kemizma drenažnih bazena rijeka, Liu i dr. (2000.) zaključuju da su vrijednosti električne provodljivosti, alkaliteta, kalcija i magnezija primarno povezane s prisutnošću ili odsutnošću karbonatne podloge. Prema istraživanju Masta i Turka 1999., drenažni bazeni s alkalitetom većim od 30  $\text{mg/L}$  pokazuju snažnu korelaciju s električnom provodljivošću. Na primjeru Dunjak, na svim postajama mjerenja dobivene su veće vrijednosti od 30  $\text{mg/L}$  što ukazuje na korelaciju alkaliteta i električne provodljivosti (Sl.22). Alkalitet se



može koristiti kao indeks geologije podloge, prema tome, u prirodnim uvjetima postoji očekivani raspon električne provodljivosti koji odgovara određenom rasponu alkaliteta (Cantonati, 1998; Kney i Brandes, 2007). Stoga je moguće koristiti istodobna mjerenja alkaliteta i provodljivosti kako bi se utvrdile neprirodno velike vrijednosti provodljivosti koje mogu ukazivati na antropogeno onečišćenje. Visoke vrijednosti provodljivosti u kombinaciji s niskim vrijednostima alkaliteta ukazuju na antropogeni utjecaj (Kney i Brandes, 2007). Na svim mjernim postajama istodobno su zabilježene visoke vrijednosti alkaliteta i električne provodljivosti što ukazuje na nepostojanje većeg antropogenog onečišćenja.

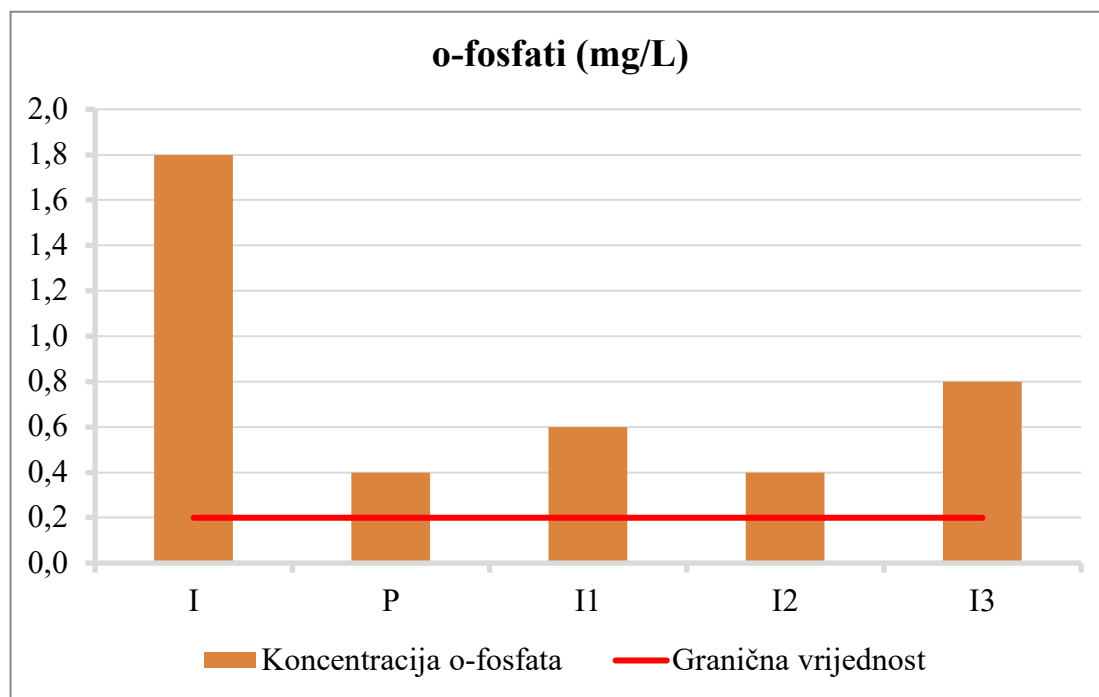
### Nitrati ( $\text{NO}_3^-$ ) i Ortofosfati ( $\text{PO}_4^{3-}$ )

Koncentracije nitrata na istraživanim lokacijama ne prelaze granicu od 50 mg/L određenu *Uredbom o izmjenama i dopunama Uredbe o standardu kakvoće voda* (NN 80/2018). Najviša koncentracija zabilježena je na ponoru (P) 13.7 mg/L, dok na izvoru I nije zabilježeno prisustvo nitrata (Sl.23).



**Slika 23.** Koncentracija nitrata ( $\text{NO}_3^-$  (mg/L)) na mjestima uzorkovanja vode (I, P, I1, I2, I3)

Koncentracije ortofosfata na svim mjestima uzorkovanja prelaze granicu od 0.2 mg/L propisanu *Uredbom o izmjenama i dopunama Uredbe o standardu kakvoće voda* (NN 80/2018). Najviša koncentracija zabilježena je na izvoru I te iznosi 1.8 mg/L (Sl.24).



**Slika 24.** Koncentracija ortofosfata  $PO_4^{3-}$  (mg/L) na mjestima uzorkovanja vode (I,P,I1,I2,I3). Linijski je prikazana granična vrijednost (prema Uredbi o izmjenama i dopunama Uredbe o standardu kakvoće voda (NN 80/2018))

Krška područja posebno su osjetljiva na onečišćenja zbog brze infiltracije i brzog prijenosa onečišćivača na velike udaljenosti te neučinkovitog procesa samočišćenja zbog smanjenje filtracije (Ravbar i dr. 2015). Od indikatora onečišćenja, određene su koncentracije nitrata i ortofosfata u vodi. Nitrati su na svim lokacijama uzorkovanja bili ispod propisane granice, dok su ortofosfati prelazili granicu na svim lokacijama. S obzirom na to da je Dunjak seosko naselje, uzroci visokih koncentracija ortofosfata mogu biti donos iz okolnih poljoprivrednih zemljišta spiranjem tla ili prinos iz septičkih jama uz hidrološke uvjete s malo padalina.

#### 4.1.5 Hidrometrijska analiza ponornice

Mjerenje protoka analizirane tekućice prije poniranja obavljeno je volumetrijskom metodom. Zbog uskog i plitkog toka rijeke, voda je kanalizirana pomoću cijevi kako bi se cijeli tok usmjerio u posudu (Sl.25) te je određen protok vode volumenom dobivenim desetosekundnim punjenjem posude. Nakon tri mjerenja određena je srednja vrijednost i dobiven protok od 0,56 L/s.

Mjerenje protoka nizvodno od (glavnog) izvora I2 obavljeno je mjerenjem srednje brzine tečenja i površine mokrog profila tekućice. Profil rijeke podijeljen je na vertikalne sekcije te je

izmjerena brzina tečenja unutar svake sekcije (S1.27). Širina profila iznosi 58 cm, stoga je određeno 6 sekcija, prvih pet širine 10 cm, dok je zadnja širine 8 cm. Dubine rijeke na vertikalnim presjecima koji omeđuju sekcije iznosile su: 6, 15, 17, 18, 9.5, 10 i 9 cm. Brzina je mjerena na sredini svake sekcije, na 60 % dubine rijeke jer je to dubina gdje izmjerena brzina tečenja teorijski odgovara prosječnoj brzini tečenja stupca vode u sekciji (Hersch, 1995). Za mjerenje brzine koristio se elektromagnetski mjerač brzine strujanja (S1.26). Na vertikalnim presjecima sekcija izmjerene su dubine rijeke kako bi se mogla izračunati površina svake, a potom i protok pomoću dobivenih površina i izmjerenih brzina tokova. Ukupan protok može se izračunati zbrojem protoka svih sekcija (Gravelle, 2015) .

Izmjerene brzine tokova po sekcijama iznose: 2 cm/s (S1), 3 cm/s (S2), 8 cm/s (S3), 11 cm/s (S4), 3 cm/s (S5).

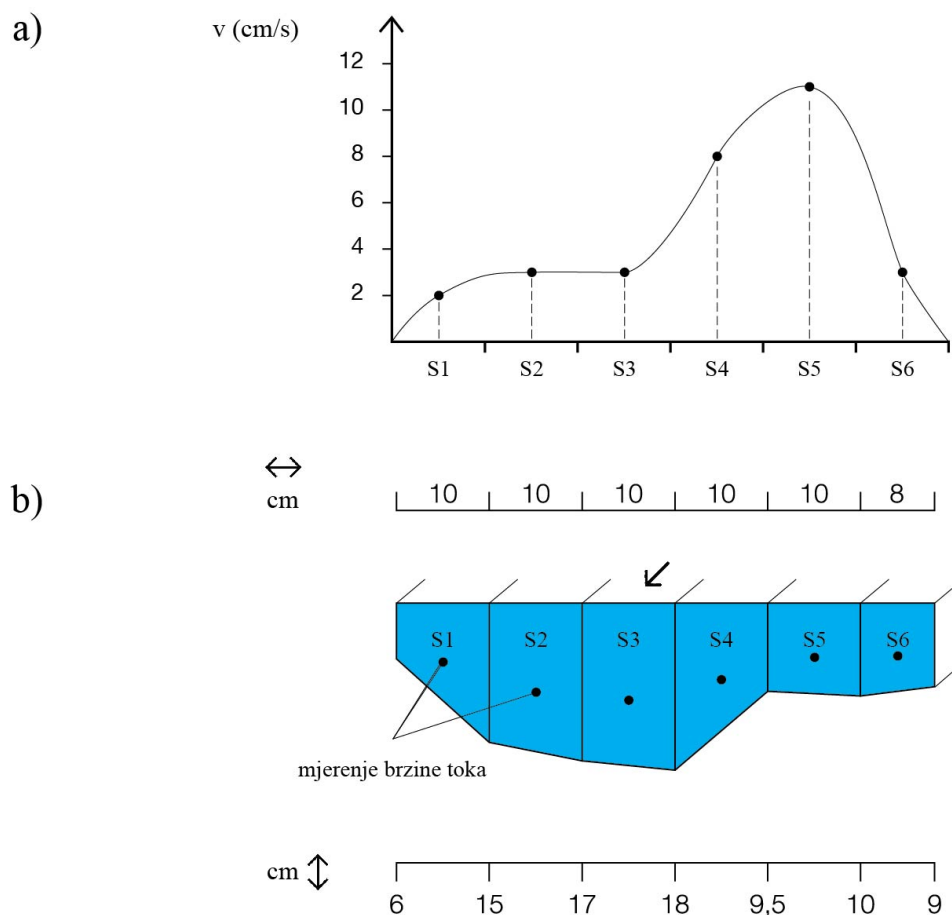
Dobiveni protoci po sekcijama iznose 210 ml/s (S1), 480 ml/s (S2), 525 ml/s (S3), 1040 ml/s (S4), 1075 ml/s (S5) i 282 ml/s (S6), što ukupnim zbrojem daje protok od 3,6 L/s.



**Slika 25.** Mjerenje protoka na ponoru (P)



**Slika 26.** Mjerenje brzine toka na izvoru  
(I2)



**Slika 27.** Shematski prikaz tzv. velocity-area metode primijenjene na izvoru I2: a) grafički prikaz izmjerenih prosječnih brzina toka po sekcijama; b) poprečni profil rijeke podijeljen na manje sekcije unutar kojih su označena mjesta mjerenja brzine toka (prema Le Coz i dr., 2012).

Na ponoru je izmjeren manji protok (0,56 L/s) nego na izvoru I2 (3,6 L/s) što ukazuje na hidrološki period manje količine padalina prilikom čega dolazi do pada razine vodnog lica. Dotoci su smanjeni, a akumulirana voda u podzemlju se polako prazni. U obzir treba uzeti i podzemno jezero koje predstavlja određeni spremnik te autogeni unos u krški sustav.

## Trasiranje

Traser je pušten u ponor u 12:50 sati, te je promatrana boja vode na 3 izvora za koje je pretpostavljeno da bi mogli biti hidrološki povezani s ponorom. U 15:00 dolazi do prve pojave obojenja na izvoru I2. Prema intenzitetu obojenja, maksimalna koncentracija trasera opažena je između 15:30 i 16:20. Pojava obojenja opažena je samo na izvoru I2, dok na ostala 2 promatrana

izvora (I1 i I3) obojenje nije primijećeno. Prema vremenu potrebnom za prvu pojavu trasera na izvoru nakon puštanja u ponor, brzina toka vode kroz podzemlje (prividna brzina tečenja) iznosila je 0,028 m/s ako pretpostavimo da je put linearan (zračna udaljenost između ponora i izvora je 220 m). Ovime je dokazana hidrološka povezanost ponora i izvora I2. Smjer kretanja ponornice kroz podzemlje je pukotinama u smjeru SZ-JI.

Traser je izašao na I2, što ne znači da u drugim hidrološkim uvjetima ne bi došlo do pojave i na ostalim promatranim izvorima. Slijepa dolina na mjestu poniranja tekućice ispunjena je kvartarnim sitnozrnatim sedimentom koji u prvih 20-40 metara toka kroz podzemlje usporava ponornicu. Unatoč tome, dolazi do relativno brze pojave trasera na izvoru (2h i 10 min nakon ubacivanja vode u sustav) što ukazuje na dobru kanalizaciju karbonatnih naslaga (sekundarna i tercijarna poroznost, visok stupanj okršenosti).

## 4.2 Kućinić Selo

### 4.2.1 Definiranje drenažnog bazena ponornice

Topografska površina drenažnog bazena iznosi 1,91 km<sup>2</sup>, dok je opseg 6,65 km. Opseg kruga iste površine iznosi 4,90 km što daje vrijednost odnosa opsega 1,36. Najviši dio istraživanog bazena iznosi 372 m na sjeveroistočnom dijelu ruba bazena, dok je najniži 284 m u području ponora, što čini visinsku razliku od 88 metara. Tip drenažne mreže je nedefiniran, ima elemente više tipova.

### 4.2.2 Morfometrija

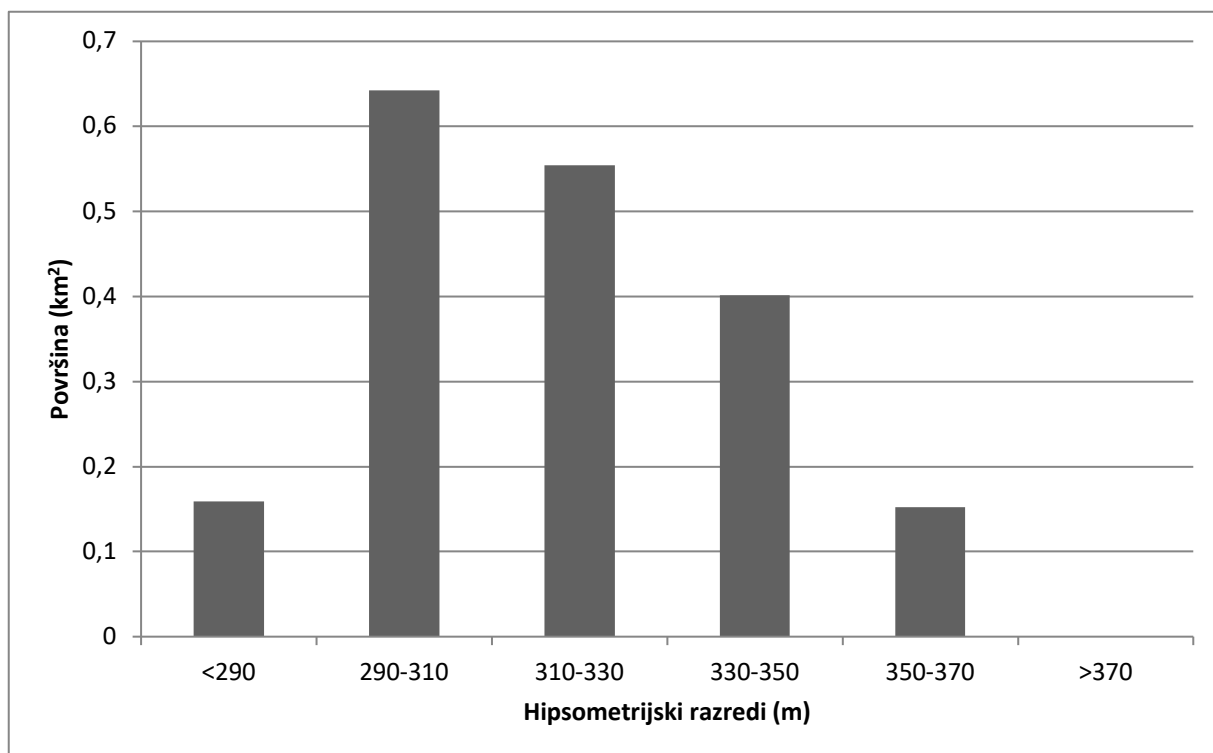
S obzirom da se radi o području male površine i malog raspona nadmorskih visina određeni su razredi malog raspona (20 m) i ima ih 6. Na temelju podataka DEM-a izračunati su udjeli i površine hipsometrijskih razreda.

**Tablica 3.** Površine hipsometrijskih razreda i njihovi udjeli u ukupnoj površini istraživanog drenažnog bazena Kućinić Sela

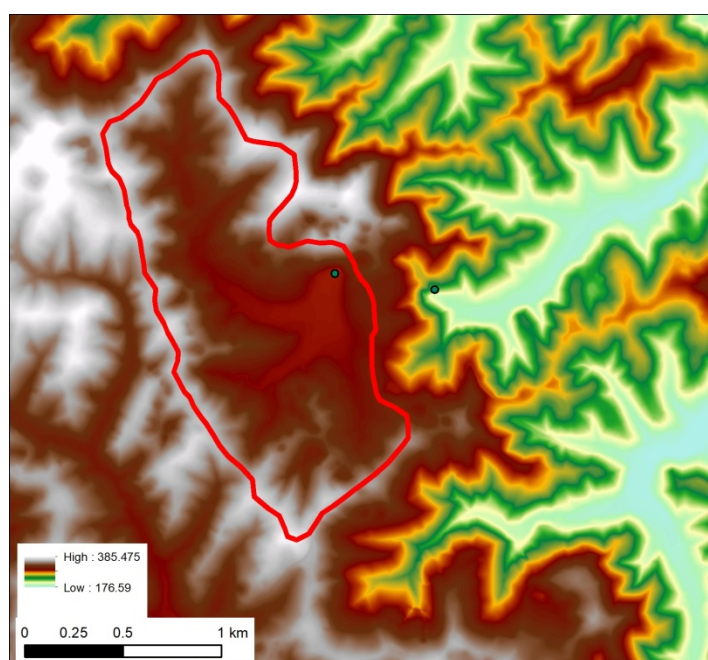
| Hipsometrijski razredi (m) | Udio (%)      | Površina (km <sup>2</sup> ) |
|----------------------------|---------------|-----------------------------|
| <290                       | 8,31          | 0,159                       |
| 290-310                    | 33,64         | 0,642                       |
| 310-330                    | 29,04         | 0,555                       |
| 330-350                    | 21,02         | 0,401                       |
| 350-370                    | 7,96          | 0,152                       |
| >370                       | 0,03          | 0,001                       |
| <b>Ukupno</b>              | <b>100,00</b> | <b>1,91</b>                 |

Na temelju dobivenih podataka (Tab.3, Sl.28) može se zaključiti kako razred 290-310 m (0,642 km<sup>2</sup>) zauzima trećinu istraživanog bazena (33,64 %). Zajedno sa sljedeća dva najzastupljenija razreda (29,04 % i 21,02%) zauzima većinu istraživane površine. Većina površine drenažnog bazena smjestila se na visinskom rasponu od 60 metara (290-350 m).

Na hipsometrijskoj karti Kućinić Sela (Sl.29) također se može uočiti kako se bazen smjestio na malom visinskom rasponu i lokalno je vidljiva promjena strukture terena što ukazuje na pojavu naslaga propusnih stijena (primjerice južni dio drenažnog bazena).

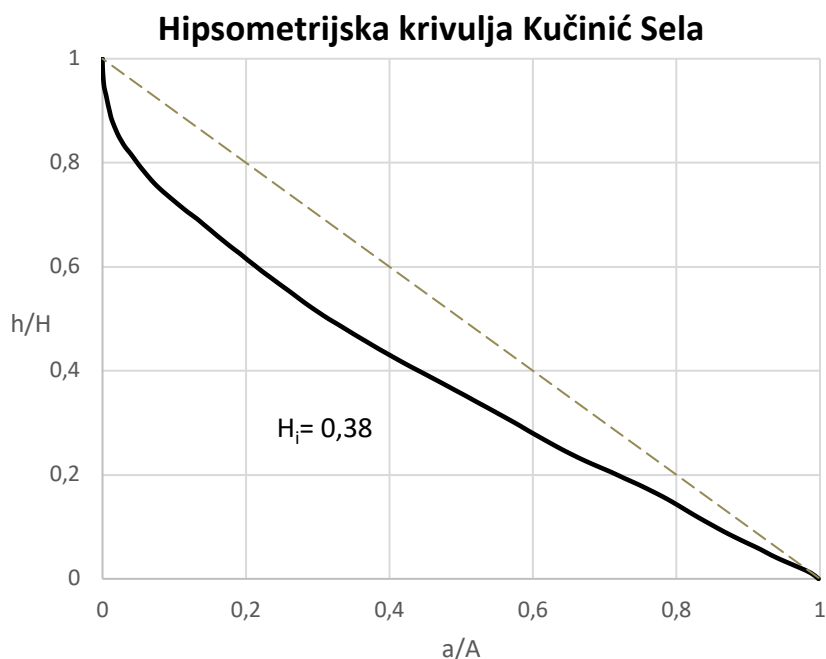


*Slika 28. Histogram površina hipsometrijskih razreda istraživanog drenažnog bazena Kučinić Sela*



*Slika 29. Hipsometrijska karta Kučinić Sela*

Hipsometrijska krivulja drenažnog bazena Kučinić Sela ima konkavan oblik, te  $H_i$  iznosi 0,38 što ukazuje na zreli stadij razvoja reljefa (Sl.30).

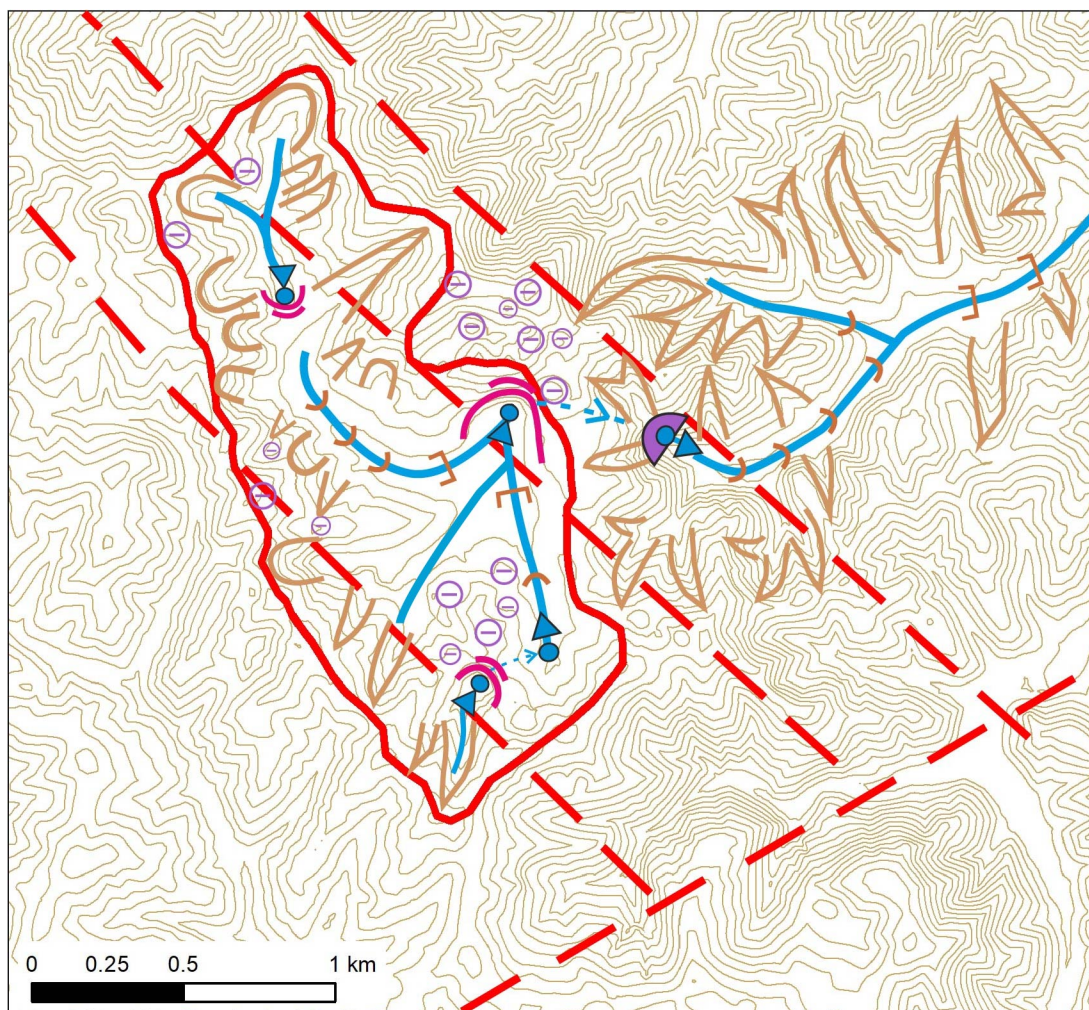


*Slika 30. Hipsometrijska krivulja drenažnog bazena Kučinić sela*

#### 4.2.3 Geomorfološka obilježja i geološki uvjeti razvoja reljefa

Drenažni bazen nalazi se na nepropusnim naslagama fliša K,Pc u kojima se izmjenjuju lapori, pješčenjaci i vapnenci. Na tim naslagama formira se površinski tok vode koji oblikuje fluviodenudacijske oblike reljefa kao što su jaruge, derazijske doline i korita tekućice. Nakon površinskog otjecanja, postoji pojava slijepih dolina na tri mjesta unutar drenažnog bazena gdje dolazi do poniranja rijeke, dvije manje na sjevernom i južnom dijelu drenažnog bazena te jedna veća (na SI dijelu) koja završava sitastim ponorom. One se nalaze na kontaktnom dijelu, tamo gdje dolazi do promjene u propusne stijene i gdje postoji tektonska predispozicija za poniranje zbog rasjeda. Prema položaju jaruga i derazijskih dolina na sjeveru, može se uočiti kako dolazi do centripetalnog slijevanja vode nakon čega ona ponire te ponovno izvire i nastavlja put do ponora. Na južnom dijelu postoji povremeni površinski tok koji nailaskom na propusne naslage ponire (pojava ponikava) te ponovno izvire i nastavlja površinski tok. Za rasjede koji se pružaju smjerom SZ-JI vezane su pojave ponora i izvora. Ponikve ovog područja malih su promjera jer su građene od vapnenačkih stijena, te su jasno uočljive na područjima gdje nema površinskog toka vode. Izvor potoka Radovice nalazi se JI od ponora u obliku izvor-špilje (Sl.31).



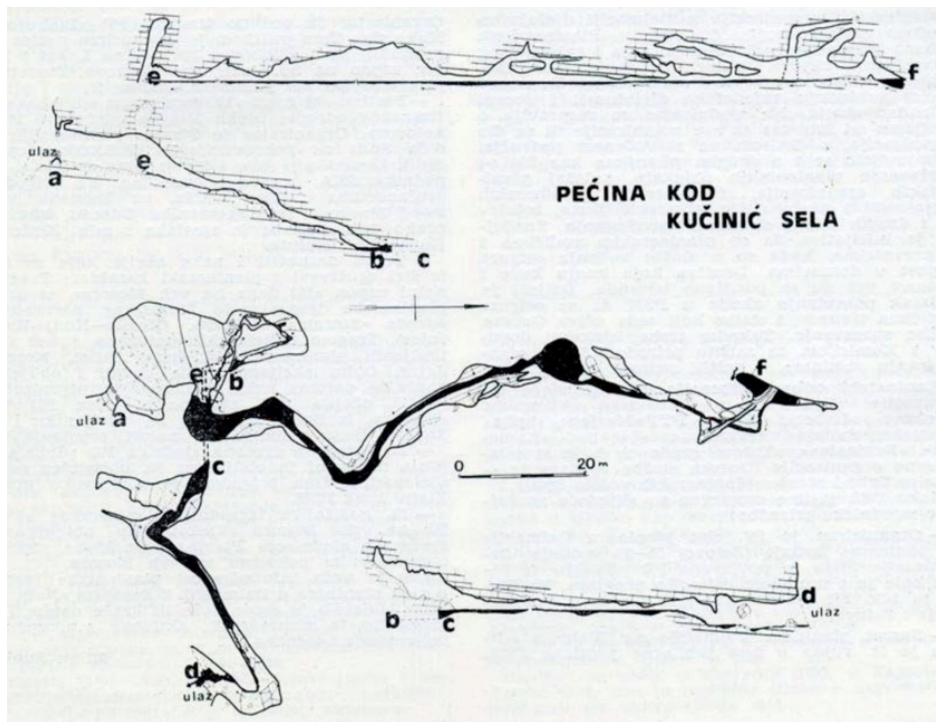


**Slika 31.** Geomorfološka karta Kučinić Sela (ekvidistanca = 10 m)

Speleološki sistem Pećina – izvor - špilja Radovica (Sl.32) nastao je u rasjednoj zoni između malmskih vapnenaca i dolomita i gornjokredne klastične serije naslaga. Ukupna dužina kanala iznosi 319 metara, dok dubina (visinska razlika) iznosi 23 metra. Stijene kroz koje su razvijeni špiljski kanali su tanko slojeviti do pločasti vapnenaci (prostrani kanali), a ponegdje masivni dolomitični vapnenaci i dolomiti (niski i uski kanali). Na kraju špilje Pećina nalazi se ulazni sifon gdje voda ulazi u špilju i teče do izlaznog sifona koji je udaljen 33 m od ulaza u špilju. Izvor špilja Radovica nalazi se pedesetak metara SI od ulaza u Pećinu. Unutar špilje nalazi se ulazni sifon koji je nastavak sifona iz špilje Pećina što čini ova dva objekta spojena u jedan. Iz špilje Radovica izvire potok Radovica i nastavlja površinski tok (Garašić, 1983).

Voda s područja Ponora teče površinom po nepropusnim naslagama i ponire na SI dijelu (sitasti ponor). Nakon 300 m podzemnog kretanja voda izvire, teče 25 m po površini i ponire u 14 m dubok ponor Sklop. Zatim voda teče 100 m kroz neotkrivene podzemne kanale i izvire u

ulazni sifon u Pećini. Teče kroz špilju 180 m, čini sifon dužine 13 m i izvire u izvor-špilju Radovice (Garašić, 1983).



*Slika 32. Speleološki nacrt Pećine kod Kućinić Sela (izvor: Garašić, 1983)*

## 4.3 Tatar Varoš

### 4.3.1 Definiranje drenažnog bazena ponornice

Topografska površina bazena iznosi 3,72 km<sup>2</sup>, a opseg 9,75 km. Površinom je najveći istraživani drenažni bazen. Opseg kruga iste površine iznosi 6,84 km, te vrijednost odnosa opsega iznosi 1,43. Najviša vrijednost odnosa opsega u odnosu na druge bazene može se objasniti time što je razvodnica neravnog oblika, najvjerojatnije zbog snažne erozije i međusobne kompeticije susjednih bazena. Najviši dio iznosi 368 metara, a najniži 253 m, što čini visinsku razliku od 115 metara. Ima dendritičan tip hidrološke mreže. Dendritičan tip, s kanalima orijentiranim u različitim pravcima uobičajen je u područjima gdje postoji homogena struktura stijena (Twidale, 2004).

### 4.3.2 Morfometrija

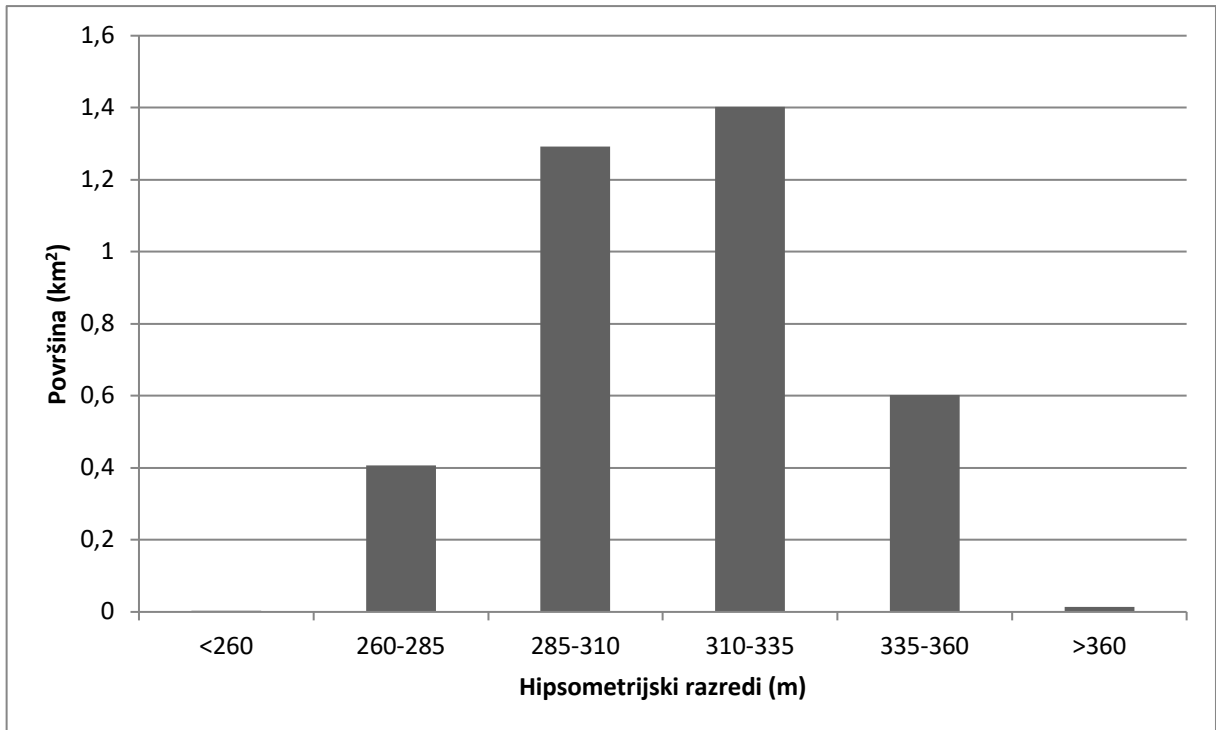
S obzirom da se radi o području male površine i malog raspona nadmorskih visina određeni su razredi malog raspona (25 m) i ima ih 6. Na temelju podataka DEM-a izračunati su udjeli i površine hipsometrijskih razreda.

**Tablica 4.** Površine hipsometrijskih razreda i njihovi udjeli u ukupnoj površini istraživanog drenažnog bazena Tatar Varoši

| Hipsometrijski razredi (m) | Udio (%)      | Površina (km <sup>2</sup> ) |
|----------------------------|---------------|-----------------------------|
| <260                       | 0,07          | 0,003                       |
| 260-285                    | 10,94         | 0,407                       |
| 285-310                    | 34,73         | 1,292                       |
| 310-335                    | 37,68         | 1,401                       |
| 335-360                    | 16,21         | 0,603                       |
| >360                       | 0,37          | 0,014                       |
| <b>Ukupno</b>              | <b>100,00</b> | <b>3,72</b>                 |

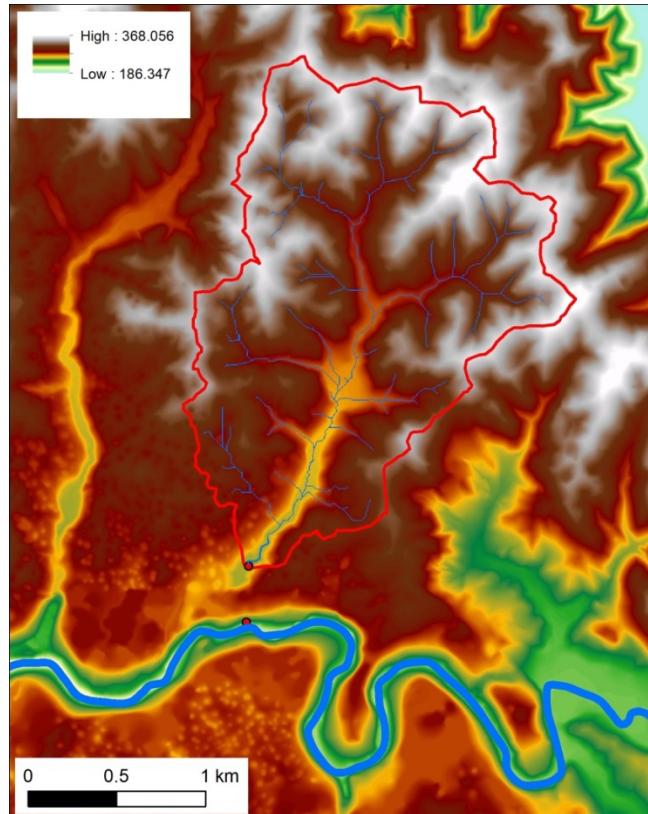
Na temelju dobivenih podataka (Tab.4, Sl.33) može se zaključiti kako razredi 310-335 m (1,401 km<sup>2</sup>) i 285-310 m (1,292 km<sup>2</sup>) zauzimaju više od dvije trećine istraživanog bazena. Najmanje površine zauzimaju razredi <260 (0,07%) i >360 (0,37%).

Na hipsometrijskoj karti Tatar Varoši (Sl.34) također se može uočiti promjena strukture terena što ukazuje na prijelaz nepropusnih u propusne naslage (na jugu drenažnog bazena počinje pojava ponikava).



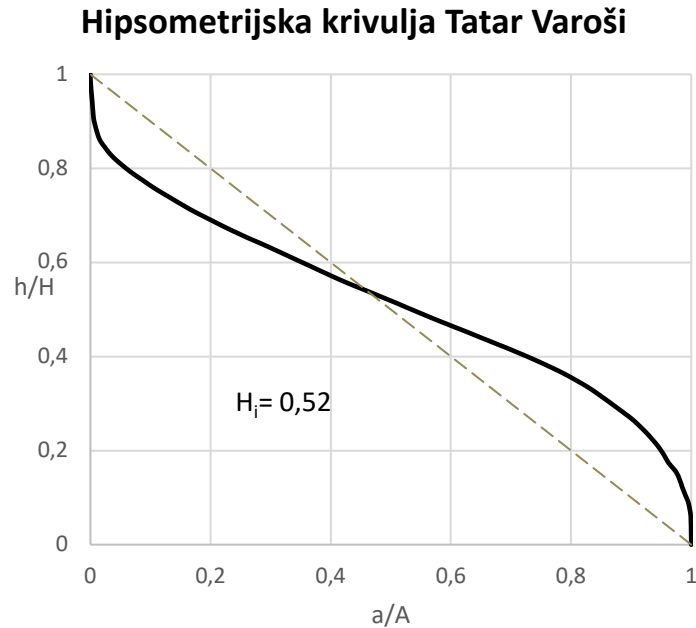
*Slika 33. Histogram površina hipsometrijskih razreda istraživanog drenažnog bazena Tatar Varoši*





*Slika 34. Hipsometrijska karta Tatar Varoši*

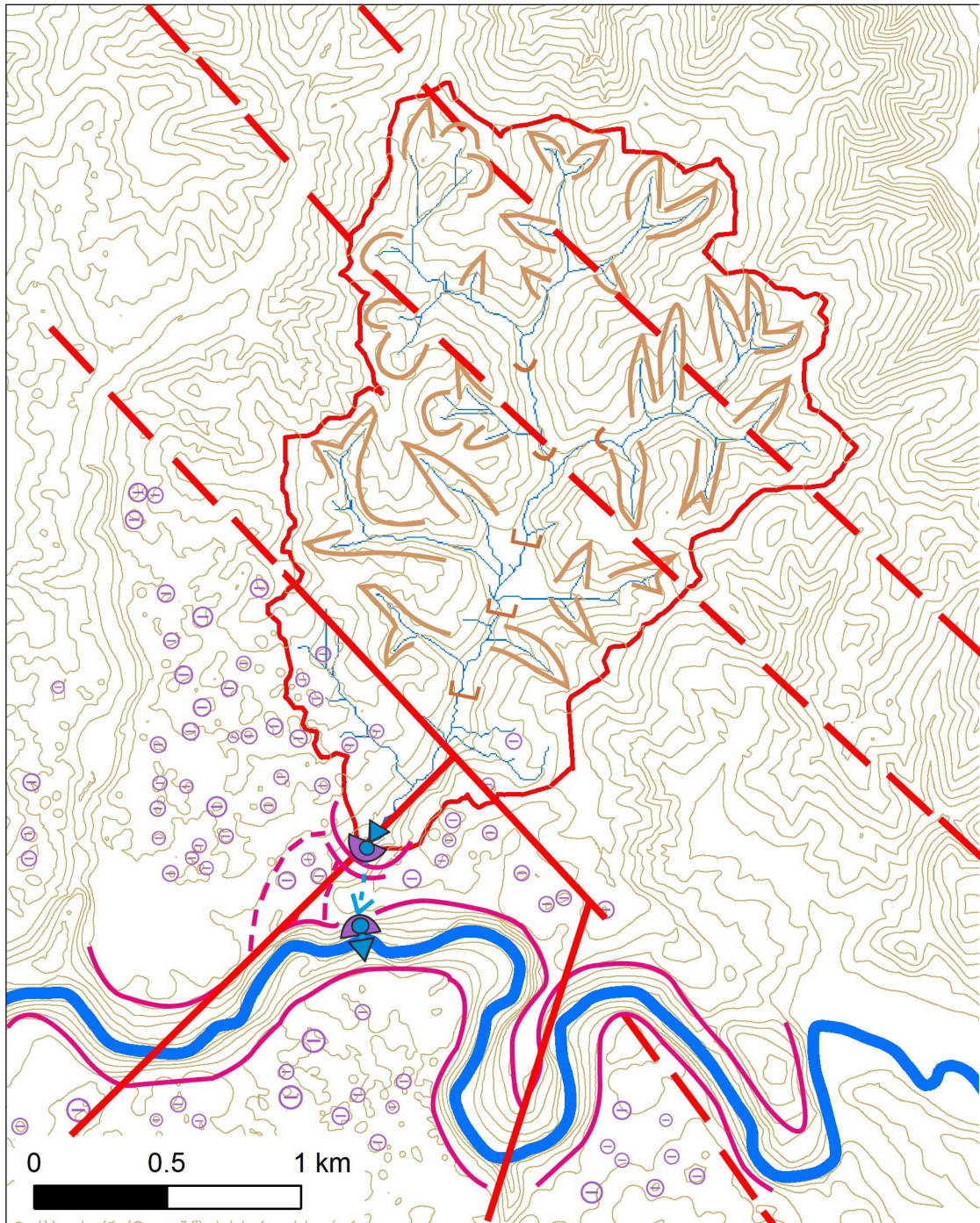
Hipsometrijska krivulja drenažnog bazena Tatar Varoši ima s-oblik krivulje te  $H_i$  iznosi 0,52 što ukazuje na zreliji stadij razvoja reljefa te ga čini najmanje razvedenim bazenom od istraživanih (Sl.35).



*Slika 35. Hipsometrijska krivulja drenažnog bazena Tatar Varoši*

### 4.3.3 Geomorfološka obilježja i geološki uvjeti razvoja reljefa

Najviši vrh drenažnog bazena nalazi se na 368 m nadmorske visine. Gornji i većinski dio drenažnog bazena nalazi se na nepropusnim naslagama fliša K,Pc. Tu je formiran površinski tok tekućice koji je erozijom i derazijom oblikovao fluviodenudacijske reljefne oblike (jaruge, derazijske doline i korito). Na krednim naslagama vapnenca, neposredno prije ponora, počinju se pojavljivati brojne ponikve koje su, zbog svojstava stijene, relativno malog promjera te ukazuju na promjenu geološke građe podloge iz nepropusnih u propusne naslage. Ponor se nalazi na kraju aktivne slijepa doline na rasjednom kontaktu karbonatnih naslaga krede i malma (Sl.36). Rasjedi smjerova SZ-JI, S-J i SI-JZ presjecaju naslage te stvaraju mrežu pukotina u podzemlju. Smjer pružanja suhe doline (SI-JZ) i pretpostavljeni smjer pružanja podzemnih kanala ponornice (S-J) na temelju položaja ponora i izvora, odgovaraju smjerovima postojećih rasjeda na istraživanom području. Na istraživanom području nalazi se špiljski sustav Sovin ponor – Vukovićeva špilja duljine >1 km kojeg se trenutno istražuje (Cvitanović, usmeno priopćenje). Izvor ponornice nalazi se južno od ponora u karbonatnim naslagama malma, nakon čega se ponornica odmah ulijeva u Koranu koja predstavlja erozijsku bazu istraživanog područja na 240 m nadmorske visine.



*Slika 36. Geomorfološka karta Tatar Varoši (ekvidistanca =10 m)*

## 4.4 Kremenita Glava

### 4.4.1 Definiranje drenažnog bazena ponornice

Topografska površina bazena iznosi 0,88 km<sup>2</sup>, dok je opseg dužine 4,57 km. Opseg kruga iste površine iznosi 3,34 km, zbog čega je vrijednost odnosa opsega 1,37. Najviši dio iznosi 460 m na južnom dijelu istraživanog bazena, dok je najniži dio 271 m na području ponora, što čini visinsku razliku od 189 metara. Bazen je s najvećom visinskom razlikom zbog čega voda ima najveću erozijsku moć od svih istraživanih bazena zbog hidrauličkog gradijenta. Hidrološka mreža je paralelno-dendritičnog tipa. Paralelni tip ukazuje da je tok kontroliran gradijentom (Twidale, 2004).

### 4.4.2 Morfometrija

S obzirom da se radi o području male površine i malog raspona nadmorskih visina određeni su razredi malog raspona (40 m) i ima ih 6. Na temelju podataka DEM-a izračunati su udjeli i površine hipsometrijskih razreda.

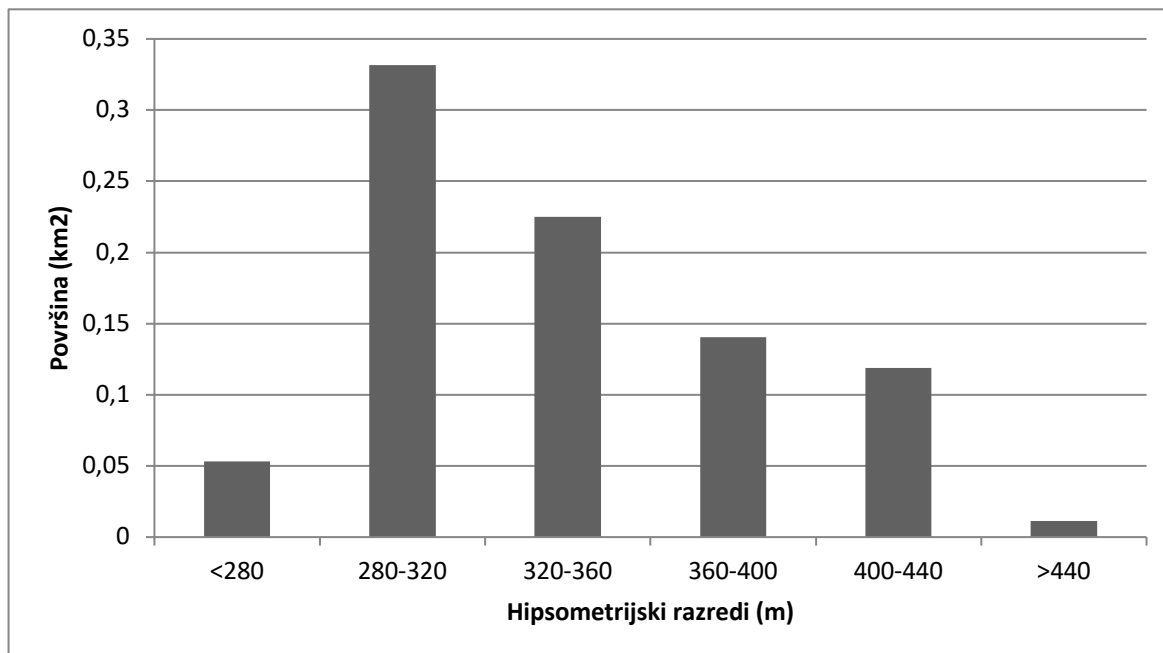
**Tablica 5.** Površine hipsometrijskih razreda i njihovi udjeli u ukupnoj površini istraživanog drenažnog bazena Kremenite Glave

| Hipsometrijski razredi (m) | Udio (%)      | Površina (km <sup>2</sup> ) |
|----------------------------|---------------|-----------------------------|
| <280                       | 6,05          | 0,053                       |
| 280-320                    | 37,66         | 0,331                       |
| 320-360                    | 25,56         | 0,225                       |
| 360-400                    | 15,96         | 0,141                       |
| 400-440                    | 13,50         | 0,119                       |
| >440                       | 1,27          | 0,011                       |
| <b>Ukupno</b>              | <b>100,00</b> | <b>0,88</b>                 |

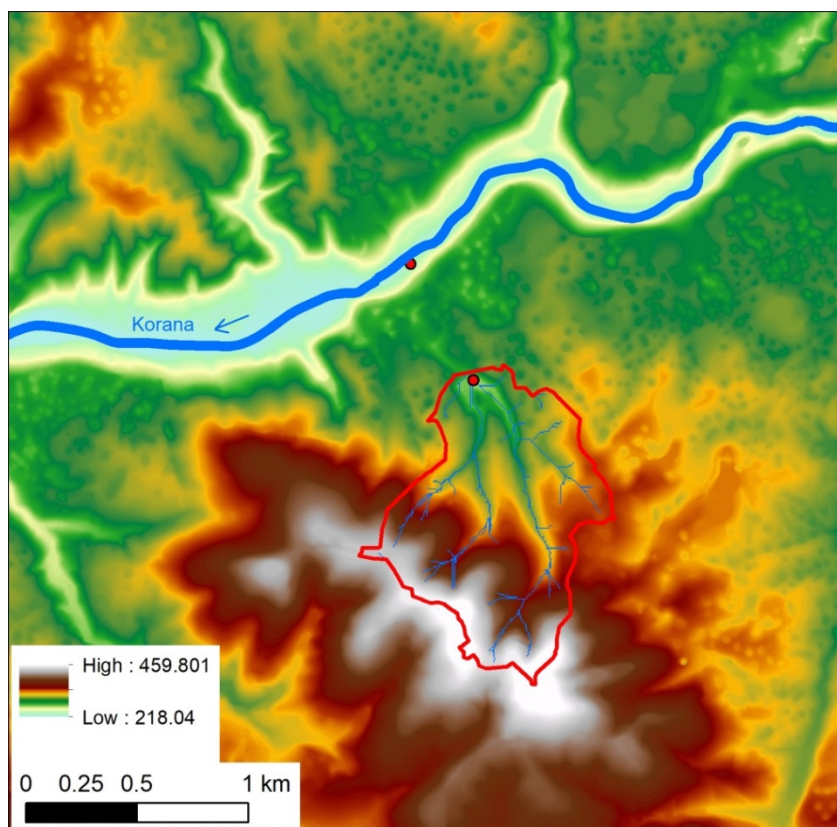
Na temelju dobivenih podataka (Tab.5, Sl.37) može se zaključiti kako razred 280-320 m (0,331 km<sup>2</sup>) zauzima više od jedne trećine istraživanog bazena (37,66%). Sljedeći značajniji razred je 320-360m (0,225 km<sup>2</sup>) s udjelom od 25,56%, te zajedno s najzastupljenijim razredom zauzima gotovo dvije trećine površine. Najmanji udio ima hipsometrijski razred >440 (1,27%) koji obuhvaća rubne dijelove jugozapadnog i južnog dijela drenažnog bazena.



Na hipsometrijskoj karti (Sl.38) jasno se može razlučiti područje nepropusnih (uzvišenje Kremenita Glava na jugu) od područja propusnih (sav prostor oko Kremenite Glave) stijena prema promjeni strukture terena. Posebno su uočljive brojne ponikve kao mali krugovi na propusnim naslagama.

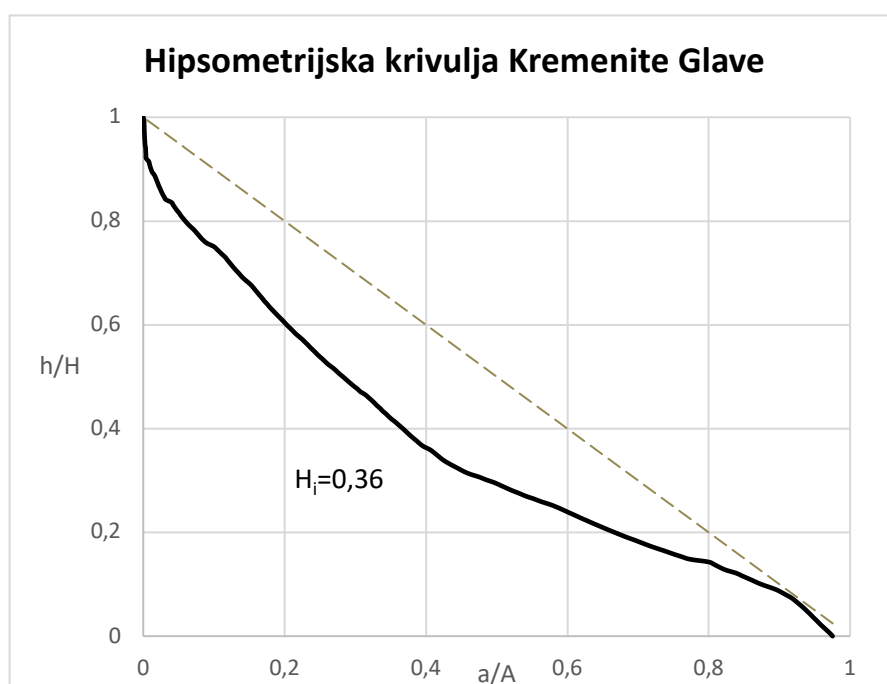


*Slika 37. Histogram površina hipsometrijskih razreda istraživanog drenažnog bazena Kremenite Glave*



*Slika 38. Hipsometrijska karta područja Kremenite Glave*

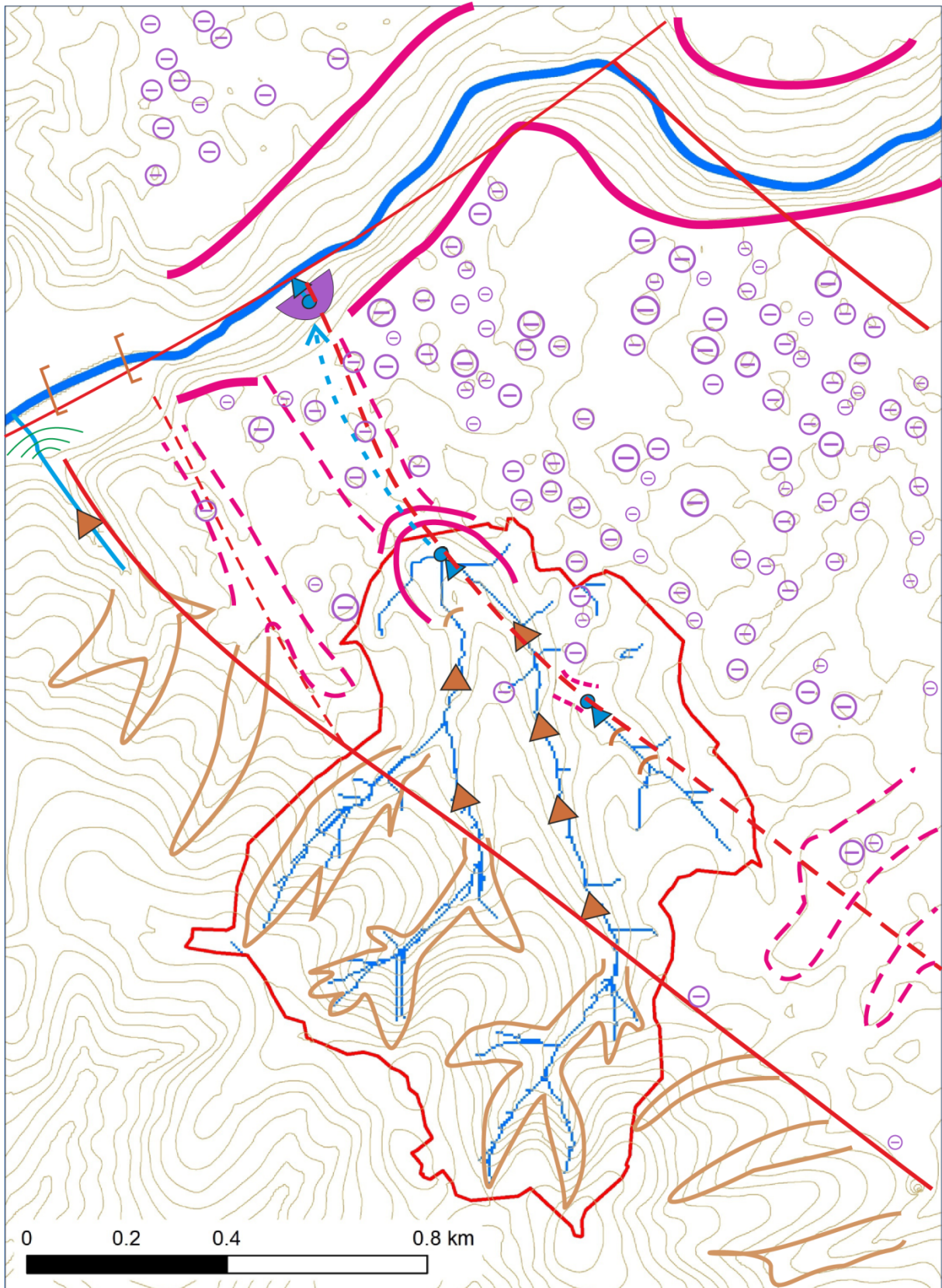
Hipsometrijska krivulja Kremenite Glave konkavnog je oblika te  $H_i$  iznosi 0,36 što ukazuje na zreliji stadij razvoja reljefa (Sl.39).



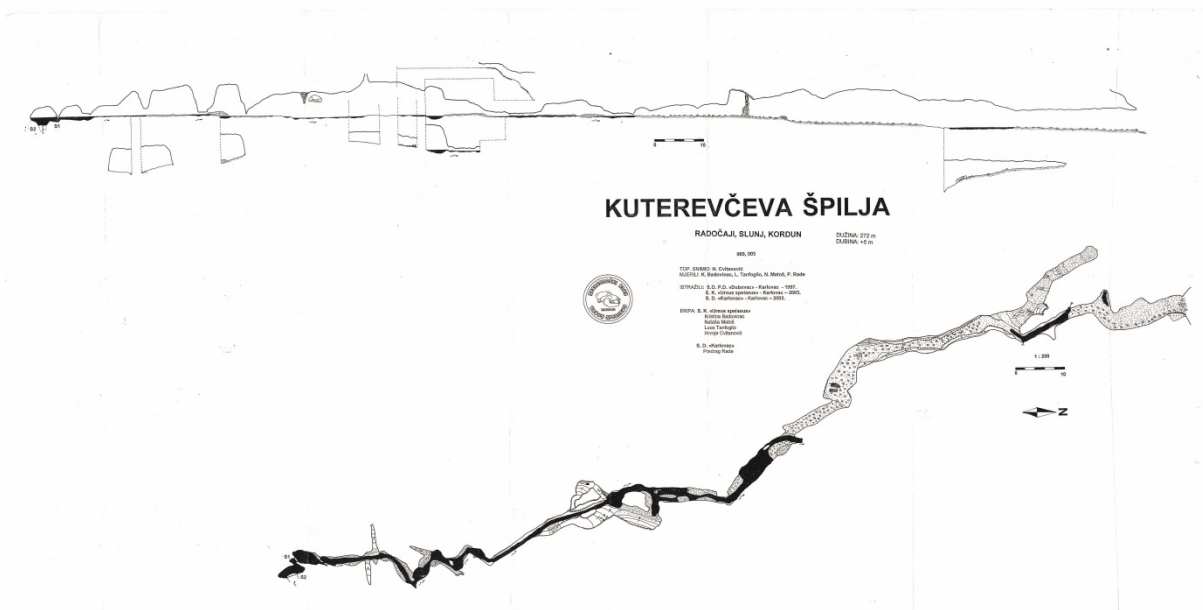
*Slika 39. Hipsometrijska krivulja drenažnog bazena Kremenite Glave*

#### 4.4.3 Geomorfološka obilježja i geološki uvjeti razvoja reljefa

Drenažni bazen ponornice nalazi se na nepropusnim naslagama pješčenjaka perma i propusnim naslagama vapnenca donje krede. Površinski tok vode počinje se formirati na 460 metara visokom brdu. Fluvijalni i fluviudenudacijski procesi dominantno utječu na razvoj reljefa na području brda Kremenite glave (Bočić, 2003). Erozijom i derazijom nepropusnih permskih pješčenjaka formiraju se jaruge i korito tekućice. Između naslaga perma i donje krede postoji rasjedni kontakt. Na temelju reljefnih oblika i njihovog prostornog odnosa pretpostavljeni su rasjedi i pukotinski sustavi važni za razvoj reljefa. Potoci alogenim tokom dolaze na propusne naslage donje krede na čijem se kontaktu formiraju fluviokrški reljefni oblici. Spuštanjem razine vodnog lica, povećava se hidraulički gradijent i dolazi do poniranja rijeke zbog čega se formiraju slijepa i suha dolina. Suha dolina smjera pružanja SZ-JI predstavlja ostatak nekadašnjeg površinskog toka koji se ulijevao u Koranu i koji je formirao dolinu čije su dolinske strane i korito danas dezintegrirani i okršeni (Sl.40). Na vapnenačkim naslagama donje krede utvrđen je veliki broj ponikava i speleološki objekt što ukazuje na visoki stupanj okršenosti. Ponikve na naslagama vapnenaca puno su manjeg promjera od ponikava na dolomitima (područje Dunjaka) što ovisi o različitim mehaničkim i kemijskim svojstvima stijena. Proces okršavanja odvija se paralelno na površini i u podzemlju stoga je speleološki objekt Kuterovčeva špilja (Sl.41), koji se nalazi na samom rasjedu sjeverozapadno od ponora, provodnik i pretpostavljeni izvor istraživane ponornice. Ponornica izvire na tektonski predisponiranom mjestu, na samom rasjedu smjera pružanja SI-JZ i ulijeva se u rijeku Koranu. Položaj izvora sjeverozapadno u odnosu na ponor, smjer pružanja suhe doline SZ-JI i postojanje rasjeda dinarskog smjera pružanja ukazuju da podzemni kanali imaju isti smjer pružanja prema sjeverozapadu. Erozijska baza je dolina rijeke Korane na 230 m koja je svojim tokom usjekla 50 metara duboki kanjon.



*Slika 40. Geomorfološka karta Kremenite Glave (ekvidistanca =10 m)*



**Slika 41.** Nacrt Kuterevčeve špilje (izvor: Arhiva SK „Ursus spelaeus“, 2003.)

## 5 Zaključak

Na temelju geološko-geomorfološke i hidrološke analize i sinteze istraživanih ponornica te njihovih drenažnih bazena zaključeno je sljedeće:

- Istraživani lokaliteti dio su plitkog Kordunskog krša koji je dodirno područje dviju megageomorfoloških regija, Panonskog bazena i Dinarida. Sva četiri istraživana drenažna bazena ponornica pripadaju megageomorfološkoj regiji Panonski bazen i nalaze se unutar Karlovačke županije.
- S obzirom na to da je Kordunski krš prijelazno područje, geomorfološki najzastupljenija su tri morfogenetska tipa reljefa: fluviodenudacijski, fluviokrški i krški kao odraz promjene geološke podloge.
- Fluviodenudacijski reljef oblikuje se na nepropusnim stijenama (tinjčasti pješčenjaci i naslage fliša), fluviokrški na kontaktnom području između nepropusnih i propusnih stijena te na dolomitu, a krški reljef na propusnim stijenama (vapnenci).
- Za nastanak ponornice potreban je kontakt nepropusnih i propusnih naslaga. Na vodonepropusnim naslagama dolazi do formiranja površinskog toka tekućica gdje one erozijom oblikuju fluviodenudacijske oblike reljefa (jaruge i doline). Tekućice nailaskom na propusne naslage erozijom i korozijom oblikuju fluviokrške oblike (suhe i slijepe doline) i alogenim ulazom poniru u podzemlje. Suhe doline predstavljaju paleohidrografske ostatke mreže prije nego su se stvorili uvjeti za poniranje. Uz topljivu podlogu, za razvoj ovakvog reljefa potrebna je i tektonska predispozicija (razlomljenost i pukotine) te pad razine vodnog lica snižavanjem erozijske baze. Ponornice ponovno izvire na površinu nailaskom na nepropusne naslage, također na tektonski predisponiranom mjestu.
- Speleološki objekti na istraživanim lokalitetima uglavnom horizontalnog razvoja (nema velikih promjena nagiba kanala), predstavljaju reliktno kanale (npr. Pećina kod Dunjaka) kojima se pretpostavlja da je nekoć tekla današnja ponornica te hidrološki aktivne kanale u kojima teče recentna ponornica i izvire na površinu (npr. Speleološki sistem Pećina- izvor- špilja Radovica, Kuterevčeva špilja). Dominantno pružanje špiljskih kanala odgovara pravcu rasjeda istraživanih lokaliteta (Dunjak- pravac SI-JZ ukazuje na neotektonske pokrete; Kučinić Selo- pravac SZ-JI, dinarski pravac pružanja) tj. pravcu ponor-izvor.

- Svi istraživani drenažni bazeni malih su površina i u zreom stadiju razvoja reljefa. Drenažni bazen na Dunjaku najmanji je bazen s površinom od 0,295 km<sup>2</sup>. Osim što je najmanji površinom, ujedno ima vrijednost cirkularnosti najbližu 1 što ga čini najrazvijenijim bazenom, na što ukazuje i vrijednost hipsometrijskog integrala (0,4) i oblik hipsometrijske krivulje (konkavna) jer se bazen nalazi u zreom stadiju razvoja reljefa. Bazen Kremenite glave ima najmanju vrijednost hipsometrijskog integrala (0,36) i hipsometrijska krivulja je najkonkavnijeg oblika što ukazuje da je bazen u najzrelijem stadiju razvoja od istraživanih. Tatar Varoš je bazen s najvećom površinom od 3,72 km<sup>2</sup>, ima najveću vrijednost cirkularnosti (1,43), vrijednost hipsometrijskog integrala iznosi 0,52 te je jedini bazen s krivuljom s-oblika što ga čini najmanje razvijenim i bazenom u najmlađem stadiju razvoja od istraživanih.
- Na lokalitetu Dunjak, zbog visokog stupnja okršenosti i kratkog zadržavanja vode u podzemlju, nije došlo do pada koncentracije kisika nakon izlaska iz podzemlja.
- Na lokalitetu Dunjak pH vode je blago alkalno te ima visoke vrijednosti alkaliteta i električne provodljivosti zbog otapanja karbonatne podloge i prisustva karbonatnih i bikarbonatnih iona.
- Na lokalitetu Dunjak povišene koncentracije ortofosfata mogu se objasniti prinosom s poljoprivrednih zemljišta i septičkih jama, odnosno sušnim hidrološkim uvjetima.
- Na lokalitetu Dunjak izmjereni protok na ponoru (0,56 L/s) manji je nego na izvoru I2 (3,6 L/s) što ukazuje na hidrološki period s malom količinom padalina i spuštanje razine vodnog lica.



## 6 Literatura

Bakalowicz, M., 2005: Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeology Journal*, 13(1), 148–160.

Banks, E.W., Simmons, C.T., Love, A.J., Cranswick, R., Werner, A.D., Bestland, E.A., Wood, M., Wilson, T., 2009: Fractured bedrock and saprolite hydrogeologic controls on groundwater/surface-water interaction: a conceptual model (Australia). *Hydrogeology Journal* 17(8):1969–1989

Bočić, N., 2003: Relation Between Karst and Fluviokarst Relief On the Example of the Slunj Plateau (Croatia). *Acta Carsologica* 32 (2), 137–146.

Bočić, N., 2004: Geomorphological Conditions of the Genesis of the Ponor Jovac Cave (Croatia). *Acta Carsologica* 33 (2), 107-113.

Bočić, N., 2009: Geomorfološke značajke prostora Slunjske zaravni. Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, PMF, Zagreb.

Bočić, N., Pahernik, M., Mihevc, A., 2015: Geomorfološki značaj okršenih dolina na krškim zaravnima, primjer Unsko-koranske zaravni.

Bočić, N., Pahernik, M., Maradin, M., 2016: Temeljna geomorfološka obilježja Karlovačke županije. *Prirodoslovlje* 16 (1-2), 153-172.

Bonacci, O. 1987: Karst Hydrology, with special reference to the Dinaric Karst. U: Barsch D., *Springer Series in Physical Environment*. Springer Verlag, Berlin. 141-145; 184pp

Bonacci, O., Trninić, D., Roje-Bonacci, T., 2008: Analyses of the water temperature regime of the Danube and its tributaries in Croatia. *Hydrological Processes* 22 (7): 1014-1021.

Boudaghpour S., 2011: The Effect of Pollutants Dissolved Oxygen and Temperature Change (Case Study:Ghezel-Ozen River), *Journal of Water Sciences Research* 3 (1) 27-35

Boyd, C. E., 2000: pH, Carbon Dioxide, and Alkalinity. *Water Quality*, 105–122

Bradley, R. W., & Sprague, J. B., 1985: The Influence of pH, Water Hardness, and Alkalinity on the Acute Lethality of Zinc to Rainbow Trout (*Salmo gairdneri*), *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 42(4), 731–736

- Cantonati, M., 1998: Diatom communities of springs in the Southern Alps. *Diatom Research*, 13 (2), 201–220.
- Chandler D.G., Bisogni J.J., 1999: The use of alkalinity as a conservative tracer in a study of near-surface hydrologic change in tropical karst, *Journal of hydrology* 216, 172-182.
- Chu, H., Wei, J., Wang, R., & Xin, B. 2016: Characterizing the interaction of groundwater and surface water in the karst aquifer of Fangshan, Beijing (China). *Hydrogeology Journal*, 25(2), 575–588.
- Dedic A., Plenković-Moraj A., Kralj Borojević K., Hafner D., 2015: The first report on periphytic diatoms on artificial and natural substrate in the karstic spring Bunica, Bosnia and Herzegovina. *Acta Botanica Croatica* 74 (2) 393-406.
- Filipović V., Petošić D., Nakić Z. i Bubalo M., 2013: Prisutnost nitrata u podzemnim vodama; izvori i procesi. *Hrvatske vode* 21 (84), 119-128.
- Ford, D., Williams, P., 2007: *Karst Hydrogeology and Geomorfology*, John Wiley i Sons, Chichester, West Sussex, England.
- Gams, I., 1968: Geomorfološko kartiranje na primeru Rakitne in Glinic. *Geografski vestnik*, Ljubljana.
- Gams, I., 1974: *Kras*. Ljubljana, Slovenska matica, 375 p.
- Gams, I., 2001: Notion and forms of contact karst, *Acta Carsologica*, 30/2, 33-46
- Gams, I., 2004: *Kras v Sloveniji v prostoru in času*. Ljubljana, Založba ZRC, 515 p.
- Garašić, M., 1983: Pečina kod Kučinić sela. *Naše planine*. 75 (3-4). 88-90.
- Gill, L.W., Naughton, O., Johnston, P.M., Basu, B., Ghosh. B., 2013: Characterisation of hydrogeological connections in a lowland karst network using time series analysis of water levels in ephemeral groundwater-fed lakes (turloughs). *Journal of Hydrology* (499) 289–302.
- Gligora, M., 2007: Sukcesije funkcionalnih grupa fitoplanktona u polimiktičnim krškim jezerima. Doktorska disertacija. Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.

- Goldscheider N., Drew D., 2007: *Methods in Karst Hydrogeology*, Taylor & Francis Group, London.
- Goldscheider, N., Meiman, J., Pronk, M., Smart, C., 2008: Tracer tests in karst hydrogeology and speleology. *International Journal of Speleology*, 37 (1), 27-40.
- Gravelle R., 2015: Discharge Estimation: Techniques and Equipment, Poglavlje 3.3.5., U: Clarke L.E., Nield J.M., *Geomorphological Techniques*, British Society for Geomorphology, London.
- Gunn, J., 2004: *Encyclopedia of Caves and Karst science*. New York, London, Fitzroy Dearborn, 902p.
- Hayashi, M., 2004: Temperature-Electrical Conductivity Relation of Water for Environmental Monitoring and Geophysical Data Inversion. *Environmental Monitoring and Assessment*, 96(1-3), 119–128.
- Hem, J.D., 1959: Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. US Geological Survey Water-Supply Paper 1473.
- Herak, M., 1951-1953: O geološkim prilikama područja Korane uzvodno od Slunja, *Geološki vjesnik* 5-7, 7-24.
- Herak, M., Bahun, S., Magdalenić, A., 1969: Pozitivni i negativni utjecaji na razvoj krša u Hrvatskoj. *Krš Jugoslavije* 6, JAZU, 45-71, Zagreb.
- Herak, M., 1991: Dinaridi, mobilistički osvrt na genezu i strukturu, *Acta Geologica* 21 (2), 35-117.
- Hersch, R.W., 1995: *Streamflow Measurement (2nd Edition)*. Taylor and Francis, London. 524pp.
- James, C., Fisher, J., Russell, V., Collings, S., Moss, B.R. 2005: Nitrate availability and hydrophyte species richness in shallow lakes. *Freshwater Biol.* 50 (6), 1049–1063
- Jebreen H., Banning A., Wohnlich S., Niedermayr A., Ghanem M., Wisotzky F., 2018: The Influence of Karst Aquifer Mineralogy and Geochemistry on Groundwater Characteristics: West Bank, Palestine, *Water* 10(12): 1829

- Katz, B.G., Dellan, R.S., Illirten, J.J., Catches, J.S., 1997: Interactions between ground water and surface water in the Suwannee river basin. Florida. *J Am Wat Res Assoc* 33(6): 1237-1254
- Kney, A. D., Brandes, D. 2007: A graphical screening method for assessing stream water quality using specific conductivity and alkalinity data. *Journal of Environmental Management*, 82(4), 519–528.
- Korolija, B., Živaljević, T, Šimunić, A., 1979: Osnovna geološka karta 1 : 100 000 list Slunj, Savezni geološki zavod, Beograd.
- Korolija, B., Živaljević, T, Šimunić, A., 1981: Tumač Osnovne geološke karte 1 : 100 000 za list Slunj, Institut za geološka istraživanja, Zagreb
- Le Coz, J., Camenen, B., Peyrard, X., Dramais, G. 2012: Uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity–area method. *Flow Measurement and Instrumentation*, 26, 18–29.
- Mahler B.J., Bourgeais R., 2013: Dissolved oxygen fluctuations in karst spring flow and implications for endemic species: Barton Springs, Edwards aquifer, Texas, USA, *Journal of Hydrology* 505, 291-298
- Mast, M.A., Turk, J.T., 1999: Environmental characteristics and water quality of Hydrologic Benchmark Network stations in the Eastern United States, 1963–95: U.S. Geological Survey Circular 1173-A, 158pp.
- Mihevc, A., 1991: Morfološke značilnosti ponornega kontaknega krasa: izbrani primeri s slovenskega krasa. Master thesis. Ljubljana, Faculty of Arts, Department od Geography, 206 p.
- Mihevc, A., 2001: Speleogeneza Divaškega krasa ( The speleogenesis of the Divača karst). Ljubljana, Založba ZRC, 180 p.
- Miller, V. C., 1953: A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the clinch mountain area, Technical report 3, Department of Geology, Columbia University.
- Nakić, Z., Bačani, A., Vlahović, T. 2001: Antropogeni utjecaj na podzemne vode crpilišta Strmec, Zagreb, Hrvatska. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 13, 25-38.
- Pahernik, M., 2005: Geomorfologija Gorskog Kotara-primjena geografsko informacijskog sustava u istraživanju reljefa, disertacija, PMF, Zagreb

- Paić M., 2014: Geomorfologija krša područja Dunjaka između Slunja i Vojnića. Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, PMF, Zagreb.
- Perez-Pena, J. V., Azanon, J. M., & Azor, A., 2009: CalHypso: An ArcGIS extension to calculate hypsometric curves and their statistical moments. Applications to drainage basin analysis in SE Spain. *Computers & Geosciences*, 35(6), 1214–1223.
- Peters, N.E., 1984: Evaluation of environmental factors affecting yields of major dissolved ions of streams in the United States. USGS WaterSupply Paper 2228.
- Rantz, S.E., 1982: Measurement and computation of streamflow. Vol. 1, Measurement of stage and discharge. Water-Supply Paper 2175. Washington: US Geological Survey.
- Ravbar, N., Kogovšek, J., Pipan, T., 2015 :Environmental value and vulnerability of karst resources. U: Zupan Hajna, N., Ravbar, N., Rubinić, J., Petrič, M., Life and water on karst: Monitoring of transboundary water resources of Northern Istria. Založba ZRC, Ljubljana. 23-33.
- Riđanović J., 1993.: Hidrogeografija. Školska knjiga, Zagreb.
- Roglić, J., 1974: Odnos između površja i podzemlja Dinarskog krša. *Acta Carsologica* VI. 9-19, IZRC SAZU, Ljubljana.
- Sakač N., Glumac N., Kovač I., 2017: Dinamika sadržaja nitrata, fosfata i deterdženata u podzemnoj vodi vodoopskrbnog sustava Međimurske županije, *Radovi Zavoda za znanstveni rad HAZU Varaždin* 28, 31 – 40.
- Sauro, U., 2001: Aspects of contact karst in The Venetian Fore-Alps (Primeri kontaktnega krasa v beneških Predalпах). *Acta Carsologica*, 30 (2), 89-102.
- Stevanović, Z., 2015: Karst Aquifers - Characterization and Engineering. Springer.
- Strahler, A. N., 1952: Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63(11), 1117-1142.
- Twidale, C., 2004: River patterns and their meaning. *Earth-Science Reviews*, 67(3-4), 159–218
- Wakida, F.T., Lerner, D.N., 2005: Non-agricultural sources of groundwater nitrate: a review and case study. *Water Res.*, 39 (1), 3–16

Webb, B. W., 1996: Trends in stream and river temperature. *Hydrological Processes*, 10 (2), 205–226

White, W.B., 1988: Geomorphology and hydrology of karst terrains.- University Press, pp. 464, New York, Oxford.

Wolfe, A.H., Patz, J.A., 2002: Reactive nitrogen and human health: acute and long-term implications. *Ambio*, 31 (2), 120-125.

World Health Organization (WHO) 1999: Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to their Public Health Consequences, Monitoring and Management. E & FN Spon, London.

### **Uredbe, zakoni i internetski izvori**

Uredba o izmjenama i dopunama Uredbe o standardu kakvoće voda, Narodne novine 80/18, 1610, 16, Vlada Republike Hrvatske (7.5.2020.).

Nitratna direktiva - 91/676/EEC: [https://www.voda.hr/sites/default/files/nitratna\\_direktiva\\_-\\_91\\_676\\_eec\\_-\\_1991.pdf](https://www.voda.hr/sites/default/files/nitratna_direktiva_-_91_676_eec_-_1991.pdf) (8.5.2020.)

Okvirna direktiva o vodama Europske Unije (2000/60/EZ)

## **Popis slika i grafičkih priloga**

**Slika 1.** Shematska ilustracija heterogenog krškog vodonosnika karakteriziranog alogenim i autogenim ulaskom vode

**Slika 2.** Topografska karta područja istraživanih lokaliteta

**Slika 3.** Topografska karta istraživanog područja Dunjaka s označenim položajem i obuhvatom drenažnog bazena i hidrološkom mrežom ponornice te mjestima uzorkovanja vode (I, P, I1, I2, I3)

**Slika 4.** Topografska karta istraživanog područja Kučinić sela s označenim položajem i obuhvatom drenažnog bazena ponornice

**Slika 5.** Topografska karta istraživanog područja Tatar Varoši s označenim drenažnim bazenom i hidrološkom mrežom ponornice

**Slika 6.** Topografska karta istraživanog područja Kremenite glave (izvorno mjerilo 1 : 25 000) s označenim položajem i obuhvatom drenažnog bazena i hidrološke mreže ponornice

**Slika 7.** Geološka karta istraživanog područja Dunjaka

**Slika 8.** Geološka karta Kučinić sela

**Slika 9.** Geološka karta Tatar Varoši

**Slika 10.** Geološka karta Kremenite glave

**Slika 11.** Legenda kartiranih jedinica i standardnih oznaka (vezano za geološke karte lokaliteta)

**Slika 12.** Dominantni tipovi drenažnih mreža

**Slika 13.** Prikaz glavnih parametara za konstrukciju hipsometrijske krivulje drenažnog bazena

**Slika 14.** Prikaz izgleda hipsometrijske krivulje i vrijednosti integrala prema stadijima razvoja reljefa: a) mladi stadij b) zreli stadij c) završni stadij

**Slika 15.** Histogram površina hipsometrijskih razreda istraživanog drenažnog bazena na Dunjaku

**Slika 16.** Hipsometrijska karta istraživanog područja Dunjaka

**Slika 17.** Hipsometrijska krivulja drenažnog bazena Dunjaka



**Slika 18.** Geomorfološka karta Dunjaka

**Slika 19.** Legenda geomorfoloških karata

**Slika 20.** Nacrt Pećine kod Dunjaka (a) i rozeta dijagram pružanja kanala (b)

**Slika 21.** Profil Pećine kod Dunjaka s okolnim reljefom i hidrografijom

**Slika 22.** Vrijednosti električne provodljivosti ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) i alkaliteta ( $\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ ) na primjeru Dunjak

**Slika 23.** Koncentracija nitrata ( $\text{NO}_3^-$  ( $\text{mg}/\text{L}$ )) na mjestima uzorkovanja vode (I, P, I1, I2, I3)

**Slika 24.** Koncentracija ortofosfata  $\text{PO}_4^{3-}$  ( $\text{mg}/\text{L}$ ) na mjestima uzorkovanja vode (I,P,I1,I2,I3). Linijski je prikazana granična vrijednost (prema Uredbi o izmjenama i dopunama Uredbe o standardu kakvoće voda (NN 80/2018))

**Slika 25.** Mjerenje protoka na ponoru (P)

**Slika 26.** Mjerenje brzine toka na izvoru (I2)

**Slika 27.** Shematski prikaz tzv. velocity-area metode primijenjene na izvoru I2: a) grafički prikaz izmjerenih prosječnih brzina toka po sekcijama; b) poprečni profil rijeke podijeljen na manje sekcije unutar kojih su označena mjesta mjerenja brzine toka

**Slika 28.** Histogram površina hipsometrijskih razreda istraživnog drenažnog bazena Kućinić Sela

**Slika 29.** Hipsometrijska karta Kućinić sela

**Slika 30.** Hipsometrijska krivulja drenažnog bazena Kućinić sela

**Slika 31.** Geomorfološka karta Kućinić sela

**Slika 32.** Speleološki nacrt Pećine kod Kućinić sela

**Slika 33.** Histogram površina hipsometrijskih razreda istraživnog drenažnog bazena Tatar Varoši

**Slika 34.** Hipsometrijska karta Tatar Varoši

**Slika 35.** Hipsometrijska krivulja drenažnog bazena Tatar Varoši

**Slika 36.** Geomorfološka karta Tatar Varoši

**Slika 37.** Histogram površina hipsometrijskih razreda istraživnog drenažnog bazena Kremenite glave

**Slika 38.** Hipsometrijska karta područja Kremenite glave

**Slika 39.** Hipsometrijska krivulja drenažnog bazena Kremenite glave

**Slika 40.** Geomorfološka karta Kremenite glave

**Slika 41.** Nacrt Kuterevčeve špilje

**Tablica 1.** Površine hipsometrijskih razreda i njihovi udjeli u ukupnoj površini istraživnog drenažnog bazena na Dunjaku

**Tablica 2.** Rezultati mjerenja različitih fizikalno-kemijskih parametara: temperatura (°C), pH, električna provodljivost ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), otopljeni kisik (mg/L), nitrati (mg/L), ortofosfati (mg/L) i alkalitet ( $\text{mgCaCO}_3/\text{L}$ ) po lokacijama uzorkovanja vode I, P, I1, I2 i I3.

**Tablica 3.** Površine hipsometrijskih razreda i njihovi udjeli u ukupnoj površini istraživnog drenažnog bazena Kućinić Sela

**Tablica 4.** Površine hipsometrijskih razreda i njihovi udjeli u ukupnoj površini istraživnog drenažnog bazena Tatar Varoši

**Tablica 5.** Površine hipsometrijskih razreda i njihovi udjeli u ukupnoj površini istraživnog drenažnog bazena Kremenite glave