

# Morfometrijska analiza krških reljefnih oblika temeljena na LiDAR-skim podacima - primjer NP Plitvička jezera

---

Kožar, Lidija

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:217:263210>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-30**



Repository / Repozitorij:

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



**Lidija Kožar**

**Morfometrijska analiza krških reljefnih oblika temeljena na  
LiDAR-skim podacima - primjer NP Plitvička jezera**

**Diplomski rad**

**Zagreb  
2020**



**Lidija Kožar**

**Morfometrijska analiza krških reljefnih oblika temeljena  
na LiDAR-skim podacima - primjer NP Plitvička jezera**

**Diplomski rad**

predan na ocjenu Geografskom odsjeku  
Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu  
radi stjecanja akademskog zvanja  
magistre geografije

**Zagreb  
2020**

Ovaj je diplomski rad izrađen u sklopu diplomskog sveučilišnog studija *Geografija*; smjer: *istraživački (Geografski informacijski sustavi)* na Geografskom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Nevena Bočića i doc. dr. sc. Mladena Pahernika

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA
----------------------------------

Sveučilište u Zagrebu  
Diplomski rad  
Prirodoslovno-matematički fakultet  
Geografski odsjek

**Morfometrijska analiza krških reljefnih oblika temeljena na LiDAR-skim podacima - primjer NP Plitvička jezera**

Lidija Kožar

**Izvadak:** Morfometrijska analiza temeljila se na digitalnom modelu reljefa razlučivosti  $0,5 \times 0,5$  m, izrađenog LiDAR-skim snimanjem. Obodi depresija su izlučivani poluautomatskom metodom, kojom se izvela klasifikacija ponikava u redove. Na temelju ponikava prvog reda su izrađene analize reljefnih atributa (dubina, indeks kružnosti, orijentacija, volumen, površina) i analize prostornih statistika (indeks okršenosti, prostorna gustoća ponikava, mjera disperzije). Zaključeno je kako su ponikve proučavanog područja korozijskog postanka. Dominantni pravac pružanja je N-S, uvjetovan litologijom i tektonikom. Najveća gustoća ponikava je na rudistnim vapnencima, a distribucija ponikava je disperzna. Potrebno je izvršiti dodatna terenska istraživanja kako bi se utvrdio nastanak depresija viših redova.

53 stranice, 38 grafičkih priloga, 7 tablica, 78 bibliografske reference; izvornik na hrvatskom jeziku

Ključne riječi: ponikve, LiDAR, morfometrija, orijentacija, krš, Plitvička jezera

Voditelj: izv. prof. dr. sc. Neven Bočić  
doc. dr. sc. Mladen Pahernik

Povjerenstvo: izv. prof. dr. sc. Neven Bočić  
doc. dr. sc. Mladen Pahernik  
doc. dr. sc. Luka Valožić

Tema prihvaćena: 7. 2. 2019.

Rad prihvaćen: 13. 2. 2020.

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

BASIC DOCUMENTATION CARD
--------------------------

University of Zagreb  
Master Thesis  
Faculty of Science  
Department of Geography

**Morphometric analysis of karst forms based on LiDAR data - example from Plitvička jezera NP**

Lidija Kožar

**Abstract:** Morphometric analysis was based on a digital elevation model of  $0.5 \times 0.5$  m resolution, derived from LiDAR surveying method. The rims of depressions were delineated by a semi-automatic method, which was used for classifying sinkholes into different levels. Based on the data of level-1 sinkholes, the analysis of relief attributes (depth, circularity index, orientation, volume, area) and the analysis of spatial statistics (pitting index, sinkhole density, dispersion patterns) were made. It was concluded that the sinkholes of the studied area are of corrosive origin. Dominant orientation of the longest axis of sinkholes is N-S, conditioned by lithology and tectonics. Highest sinkhole density was observed on rudist-bearing limestones, and the distribution of sinkholes is dispersed. Additional field research needs to be conducted in order to determine the occurrence of depressions on higher levels.

53 pages, 38 figures, 7 tables, 78 references; original in Croatian

Keywords: sinkholes, LiDAR, morphometry, orientation, karst, Plitvice lakes

Supervisor: Neven Bočić, PhD, Associate Professor  
Mladen Pahernik, PhD, Assitant Professor

Reviewers: Neven Bočić, PhD, Associate Professor  
Mladen Pahernik, PhD, Assistant Professor  
Luka Valožić, PhD, Assistant Professor

Thesis title accepted: 07/02/2019

Thesis accepted: 13/2/2020

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

## Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Dosadašnja istraživanja .....	2
3. Teorijski okvir .....	7
3.1. Krš .....	7
3.2. Ponikve .....	9
3.3. LiDAR.....	11
3.3.1. Opis tehnologije .....	12
4. Istraživano područje .....	13
4.1. Geološka građa.....	14
4.2. Hidrologija i klima.....	17
5. Podaci i programska oprema .....	17
5.1. Podaci.....	17
5.2. Programska oprema .....	18
6. Metodologija.....	18
6.1. Napomene .....	18
6.2. Određivanje oboda ponikava.....	19
6.3. Izračun reljefnih atributa.....	21
6.3.1. Dubina .....	21
6.3.2. Indeks kružnosti .....	22
6.3.3. Orijentacija .....	22
6.3.4. Volumen ponikava .....	24
6.4. Izračun prostornih statistika .....	24
6.4.1. Indeks okršenosti.....	24
6.4.2. Gustoća i prostorni raspored gustoće ponikava .....	24
6.4.4. Mjera disperzije ponikava .....	25
7. Rezultati i rasprava.....	26
7.1 Kategorizacija depresija u redove .....	27
7.2. Analiza reljefnih atributa .....	28
7.2.1. Dubina .....	28



7.2.2. Indeks kružnosti .....	30
7.2.3. Orijentacija .....	33
7.2.4. Volumen .....	36
7.3. Analiza prostornih statistika.....	38
7.3.1. Indeks okršenosti.....	38
7.3.2. Gustoća ponikava .....	39
7.3.3. Mjera disperzije ponikava .....	44
8. Zaključak .....	45
9. Izvori i literatura .....	47

## 1. Uvod

Ponikve su površinske depresije koje se formiraju na mjestima gdje voda otapa karbonatne stijene i odnosi površinske čestice tla u podzemlje, čime se površina polako udubljuje ili iznenadno urušava (Ford i Williams, 2007; Zhu i dr., 2014). Osim korozije i urušavanja, geneza ponikava može biti vezana i uz procese sufozije i supkutane korozije unutar nevezanih klastičnih sedimentata smještenih na karbonatnoj podlozi (Sauro, 2003; Pahernik, 2012). Ponikve su tipični oblici u krškom reljefu, koje pomažu pri razlikovanju od "normalnog" erozijskog reljefa, oblikovanog površinskim tokovima, stoga se smatraju i dijagnostičkim oblikom krškog reljefa (Bondesan i dr., 1992; Ford i Williams, 2007). Njihova pojava je također vezana za tektonske strukture, ponajprije uz rasjedne zone (Gabor, 2018). Iako je termin "ponikva" općepoznat, njezina definicija znatno varira u hrvatskoj i stranoj literaturi, kao i načini klasificiranja (Bonacci, O., Roje-Bonacci, T., 2006; Moreno-Gómez, 2019).

U okviru krškog reljefa, ponikve su bile prvi oblici podvrgnuti morfometrijskim analizama (Basso, 2013; Kobal i dr., 2015). Ranija istraživanja (LaValle, 1967; Williams, 1971, 1972) su bila fokusirana (i ograničena) na morfometrijske parametre koji opisuju razvoj krša i genezu ponikava. Problem ranijih morfometrijskih analiza je bio nedostatak karata s dovoljnom visinskom (altimetrijskom) rezolucijom. Zbog toga su visinski parametri ponikava bili obično zanemarivani te je naglasak bio na planimetrijskim atributima (Bondesan i dr., 1992). Metode za kartiranje ponikava su se temeljile na vizualnoj interpretaciji nisko-rezolucijskih topografskih karata i zračnih snimaka - s provjerama točnosti podataka na terenu (Doctor i Young, 2013). Sve do sredine 1990-ih se pretpostavljalo kako je točne podatke o atributima ponikava moguće dobiti jedino terenskim istraživanjima (Šušteršič, 1994). Takve metode su bile neučinkovite, dugotrajne i nepraktične jer je pouzdanost ručno digitaliziranih ponikava bila upitna (Doctor i Young, 2013; Wu i dr., 2016).

Posljednjih godina, točnost kartografskih podataka je napredovala razvojem GIS softvera, kao i tehnikama daljinskih istraživanja (Bondesan i dr., 1992; Bauer, 2015). Tehnike daljinskih istraživanja se dijele s obzirom na aktivne (Radar, LiDAR) i pasivne senzore (npr. geodetska izmjera, zračne fotografije, hiperspektralne i multispektralne snimke, satelitske snimke, ...).

Ovaj rad se temelji na digitalnom modelu reljefa rezolucije  $0,5 \times 0,5$  dobivenom iz LiDAR-skih podataka za područje Plitvičkih jezera.

Cilj ovog diplomskog rada je morfometrijska analiza pomoću GIS alata, koja obuhvaća:

- određivanje oboda ponikava poluautomatskom metodom iz digitalnog modela reljefa (u nastavku: DEM, *Digital Elevation Model*)
- klasifikaciju ponikava u redove,
- analizu reljefnih atributa (dubina, kružnost, orijentacija, volumen, površina),
- analizu prostornih statistika (indeks okršenosti, prostorna gustoća, disperzija),
- uočavanje korelacije navedenih atributa.

## 2. Dosadašnja istraživanja

Geomorfometrija je znanost koja analizira reljef na kvantitativnoj razini. Počela se spominjati već u 16. stoljeću (Pike i dr., 2008), međutim, do njenog razvoja je došlo tek 1970-ih godina razvojem računalstva. Jedan od glavnih doprinosa je rad S. Evansa (1972) s naslovom *General geomorphometry*, u kojem je istaknuo temeljne varijable koje se upotrebljavaju u morfometriji te opisao postupke u računalstvu. Bitan doprinos za prepoznavanje reljefnih oblika su iznijeli Peucker i Douglas (1975) u publikaciji *Detection of Surface-Specific Points by local Parallel Processing of Discrete Terrain Elevation Data*. Jenson i Domingue (1988) su naveli osnove automatiziranog otkrivanja oblika na fluvijalnom reljefu na temelju DEM-a, koja je danas osnova za metode određivanja oboda ponikava (Obu, 2011).

Novijim postignućima u prepoznavanju reljefnih oblika pripada doktorska disertacija Jo Wooda (1996) s naslovom *The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Models*. Bondesan, Meneghel i Sauro (1992) su u radu *Morphometric analysis of dolines* naveli pregled morfometrijskih analiza specifičnih za ponikve, naveli planimetrijske, kutne i altimetrijske parametre te njihovu korelaciju u prostornoj analizi (Obu, 2011).

Marko Krevs (1992) se bavio traženjem lokalnih reljefnih ekstrema na DEM-u s prostornom rezolucijom od 100 metara, što je jedan od prvih koraka do automatizirane morfometrijske analize. Iznio je definicije ekstrema (minimuma i maksimuma) i pojma lokalnosti, kojima je

dobio različite rezultate te ih je uspoređivao s obzirom na upotrebljivost (Novljan, 2019). Automatskim prepoznavanjem reljefnih oblika bavio se i Podobnikar (2001, 2008a, 2008b, 2008c). Izradio je algoritme za automatsko prepoznavanje bitnih točaka na površini iz slojnica. Zajedno s Petrom Možinom (2008) je proučavao mogućnosti prepoznavanja reljefnih oblika lokalnim prozorom (*local window*) na temelju histograma (Obu, 2011).

Automatiziran pristup prepoznavanju krških depresija je opisao Obu (2011) u svom diplomskom radu. Izradio je algoritam koji se sastoji od nekoliko dijelova - izračuna dna depresija, određivanja oboda depresija i na kraju, klasifikacije. Depresije su bile određene na temelju najniže rubne ćelije teoretičnog porječja depresije. Problem pojavljivanja depresija unutar depresija je riješio postupnim zapunjavanjem te na taj način klasificirao depresije na različitim redovima. Rezultati analize su bili ovisni o kvaliteti i rezoluciji ulaznih podataka. Pomoću skripte napisane u programskom jeziku *Python* je dobiven sloj s rubovima depresija i atributivnom bazom morfometrijskih podataka sa širokom mogućnošću upotrebe (Obu, 2011). Istu automatiziranu metodu je primijenila Gostinčar (2013) te rezultate usporedila s rezultatima kartiranja na temelju topografske karte 1:5.000. Kobal i dr. (2015) su opisanu metodu upotrijebili za analizu gusto zaraslog i neprohodnog terena, na temelju DEM-a s prostornom rezolucijom 1m, nastalog iz oblaka točaka LiDAR-skog snimanja (Kobal i dr., 2015).

Sličnu metodu kao Obu (2011) su koristili i Miao i dr. (2013). Opisali su metodu adaptivnog *Wiener* filtera (AWF) i hijerarhijske segmentacije porječja (HWS) kojima su popunjavali depresije. U drugom dijelu je algoritam za popunjavanje primijenjen na potencijalne ponikve te je izlučeno devet morfoloških karakteristika. U zadnjem dijelu, na temelju modela *Random Forest* klasifikatora su selektirane "prave" ponikve od svih potencijalnih ponikava. Rezultati su pokazali kako je opisani pristup učinkovit za detektiranje "zrelih" ponikava i procjene rizika u okršnim područjima. Sličnu metodu za popunjavanje depresija su primijenili Wu i dr. (2016) koristeći metodu *Contour Tree* za identificiranje različitih redova ponikava (Miao i dr., 2013).

Rahimi i Alexander (2013) su iz DEM-a prostorne razlučivosti 1 m razvili algoritam za otkrivanje ponikava u tri dijela: u prvom se pomoću morfološke operacije (*Erosion*) detektiraju potencijalne lokacije ponikava. U drugom dijelu algoritam automatski izlučuje obode ponikava

aktivnim podešavanjem slojnica (*Active Contour Fitting*). U zadnjem koraku se brišu plitke depresije, s obzirom na omjer dubine i površine. Rezultati su uspoređeni sa sadržajem baze podataka, koja je bila izrađena terenskim kartiranjem ponikava pomoću topografskih karata i aero-snimaka (Rahimi i Alexander, 2013).

Padro-Igúzquiza i dr. (2013) su razvili metodu koja se temelji na izlučivanju depresija iz DEM-a alatom koji simulira popunjavanje depresije do visine najniže točke njenog oboda (*pour-point*) preko koje bi se voda izlila iz depresije. Popunjen DEM se zatim oduzme od originalnog, a kao rezultat se dobiju dijelovi DEM-a koji predstavljaju ponikve. Na takvim podacima su moguće daljne morfometrijske analize. U svom radu su istaknuli kako je za identifikaciju manjih krških depresija bitna i što veća rezolucija podataka (Padro-Igúzquiza i dr., 2013).

Doctor i Young (2013) su usporedili kvalitetu podataka za određivanje oboda ponikava na tri načina: 1. ručnim kartiranjem ponikava, na temelju sjenčanog reljefa (*Hillshade*), sjenčanih naklona (*Slopesshade*), zračnih fotografija i indeksa topografske pozicije (*Topographic Position Index, TPI*) izrađenih iz DEM-a rezolucije 1×1 m; 2. modelom hidrološko pravilnog reljefa, izrađenog alatom za popunjavanje depresija koji je oduzet od originalnog rastera; 3. automatskim izlučivanjem depresija pomoću indeksa topografske pozicije. Rezultati dobiveni na temelju druge, poluautomatizirane, metode, su pokazali da se u 70% slučajeva poklapaju s rezultatima dobivenim ručnim kartiranjem. Treća, automatizirana metoda, detektira puno veći broj ponikava, koji se u manjem postotku preklapa s ručno određenim ponikvama te je bilo potrebno ručno filtrirati dobivene rezultate budući da su detektirani i primjeri koji se mogu klasificirati kao nepravilnosti na površini (Doctor i Young, 2013).

U svom diplomskom radu je Grlj (2014) opisao postupak automatskog prepoznavanja bezstropnih špilja u sklopu kojeg je napisao skriptu za identificiranje reljefnih depresija. Skripta funkcionira tako da nekoliko puta popuni depresije ulaznog DEM-a različitim z-vrijednostima, zatim od popunjenog DEM-a oduzme izvorni. Slijedi pretvorba rasterskih podataka u sloj poligona. Novljan (2019) je na temelju spomenute skripte izradila morfometrijsku analizu ponikava na pobočjima.

Bauer (2015) se bavio određivanjem oboda ponikava na digitalnom modelu reljefa, za koje je naveo tri metode. Prva metoda (OCC - *outermost closed contour*) temelji se na dobivanju oboda iz najviše zatvorene slojnice koja opisuje ponikvu, s kojom je također i definiran oblik ponikve. Druga metoda (WSB - *watershed-based doline delineation*) se temelji na opažanju razvodnica ponikava. Obod ponikve je određen ćelijama iz kojih otječe voda u jednu najnižu točku. Treća metoda (FDB - *filled-DTM based doline delineation*) se temelji na zapunjavanju ponikve od njezine najniže točke sve do najviše - gdje započinje prelijevanje (Gabor, 2018). Na temelju Bauerove prve metode je Gabor (2018) napravila geomorfološku analizu ponikava za područje Matarskog podolja.

Sličnu metodu su primijenili Telbisz i dr. (2016) usporedivši rezultate dobivene u trima bazama podataka: "TOPO" ponikve su određivane na klasičan način iz najviše zatvorene slojnice na topografskoj karti mjerila 1:10.000; "KRIG" ponikve su dobivene u istom mjerilu digitalizacijom slojnice iz DEM-a pomoću *Kriging* metode interpolacije; "LIDAR" ponikve su dobivene pomoću DEM-a izrađenog iz LiDARskih podataka. Budući da su metode određivanja oboda ponikava osjetljive na rezoluciju ulaznih podataka i potencijalne greške zbog njihove detaljnosti, postavljen je prag dubine iznad kojeg se potencijalne depresije ne smatraju ponikvama, već pogreškama. Za ponikve dobivene *Kriging* metodom je prag bio 1 m, a za LiDAR 0,5 m. Rezultati su pokazali da su ponikve dobivene iz DEM podataka površinski veće od onih koje su određene ručnim kartiranjem (Telbisz i dr., 2016).

Sasvim suprotne rezultate korištenih metoda iznijeli su Šegina i dr. (2018), proučavajući pouzdanost podataka za određivanje oboda ponikava na području otoka Krka, dobivenih iz topografskih karata mjerila 1:5.000 i zračnih orto-foto snimaka rezolucije 0,5 m. Zaključila je kako je ručno kartiranje iz orto-foto snimaka pouzdanije za određivanje oboda od automatskih i polu-automatskih metoda na temelju DEM-a. Podaci dobiveni iz slojnice generiranih na temelju DEM-a nisu reprezentativni predstavnici stvarnog oboda ponikava zbog vertikalnih nepravilnosti kao i zbog intervala slojnice koji ne zahvaća nužno stvarni obod ponikve (Šegina i dr., 2018).

Novi model kartiranja ponikava predložili su Moreno-Gómez, Liedl i Stefan (2019). Identificirali su ponikve unutar već postojećih depresija koristeći alat za popunjavanje, oduzeli rezultat od ulaznog DEM-a te klasificirali depresije u nekoliko intervala koristeći algoritam alata *Slice*. Upotrebljena je *Jenks* metoda optimizacije, kako bi se smanjila varijanca (mjera disperzije veličine) između vrijednosti unutar zadanog intervala depresija i kako bi se povećala varijanca između različitih intervala. U trećem dijelu je slijedila pretvorba u vektorski sloj i selektiranje rezultata glede na attribute i lokaciju. Rezultati metode su pokazali točnost u 63% slučajeva, zbog nemogućnosti provjere točnosti rezultata lociranih ispod gustih šuma, čime bi postotak točnosti bio veći (Moreno-Gómez i dr., 2019).

Geomorfološka promatranja Plitvičkih jezera iznio je Roglić (1951) tvrdnjom kako je zbog zatopljenja klime, krajem posljednjeg glacijala, uzrokovan prestanak periglacialnih procesa modeliranja u gornjokoranskoj dolini i razvoj šumskog pokrova u širem porječju Korane koji je pridonio agresivnosti vode, a time i otapanju karbonatne podloge (Roglić, 1951). Prema Rogliću (1974), Plitvička jezera su riječnog tipa, koja predstavljaju uzvodni dio rijeke Korane i iz kojih se voda prelijeva iz jednog jezera u drugo sustavom barijera. S obzirom na fiziografske i hidrološke karakteristike Plitvičkog hidrološkog sustava, Roglić (1974) izdvaja tri sustava povezanosti jezera: kanalski, kaskadni i vodopadni.

Godine 1978. je Institut za geološka istraživanja u Zagrebu izradio geološku kartu promatranog područja u mjerilu 1:100.000, koje je dio lista OGK Bihač. U tumaču je iznesen pregled dotadašnjih istraživanja, prikaz opće građe terena, opisane su naslage kartiranih jedinica, opća obilježja tektonske građe i slijed orogenetskih zbivanja, navedene su mineralne sirovine te povijest stvaranja tereza (Polšak i dr., 1978).

Pentek i dr. (2007) su na temelju terenskih istraživanja i topografskih kartiranja okršenih područja Mađarske, Austrije, Hrvatske i Rumunjske analizirali prostorne parametre korozivskih ponikava. Zaključili su kako se ponikve šire na četiri načina: širenje oboda i baze ponikve; širenje baze ponikve; širenje oboda ponikve; udubljivanje ponikve, ali ne i širenje. Na području Hrvatske, analizirali su 51 ponikvu na Plitvičkim jezerima koje karakterizira širenje oboda bez

značajnijeg udubljivanja. Također, dužina konveksnog nagiba raste na račun konkavnog nagiba. Nagib postaje blaži i duži, dok se baza ne izravna (Pentek i dr., 2007).

Analizu prostorne gustoće ponikava izradio je Pahernik (2012) unutar analize prostorne gustoće ponikava za područje cijele Republike Hrvatske. Kartirao je dna ponikava kosteći topografske karte u mjerilu 1:25.000, a gustoća je računata *Kernel* metodom unutar površine 1km<sup>2</sup>. Za područje Plitvičkih jezera su uočeni oštri prijelazi gustoća ponikava s obzirom na litostratigrafska obilježja stijenskih kompleksa i geološku strukturu (Pahernik, 2012).

Bočić i dr. (2015) su proučavali susjedno područje Unsko-koranske zaravni, za koje su vektorizirali dna ponikava na topografskoj karti mjerila 1:25.000. Utvrdili su kako je najveća gustoća ponikava na reliktnim dolinama. Pojava je objašnjena postupnim okršavanjem područja s razvijenom drenažnom mrežom. U početku su tokovi bili izraženi, a kasnije zamijenjeni ponikvama. Tijekom pleistocena, zbog tektonike se povećao hidraulički gradijent i počeli su se urezivati tokovi na površini, što je vodilo do snižavanja gornje granice podzemne vode. Manji tokovi nisu imali dovoljnu snagu erozije te su bili izloženi okršavanju. Aktivna drenažna mreža je prešla u suhu, a zatim i u reliktnu, na kojoj se nalazi najveća gustoća ponikava (Bočić i dr., 2015).

U svom diplomskom radu, Rastija (2015) je napravio morfometrijsku analizu Nacionalnog parka Plitvička jezera na temelju digitalnog modela reljefa rezolucije 25 m<sup>2</sup>. Proučio je hipsometrijska obilježja, vertikalnu raščlanjenost reljefa, nagibe padina, udubljenja (depresije) u reljefu te razmještaj ponikava. Spomenute parametre je proučavao u odnosu na strukture i morfogenetska obilježja (Rastija, 2015).

### **3. Teorijski okvir**

#### **3.1. Krš**

Krš je reljef sa specifičnom hidrologijom i oblicima koji nastaju u kombinaciji topivih stijena i razvijene sekundarne poroznosti (Ford i Williams, 1989). Često je povezan s karbonatnim stijenama poput vapnenaca i dolomita, a karakteriziraju ga špilje, jame, zatvorene depresije,



rijeke ponornice i veliki izvori. Termin "krš" je nastao je u vapnenačkoj regiji na granici Slovenije i Italije, koje se odlikuje spomenutim oblicima. Ime regije je *Kras* (slovenski) ili *Carso* (talijanski), a germanizirano je u termin *Karst* u periodu Austro-Ugarskog carstva, za vrijeme prvih znanstvenih istraživanja iz područja geomorfologije i hidrologije spomenute regije (Goudie, 2004).

Krš nastaje ispunjenjem triju uvjeta:

- prisutnost vodotopivih karbonatnih stijena (>90%  $\text{CaCO}_3$ ),
- razvijena sekundarna poroznost (niska primarna poroznost) i
- prisutnost veće količine vode koja djeluje na karbonatne stijene (Goudie, 2004).

Najpoznatije karbonatne stijene su vapnenci i dolomiti koje se razlikuju s obzirom na mineralni sastav, kemijska i mehanička svojstva te nastanak i starost. Vapnenci se uglavnom sastoje od kalcita ( $\text{CaCO}_3$ ), koji je najzastupljeniji, ali i od dolomita, kvarca, glina i organske tvari. Osim kalcita, vapnenac može biti građen i od aragonita koji ima istu kemijsku formulu, ali nastaje pri višoj temperaturi te ima različitu strukturu. Dolomit ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) je najzastupljeniji mineral u građi istoimene stijene te nastaje procesom dolomitizacije (Ford i Williams, 2007). Dolomitizacija (dijageneza) je proces nastajanja dolomita tako što se minerali kalcita ili aragonita zamjene dolomitom (Ford i Williams, 2007). Karbonatne stijene vrlo su podložne kemijskom otapanju, koje je izraženije s povećanjem koncentracije ugljičnog dioksida ( $\text{CO}_2$ ) u vodi. Reakcijom vode i  $\text{CO}_2$  nastaje slaba ugljična kiselina ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) koja otapa mineral kalcit ( $\text{CaCO}_3$ ) te nastaje kalcijev hidrokarbonat ( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ) koji je stabilan u vodi.

Ovaj proces se odvija i u suprotnom smjeru, kada iz otopine dolazi do gubljenja ugljičnog dioksida čime se kalcijev karbonat taloži u obliku sedre ili siga u podzemlju. Intenzitet korozije ovisi o klimatskim (količina i raspored oborina, temperatura), biogeografskim (vegetacija), pedološkim (debljina i prozračnost tala), reljefnim (nagib) i o svojstvima karbonatnih stijena određenog područja (Dreybrodt, W., 1988).

U geološkoj prošlosti su se odvijali razni tektonski pokreti koji su imali posljedice na strukturu zemljine kore te utjecali na sastav karbonatnih stijena. Pomicanje litosfernih ploča uzrokuje boranje ili savijanje slojeva te uvjetuje nastanak sekundarnih pukotina. One svojim položajem

djelomično određuju raspored i kretanje podzemnih voda, a omogućavaju i poniranje vode koja pri tome otapa stijene (Bonacci i dr., 2013). Na pojavu i gustoću pojedinih krških oblika utječe nagib padina i vertikalna raščlanjenost. Osim spomenutih, krški reljef je podložan utjecaju drugih geomorfoloških procesa – eolskih, fluvijalnih, glacijalnih, itd. Za njega je karakteristično da se većina vode nalazi u podzemlju, budući da karbonatne stijene ne zadržavaju površinsku vodu. Vodeni tokovi prisutni su na površini jedino ako se nalaze na vodonepropusnim stijenama, dok je voda koja se nalazi u podzemlju vrlo neravnomjerno raspoređena. Prisutnost vode u podzemlju te njena cirkulacija na mjestima gdje postoje sekundarne pukotine uzrokuje progresivno proširivanje šupljina procesom otapanja i znatno povećanje propusnosti (Ford i Williams, 2007).

### **3.2. Ponikve**

Ponikve su zatvorene depresije kružnog oblika, čiji se promjer mjeri desecima ili stotinama metara, a dubina nekoliko desetaka metara. Njima se voda centripetalno drenira u podzemlje kroz sustave pukotina, šupljina i špilja (Goudie, 2004).

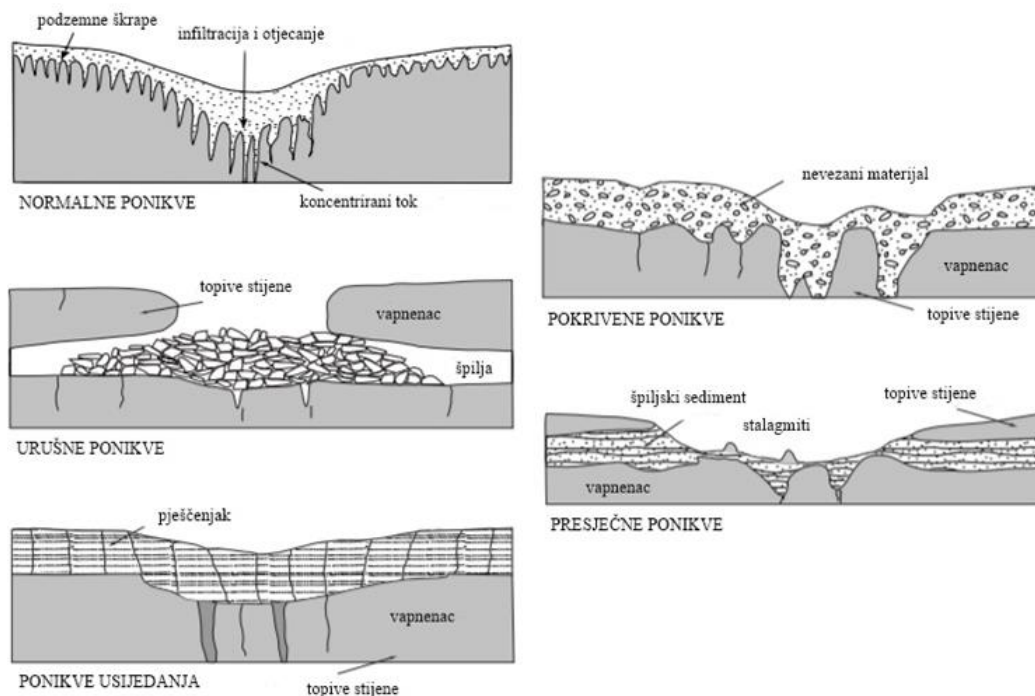
Ponikve je prvi opisao Cvijić (1895), koji je zagovarao teoriju korozijskog nastanka ponikava. Većina autora je prihvatila njegovu definiciju i skicu prereza tipične ponikve na kojoj je ona temeljena, kao i ideju o vertikalnom odvodnjavanju u dnu ponikve (Šušteršič, 2012; Klun, 2016). Nastanak korozijskih ponikava još uvijek se povezuje s lokalno povećanim površinskim otapanjem stijene prilikom uspostavljanja efektivnog subvertikalnog odvodnjavanja padalinske vode kroz stijenu, uslijed kojeg dolazi do snižavanja reljefa i nastanka depresija (Ford i Williams, 2007; Klun, 2016).

Novija literatura (Williams, 2004; Gutierrez i dr., 2008; Waltham i dr., 2010) opisuje dva glavna procesa geneze ponikava: korozija i subsidencija (usijedanje/slijeganje). Ponikve nastale procesom subsidencije se dalje dijele na urušne ponikve i ponikve usijedanja - koje se pojavljuju u evaporitnim stijenama te na sufozijske ponikve - koje se pojavljuju u nevezanim sedimentima. Korozijske ponikve su većinom posljedica površinskih procesa, dok su urušne ponikve nastale zbog procesa u podzemlju (Waltham i dr., 2010) . Prema Bondesan i dr. (1992), s obzirom na morfogenetsku klasifikaciju, razlikuju se:

- Korozijske ponikve - nastale kemijskim otapanjem stijene; voda otječe u središnji dio koji postaje zona ubrzane korozije,

- Aluvijalne ili sufozijske ponikve - koje nastaju unutar slojeva nekonsolidiranih stijena, poput aluvija ili naslaga tla, smještenih iznad karbonatnih stijena. Razvoj "zakopanih" ponikava unutar topivih stijena, uzrokovan otjecanjem vode, uzrokuje slijeganje i sufoziju gornjeg materijala, kao i razvoj zatvorenih depresija,
- Ponikve usijedanja - nastale postupnim urušavanjem vezanih, netopivih, propusnih stijena (npr. pješčenjaci), smještenih iznad karbonatnih stijena. Voda prolazi kroz pukotine gornjih slojeva, dolazi do topivih stijena i otapa ih. Rezultat je diferencijalno slijeganje (subsudencija) netopivih stijena i razvoj zatvorenih depresija,
- Urušne ponikve - nastaju rušenjem tankog krova podzemne šupljine.

Proučavajući geometrijski oblik, veličinu, nastanak, funkciju te litološke i strukturne značajke reljefa, Sauro (2003) je naveo pet glavnih tipova prirodnih ponikava (Sl. 1):



Sl. 1: Glavni tipovi ponikava po: Sauro (2003), prilagođeno

- Normalne ponikve, odnosno ponikve nastale ubrzanom korozijom - pri nastanku prevladava proces otapanja stijena,
- Urušne ponikve - nastale urušavanjem špiljskog stropa,

- Ponikve usijedanja - nastale otapanjem slojeva topivih stijena ispod gornjeg sloja netopivih stijena, koji se zbog toga usijeda,
- Pokrivene ponikve - nastale kao posljedica "upijanja" nevezanih klastičnih sedimenata koji prekriva ili djelomično zapunjuje kršku depresiju,
- Presječne ponikve - nastale odstranjivanjem jamskih sedimenata iz bezstropne špilje (Sauro, 2003).

Čar (2001) je istaknuo da je "čistih" tipova ponikava u prirodi malo te da se većina ponikava pojavljuje kao kombinacija različitih tipova nastanka. Geneza ponikava se ne može svesti na jedan proces jer do nastanka tih oblika vode različiti strukturno-geološki uvjeti i procesi, koji se međusobno isprepliću (Čar, 2001).

### **3.3. LiDAR**

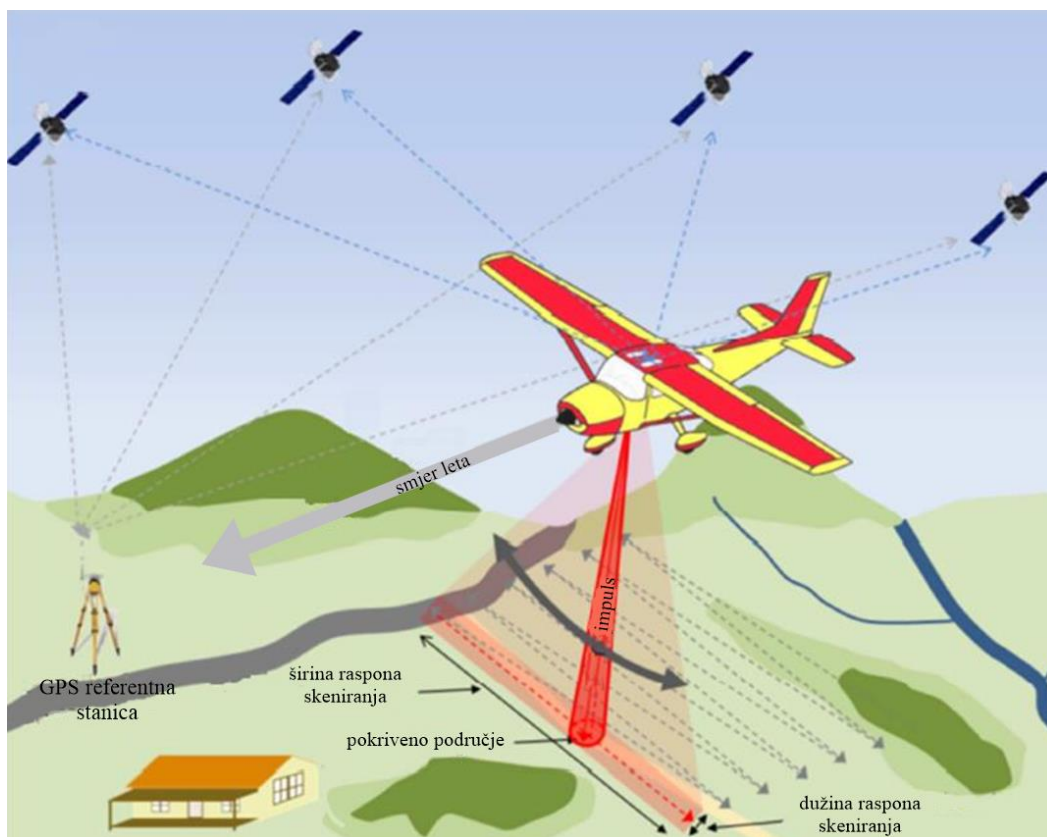
LiDAR (Light Detection and Ranging) je metoda daljinskih istraživanja, pri kojoj se mjeri udaljenost između odašiljača laserske zrake i točke na Zemljinoj površini. Nosač laserskog skenera, u slučaju aerolaserskog skeniranja (u nastavku: ALS), je pokretni nosač u zraku (npr. avion). Laser je uređaj za stvaranje i pojačavanje laserske svjetlosti (eng. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Laserska svjetlost je usko usmjerena i ima određenu valnu duljinu. Laserski skeneri koriste valne duljine iz područja vidljive i bliske infracrvene svjetlosti (Urbančić i Grigillo, 2015). Radi se o aktivnom senzorskom sustavu mjerenja, gdje se za snimanje koristi vlastiti izvor elektromagnetskog zračenja. Postoje dva načina mjerenja udaljenosti: fazni i impulsni način. Impulsni način koriste svi komercijalni lidarski sustavi. Pored mjerenja udaljenosti između odašiljača i površine, mjeri se i smjer laserske zrake (Novak, 2018).

Lasersko skeniranje se dijeli na: satelitsko lasersko skeniranje, aerolasersko skeniranje (*Airborne Laser Scanning*, ALS), terestričko lasersko skeniranje, mobilno lasersko skeniranje i lasersko skeniranje iz kratkih udaljenosti. Nabrojene tehnologije laserskog skeniranja se međusobno razlikuju u vrsti platforme i u opremi (Kosmatin Fras, 2009; Novak, 2018). U početku su oblaci točaka korišteni isključivo za izradu DEM-a, dok danas lidarski sustavi omogućuju veliku gustoću točaka i zbog toga su korisni u brojnim područjima, poput: percipiranje i modeliranje prostora (objekti i zgrade), 3D modeliranje infrastrukturnih objekata

(ceste, dalekovodi, cjevovodi), modeliranje pojedinih stabala, otkrivanje promjena na šumskim površinama, uočavanje promjena u urbanim i ruralnim područjima, upravljanje rizicima prirodnih i umjetnih katastrofa, navigacija autonomnih vozila, itd. (Urbančić, 2017; Novak, 2018). Lidarski sustav snimanja sastoji se iz zračnog i terenskog segmenta. Zračni segment, pored nosača ALS i laserskog skenera, sastoji se i od sustava za dinamičko pozicioniranje i orijentaciju sustava (eng. *Position and Orientation System*, POS). Suvremeni sustavi uključuju i digitalnu kameru, koja uz lidarsko skeniranje omogućuje i fotografiranje terena. Terenski segment sastoji se iz referentne postaje za globalno pozicioniranje te strojne i programske opreme za naknadnu obradu podataka (Kosmatin Fras, 2009; Novak, 2018).

### 3.3.1. Opis tehnologije

Kod skeniranja, nosač lidarskog sustava leti po unaprijed određenoj liniji, pri čemu skenira površinu zadane širine – pojas (Sl. 2). Za plan snimanja je bitno odrediti takvu liniju koja će osigurati preklapanje snimanih pojava.



Sl. 2: Princip rada ALS snimanja; Izvor: Sopchaki, Sampaio, (2016), prilagođeno

Laser pri snimanju površine šalje kratke impulse velikom brzinom, bilježi njihov odboj te mjeri vrijeme putovanja svakog impulsa - od njegovog emitiranja do detekcije povratnog dijela odbijene zrake. Odbijeni laserski impuls se obično difuzno rasprši na površini objekta, zbog čega se natrag do senzora vrati samo manji dio odbijene zrake. Na vrlo glatkim površinama ponekad dolazi do zrcalnog odboja, pri čemu se zraka ne vrati do senzora te je nemoguće izvesti mjerenje. Udaljenost od senzora na nosaču do promatrane površine se računa iz vremena putovanja impulsa. Sistem POS u određenim vremenskim intervalima, neovisno o lidaru, sprema položaj i obrtaje (okrete) mjerne naprave. Istovremeno s mjerenjima skenera, na avionu se izvode opažanja GNSS (Globalni Navigacijski Satelitski Sustav) te se ti podaci spremaju na referentnoj GNSS postaji. Ti su podaci potrebni pri naknadnom određivanju položaja laserskog skenera diferencijalnom GPS metodom. Svi obuhvaćeni podaci, pa tako i lidarski, se registriraju u GPS vremenskom sistemu, što omogućava vremensku sinkronizaciju između senzorskih sistema. Točnost sinkronizacije se giba oko jedne mikrosekunde. Također, bitna je kalibracija senzorskih sistema kako bi se točnije utvrdio njihov međusobni položaj i orijentacija sredstva snimanja (Kosmatin Fras, 2009; Novak, 2018).

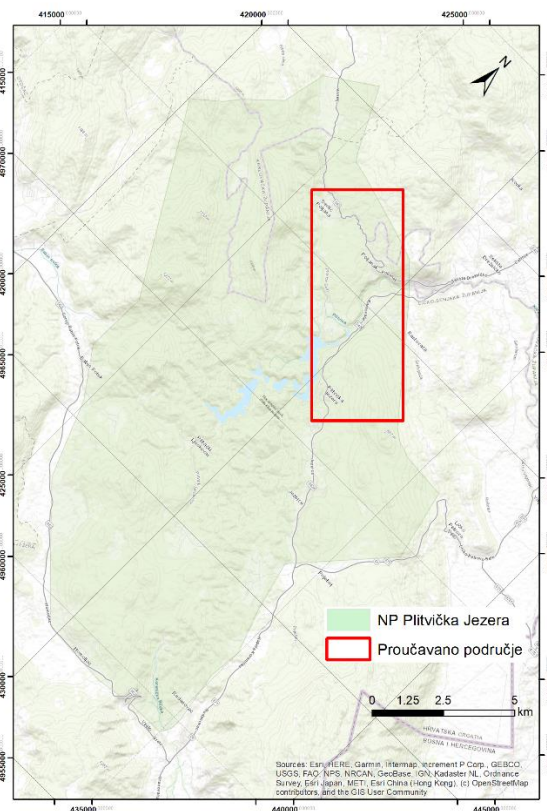
#### **4. Istraživano područje**

Geomorfološki položaj područja predstavlja njegov položaj u geomorfološkoj regionalizaciji Hrvatske (Bognar, 2001). Prema toj regionalizaciji, položaj istraživanog područja se svrstava u sljedeće kategorije:

1. Megamakrogeomorfološka regija – Dinarski gorski sustav
2. Makrogeomorfološka regija – Gorska Hrvatska
3. Mezogeomorfološka regija – Gorska skupina Mala Kapela
4. Subgeomorfološka regija – JZ podgorsko - zavalsko - udolinsko područje Male Kapele.

Istraživano područje nalazi se svojim sjevernim dijelom u Karlovačkoj, a južnim dijelom u Ličko-Senjskoj županiji. Gotovo cijelom svojom površinom od 26,068 km<sup>2</sup> se nalazi unutar Nacionalnog parka Plitvička jezera, a omeđuju ga selo Mukinje na jugu, jezero Kozjak na jugozapadu, naselje Plitvica selo na zapadu, naselje Rakovica na sjeveru te brdo Medveđak i naselje Rastovača na istoku (Sl. 3). Najniža točka izabranog područja se nalazi na 406 m n.v., a

najviša na 876 m n.v., što čini relativnu visinu područja od 473 m. Teren je najniži na središnjem dijelu uz jezero Kozjak i kanjon rijeke Korane, dok se uzdiže prema sjevernom i jugoistočnom dijelu s najvišim vrhom Oštri Medveđak. Površinu karakteriziraju brojne ponikve.



Sl. 3: Položaj istraživanog područja

#### 4.1. Geološka građa

Geološka podloga šireg promatranog područja obuhvaća karbonatne naslage mezozojske starosti, a temeljne značajke područja istraživanja prikazane su na OGK lista Bihać (Polšak i dr., 1976). Prema tumaču lista Bihać, na širem području Plitvičkih jezera mogu se izdvojiti stratigrafske jedinice trijasko, jurske i kredne starosti. Sastav naslaga pretežito je karbonatni (vapnenac i dolomit) (Polšak i dr., 1978). Analizirano područje je dio strukturne jedinice Trovrh - Gola Plješivica, izgrađeno većinom od krednih naslaga. Područje predstavlja sinklinorij dinarskog pravca u čijoj su jezgri naslage rudistnih vapnenaca. Bore su blage, a nagibi slojeva variraju između 10° i 30°. Sinklinorij se normalno zatvara periklinalno položenim slojevima. Na svojoj sjeveroistočnoj i jugozapadnoj strani, sinklinorij je omeđen jakim rasjednim zonama. Od strukturnog područja Čatrnja - Lipovača ga dijeli strmi reversni rasjed, a od Bihaćke zaravni

ga dijeli vertikalni rasjed Ličko Petrovo selo - Baljevac - Zavalje. Uz potonji rasjed su ukliještene paleogenske naslage te se on produžuje prema sjeverozapadu u području krednog sinklinorija, sve do Trovrha. Sinklinorij je na jugozapadnom dijelu spušten uz rasjed Biljevina - Prijeboj - Mihaljevac, koji ujedno čini granicu prema trijasko-jurskom prodoru Plitvička jezera - Koreničko polje. Na promatranom području nalazi se još nekoliko slabijih uzdužnih rasjeda, a vrlo brojni su i poprečni vertikalni rasjedi relativno malih skokova. U rasjedne zone spada pojas na području Donjih Plitvičkih jezera i Korane, zatim područje Rešetar - Arapovdol te masiv Gole Plješivice (Sl. 3) (Polšak i dr., 1978).

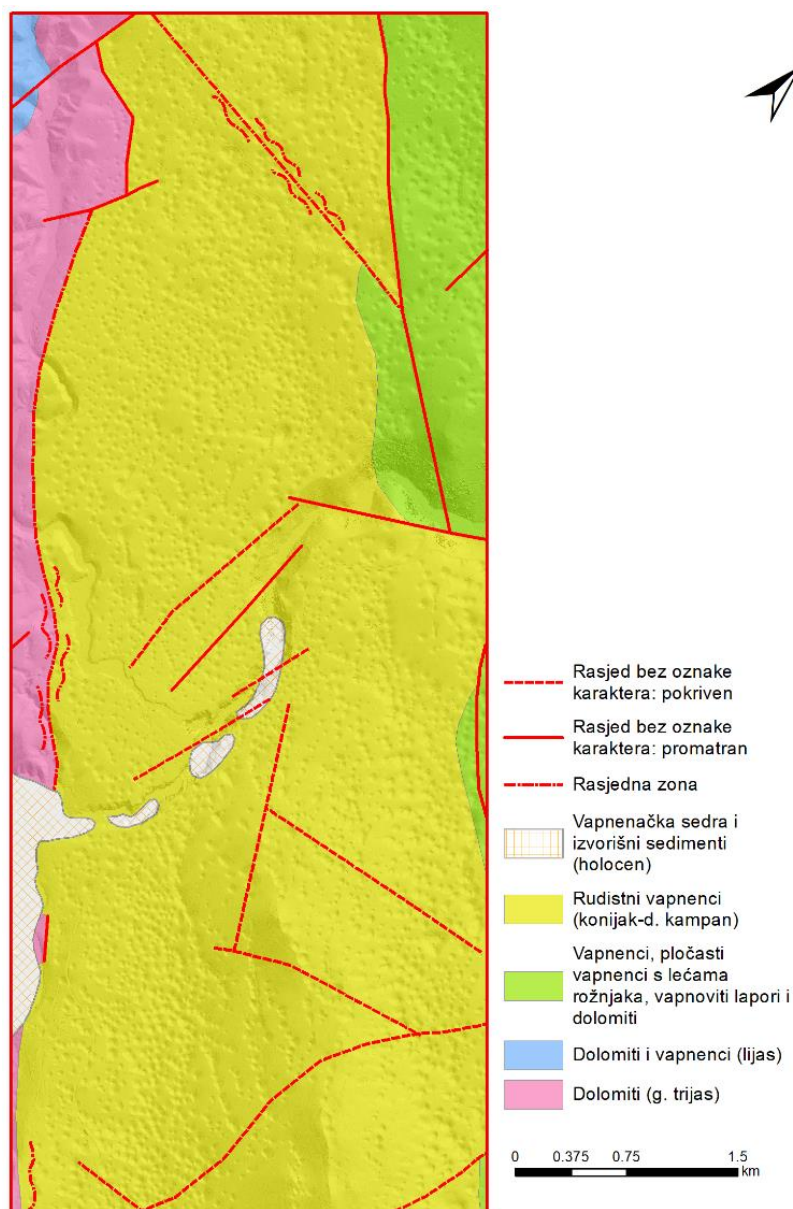
S obzirom na litostratigrafske jedinice, najstarije naslage proučavanog područja su dolomiti gornjeg trijasa ( ${}^2T_3$ ). Pretežito su svijetlo-sive boje, dok se tamniji nalaze blizu prijelaza u naslage lijasa. Dolomiti su odlično uslojeni, a prosječna debljina slojeva iznosi 0,5 m. Sadržaj dolomitne komponente iznosi 90-100% dok prema granici s lijasom pada na 80-90%. Prisutne su primjese glinene supstance, koja može biti ravnomjerno raspršena, zatim manje ili više koncentrirana i smještena u centru dolomitnih zrna. Upravo prisustvo glinene supstance, relikti kalcitne mase i variranje dolomitne komponente ukazuju da stijene pripadaju dijagenetskom tipu dolomita (Polšak i dr., 1978).

Sjeverozapadno od Plitvičkih jezera prevladavaju dolomiti i vapnenci iz razdoblja lijasa ( $J_1$ ). U donjem dijelu naslaga, osim čistih dolomita, prisutni su i vapnoviti dolomiti. Pretežito su sive, tamno-sive i smeđe boje i odlično uslojeni. Udio dolomita iznosi 70-80%, s rijetkim ulošcima pločastog i laminiranog vapnenca. U srednjem dijelu prevladavaju tanko uslojeni, pločasti i laminirani sivi i crni vapnenci koji ponekad sadrže proslojke rožnjaka. Ulošci dolomita su rijetki i tanki. U najgornjem dijelu lijaskih naslaga mjestimično se pojavljuje "mrljasti vapnenac". Debljina lijaskih naslaga iznosi 400-600 m (Polšak i dr., 1978).

Naslage cenomana i turona ( $K_2^{1+2}$ ) pretežito se sastoje od uslojenog vapnenca s povremenim ulošcima dolomita. Vapnenac je sivo-smeđe i svijetlo-sive boje, a rijetko i tamno-sive boje. Najčešća debljina slojeva iznosi 0,5-1 m, a povremeno se javlja i tanko uslojeni i pločasti vapnenac (30-50 m debljine). Najčešći su vapneni dolomiti sa 60-85% dolomitne komponente. U manjoj mjeri javljaju se i dolomitični vapnenci. Sve dolomitne stijene predstavljaju



djelomično do potpuno dolomitizirane alohtone vapnenice te je moguće uočiti sve prijelaze od čistog vapnenca do dolomita. Debljina naslaga cenomana i turona iznosi približno 500-700 m (Polšak i dr, 1978).



Sl. 4: Geološka karta; Izvor: Polšak i dr., 1976.

Senonske naslage ( $1-3K_2^3$ ) sastoje se od rudistnih vapnenaca, koji su po kemijskom sastavu čisti vapnenci, s 97-100% udjela  $CaCO_3$ . Uočava se lokalna pojava pločastog i laminarnog smeđeg i crnog bituminoznog vapnenca s proslojcima i lećama crnog rožnjaka. Naslage pripadaju lagunarnom facijesu i lateralno ubrzo prelaze u rudistni vapnenac. Naslage su razvijene sjeverno od sela Plitvice i mjestimično uz sjeveroistočnu obalu jezera Kozjak. Navedeni rudisti

su značajni za stratigrafski raspon koniak-donji kampan. Debljina senonskih naslaga iznosi 600-800 m (Polšak i dr., 1978).

Sedra i izvorski sedimenti (i) taloženi su tijekom kvartara u dolini rijeke Korane. Velika debljina sedre ukazuje na to da je jedan dio sedre vjerojatno istaložen za vrijeme pleistocena, ali se zbog pomanjkanja dokaza ne može sigurno tvrditi. Najviše sedre istaloženo je na Plitvičkim jezerima gdje ona izgrađuje barijere preko kojih se prelijeva voda iz jednog jezera u drugo (Polšak i dr., 1978).

## **4.2. Hidrologija i klima**

Na proučavanom području rijeka Korana djeluje kao lokalna erozijska baza. Glavna karakteristika toka rijeke Korane nizvodno od Plitvičkih jezera je postupan ali postojan gubitak vode uz riječno korito tijekom ljetnih sušnih perioda prilikom kojih rijeka potpuno izgubi vodu 1 km nizvodno od jezera, prelaskom iz niskopropusnih u visokopropusne karbonatne naslage. Gornji dio toka rijeke Korane, nizvodno od jezera, u jesenjim i proljetnim periodima karakteriziraju bujični tokovi, osobito u proljeće nakon topljenja snijega. Smještena na granici dvaju slivova, jadranskog i crnomorskog, Plitvička jezera pripadaju potonjem (Biondić i dr., 2010). Gotovo cijelo porječje Plitvičkih jezera je smješteno unutar granica Nacionalnog parka.

Prosječna godišnja količina padalina iznosi 1550 mm, a prosječne godišnje temperature variraju između 8,8 i 10,4 °C. Od vjetrova prevladava sjeveroistočnjak, odnosno bura (Biondić i dr., 2010). S obzirom na Köppenovu klimatsku klasifikaciju, istraživano područje pripada Cfb tipu (umjereno topla vlažna klima s toplim ljetom) (Šegota i Filipčić, 2003).

## **5. Podaci i programska oprema**

### **5.1. Podaci**

Pri analizi i vizualizaciji podataka korišteni su sljedeći slojevi:

- DEM (Ditalni model reljefa, *Digital elevation model*) rezolucije 0,5 × 0,5 m, u vlasništvu Nacionalnog parka Plitvička jezera; izrađen u proljeće 2014. godine (izradio GD i GROUP LCC)
- Osnovna geološka karta 1:100.000 – List Bihać.

## 5.2. Programska oprema

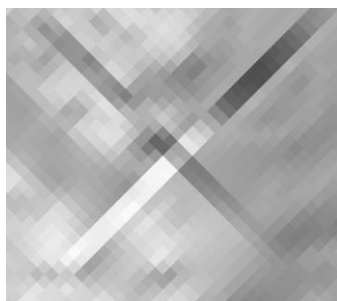
Za delineaciju oboda ponikava, izračun parametara i analizu rezultata, korišteni su:

- ArcGIS 10.5 - geografski informacijski sustav, razvijen kao programski paket tvrtke ESRI (*Environmental Systems Research Institute*). Namijenjen je izradi karata i prostornih podataka te omogućava prikaz i analizu rasterskih i vektorskih prostornih podataka (ESRI: A quick tour of ArcMap, 2019). Aplikacije koje su korištene unutar ArcGIS-a su: ArcMap 10.5 i ArcCatalog 10.5.
- RockWorks 16 - softver za izradu 2D i 3D karata u naftnoj, okolišnoj, geotehničkoj i rudarskoj industriji za površinsku i podzemnu vizualizaciju podataka upotrebom alata za izradu karata, poprečnih profila, dijagrama i izračuna volumena. U ovom diplomskom radu se koristio za izradu ružinih dijagrama u *Free Trial* verziji.
- Excel 2013 - program za obradu tabličnih podataka, koji je dio programskog paketa Microsoft Office. Omogućava veću preglednost, izračun statistika i izradu grafičkih prikaza numeričnih podataka (Microsoft Excel, 2019).

## 6. Metodologija

### 6.1. Napomene

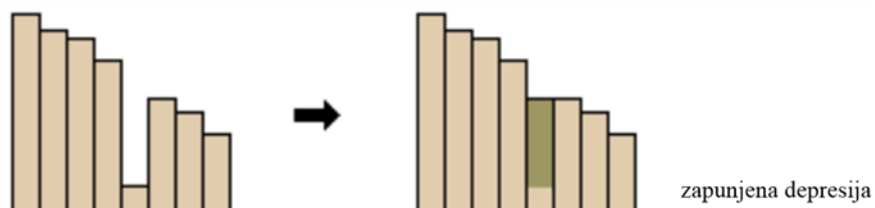
Pri analizi digitalnog modela reljefa dobivenog LiDAR-skim snimanjem, uočene su greške prilikom spajanja pojedinih listova. Rubovi listova odmaknuti su za dvije ćelije, odnosno 1 m, što može utjecati na točnost dobivenih podataka (Sl. 5).



Sl. 5: Primjer greške na DEM-u

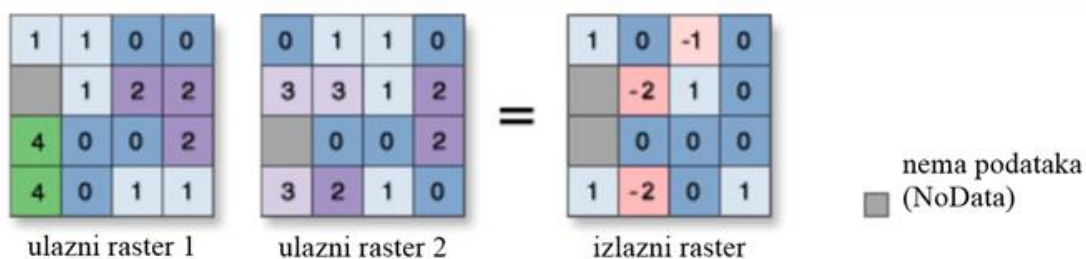
## 6.2. Određivanje oboda ponikava

Za određivanje oboda ponikava prvog reda korištena je poluautomatska metoda pomoću slojnice. Ona se temelji na zapunjavanju ulaznog rastera korištenjem alata *Fill* unutar ekstenzije *Spatial Analyst*, kojom se zapunjavaju depresije i nepravilnosti, a kao izlazni podatak dobiva se hidrološki pravilni raster (Sl. 6). Unutar metode, z-limit nije bio posebno definiran.



Sl. 6: Princip rada alata *Fill*; Izvor: Grlj, 2014; prilagođeno

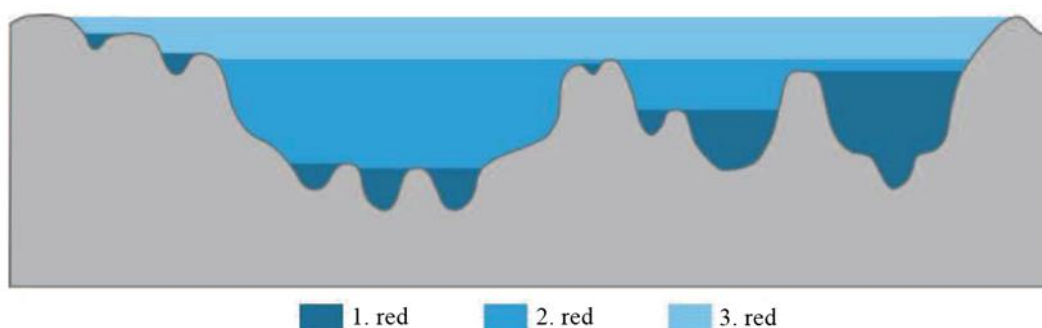
Alatom *Raster Calculator* se od ulaznog rastera oduzeo zapunjeni raster izrazom *Minus*, koji na razini pojedine ćelije oduzme vrijednost drugog rastera od vrijednosti istoležeće ćelije prvog rastera te pojedinoj ćeliji pripiše razliku (Sl. 7) (Minus, 2020). Rasteri se u pojedinim primjerima razlikuju jedino na područjima gdje originalni DEM sadrži depresije, stoga će sve ćelije, koje nemaju depresija, u izlaznom rasteru poprimiti vrijednost 0, a preostale ćelije pa vrijednost koja predstavlja dubinu depresije na toj lokaciji (Grlj, 2014). Izlazni raster tako postaje raster depresija.



Sl. 7: Princip rada alata *Minus*; Izvor: Grlj, 2014; prilagođeno

Drugi korak se sastojao od izrađivanja slojnice (izohipsi) za raster depresija alatom *Contour* u intervalu od 1 m. Dobiven je vektorski sloj zatvorenih linija, za koje se je u atributnoj tablici dodavanjem polja "Shape Length" izračunao opseg naredbom *Calculate Geometry*. Iz dobivenih

podataka o opsegu selektirale su se vrijednosti koje se mogu smatrati greškama iz razloga što je DEM veličine ćelije  $0,5 \times 0,5$  m predetaljan te u kategoriju depresija svrstava i manje nepravilnosti na reljefu, kao i područja antropogenog utjecaja. Selekcijom atributa su izbrisane sve zatvorene linije kojima je dubina manja ili jednaka 5 m, a opseg manji ili jednak 30 m (što otprilike odgovara promjeru od 10 m, koji je u većini literature donja granica za veličinu ponikve (npr. Habič, 1986; Obu i Podobnikar, 2013). Ručno su dodatno izbrisane veće linije koje nisu depresije s obzirom na njihov oblik. Budući da su linije imale oštre rubove, izgladene su alatom *Smooth Line* s tolerancijom od 10 m.



Sl. 8: Princip svrstavanja ponikava u redove; Izvor: Obu, 2011; prilagođeno

Treći korak sastojao se od ručne kategorizacije depresija u redove. U atributnoj tablici dodano je polje "Red", a linijama su se pripisivale vrijednosti od 1 do 3. Prvi red podrazumijeva one linije, unutar kojih postoji samo jedno dno. Linije prelaze u drugi red ukoliko unutar njih postoje dvije ili više linija prvog reda. Isto vrijedi i za treći red - ukoliko unutar linije postoje dvije ili više linija drugog reda, linija poprima vrijednost trećeg reda (Sl. 7) (Obu, 2011). Cilj kategorizacije je bio dobiti obode "čistih", zasebnih ponikava prvog reda na kojima se temeljila daljnja morfometrijska analiza.

Četvrti korak bio je selekcija linijskih podataka s obzirom na red linija te izvoz selektiranih podataka u nove *Shapefile-ove*. Slijedila je pretvorba linijskih podataka u poligone alatom *Feature to Polygon*. Nastao je sloj poligona koji su unutar sebe imali poligone. Alatom *Dissolve* uklonjene su unutarnje linije te su dobiveni poligoni prvog, drugog i trećeg reda, a opcijom

*Explode* unutar izbornika *Advanced Editing* su rastavljeni poligoni. Daljnja analiza se odnosi na ponikve prvog reda.

### 6.3. Izračun reljefnih atributa

U ovom poglavlju se proučavaju morfometrijske karakteristike ponikava s obzirom na oblik pripadajućeg poligona i reljefne attribute.

#### 6.3.1. Dubina

Za izračun dubina korišteni su različiti tipovi statistika unutar alata *Zonal Statistics*. "Zonu" su definirali poligoni, odnosno ponikve prvog reda kojima je analiza bila ograničena na one dijelove DEM-a, koje se nalaze unutar granica poligona. Prvi tip statistike je bio *MAXIMUM* koji kao izlazni podatak generira raster, koji je svim ćelijama na području pojedinog poligona pripisao najvišu vrijednost unutar zone poligona. Drugi tip statistike je bio *MINIMUM*, koji je pa svim ćelijama iz zone poligona pripisao najnižu vrijednost. Alatom *Raster Calculator* je od rastera s najvišim vrijednostima oduzet raster s najnižim vrijednostima te je dobiven raster s podacima o dubinama. Tip piksela u rasteru dubina je bio *Floating Point*, koji je alatom *Int* promijenjen u *Integer*, odnosno cijeli broj. Nakon pretvorbe tipa piksela bilo je moguće korištenje alata za pretvorbu podataka *Raster to Polygon* te je dobiven vektorski sloj s podacima o dubinama. Formula za izračun prosječne dubine ponikve je

$$Dr\_mean = \frac{\Sigma \Delta elev}{Nd}$$

gdje je  $\Sigma \Delta elev = \Sigma max\_elev$  (maksimalne dubine ponikava) -  $\Sigma min\_elev$  (minimalne dubine ponikava), a  $Nd$  ukupni broj ponikava.

Za izračun lokacije najdublje točke unutar ponikve korišten je alat *Raster Calculator*. Korišten je uvjetni izraz (*Con*),

$$Con("DEM" == "Min\_Elev", "DEM")$$

koji nalaže da ako se ćelije unutar DEM-a poklapaju s odgovarajućim ćelijama unutar rastera sa najnižim zonama, tada će vrijednost ćelija izlaznog rastera biti jednaka vrijednostima DEM-a. Ukoliko vrijednost ćelija DEM-a nije jednaka vrijednostima unutar rastera s najnižim zonama, tada te ćelije poprimaju vrijednost *NoData* u izlaznom rasteru.

Izlazni raster se sastojao od pojedinačnih piksela s vrijednostima najnižih nadmorskih visina unutar ponikava. Alatom *Raster to Point* je promijenjen u vektorski točkasti sloj. Budući da je više piksela unutar jedne ponikve imalo istu najnižu vrijednost, te točke su izbrisane alatom *Delete Identical* čime se postiglo da jedna ponikva ima pripadajuću jednu točku koja označava njenu najdublju lokaciju (ESRI: How to: Create points... 2020). Točkasti sloj ponikava s lokacijama najveće dubine se koristio pri analizi prostornih statistika.

### 6.3.2. Indeks kružnosti (*circularity index, Ci*)

Kružnost ponikve *Ci* je parametar koji izražava u kojoj mjeri oblik oboda ponikve odstupa od pravilnog kruga. Formulu za izračun indeksa kružnosti ponikve je

$$Ci = \frac{Ad}{\pi \left(\frac{Ad}{Pd}\right)^2}$$

gdje *Ad* predstavlja površinu ponikve, a *Pd* predstavlja opseg ponikve. Vrijednost indeksa kružnosti blizu 1 predstavlja gotovo savršeni, kružni oblik oboda ponikve. Što se vrijednost udaljava od 1, to je ponikva nepravilnijeg oblika (Bauer, 2015). Vrijednosti indeksa između 1,2 i 1,65 predstavljaju eliptične ponikve, a vrijednosti iznad 1,65 predstavljaju izdužene ponikve (Basso i dr, 2013). Za analizu su korišteni podaci poligonskog sloja ponikava prvog reda.

### 6.3.3. Orijehtacija

Orijehtacija ponikava pokazuje u kojem pravcu se pruža najduža os poligona koji opisuje obod ponikve. Ukazuje na tektonsku aktivnost i orijentaciju stresa. Za analizu je korišten alat *Minimum Bounding Geometry*.

#### 6.3.3.1. Promjena orijentacije najdulje osi ponikve u odnosu na dubinu

Analiza rotacije ponikava temeljila se na linijskim podacima izohipsi ponikava prvog reda, dobivenih u 6.2. poglavlju. U atributnoj tablici se nalaze podaci o dubinama ponikava, na

temelju kojih su selektirane linije za svakih 5 m dubine. Dobiveno je 5 novih slojeva - linije ponikava na 0, 5, 10, 15 i 20 m dubine. Alatom *Minimum Bounding Geometry*, tipom *CONVEX\_HULL* (najmanji konveksni poligon koji opisuje ulazne linijske podatke), dobiveno je 5 novih slojeva poligona, koji u atributnoj tablici sadrže podatke o početnim i završnim X i Y koordinatama opisujućih poligona. Podaci o početnim i završnim X i Y koordinatama su bili potrebni za konverziju poligonskih slojeva u linijske alatom *XY to Line*. Rezultati konverzije su linije koje predstavljaju najdulje osi ulaznih poligonskih podataka.

Za izračun pravca pružanja osi, korišten je alat *Linear Directional Mean*, na temelju stupca FID (Feature ID) linijskog sloja. Dobiveno je 5 linijskih slojeva koji u atributnoj tablici sadrže podatke o azimutima osi ponikava od 0 do 180 stupnjeva. Stupnjevi su kategorizirani u 4 jednaka razreda koji predstavljaju pravac pružanja ponikve: N-S s vrijednostima od 0 do 22,5 i od 157,5 do 180; NE-SW od 22,5 do 67,5; E-W od 67,5 do 112,5 i NW-SE od 112,5 do 157,5. Kvantitativni podaci dobiveni su na temelju selekcija:

*"CompassA" >= 157.5 OR "CompassA" < 22.5*, za pravac N-S

*"CompassA" >= 22.5 AND "CompassA" < 67.5*, za pravac NE-SW

*"CompassA" >= 67.5 AND "CompassA" < 112.5*, za pravac E-W

*"CompassA" >= 112.5 AND "CompassA" < 157.5*, za pravac NW-SE.

Slojevi pravaca pružanja, s obzirom na dubinu, izvedeni su u CAD formatu te analizirani pomoću programa RockWorks. Unutar izbornika *Utilities*, alatom *Linears*, uvedeni su u program. Analiza pravaca pružanja se izvela izborom stupaca X1 i Y1 kao početnih koordinata i X2 i Y2 kao završnim koordinatama, pomoću kojih je dobiven ružin dijagram.

### **6.3.3.2. Orijehtacija lineamenata**

Linijski sloj lineamenata izrađen je dodavanjem novog *Shapefile-a* u ArcCatalog. Dobiven je vizualnom interpretacijom dvaju sjenčanih reljefa (azimuta 45° i 315°) i poligonskog sloja ponikava prvog reda. Linijama su u atributnoj tablici, dodavanjem stupaca X1, Y1, X2, Y2 izračunate početne i završne koordinate naredbom *Calculate Geometry*. Sloj je izveden u CAD formatu, dodan u program RockWorks, pomoću kojeg je izrađen ružin dijagram.



### 6.3.4. Volumen ponikava

Za izračun volumena ponikava, Bauer (2015) je upotrijebio modificiranu verziju jednadžbe za izračun volumena stošca:

$$V = \frac{1}{2}x \text{ (površina } x \text{ dubina)}$$

Kao ulazni podaci korišteni su poligoni ponikava prvog reda.

## 6.4. Izračun prostornih statistika

Izračun prostornih statistika podrazumijeva analizu točkastih podataka ponikava prvog reda.

### 6.4.1. Indeks okršenosti (*pitting index, Rp*)

Stupanj okršenosti izražava u kolikoj mjeri je promatrano područje okršeno (Bauer, 2015). Definiran je tzv. "pitting indeksom", koji izražava okršenost s obzirom na područje unutarnjeg otjecanja u ponikvu. Stupanj okršenosti računa se formulom

$$Rp = \frac{Ak}{\Sigma Ad}$$

gdje  $Ak$  izražava površinu cjelokupnog analiziranog krškog područja, a  $\Sigma Ad$  podrazumijeva zbroj površina svih depresija. Stupanj okršenosti je veći što se vrijednost indeksa približava vrijednosti 1 (potpuno otjecanje u depresije) (Bauer, 2015). U ovom radu, stupanj okršenosti je izračunat iz poligonskog sloja depresija prvog reda. Dodavanjem polja "Area" u atributnoj tablici, naredbom *Calculate Geometry* izračunate su površine za cjelokupno promatrano područje, kao i za svaku pojedinu depresiju.

### 6.4.2. Gustoća (*doline density, Dd*) i prostorni raspored gustoće ponikava

Gustoća ponikava je mjera koja postavlja u odnos broj ponikava i veličinu okršenog područja. Ona pokazuje koliko ponikava se u prosjeku nalazi na površini od 1 km<sup>2</sup>. Gustoća je definirana formulom

$$Dd = \frac{Nd}{Ak}$$

gdje  $N_d$  izražava broj ponikava, a  $A_k$  izražava površinu cjelokupnog analiziranog krškog područja u  $\text{km}^2$ . Podaci o broju ponikava dobiveni su iz atributne tablice poligonskog sloja ponikava prvog reda, a podaci o površini cjelokupnog područja su izračunati alatom *Calculate Geometry* (Bauer, 2015). Gustoća je analizirana s obzirom na litostratigrafske jedinice, hipsometriju, nagib padine (korištenjem alata *Slope*) i vertikalnu raščlanjenost (korištenjem alata *Focal statistics*, veličinom radijusa 564 m i tipom geometrije RANGE).

Prostorni raspored gustoće ponikava dobiven je korištenjem alata *Kernel Density*, računanjem gustoće točkastog sloja ponikava prvog reda dobivenog alatom *Feature to Point*, kojim su točke smještene u sredinu poligona (Bauer, 2015). Veličina ćelije izlaznog rastera je bila promijenjena na 1.

#### **6.4.4. Mjera disperzije ponikava (*dispersion patterns, Rnn*)**

Mjera disperzije ponikava izračunata je metodom najbližih susjeda (*Average Nearest Neighbor*). Formula za izračunavanje najbližeg susjeda je

$$Rnn = \frac{La}{Le}$$

u kojoj se  $La$  odnosi na srednju promatranu udaljenost, a  $Le$  na srednju očekivanu udaljenost. Omjer veličina  $La$  i  $Le$  uspoređuje prosječnu promatranu udaljenost između točaka unutar promatranog prostora s prosječnom očekivanom udaljenošću između susjedstva unutar hipotetske nasumične distribucije. Vrijednosti disperzije  $Rnn$  variraju između 0 (grupirani uzorak) i 1 (disperzni uzorak). Statistička značajnost mjere disperzije  $Rnn$  promatra se kroz z-vrijednosti i p-vrijednosti. Vrlo visoka ili niska z-vrijednost ukazuje na to da promatrani uzorak ne predstavlja prostorni uzorak nul hipoteze, odnosno da ne postoji statistički bitna razlika između analiziranih uzoraka. P-vrijednost izražava vjerojatnost (od 0 - niska, do 1 - visoka) da je promatrani prostorni uzorak nasumičan (Bauer, 2015). Mjera disperzije je izračunata analizom točkastog sloja ponikava alatom *Average Nearest Neighbor*, a kao rezultat se dobio grafički prikaz mjere disperzije.

## 7. Rezultati i rasprava

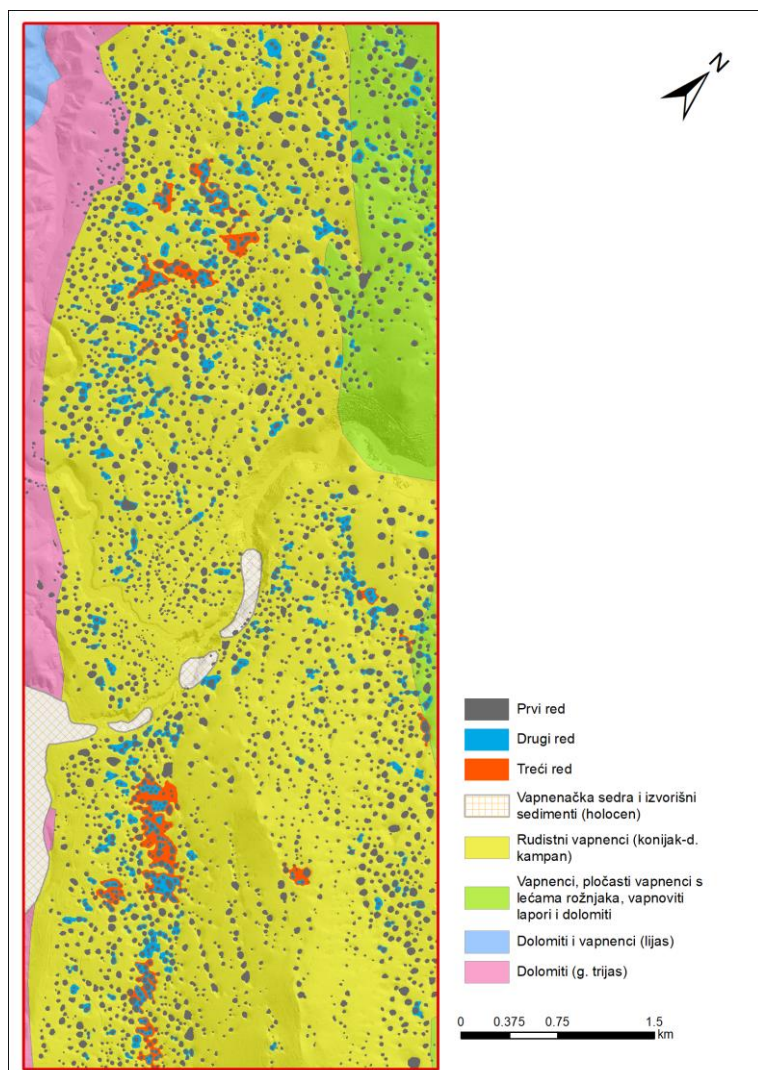
Određivanje oboda ponikava temeljilo se na poluautomatskoj metodi pomoću slojnice. Ukupna površina analiziranog područja je  $A_k = 26,068,869.342 \text{ m}^2$ , odnosno  $26.068 \text{ km}^2$ .

Tab. 1: Statistički rezultati analiziranih parametara

<i>Parametri</i>	<i>Vrijednost</i>
Broj ponikava prvog reda, $N_d$	3624
Broj depresija drugog reda	292
Broj depresija trećeg reda	15
Zbroj površina ponikava, $A_d \text{ (m}^2\text{)}$	3,116,822.43
Prosječna površina ponikve, $A_{mean} \text{ (m}^2\text{)}$	860.05
Minimalna površina ponikve, $A_{min} \text{ (m}^2\text{)}$	36.33
Maksimalna površina ponikve, $A_{max} \text{ (m}^2\text{)}$	8961.08
Prosječni opseg, $P_{mean} \text{ (m)}$	99.74
Minimalni opseg, $P_{min} \text{ (m)}$	22.79
Maksimalni opseg, $P_{max} \text{ (m)}$	415.95
Indeks okršenosti, $R_p$	8.36
Gustoća ponikava, $D_d$	139.02
Mjera disperzije, $R_{nn}$	1.168
Srednja promatrana udaljenost, $L_a \text{ (m)}$	49.53
Srednja očekivana udaljenost, $L_e \text{ (m)}$	42.40
P-vrijednost ( za $R_{nn}$ )	0.000
Z-vrijednost (za $R_{nn}$ )	19.358
Prosječna dubina, $Dr_{mean} \text{ (m)}$	5.12
Minimalna dubina, $Dr_{min} \text{ (m)}$	0.27
Maksimalna dubina, $Dr_{max} \text{ (m)}$	26.05
Zbroj volumena, $V_{sum} \text{ (m}^3\text{)}$	11,792,520.47
Prosječni volumen, $V_{mean} \text{ (m}^3\text{)}$	3254.01
Minimalni volumen, $V_{min} \text{ (m}^3\text{)}$	6.29
Maksimalni volumen, $V_{max} \text{ (m}^3\text{)}$	85,185.23
Prosječni indeks cirkularnosti, $Ci_{mean}$	1.077
Minimalni indeks cirkularnosti, $Ci_{min}$	1.003
Maksimalni indeks cirkularnosti, $Ci_{max}$	2.229

## 7.1 Kategorizacija depresija u redove

Poluautomatskom metodom dobivene su 3624 ponikve prvog reda, 292 depresije drugog reda i 15 depresija trećeg reda (Sl. 9). Ponikve prvog reda se pojavljuju najrjeđe na stijenama trijasne starosti (dolomiti) i holocenskih naslaga (vapnenačka sedra i izvorišni sedimenti). Najgušće su raspoređene na sedimentima kredne starosti (rudistni i pločasti vapnenci). Depresije drugog reda se pojavljuju samo na sedimentima kredne starosti, a depresije trećeg reda samo na naslagama rudistnih vapnenaca, za koje je karakterističan dominantni proces korozije. Za depresije 2. i 3. reda, zbog njihovih velikih površina, može se pretpostaviti da se možda radi o uvalama ili bezstropnim špiljama, što je potrebno ustanoviti terenskim istraživanjem.

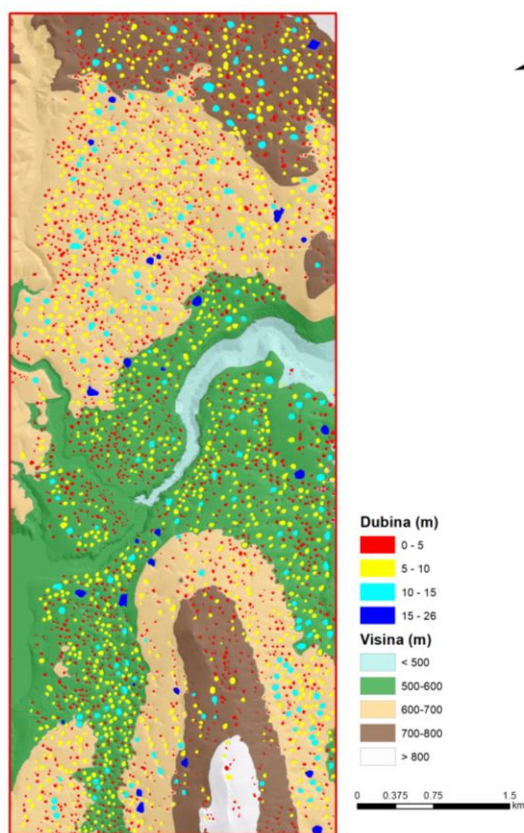


Sl. 9: Klasifikacija depresija po redovima u odnosu na litostratigrafske jedinice

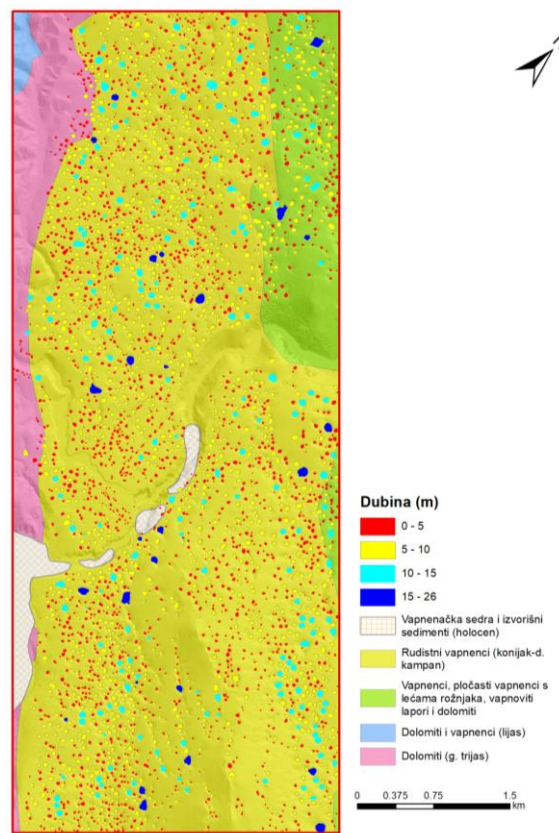
## 7.2. Analiza reljefnih atributa

### 7.2.1. Dubina

Dubina je definirana kao razlika između oboda ponikve i najniže ćelije unutar ponikve. Prosječna dubina ponikava je 5,12 m. Ponikve dubine do 15 m se pojavljuju na svim nadmorskim visinama, dok se najdublje ponikve češće pojavljuju na visinama do 700 m, a rjeđe na visinama do 800 mnv. Iznad 800 m se nalaze samo ponikve koje imaju dubinu manju od 10 m. Najveću dubinu ima ponikva u visinskom razredu 500-600 m (na 556 mnv) (Sl. 10).



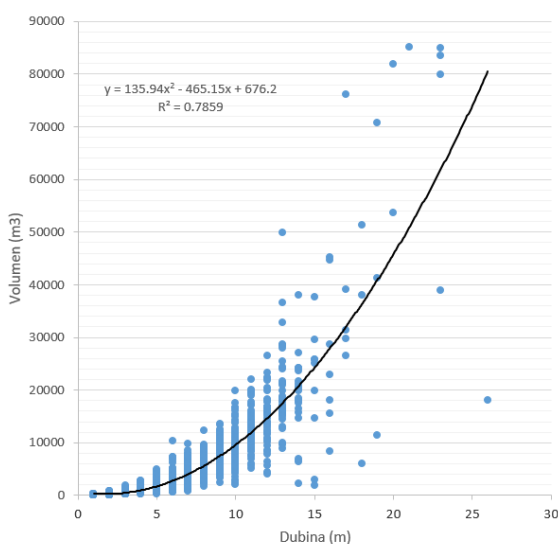
Sl. 10: Prikaz dubina ponikava s obzirom na hipsometriju



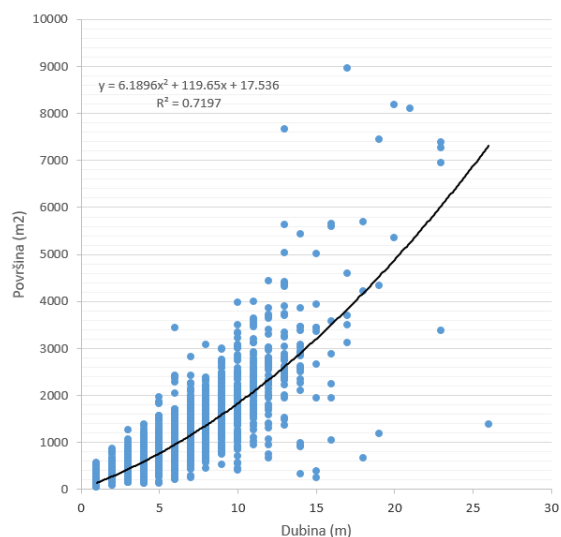
Sl. 11: Prikaz dubina ponikava s obzirom na litolostratigrafske jedinice

S obzirom na litološku podlogu, na dolomitima se pojavljuju najpliće ponikve do 10 m dubine, budući da korozija ne djeluje agresivno kao na stijenama s većim udjelom kalcita (Sl. 10). Na rudistnim vapnencima su zastupljene ponikve svih dubina, gdje se nalazi i najveći broj najdubljih ponikava. Na pločastim vapnencima s lećama rožnjaka su također zastupljene ponikve dubina većih od 10 m, ali u manjem udjelu (Sl. 11).

Proučavajući distribuciju broja ponikava s obzirom na dubinu, preko 800 ponikava ima dubinu do 2,5 m, a najveći broj se nalazi između vrijednosti 2,5 i 5,2, gotovo 1.400 ponikava. Broj ponikava koje imaju dubinu između 5 i 10 m je oko 1200, nakon koje dubine broj naglo pada. Iz omjera dubine i volumena primjećuje se da ponikve do 5 m dubine imaju volumen do 5.000 m<sup>3</sup>. Ponikve koje imaju dubinu do 10 m nemaju volumen veći od 10.000 m<sup>3</sup>. Ponikve dubina 13 m postižu volumen od 50.000 m<sup>3</sup>, a najveći volumen postiže ponikva dubine 21 m, s volumenom preko 85.000 m<sup>3</sup>. S druge strane, najdublja ponikva od 26 m ima volumen manji od 20.000 m<sup>3</sup>, što bi moglo označavati potencijalnu lokaciju jame ili urušne ponikve. Vrijednost koeficijenta determinacije  $R^2 = 0,7859$  ukazuje na statistički značajnu korelaciju volumena i dubine (Sl. 12).



Sl. 12: Odnos dubine i volumena ponikava



Sl. 13: Odnos dubine i površine ponikava

Omjer dubine i površine ponikava također karakterizira porast jedne varijable u odnosu na drugu. Ponikvama dubine do 5 m površina ne prelazi 2.000 m<sup>2</sup>, a dubinama od 10 m ne prelazi 4.000 m<sup>2</sup>. S porastom dubine vrijednost površine varira: u slučaju kad se površina smanjuje postoji mogućnost da se radi o jami ili urušnoj ponikvi, dok se u slučaju povećanja radi o korozivskim ponikvama. Iz grafičkog prikaza (Sl. 13) se uočava da se na istraživanom području uglavnom pojavljuju korozivske vrtače u kojem prevladava širenje oboda na račun dubine, što se poklapa s rezultatima istraživanja Penteka i dr. (2007). Također, vrijednost koeficijenta determinacije od  $R^2 = 0,7197$  ukazuje na sttistički značajnu korelaciju površine i dubine.

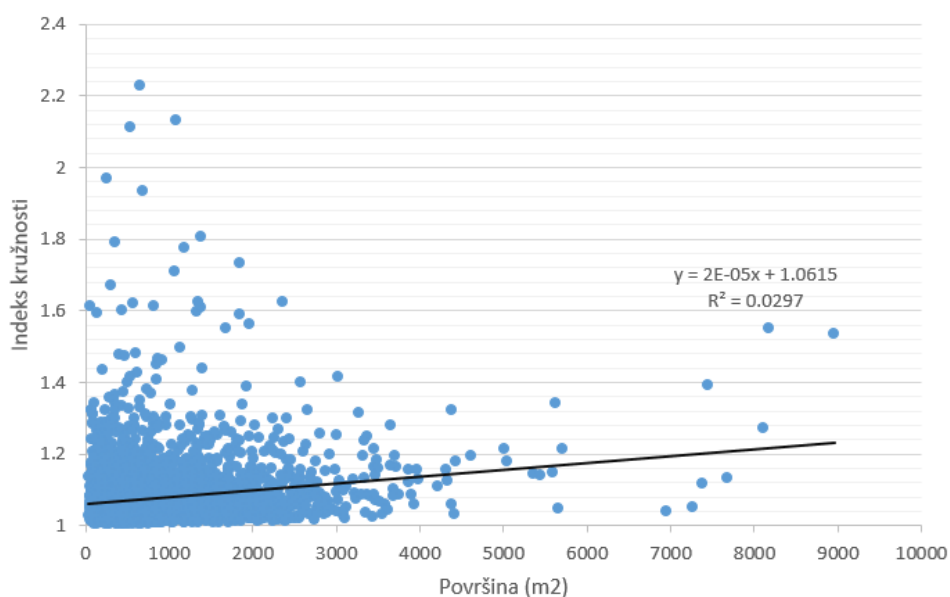
Za usporedbu, ponikve Štajerskog bazena analizirane u radu Bauera (2015) imaju prosječnu površinu od 268 m<sup>2</sup>, opseg 48 m i dubinu od 2,22 m, čime se nalaze u početnoj fazi oblikovanja. Za ponikve Matarskog podolja, analizirane u radu Verbovšek i Gabor (2019), prosječna površina je 1088 m<sup>2</sup>, a dubina 2,2 m te prema Pentek i dr. (2007) pripadaju kategoriji ponikava koje se šire pri obodu.

### 7.2.2. Indeks kružnosti

Indeks kružnosti ponikava klasificiran je u tri kategorije, prema Basso i dr. (2013). Okrugle ponikve imaju vrijednost indeksa do 1,2, eliptične između 1,2 i 1,65, a izdužene veću od 1,65.

Tab. 2: Indeks kružnosti s obzirom na redove ponikava

<i>C<sub>i</sub></i>	<i>1. red</i>	<i>2. red</i>	<i>3. red</i>
< 1,2	3413	9	0
1,2 – 1,65	200	124	1
> 1,65	11	159	14

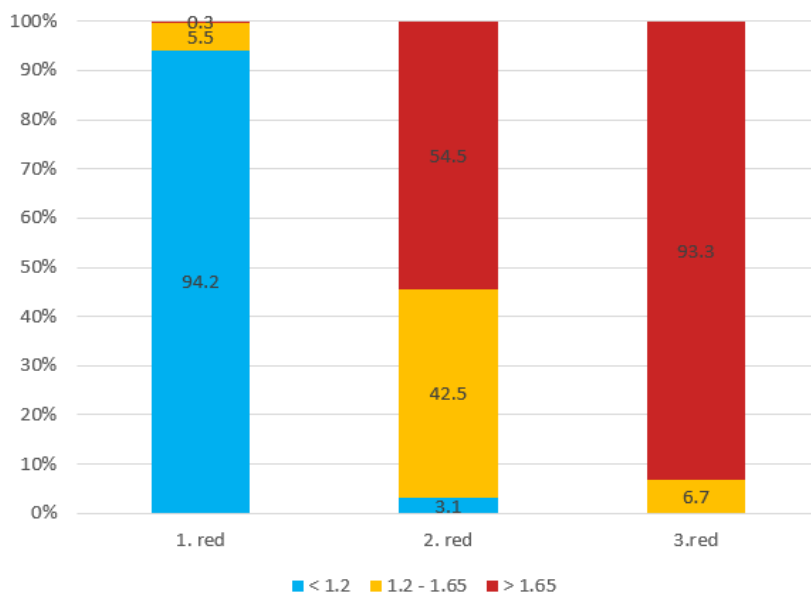


Sl. 14: Odnos indeksa kružnosti ponikava prvog reda i površine

Za ponikve prvog reda, indeks se kreće između 1,003 i 2,229, dok je srednja vrijednost 1,077. Najveći broj ponikava prvog reda (94,2%) ima indeks manji od 1.2 što znači da su ponikve

prvog reda uglavnom okruglog oblika (Tab. 2; Sl. 15). Ponikvama drugog reda indeks se kreće između 1,11 i 5,39. Kategorija okruglih ponikava je zastupljena s najmanjim udjelom od 3,1%, dok eliptične zauzimaju 42,5%, a izdužene 54,5%. U ponikvama drugog reda najčešće se radi o ponikvama koje imaju 2 ili više dna, što objašnjava njihov nepravilni oblik. Za ponikve trećeg reda indeks se kreće između 1,54 i 11,74. Okruglih ponikava nema, eliptična je samo jedna, a najviše ima izduženih, 93,3% (Sl. 15). Za treći red ponikava je bio uvjet da sadrži dvije ili više ponikava drugog reda, što objašnjava visoke indekse kružnosti. S obzirom na oblik, vjerojatno se radi o ponikvama u nizu, uvalama ili bezstropnim špiljama, što je potrebno provjeriti terenskim istraživanjem.

Prostorno promatrajući, najveće indekse kružnosti imaju ponikve najvećih površina. Međutim, s obzirom na rezultat koeficijenta determinacije  $R^2 = 0,0297$  (Sl. 15), zaključuje se kako ne postoji statistički značajna korelacija između  $C_i$  i površine.



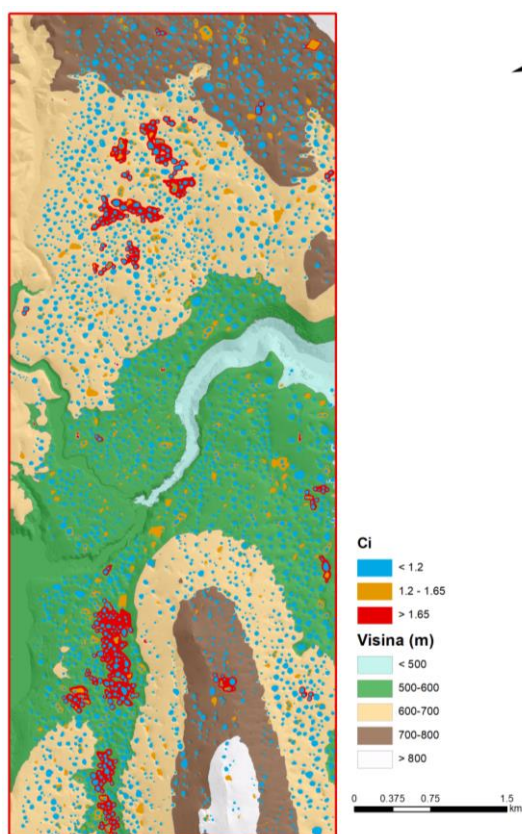
Sl. 15: Indeks kružnosti s obzirom na redove ponikava

Za usporedbu, Verbovšek i Gabor (2019) su za područje Matarskog podolja izračunali vrijednost indeksa kružnosti koji varira između 1,001 i 1,654, dok je srednja vrijednost indeksa 1,036. Nadalje, Kobal i dr. (2014) su izračunali niske vrijednosti indeksa kružnosti, u kojima je prosječna vrijednost  $C_i$  za ponikve prvog reda bila 1,1, a za ponikve drugog reda 2,1 (Kobal i

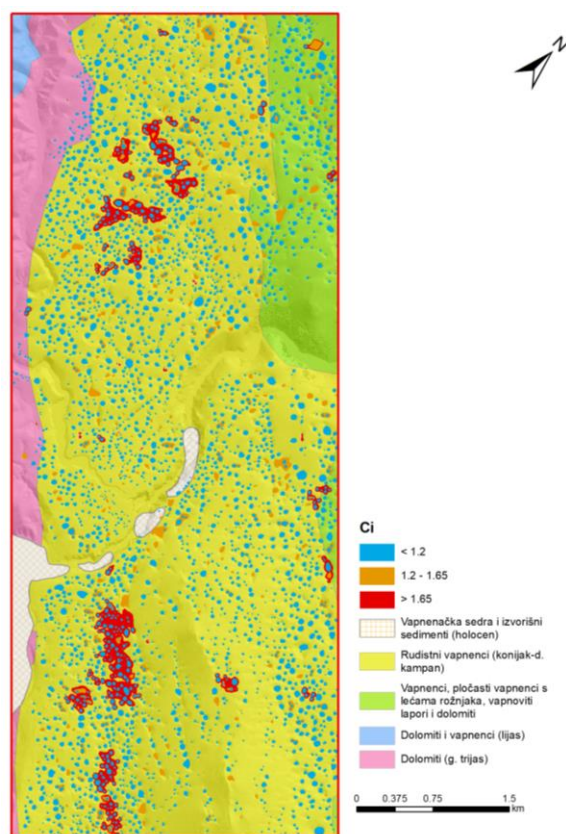


dr., 2014). Bauer (2015) je prema OCC metodi (koja je primijenjena u ovom radu) izračunao srednju vrijednost Ci koja iznosi 1,16, dok je prema FDB metodi iznosila 1,41, a prema WSB – 3,42.

S obzirom na hipsometriju, okrugle i eliptične ponikve su raspoređene po svim visinskim razredima. Izdužene ponikve se pojavljuju u visinskim razredima od 500 do 800 mnv (Sl. 16). Proučavajući litostratigrafske jedinice, na dolomitima trijasne starosti pojavljuju se okrugle ponikve, na pločastim vapnencima s lećama rožnjaka, vapnovitim laporima i dolomitima najčešće se pojavljuju okrugle ponikve, dok su eliptične i izdužene ponikve rijetke. Na rudistnim vapnencima su prisutne ponikve svih indeksa kružnosti od kojih su najbrojnije okrugle ponikve prvog reda. Također, najveći udio izduženih ponikava se pojavljuje na rudistnim vapnencima (Sl. 17).



Sl. 16: Indeks kružnosti s obzirom na hipsometriju



Sl. 17: Indeks kružnosti s obzirom na litostratigrafske jedinice

### 7.2.3. Orijentacija

Azimuti ponikava proučavanog područja kreću se između  $0^\circ$  i  $180^\circ$  na temelju kojih su podijeljeni u četiri pravca pružanja. Podaci su analizirani s obzirom na najmanji opisujući konveksni poligon.

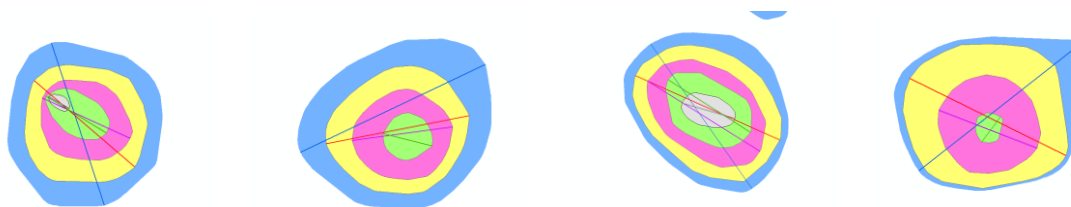
#### 7.2.3.1. Promjena orijentacije najdulje osi ponikve u odnosu na dubinu

Obodi ponikava na površini ukazuju na dominantni pravac pružanja N-S, nakon kojeg su zastupljeni NE-SW, NW-SE, dok je E-W najmanje zastupljen (Tab. 3; Sl. 20-24). Pravci pružanja ponikava na 5 m dubine i dalje imaju dominantni pravac pružanja N-S, međutim, dolazi do promjene sljedećeg najzastupljenijeg pravca pružanja u NW-SE. Isti trend rasta zastupljenosti pravca pružanja NW-SE na račun NE-SW se primjećuje i u ponikvama na -10, -15 i -20 m dubine. Pravac pružanja E-W je uvijek najmanje zastupljen.

Tab. 3: Prikaz broja ponikava u odnosu na dubinu i pravce pružanja

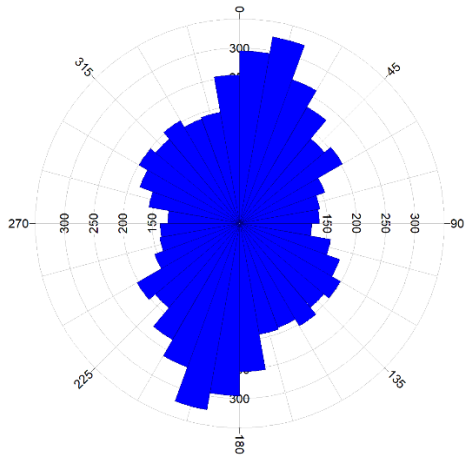
<i>Dubina</i>	<i>N-S</i>	<i>NE-SW</i>	<i>E-W</i>	<i>NW-SE</i>
0	1177	937	635	875
-5	575	358	260	489
-10	168	109	118	169
-15	28	19	12	25
-20	4	4	2	5

Izabrani primjeri promjene orijentacije najdulje osi ponikve s obzirom na dubinu prikazani su na sl. 18:

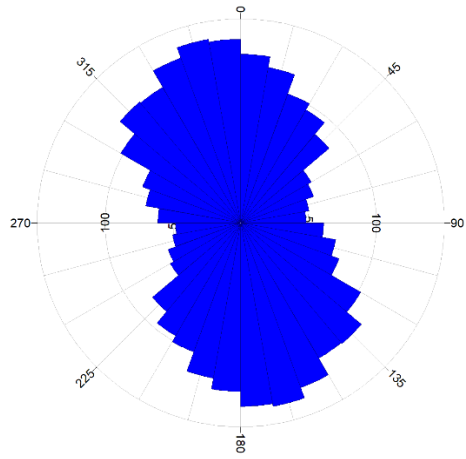


Sl. 18: Promjena orijentacije najdulje osi ponikve s obzirom na dubinu

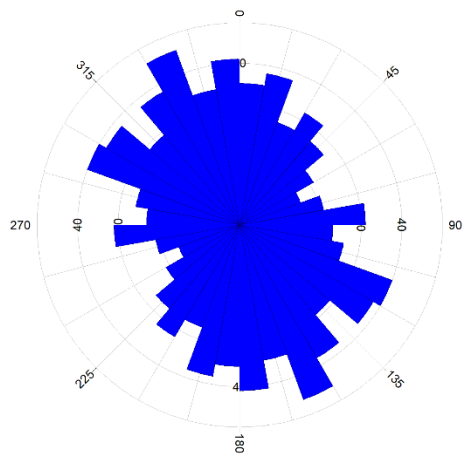
\* Plavo: osi ponikve na 0 m dubine; Žuto: osi ponikve na -5 m dubine; Rožo: osi ponikve na -10 m dubine; Zeleno: osi ponikve na -15 m dubine; Sivo: osi ponikve na -20 m dubine.



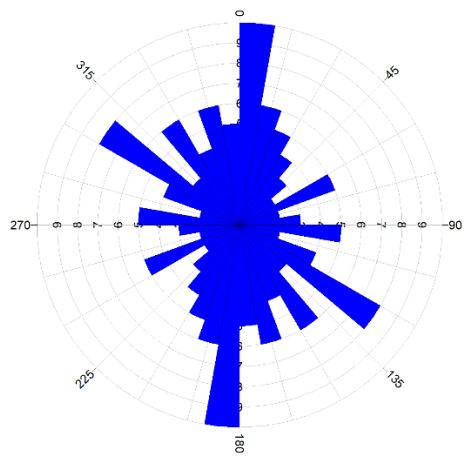
Sl. 19: Azimut najdulje linije površine oboda ponikve



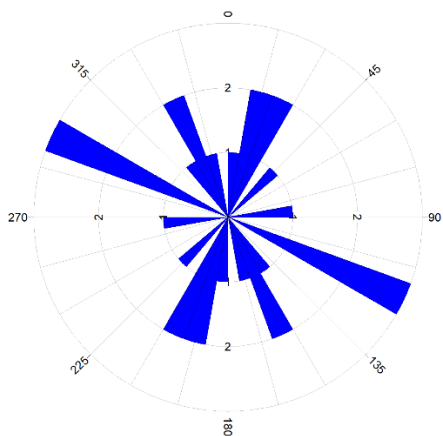
Sl. 20: Azimut najdulje linije ponikve na -5 m dubine



Sl. 21: Azimut najdulje linije ponikve na -10 m dubine



Sl. 22: Azimut najdulje linije ponikve na -15 m dubine

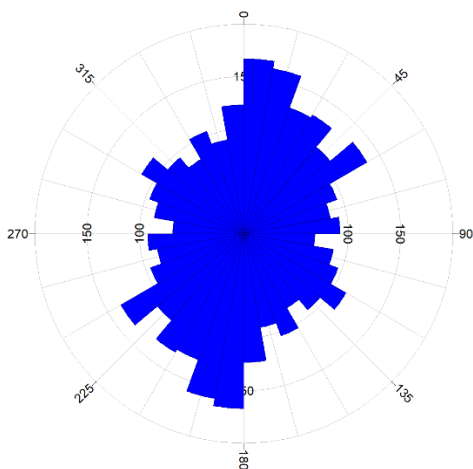


Sl. 23: Azimut najdulje linije ponikve na -20 m dubine

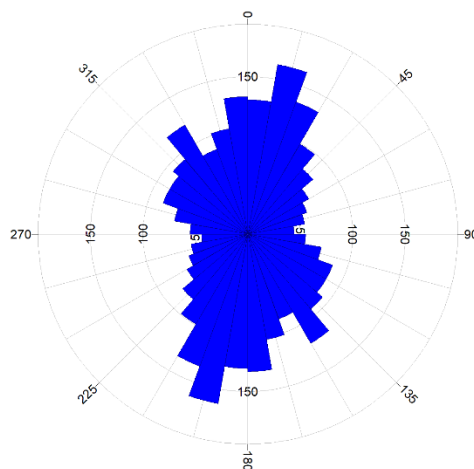
### 7.2.3.2. Promjena orijentacije najdulje osi ponikve u odnosu na rijeku Koranu

Također, analizirani su azimuti pravaca pružanja ponikava prvog reda na 0 m dubine za lijevu i desnu stranu promatranog područja u odnosu na rijeku Koranu (Sl. 25; Sl. 26).

Primjećuje se da na lijevoj strani, nakon dominantnog pravca pružanja N-S, prevladava pravac NE-SW, dok na južnoj strani nakon dominantnog pravca pružanja N-S prevladava NW-SE. Za usporedbu, Bočić (2009) je u doktorskoj disertaciji proučavao susjedno područje Slunjske zaravni za koje su također izraženi dominantni pravci pružanja N-S i NW-SE za lijevu stranu u odnosu na rijeku Koranu, dok se za desnu stranu rijeke Korane primjećuje rotacija dijagrama te rast vrijednosti pravaca pružanja NW-SE. Bočić (2009) pojavu promjene orijentacije najduljih osi ponikava pripisuje promjeni orijentacije stresa iz NE-SW u NNW-SSE pravac pružanja recentnog razdoblja (Bočić, 2009)



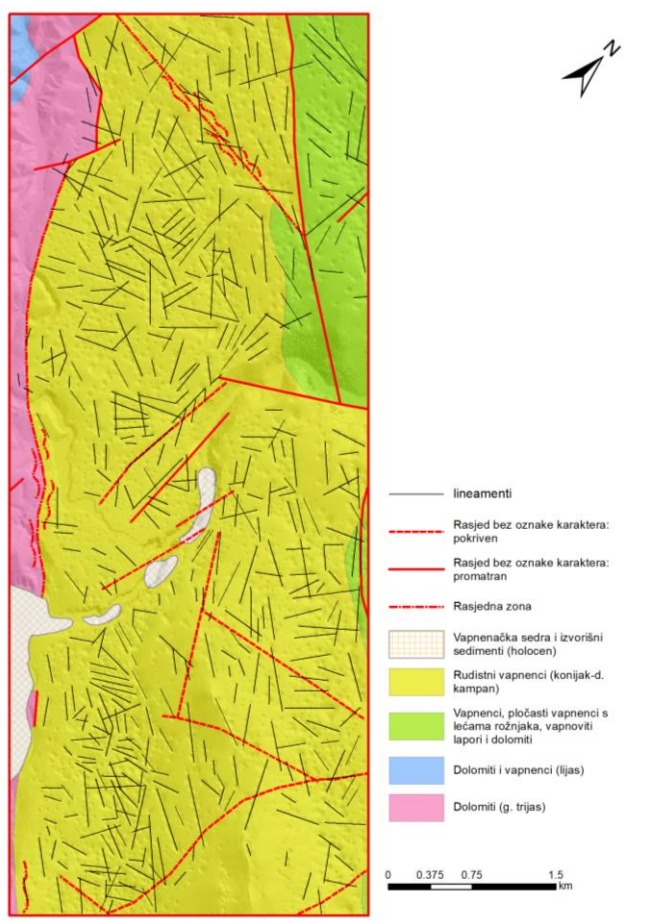
Sl. 24: Azimut najdulje linije površine oboda ponikava na lijevoj strani rijeke Korane



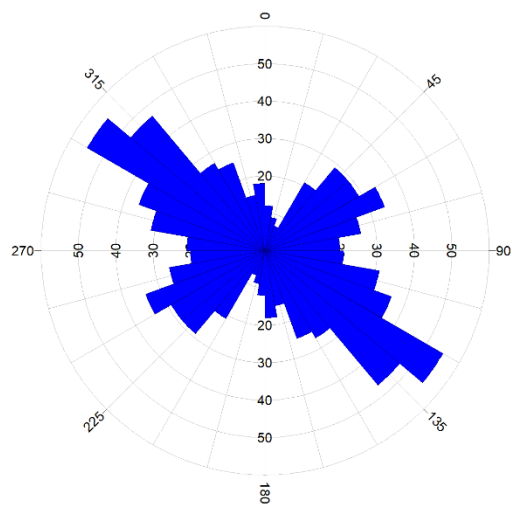
Sl. 25: Azimut najdulje linije površine oboda ponikava na desnoj strani rijeke Korane

### 7.2.3.2. Orijentacija lineamenata

Lineamenti dobiveni direktnim opažanjem na temelju dvaju sjenčanih reljefa ukazuju na dominantni pravac pružanja NW-SE, koji odgovara dinarskom pravcu pružanja (Sl. 27; Sl. 28). Sljedeći najzastupljeniji pravac pružanja je NE-SW, odnosno poprečni dinarski. Pravci pružanja lineamenata također odgovaraju pravcima pružanja rasjeda.



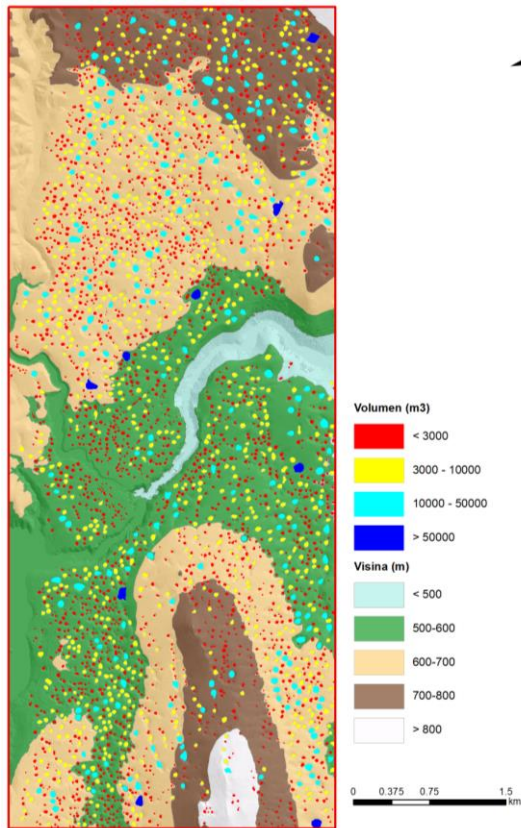
Sl. 26: Prikaz linemenata u odnosu na litostratigrafske jedinice



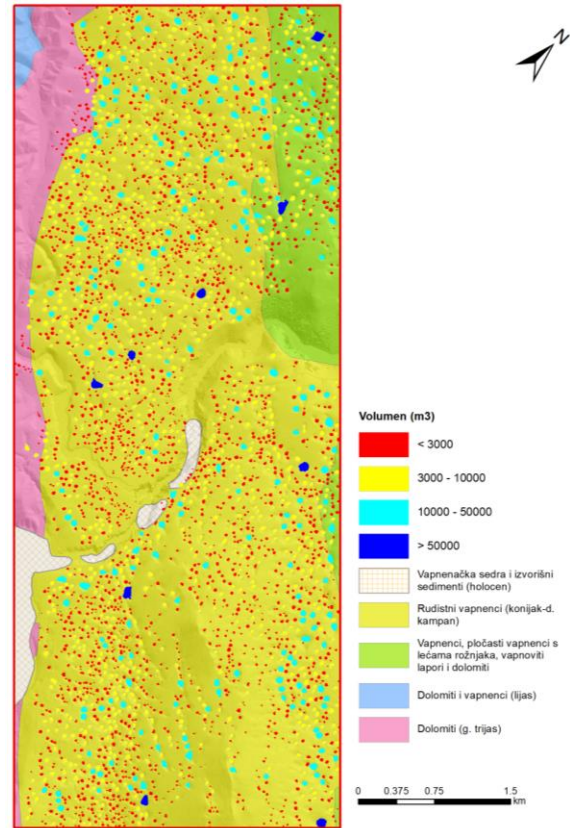
Sl. 27: Azimuti lineamenata

#### 7.2.4. Volumen

Vrijednosti volumena ponikava proučavanog područja gibaju se između  $6,29 \text{ m}^3$  i  $85.185,0 \text{ m}^3$ , s prosječnom vrijednošću od  $3.254 \text{ m}^3$ . Ponikve malih volumena ispod  $3.000 \text{ m}^3$  se pojavljuju u svim hipsometrijskim razredima, dok su ponikve najvećih volumena najprisutnije na visinama između 500 i 700 mnv (Sl. 29). S obzirom na litološku podlogu, na dolomitima trijaske starosti su prisutne ponikve manjih volumena, što se objašnjava slabim djelovanjem korozije. Volumen ponikava se povećava na pločastim vapnencima, a ponikve najvećih volumena su prisutne na rudistnim vapnencima (Sl. 30).

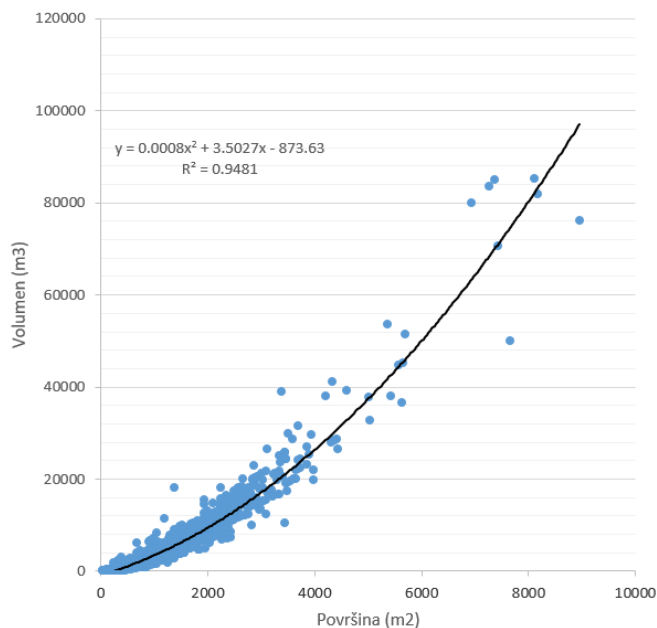


Sl. 28: Volumen ponikava u odnosu na hipsometriju



Sl. 29: Volumen ponikava u odnosu na litostratografske jedinice

Pri većini ponikava se volumen povećava s rastom površine, što je veći volumen, veća je dubina, a samim time i površina. Iznimka su urušne ponikve, koje s obzirom na visok volumen imaju malu površinu oboda. Iz sl. 31 očituje se da koeficijent determinacije  $R^2 = 0.9481$ , dobiven polinomom drugog stupnja, ukazuje na statistički značajnu korelaciju parametara volumena i površine.



Sl. 30: Prikaz volumena ponikava u odnosu na dubinu

### 7.3. Analiza prostornih statistika

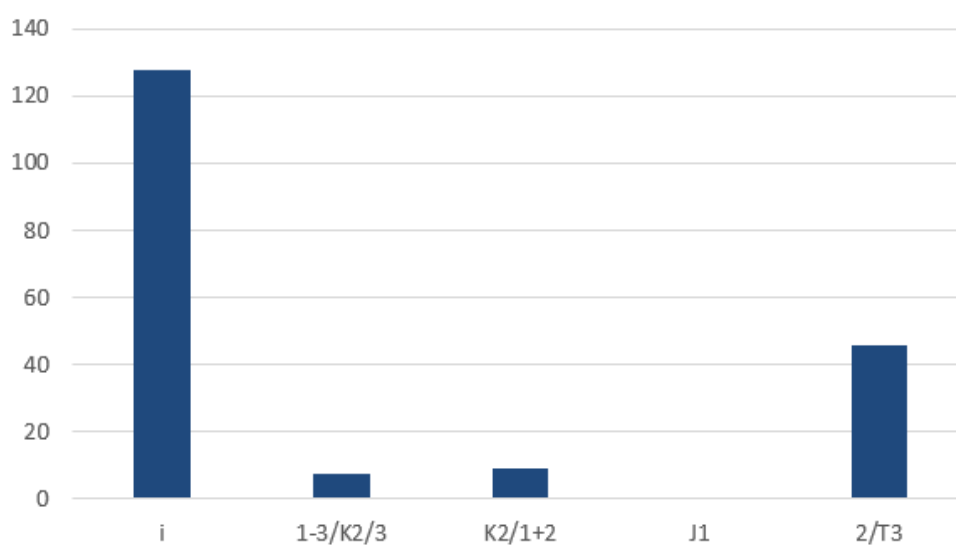
#### 7.3.1. Indeks okršenosti

Površina istraživanog područja je 26.068.869,342 m<sup>2</sup>, a zbroj površina svih ponikava prvog reda iznosi 3.116,822.43 m<sup>2</sup>, čime indeks okršenosti proučavanog područja iznosi 8,36. Indeks je veći što se više približava broju 1. Usporedno, Gabor (2018) je računala indeks okršenosti za područje Matarskog podolja u Sloveniji (gdje također prevladavaju vapnenci i dolomiti gornjokredne starosti), koji je iznosio 7,2, što znači da ponikve na području Plitvičkih jezera zauzimaju manju površinu po kvadratnom kilometru u odnosu na ponikve Matarskog podolja.

Tab. 4: Indeks okršenosti u odnosu na litostratigrafske jedinice

<i>Litostratigrafska jedinica</i>	<i>Ak (površina područja, m<sup>2</sup>)</i>	<i>Ad (površina ponikava)</i>	<i>Rp (indeks okršenosti)</i>
i	544.101,35	4.250,55	128
<sub>1-3</sub> K <sub>2</sub> <sup>3</sup>	20.802.716,10	2.779.631,00	7,5
K <sub>2</sub> <sup>1+2</sup>	2.673.642,88	291.457,60	9,2
J <sub>1</sub>	149.184,26	0,00	0
<sup>2</sup> T <sub>3</sub>	1.899.224,73	41.482,74	45,7

U tablici su prikazane vrijednosti indeksa okršenosti s obzirom na geološku podlogu (Tab. 4). Najveća vrijednost indeksa (najbliže broju 1) se nalazi na rudistnim vapnencima ( $_{1-3}K_2^3$ ) i iznosi 7,5. Druga najveća vrijednost indeksa okršenosti nalazi se na vapnencima, pločastim vapnencima s lećama rožnjaka, vapnovitim laporima i dolomitima ( $K_2^{1+2}$ ). Indeks okršenosti se smanjuje povećanjem udjela dolomita u stijeni, tako na dolomitima i vapnencima ( $^2T_3$ ) iznosi 45,7, dok na dolomitima ( $J_1$ ) nema ponikava te ga nije moguće izračunati. Na holocenskim naslagama vapnenačke sedre i izvorišnih sedimenata je indeks okršenosti najmanji, s vrijednošću 128 (Sl. 32).



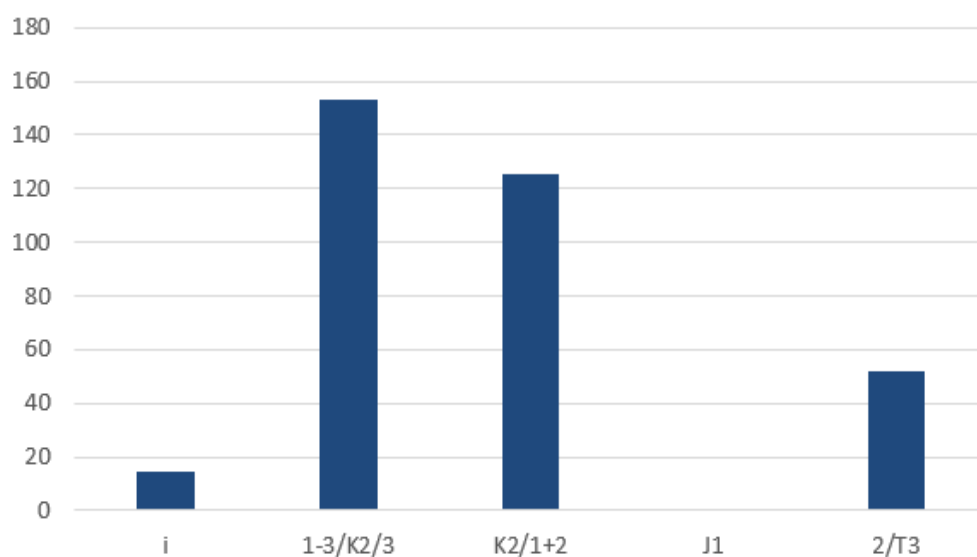
Sl. 31: Indeks okršenosti u odnosu na litostratigrafske jedinice

### 7.3.2. Gustoća ponikava

Poluautomatskom metodom određeno je 3624 ponikava prvog reda, dok je površina promatranog područja 26.068 km<sup>2</sup>. Gustoća ponikava promatranog područja iznosi 139 pon/km<sup>2</sup>. Usporedno, za područje cijele Republike Hrvatske, Pahernik (2012) je izračunao prosječnu gustoću ponikava za područje Dinarika, koja iznosi 18,6 pon/km<sup>2</sup>, a za sva krška područja iznosi 15,2 pon/km<sup>2</sup>. Također, Bauer (2015) je za prostor Štajerskog bazena OCC metodom (korištenom u ovom radu) izračunao gustoću ponikava cjelokupnog područja od 91 pon/km<sup>2</sup>, FDB metodom 110 pon/km<sup>2</sup> i WSB metodom od 146 pon/km<sup>2</sup>. Gabor (2018) je za cjelokupno područje Matarskog podolja izračunala gustoću ponikava od 96 pon/km<sup>2</sup>. Usporedivši rezultate indeksa okršenosti i gustoće ponikava, zaključuje se da ponikve Plitvičkih



jezera imaju manju površinu, ali su brojnije u odnosu na ponikve Matarskog podolja. Analogno rezultatima prethodne analize, zaključuje se kako gustoća ponikava raste u odnosu na indeks okršenosti.



Sl. 32: Gustoća ponikava u odnosu na litostratigrafske jedinice

Tab. 5: Gustoća ponikava u odnosu na litostratigrafske jedinice

<i>Litostratigrafska jedinica</i>	<i>Broj ponikava, Nd</i>	<i>Površina područja, Ak, (km<sup>2</sup>)</i>	<i>Gustoća ponikava (Nd/Ak)</i>
i	8	0.54	14
$_{1-3}K_2^3$	3183	20.80	153
$K_2^{1+2}$	335	2.67	125
J <sub>1</sub>	0	0.14	0
$^2T_3$	98	1.89	51

U tab. 5 je prikazan odnos gustoće ponikava s obzirom na litostratigrafske jedinice. Gustoća je najveća na rudistnim vapnencima ( $_{1-3}K_2^3$ ) s gustoćom od 153 ponikve/km<sup>2</sup>. Prelaskom na pločaste vapnence s lećama rožnjaka, vapnovite lapore i dolomite, gustoća se smanjuje (Sl. 33,

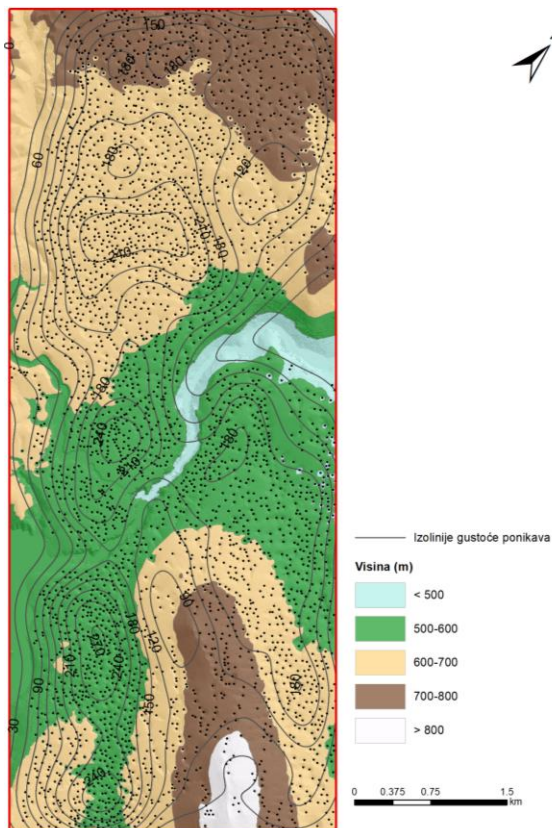
35). Bočić (2009) je proučavajući gustoću ponikava Slunjske zaravni utvrdio kako je najveća gustoća ponikava na područjima izgrađenim od karbonatnih stijena gornjojurske starosti ( $J_3^{2,3}$ ).

Također, Pahernik (1997), pri istraživanju prostora Velike Kapele, ističe kako je veća gustoća ponikava na krednim vapnencima posljedica jače tektonske razlomljenosti krednih sedimenata koji unutar istraživanog područja tvore prostranu sinklinalu razlomljenu uzdužnim (NW-SE) i poprečnim (NE-SW) rasjedima. Povećanjem udjela dolomita u naslagama gornjeg trijasa, gustoća pada na 51 pon/km<sup>2</sup>. Na području dolomita i vapnenaca jurske starosti se ponikve ne pojavljuju, dok na holocenskim naslagama vapnenačke sedre i izvorišnih sedimenata postižu gustoću od 14 pon/km<sup>2</sup>. Pahernik (2012) manju gustoću ponikava na kvartarnim nevezanim sedimentima objašnjava kratkim razdobljem izloženosti koroziji, u kojem nije došlo do značajnijeg udublivanja.

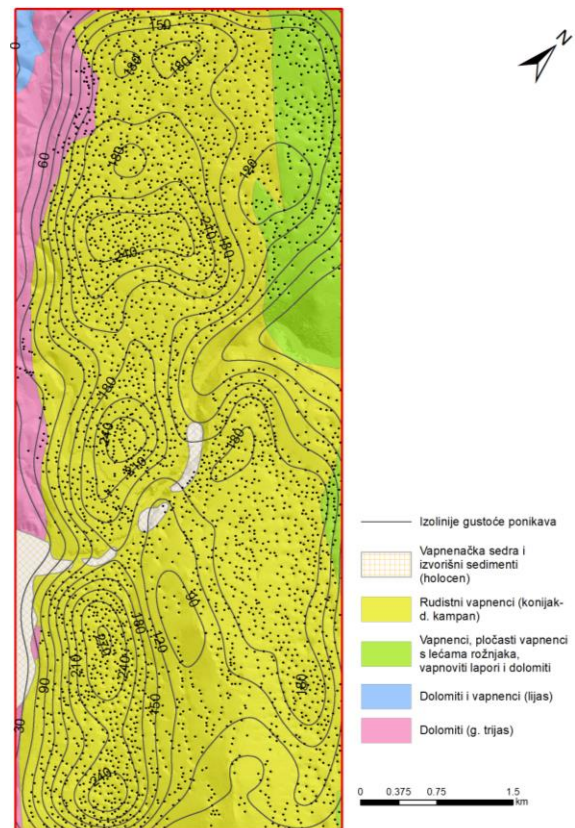
Tab. 6: Gustoća ponikava u odnosu na hipsometriju

<i>Visina (m)</i>	<i>Broj ponikava (Nd)</i>	<i>Površina područja, Ak (km<sup>2</sup>)</i>	<i>Gustoća ponikava (Nd/Ak)</i>
< 500	36	0.84	42
500 - 600	1584	8.9	177
600 - 700	1400	11.26	124
700 - 800	583	4.56	127
> 800	21	0.48	43

S obzirom na hipsometrijska obilježja, iz Tab. 6. se primjećuje da je najveća gustoća ponikava prisutna u visinskom razredu 500-600 mnv. Slijede razredi od 600-700 mnv i 700-800 mnv sa približno jednakim vrijednostima gustoće ponikava (Sl. 34). Najmanju gustoću ponikava imaju razredi ispod 500 mnv s gustoćom od 42 pon/km<sup>2</sup> i razred iznad 800 mnv s gustoćom od 43 pon/km<sup>2</sup>. Za usporedbu, Bočić (2009) je za susjedni prostor Slunjske zaravni utvrdio najveću gustoću ponikava u hipsometrijskom razredu 300-350 mnv (53,9 pon/km<sup>2</sup>).



Sl. 33: Prikaz gustoće ponikava u odnosu na hipsometriju

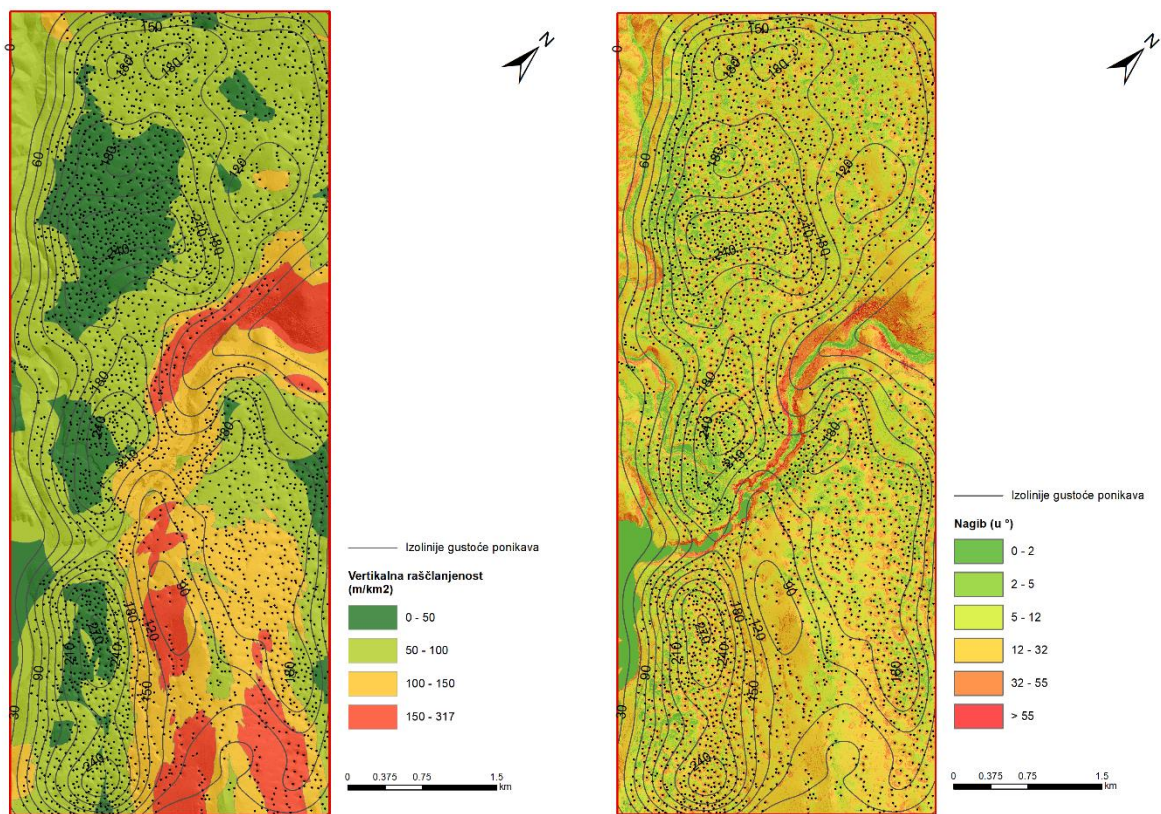


Sl. 34: Prikaz gustoće ponikava u odnosu na litostratigrafske jedinice

Grupa autora (Faivre, 1992; Mihaljević, 1995; Denizman, 2003; Bočić, 2009; Telbisz, 2010; Pahernik, 1997, 2012;) navodi kako se kroz vertikalnu raščlanjenost i nagib padina najbolje očituje gustoća ponikava.

Tab. 7: Prikaz gustoće ponikava u odnosu na vertikalnu raščlanjenost

<i>Vertikalna raščlanjenost</i>	<i>Broj ponikava, Nd</i>	<i>Površina područja, Ak (m<sup>2</sup>)</i>	<i>Gustoća ponikava (Nd/Ak)</i>
0-50	891	4.16	214
50-100	1882	13.65	137
100-150	638	5.56	114
150-317	213	2.68	79



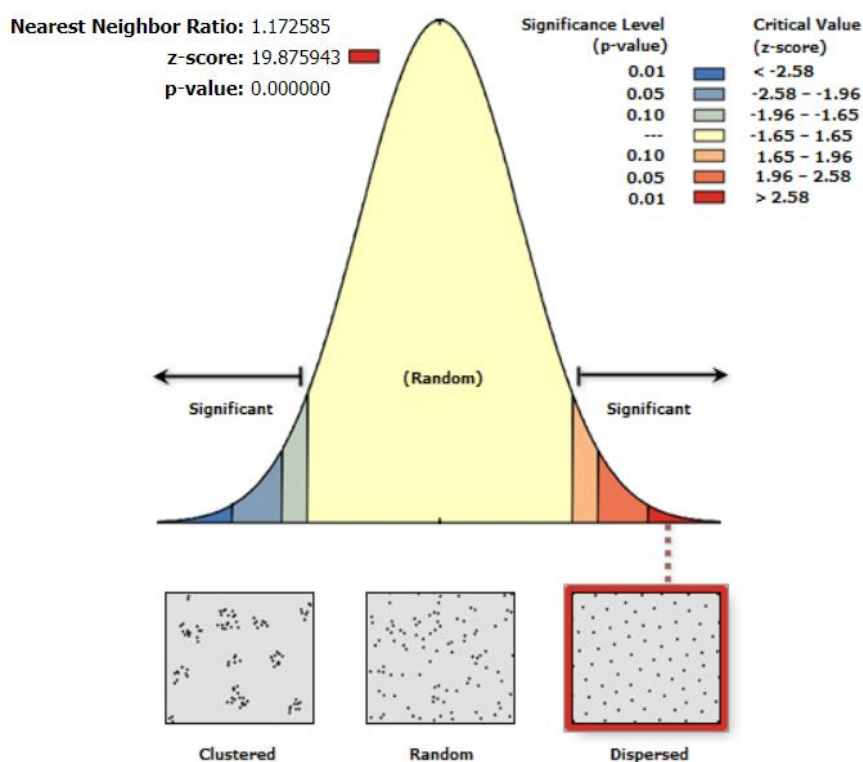
Sl. 35: Prikaz gustoće ponikava u odnosu na vertikalnu raščlanjenost

Sl. 36: Prikaz gustoće ponikava u odnosu na nagib padina

S obzirom na grafički prikaz (Sl. 36) i tab. 7, uočava se kako je najveća gustoća ponikava na područjima niske raščlanjenosti reljefa (do  $50 \text{ m/km}^2$ ). Gustoća se smanjuje s povećanjem vertikalne raščlanjenosti, što ukazuje na linearnu ili eksponencijalnu distribuciju. Rezultati su suprotni Pahernikovom (2012) istraživanju, prema kojem vrijednosti gustoće ponikava s obzirom na vertikalnu raščlanjenost pokazuju normalnu distribuciju. Rezultati su suprotni jer područje analizirano u ovom radu karakteriziraju male vrijednosti nagiba padina, dok su u Pahernikovom (2012) radu vrijednosti nagiba različite. Iz Sl. 37, koja pokazuje odnos gustoće ponikava s obzirom na nagib, uočava se da je najveća gustoća ponikava u zaravnjenim terenima ( $0-2^\circ$ ), blago nagnutim terenima ( $2-5^\circ$ ) i nagnutim terenima ( $5-12^\circ$ ). Malu gustoću ponikava Pahernik (2012) u višim razredima nagiba padina objašnjava većim udjelom površinskog otjecanja i manjim zadržavanjem padalina na visokim nagibima padina.

### 7.3.3. Mjera disperzije ponikava

Mjera disperzije je izračunata omjerom veličina srednje promatrane udaljenosti i srednje očekivane udaljenosti između centara susjednih ponikava. Očekivana udaljenost je prosječna udaljenost između susjednih ponikava i hipotetičke slučajne distribucije. Za analizirano područje ona iznosi 42,24 m, dok je vrijednost izračunate promatrane udaljenosti 49,53 m. Iz dijagrama se iščitava kako ponikve nemaju grupni uzorak te nisu distribuirane slučajno, već imaju disperzni prostorni uzorak, što potvrđuje i vrijednost mjere disperzije koja je veća od 1 ( $R_{nn} = 1,172$ ). Ponikve su jednakomjerno distribuirane po cjelokupnom području, o čemu govori i statistički značajna visoka z-vrijednost (19,87) i niska p-vrijednost (0,00000) (Sl. 38). Za analizirano područje je dobiveni rezultat očekivan, budući da se radi o zaravni koja ima ujednačene male nagibe padina i ujednačenu litologiju, što znači da je na cjelokupnom području bila jednaka šansa za razvoj ponikvi. Također, rezultat ukazuje da nema dominantnih trasa rasjeda uz koje bi se vezivale i razvijale ponikve, već da je raspucalost ujednačena na cijelom području.



Sl. 37: Prikaz mjere disperzije ponikava

## 8. Zaključak

Rezultati morfometrijske analize ukazuju na visoku okršenost analiziranog područja dijela NP Plitvička jezera. Karakteristike oblika oboda ponikava (omjer površine i dubine) ukazuju na korozijski postanak ponikava. Ukupna planimetrijska površina ponikava prvog reda varira između 36,33 m<sup>2</sup> i 8.961 m<sup>2</sup>. Najveći broj ponikava ima male i plitke dimenzije te reprezentativna ponikva istraživanog područja ima prosječnu površinu od 860 m<sup>2</sup>, opseg 100 m, promjer 31,8 m i prosječnu dubinu od 5 m te je kružnog oblika, što govori da se većina ponikava nalazi u zreloj fazi formacije. Dubina ponikava je također ovisna o litloškoj podlozi - tako su najdublje ponikve smještene na rudistnim vapnencima kredne starosti.

Indeks okršenosti područja je 8,36, što ovisi o udjelu vapnenaca u stijeni, blizini rasjeda i lineamentima. Što je udio kalcita u stijeni veći, veći je i indeks okršenosti, što potvrđuje i podatak da je indeks okršenosti najveći na rudistnim vapnencima. Ponikve prvog reda promatranog područja su većinom kružnog oblika te njihov indeks kružnosti varira između 1.003 i 2.229. Indeks kružnosti ovisi o stijenskoj strukturi i redu ponikava. Što je stijena više raspuknuta, to je ponikva nepravilnijeg oblika. Na kružnost utječu redovi ponikava i lineamenti, te su ponikve izduženije uz njihove granice.

Dominantni pravac pružanja ponikava je N-S, a proučavajući pravce pružanja po različitim dubinama, raste udio pravca NW-SE, što je ukazuje na najvjerojatnije promjene tektonskih uvjeta tijekom njihove geneze. Volumeni ponikava promatranog područja se razlikuju s obzirom na litostratigrafsku podlogu. Analogno dubini, volumeni su najveći na rudistnim vapnencima i uglavnom rastu u odnosu na površinu.

Gustoća ponikava promatranog područja iznosi 139 pon/km<sup>2</sup>, a s obzirom na litologiju, najveća je na rudistnim vapnencima. Nagib padina i vertikalna raščlanjenost također ima velik utjecaj na gustoću ponikava, koja je najizraženija na ravnom i blago raščlanjenom terenu. Prostorni raspored gustoće ponikava ukazuje da distribucija nije slučajna, već je utvrđen disperzni prostorni uzorak. To znači da su zbog ujednačenih malih nagiba i litologije bile jednake šanse za nastanak ponikava na cjelokupnom području.

Za daljna istraživanja geneze ponikava i njihovih morfometrijskih karakteristika, potrebne su geološke karte krupnijeg mjerila, ponajprije za utvrđivanje korelacije pojave ponikava uz geološke granice i aktivne rasjede. Također, terenskim istraživanjima je potrebno utvrditi krške oblike depresija drugog i trećeg reda, radi li se o uvalama, bezstropnim špiljama ili sl.

## 9. Izvori i literatura

1. Basso, A., Bruno, E., Parise, M., Pepe, M., 2013: Morphometric analysis of sinkholes in a karst coastal area of southern Apulia (Italy), *Environmental Earth Sciences*, DOI: DOI 10.1007/s12665-013-2297-z.
2. Bauer, C., 2015: Analysis of dolines using multiple methods applied to airborne laser scanning data, *Geomorphology*, 250, 78–88.
3. Biondić, B., Biondić, R. Meaški, H., 2010: The conceptual hydrogeological model of the Plitvice Lakes. *Geologia Croatica*, 63 (2), 195–206.
4. Bočić, N., 2009: *Geomorfološke značajke prostora Slunjske zaravni*, disertacija, Geografski odsjek PMF-a, Zagreb.
5. Bočić, N., Pahernik, M., Mihevc, A., 2015: Geomorphological significance of the palaeodrainage network on a karst plateau: The Una–Korana plateau, Dinaric karst, Croatia, *Geomorphology*, 247, 55-65, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.01.028>.
6. Bognar, A., 2001: Geomorfološka regionalizacija Hrvatske, *Acta Geographica Croatica*, 34, 7-29.
7. Bonacci, O., Roje-Bonacci, T., 2006: Zatvorene udubine u kršu i njihova uloga u kretanju vode (II.), *Hrvatska vodoprivreda*, 15 (168); 38-45
8. Bondesan, A., Meneghel, M., Sauro, U., 1992: Morphometric analysis of dolines, *International Journal of Speleology*, 21 (1-4), 1-55.
9. Cvijić, J., 1895: *Karst, geografska monografija*, Državna štamparija, Beograd.
10. Čar, J., 2001: Structural bases for shaping of dolines, *Acta Carsologica*, 30 (2), 239–256.
11. Denizman, C., 2003: Morphometric and spatial distribution parameters of karstic depressions, Lower Suwannee River Basin, Florida, *Journal of Cave and Karst Studies* 65 (1), 29-35.
12. Doctor, D. H., Young, J. A., 2013: An Evaluation of Automated GIS Tools for Delineating Karst Sinkholes and Closed Depressions from 1-Meter LiDAR-Derived Digital Elevation Data, *13th Sinkhole Conference*, DOI: 10.5038/9780979542275.1156.



13. Dreybrodt, W., 1988: *Processes in Karst Systems: Physics, Chemistry, and Geology*, Springer, New York, Berlin.
14. ESRI, 2019: *A quick tour of ArcMap*, <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/main/get-started/a-quick-tour-of-arcmap.htm>, (31.1.2020.).
15. ESRI: 2019: Help: *Delete Identical*, <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/data-management-toolbox/delete-identical.htm>, (31.1.2020.).
16. ESRI, 2019: Help: *Fill*, <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/fill.htm>, (31.1.2020.).
17. ESRI, 2019: Help: *Minus*, <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/minus.htm>, (31.1.2020.).
18. ESRI, 2019: Help: *UpdateCursor*, <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/analyze/arcpy-data-access/updatecursor-class.htm>, (31.1.2020.)
19. ESRI, 2020: How To: *Create points representing the highest or lowest elevations within polygon features*, <https://support.esri.com/en/technical-article/000011761>, (31.1.2020).
20. Evans, I. S., 1972: General Geomorphometry, derivatives of altitude and descriptive statistics, *Spatial Analysis in Geomorphology*. London, British Geomorphological Research Group, 17-90.
21. Faivre, S., 1992: The analysis of doline density on the north Velbit and Senjsko bilo, u: *Proceedings of the international symposium Geomorphology and sea and the meeting of the geomorphological commission of the Carpatho-Balkan countries* (ur. Bognar, A.), Mali Lošinj, September 22-26 1992, Faculty of the Natural Science and Mathematics, Department of Geography, Zagreb, 135-143.
22. Ford, D. C., Williams, P. W., 1989: *Karst Geomorphology and Hydrology*, Springer, Netherlands.
23. Ford, D. C., Williams, P. W., 2007: *Karst Geomorphology and Hydrology*, Chapman & Hall, London.

24. Gabor, L., 2018: *Geomorfološka analiza vrtač na SZ delu Matarskega podolja*, Magistrski rad, Naravoslovnotehniška fakulteta, Ljubljana.
25. Gostinčar, P., 2013: The application of GIS methods in morphometrical analysis of dolines on limestone and dolomite bedrock, *Proceedings of the 16th International Congress of Speleology*, Brno, International Union of Speleology, Czech Speleological Society, 84–88.
26. Goudie, A. S., 2004: *Encyclopedia of Geomorphology*, Routledge, New York.
27. Grlj, A., 2014: *Uporaba digitalnega modela višin in izbranih večspektralnih izdelkov daljinskega zaznavanja za iskanje kraških kotanj in brezstropih jam Podgorskega krasa*, Magistrski rad, Filozofska fakulteta, Ljubljana.
28. Gutiérrez, F., Guerrero, J., Lucha, P., 2008: A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain, *Environmental Geology*, 53 (5), 993-1006.
29. Habič, P., 1986: Površinska razčlenjenost Dinarskega krasa, *Acta carsologica*, 14 (15), 39-58.
30. Jenson, S., Domingue, J., 1988: Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54, 1593-1600.
31. Klun, U., 2016: *Mineralne, geokemične in teksturne značilnosti sedimentov dveh kraških vrtač na otoku Krku*, Diplomski rad, Naravoslovnotehniška fakulteta, Ljubljana.
32. Kobal, M., Bertonec, I., Pirotti, F., Dakskobler, I., Kutnar, L., 2015: Using Lidar Data to Analyse Sinkhole Characteristics Relevant for Understory Vegetation under Forest Cover—Case Study of a High Karst Area in the Dinaric Mountains, *PLoS ONE*, 10 (3), DOI: 10.1371/journal.pone.0122070.
33. Kosmatin Fras, M., 2009: Zračno lasersko skeniranje. *Gradivo za strokovne izpite*, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.
34. Krevs, M., 1992: Iskanje lokalnih reliefnih ekstremov na DMR, *Geografski vestnik*, 64, 205-218.
35. Krnjak, H. 2019: *Strukturno-geološki model področja Nacionalnog parka Plitvička jezera*, Diplomski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.

36. LaValle, P., 1967: Some aspects of linear karst depression development in south-central Kentucky, *Annals of Association of American Geographers*, 57, 49-71.
37. Marković, D., 2015: *Procjena geohazarda u ogulinskoj udolini*, Diplomski rad, Građevinski fakultet, Rijeka.
38. Miao, X., Qiu, X., Wu, S. S., Luo, J., Gouzie, D. R., Xie, H., 2013: Developing Efficient Procedures for Automated Sinkhole Extraction from Lidar DEMs, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 79 (6), 545-554.
39. Microsoft Office, 2019: Microsoft Excel, <https://products.office.com/en-us/excel>, (31.1.2020.).
40. Mihljević, D., 1995: *Geomorfološke značajke gorskog hrpta Učke gorske skupine Čićarije i Istarskog pobrđa*, disertacija, Geografski odsjek PMF-a, Zagreb.
41. Moreno-Gómez, M., Liedl, R., Stefan, C., 2019: A New GIS-Based Model for Karst Dolines Mapping Using LiDAR; Application of a Multidepth Threshold Approach in the Yucatan Karst, Mexico, *Remote Sensing*, 11 (1147), DOI: 10.3390/rs11101147.
42. Nacionalni park Plitvička jezera, 2020: Šume, <https://np-plitvicka-jezera.hr/prirodna-i-kulturna-bastina/prirodna-bastina/raznolikost-stanista/sume/>, (31.1.2020.).
43. Novak, N., 2018: *Primerjava višin določenih z mobilnim kartirnim sistemom in iz lidarskih podatkov*, Magistarski rad, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.
44. Novljan, Ž., 2019: *Vrtače na pobočjih*, Magistarski rad, Filozofska fakulteta, Ljubljana.
45. Obu, J., 2011: *Prepoznavanje kraških kotanj na podlagi digitalnega modela višin*, Magistarski rad, Filozofska fakulteta, Ljubljana.
46. Obu, J., Podobnikar, T., 2013: Algoritem za prepoznavanje kraških kotanj na podlagi digitalnega modela reliefa, *Geodetski Vestnik*, 57 (2), 260-270.
47. Padro-Igúzquiza, E., Durán, J. J., Dowd, P. A., 2013: Automatic detection and delineation of karst terrain depressions and its application in geomorphological mapping and morphometric analysis. *Acta Carsologica*, 42 (1) 17–24.
48. Pahernik, M., 1997: *Recentni krški procesi i njihov utjecaj na oblikovanje reljefa gorske skupine Velike Kapele*, magistarski rad, Geografski odsjek PMF-a, Zagreb.
49. Pahernik, M., 2012: Prostorna gustoća ponikava na području Republike Hrvatske, *Hrvatski geografski glasnik*, 74 (2), 5-26.

50. Péntek, K., Veress, M., Lóczy, D., 2007: A morphometric classification of solution dolines, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 51 (1), 19-30, DOI: 10.1127/0372-8854/2007/0051-0019
51. Peucker, T. K., Douglas, D. H., 1975: Detection of Surface-Specific Points by Local Parallel Processing of Discrete Terrain Elevation Data, *Computer Graphics and Image Processing*, 4, 375–387.
52. Pike, R. J., Evans, I., Hengl, T., 2009: *Geomorphometry: a Brief Guide*, Oxford, Elsevier, 3-33.
53. Podobnikar, T., 2001: *Digitalni model reliefa iz geodetskih podatkov različne kakovosti*, Doktorska disertacija, Filozofska fakulteta, Ljubljana.
54. Podobnikar, T., 2008a: Določitev značilnih gorskih vrhov in analiza njihovih oblik, *Geodetski vestnik*, 52, (1), 29-39.
55. Podobnikar, T., 2008b: Nadgradnja modela reliefa Slovenije z visokokakovostnimi podatki, *Geodetski vestnik*, 52 (4), 834-853.
56. Podobnikar, T., Možina, P., 2008: Analiza oblik površja z uporabo lokalnega okna, *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2007-2008*, Ljubljana, Založba ZRC, 29-39.
57. Polšak, A., Juriša, M., Šparica, M., Šimunić, A., 1976: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, list Bihać, L33-116, Institut za geološka istraživanja Zagreb, Savezni geološki zavod, Beograd.
58. Polšak, A., Crnko, J., Šimunić, A. N., Šimunić, A. L., Šparica, M., Juriša, M., 1978: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, *Tumač za list Bihać*, L33-116, Institut za geološka istraživanja Zagreb, Savezni geološki zavod, Beograd.
59. Rahimi, M., Alexander, E. C., 2013: Locating sinkholes in lidar coverage of a glacio-fluvial karst, Winona county, MN, *Sinkholes and the engineering and anvironmental impacts of karst*, Carlsbad, National Cave and Karst Research Institute, 469–480.
60. Rastija, P., 2015: *Morfometrijska analiza Nacionalnog parka Plitvička jezera*, Diplomski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb.
61. Roglić, J., 1951: Unsko-Koranska zaravan i Plitvička jezera – Geomorfološka promatranja, *Geografski glasnik*, 13.

62. Roglić, J. 1974: Morfološke posebnosti Nacionalnog parka Plitvička jezera, Plitvička jezera – Čovjek i priroda, Plitvička jezera, 5-24.
63. Sauro, U., 2003: Dolines and sinkholes: Aspects of evolution and problems of classification, *Acta Carsologica* 32 (2), 41-52.
64. Sopchaki, C. H., Sampaio, T. V. M., 2016: Airborne Laser Scanner: principles of operation, recent uses in Brazil and regulatory issue from laws and parameters in Brazil and in the USA, *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 6 (7), 338-353.
65. Šegina, E., Benac, Č., Rubinić, J., Knez, M., 2018: Morphometric analyses of dolines — the problem of delineation and calculation of basic parameters, *Acta Carsologica*, 47 (1), 23-33.
66. Šegota, T., Filipčić, A., 2003: Köppenova podjela klima i hrvatsko nazivlje, *Geoadria*, 8 (1), 17-37.
67. Šušteršič, F., 2012: Vrtače in doline – pol stoletja kasneje, *Proteus*, 74 (9), 402-410.
68. Telbisz, T., Látos, T., Deák, M., Székely, B., Koma, Z., Standovár, T., 2016: The advantage of lidar digital terrain models in doline morphometry compared to topographic map based datasets – Aggtelek karst (Hungary) as an example, *Acta Carsologica*, 45 (1), 5-18.
69. Urbančič, T., Grigillo, D., 2015: *Lidar in uporaba laserskega skeniranja v geodeziji*. Študijsko gradivo. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.
70. Urbančič, T., 2017: *Ocenjevanje geometrične podobnosti oblakov točk aerolaserskega skeniranja*, Doktorska disertacija, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.
71. Verbovšek, T., Gabor, L., 2019: Morphometric properties of dolines in Matarsko podolje, SW Slovenia, *Environ Earth Sci*, 78 (396), DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8398-6>.
72. Waltham, T., Bell, F., Culshav, M., 2010: *Sinkholes and Subsidence, Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction*, Springer, New York, 382 str.
73. Williams, P. W., 1971: Illustrating morphometric analysis of karst with examples from New Guinea, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 15, 40-61.
74. Williams, P.W., 1972: Morphometric analysis of polygonal karst in New Guinea, *Bulletin Geological Society of America*, 83, 761-796.

75. Williams, P. W., 2004: *Covered Karsts: Dolines, Encyclopedia of Caves and Karst Science*, New York: Springer, 304-310.
76. Wood, J. D., 1996: *The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Models*, Doktorska disertacija, University of Leicester, London.
77. Wu, Q., Deng, C., Zuoqi, C., 2016: Automated delineation of karst sinkholes from LiDAR-derived digital elevation models, *Geomorphology*, 266, 1–10.
78. Zhu, J., Taylor, T. P., Currens, J. C., Crawford, M. M., 2014: Improved karst sinkhole mapping in Kentucky using LiDAR techniques: a pilot study in Floyds Fork Watershed, *Journal of Cave and Karst Studies* 76 (3), 207–216, DOI: 10.4311/2013ES0135.

## 10. Prilozi

### Grafički prilozi

Sl. 1: Glavni tipovi ponikava po: Sauro (2003).....	10
Sl. 2: Princip rada ALS snimanja .....	12
Sl. 3: Položaj istraživnog područja.....	14
Sl. 4: Geološka karta .....	16
Sl. 5: Primjer greške na DEM-u .....	18
Sl. 6: Princip rada alata <i>Fill</i> .....	19
Sl. 7: Princip rada alata <i>Minus</i> .....	19
Sl. 8: Princip svrstavanja ponikava u redove .....	20
Sl. 9: Klasifikacija depresija po redovima u odnosu na litostratigrafske jedinice.....	27
Sl. 10: Prikaz dubina ponikava s obzirom na hipsometriju .....	28
Sl. 11: Prikaz dubina ponikava s obzirom na litostratigrafske jedinice .....	28
Sl. 12: Odnos dubine i volumena ponikava.....	29
Sl. 13: Odnos dubine i površine ponikava.....	29
Sl. 14: Odnos indeksa kružnosti ponikava prvog reda i površine .....	30
Sl. 15: Indeks kružnosti s obzirom na redove ponikava .....	31
Sl. 16: Indeks kružnosti s obzirom na hipsometriju.....	32
Sl. 17: Indeks kružnosti s obzirom na litostratigrafske jedinice .....	32
Sl. 18: Promjena orijentacije najdulje osi ponikve s obzirom na dubinu.....	33
Sl. 20: Azimut najdulje linije površine oboda ponikve.....	34
Sl. 21: Azimut najdulje linije ponikve na -5 m dubine .....	34
Sl. 22: Azimut najdulje linije ponikve na -10 m dubine .....	34
Sl. 23: Azimut najdulje linije ponikve na -15 m dubine .....	34
Sl. 24: Azimut najdulje linije ponikve na -20 m dubine .....	34
Sl. 25: Azimut najdulje linije površine oboda ponikava na lijevoj strani rijeke Korane .....	35
Sl. 26: Azimut najdulje linije površine oboda ponikava na desnoj strani rijeke Korane .....	35
Sl. 27: Prikaz linemenata u odnosu na litostratigrafske jedinice .....	36
Sl. 28: Azimuti lineamenata .....	36
Sl. 29: Volumen ponikava u odnosu na hipsometriju .....	37

Sl. 30: Volumen ponikava u odnosu na litostratigrafske jedinice .....	37
Sl. 31: Prikaz volumena ponikava u odnosu na dubinu .....	38
Sl. 32: Indeks okršenosti u odnosu na litostratigrafske jedinice.....	39
Sl. 33: Gustoća ponikava u odnosu na litostratigrafske jedinice .....	40
Sl. 34: Prikaz gustoće ponikava u odnosu na hipsometriju.....	42
Sl. 35: Prikaz gustoće ponikava u odnosu na litostratigrafske jedinice .....	42
Sl. 36: Prikaz gustoće ponikava u odnosu na vertikalnu raščlanjenost.....	43
Sl. 37: Prikaz gustoće ponikava u odnosu na nagib padina .....	43
Sl. 38: Prikaz mjere disperzije ponikava.....	44

#### Tablični prilozi

Tab. 1: Statistički rezultati analiziranih parametara .....	26
Tab. 2: Indeks kružnosti s obzirom na redove ponikava.....	30
Tab. 3: Prikaz broja ponikava u odnosu na dubinu i pravce pružanja .....	33
Tab. 4: Indeks okršenosti u odnosu na litostratigrafske jedinice.....	38
Tab. 5: Gustoća ponikava u odnosu na litostratigrafske jedinice .....	40
Tab. 6: Gustoća ponikava u odnosu na hipsometriju.....	41
Tab. 7: Prikaz gustoće ponikava u odnosu na vertikalnu raščlanjenost.....	42