

Uloga vrtača u napajanju krškog vodonosnika

Širol, Andre

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:121894>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij geološkog inženjerstva

ULOGA VRTAČA U NAPAJANJU KRŠKOG VODONOSNIKA

Diplomski rad

Andre Širol

GI305

Zagreb, 2018.

ULOGA VRTAČA U NAPAJANJU KRŠKOG VODONOSNIKA

Andre Širol

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

Sažetak

Sliv izvora Gradole nalazi se u središnjoj Istri. Ukupna površina sliva iznosi 159,6 km² od čega 85 % površine pokrivaju karbonatne stijene, a 15 % flišne naslage. U karbonatnim stijenama razvijen je velik broj vrtača koje imaju važnu ulogu u napajanju vodonosnika. Vrtalice omogućuju izravnu vezu površinske vode s podzemljem, stoga je njihovo istraživanje ključno u shvaćanju hidroloških odnosa u slivu. U ovom radu istraživanje vrtača temelji se na morfometrijskim i prostornim analizama. Početna pretpostavka morfometrijskih analiza je da se različitosti u litološkim i tektonskim obilježjima stijena manifestiraju u različitim morfometrijskim obilježjima vrtača. Analiza tih obilježja pokazala je da na području sliva Gradole ne postoji čvrsta veza između pojava vrtača i pojedinih kronostratigrafskih jedinica. Također, u istraživanju krških vodonosnika važno je izdvojiti zone različitog stupnja okršnosti, a to se postiže prostornim analizama vrtača. U slivu izvora Gradole najveća okršnost javlja se u krednim karbonatnim stijenama uz kontakt s flišnim naslagama paleogenske starosti. Na temelju provedene prostorne analize vrtača i iz nje proizašlih rezultata, izračunati su koeficijenti efektivne infiltracije u slivu izvora Gradole.

Ključne riječi: vrtalice, krški vodonosnik, izvor Gradole, prostorna analiza, morfometrijska analiza, koeficijent efektivne infiltracije.

Diplomski rad sadrži: 60 stranica, 48 slika, 13 tablica, 26 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Dr. sc. Jelena Parlov, izv. prof. RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Jelena Parlov, izv. prof. RGNF

Dr. sc. Bojan Matoš, doc. RGNF

Dr. sc. Dario Perković, doc. RGNF

Datum obrane: 19.10.2018.

THE ROLE OF SINKHOLES IN THE RECHARGE OF KARST AQUIFERS

Andre Širol

Thesis completed at: University of Zagreb

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Geology and Geological Engineering
Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

Abstract

The Gradole spring basin area is located in central Istria. The total surface of the basin area is 159.6 km², 85 % of which is made up of carbonate rocks and 15 % of flysch deposits. A large number of sinkholes developed in carbonate rocks. Sinkholes are of big importance in aquifer recharge as they enable direct flow of surface water to the underground. Sinkhole research is based upon morphometric and spatial analysis. The initial assumption of morphometric analysis is that differences in lithological and tectonic properties of rocks show up as differences in morphometric properties. Analysis done in this study showed that in the Gradole spring basin area there is no strong connection between the sinkhole phenomenon and individual chronostratigraphic units. Likewise, research of karst aquifers should include spatial analysis to differentiate between zones of different degree of karstification. In the Gradole spring basin the area of greatest karstification is located in Cretaceous carbonate rocks along border with Paleogene flysch. Based on the spatial analysis and its results, the coefficients of effective infiltration of the Gradole spring basin area were calculated.

Keywords: sinkholes, karst aquifer, Gradole spring, spatial analysis, morphometric analysis, coefficient of effective infiltration.

Thesis contains: 60 pages, 48 figures, 10 tables, 26 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited at: The Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Associate Professor Jelena Parlov, PhD

Reviewers: Associate Professor Jelena Parlov, PhD

Assistant Professor Bojan Matoš, PhD

Assistant Professor Dario Perković, PhD

Date of defense: October 19, 2018.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. OPIS ISTRAŽIVANOG PODRUČJA.....	2
2.1. Geografski položaj	2
2.2. Izvor Gradole	4
2.3. Geološka građa	6
2.3.1. Stratigrafski pregled	6
2.3.2. Tektonika.....	23
2.4. Hidrogeološke značajke	24
3. MORFOMETRIJSKA I PROSTORNA ANALIZA VRTAČA	25
3.1. Digitalizacija podataka	26
3.2. Morfometrijska obilježja vrtača	30
3.3. Površina vrtača.....	33
3.4. Gustoća vrtača.....	35
3.5. Orijentacije vrtača.....	39
3.5.1. Orijentacije vrtača unutar pojedinih R_{WL} razreda	41
3.5.2. Orijentacije rasjeda.....	43
4. NAPAJANJE VODONOSNIKA IZVORA GRADOLE	44
5. ZAKLJUČAK	46
6. LITERATURA.....	58

Popis slika:

Slika 2-1. Lokacija sliva izvora Gradole prikazana na satelitskoj snimci (izvor: Google Earth).....	2
Slika 2-2. Godišnje količine oborina na kišomjernim stanicama Pazin, Baderna i Botonega (Parlov, 2010).	3
Slika 2-3. Nivogram srednjih dnevnih vodostaja i hidrogram srednjih dnevnih protoka izvora Gradole za razdoblje 1. 1. 2000. - 31. 12. 2007. godine (Parlov, 2010).	5
Slika 2-4. Geološka građa sliva izvora Gradole prema OGK 1:100 000 listova Rovinj (prema Polšak & Šikić, 1973) i Trst (Geološki zavod Ljubljana i Institut za Geološka istraživanja Zagreb, 1951-1964) s prikazom lokacija terenskih točaka.	6
Slika 2-5. Izdanak vapnenca na točki 1.	8
Slika 2-6. Izdanak vapnenca na točki 2.	8
Slika 2-7. Prikaz izmjerenih elemenata u barem – aptskim naslagama: a) stereografska projekcija slojnih ploha; b) rozeta dijagram setova pukotina.	9
Slika 2-8. Prikaz dijela geološkog stupa s OGK 1:100.000 lista Rovinj (prema Polšak & Šikić, 1973). Na slici je prikazan razvoj donjokrednih naslaga s osnovnim strukturno-teksturnim obilježjima te s približnim debljinama.	10
Slika 2-9. Vrtača na točki 3.	10
Slika 2-10. Vrtača Sopajac na točki 4.....	11
Slika 2-11. Izdanak vapnenca na točki 4.	12
Slika 2-12. Prikaz izmjerenih elemenata u albskim naslagama: a) stereografska projekcija slojnih ploha; b) rozeta dijagram setova pukotina.	12
Slika 2-13. Vrtača na točki 5.	13
Slika 2-14. Vrtača na točki 6.	13
Slika 2-15. Prikaz dijela geološkog stupa s OGK 1:100.000 lista Rovinj (prema Polšak & Šikić, 1973). Na slici je prikazan razvoj gornjokrednih naslaga s osnovnim strukturno-teksturnim obilježjima te s približnim debljinama.....	14
Slika 2-16. Izdanak na točki 7.	15
Slika 2-17. Izdanak na točki 8.	16
Slika 2-18. Izdanak na točki 9.	17
Slika 2-19. Izdanak na točki 10.	18
Slika 2-20. Stereografska projekcija slojnih ploha izmjerenih u cenomanskim naslagama.	18
Slika 2-21. Prikaz dijela geološkog stupa s OGK 1:100.000 lista Rovinj (prema Polšak & Šikić, 1973). Na slici je prikazan razvoj paleogenskih naslaga s osnovnim strukturno-teksturnim obilježjima te s približnim debljinama.....	19
Slika 2-22. Izdanak na točki 11.	20
Slika 2-23. Izdanak pješčenjaka i lapora na točki 12.	21

Slika 2-24. Izdanak vapnenca na točki 12.	22
Slika 3-1. Karta dna vrtača u slivu izvora Gradole.....	27
Slika 3-2. Primjer atributne tablice za točkaste podatke.	28
Slika 3-3. Prikaz oznaka dna vrtača i iscrtanih poligona, atributna obilježja ovih vrtača prikazana su na slici 3-2.....	28
Slika 3-4. Primjer iscrtanih poligona.	29
Slika 3-5. Karta poligona vrtača u slivu izvora Gradole.	30
Slika 3-6. Način određivanja duljine (L) i širine (W): a) jednostavne vrtače i b) sustava manjih vrtača. Crvenim točkama označena su dna vrtača.	31
Slika 3-7. Frekvencije vrtača s obzirom na njihovu površinu.	33
Slika 3-8. Grafički prikaz odnosa površina visinskih razreda i sume površine vrtača u njima.	34
Slika 3-9. Grafički prikaz odnosa površina litoloških članova i površine vrtača u njima.	35
Slika 3-10. Grafički prikaz gustoća vrtača u pojedinom visinskom razredu.	36
Slika 3-11. Grafički prikaz gustoće vrtača u pojedinim litološkim članovima.	37
Slika 3-12. Prikaz vrijednosti gustoća vrtača proračunatih kernel metodom.	38
Slika 3-13. Rozeta dijagram orijentacija svih vrtača u slivu.	39
Slika 3-14. Grafički prikaz broja vrtača u pojedinom RWL razredu.	40
Slika 3-15. Rozeta dijagram orijentacija vrtača za razred 0,30 – 0,45.....	41
Slika 3-16. Rozeta dijagram orijentacija vrtača za razred 0,45 – 0,65.	41
Slika 3-17. Rozeta dijagram orijentacija vrtača za razred 0,65 – 0,85.	42
Slika 3-18. Rozeta dijagram orijentacija vrtača za razred 0,85 – 1,00.	42
Slika 3-19. Rozeta dijagram orijentacija rasjeda i pukotina.	43
Slika 4-1. Shematski prikaz raspodjele napajanja u slivu izvora Gradole (prema Parlov, 2010).	46
Slika 4-2. Thiessen-ovi poligoni kišomjernih stanica za sliv izvora Gradole (Dvorabić, 2010).	47
Slika 4-3. Odnos godišnje količine oborine koja padne P i otječe Q.	48
Slika 4-4. Odnos količine oborine koja padne P i otječe Q za hidrološke godine.....	49
Slika 4-5. Prikaz zona različitih gustoća vrtača.....	53

Popis tablica:

Tablica 3-1. Aritmetička sredina i standardna devijacija duljina, širina i promjera prema visinskim razredima.	31
Tablica 3-2. Aritmetička sredina i standardna devijacija duljina, širina i promjera prema litološkim članovima.	32
Tablica 3-3. Broj vratača, prosječna dubina i standardna devijacija prema visinskim razredima.	32
Tablica 3-4. Broj vrtača, prosječna dubina i standardna devijacija prema litološkim članovima.	32
Tablica 3-5. Vrijednosti suma površina i prosječne površine u pojedinom visinskom razredu te udjeli vrtača u razredu.	33
Tablica 3-6. Vrijednosti suma površina i prosječne površine u pojedinom litološkom članu te udjeli vrtača u pojedinom članu.	34
Tablica 3-7. Prikaz vrijednosti površina pojedinih visinskih razreda te njihovog udjela u slivu, broj vrtača i gustoća vrtača u pojedinom visinskom razredu.	36
Tablica 3-8. Prikaz vrijednosti površina pojedinih litoloških članova te broja i gustoće vrtača u njima.	37
Tablica 3-9. Broj vrtača u pojedinim RWL razredima.	40
Tablica 4-1. Koeficijenti efektivne infiltracije za sliv izvora Gradole u vremenskom razdoblju 2000.-2006. godine.	48
Tablica 4-2. Koeficijenti efektivne infiltracije za sliv izvora Gradole u vremenskom razdoblju 2000.-2006. hidrološke godine.	49
Tablica 4-3. Prikaz raspodjele oborina tijekom kalendarskih godina od 2000. do 2006.	50
Tablica 4-4. Prikaz raspodjele oborina tijekom hidroloških godina od 2001. do 2006.	51

1. UVOD

Ovim radom obuhvaćen je sliv izvora Gradole koji je smješten u središnjoj Istri. Sliv je većim dijelom izgrađen od karbonatnih naslaga kredne starosti, a u najvišim dijelovima od slabopropusnih flišnih naslaga paleogenske starosti. Kao i u ostalim krškim vodonosnicima voda do izvora dolazi sustavom povezanih pukotina koje najčešće nastaju tektonskom aktivnošću, a kasnije se proširuju otapanjem i prelaze u kaverne. Istraživanje površinskih krških oblika, prvenstveno vrtača, može pomoći u shvaćanju hidrogeoloških uvjeta u vodonosniku.

Vrtače ili ponikve su jedan od osnovnih morfoloških oblika u kršu. Omogućuju izravnu vezu površinske vode s podzemljem, stoga imaju veoma važnu ulogu u napajanju krških vodonosnika. Geneza vrtača vezana je uz različite prirodne procese od kojih mnogi djeluju istovremeno, a među njima se ističu otapanje, urušavanje svoda špilja i usjedanje.

Različitosti u litološkim i tektonskim obilježjima stijenskoga kompleksa manifestiraju se u različitim morfometrijskim obilježjima vrtača. Analizama morfometrijskih obilježja vrtača mogu se grupirati vrtače sličnih obilježja, a interpretacijom tih podataka moguće je donositi zaključke o stanju u podzemlju.

Osim morfometrijske, u istraživanje je uključena i analiza prostornog rasporeda vrtača. Područja koja imaju veliku gustoću vrtača ujedno su i područja velike okršenosti. Izdvajanje takvih zona cilj je ovoga rada.

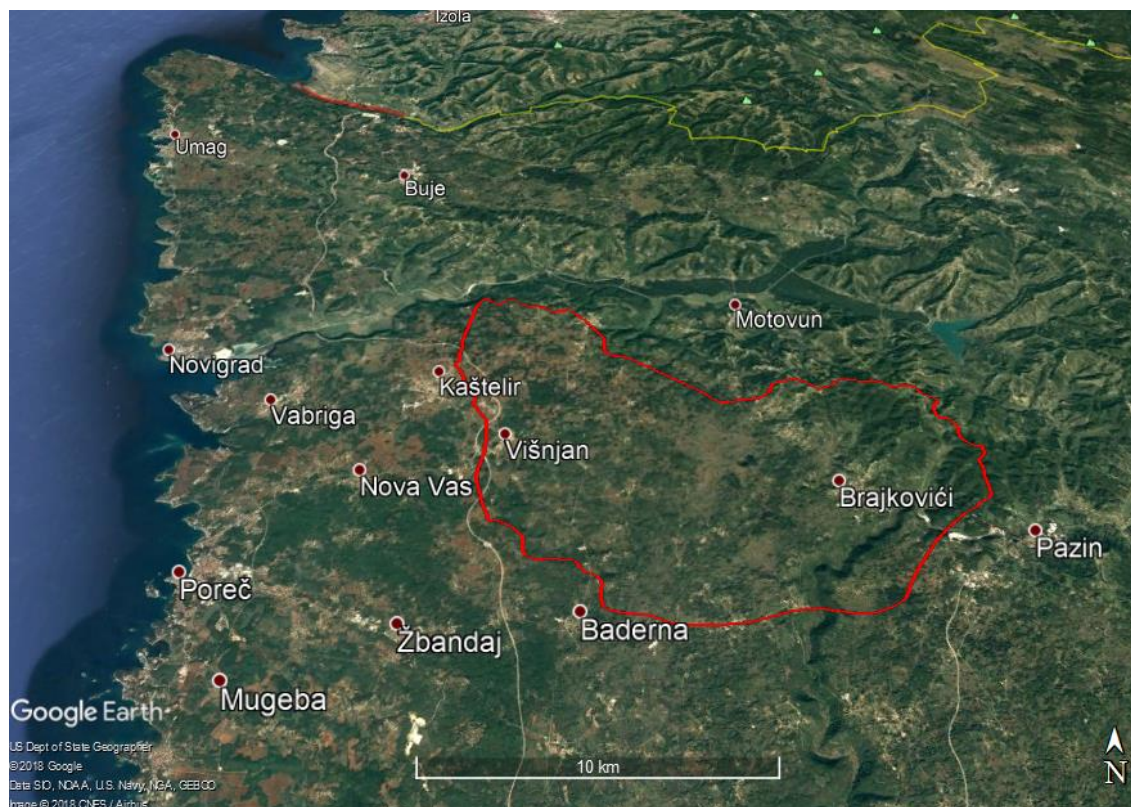
Svrha izdvajanja zona različitih okršenosti je utvrđivanje hidrološke uloge vrtača. Područja veće okršenosti imaju mnogo veću propusnost, a time i povećani intenzitet napajanja vodonosnika.

Izdvojene zone okršenosti, određene površine vrtača i orijentacije poslužile su kao ulazni podaci u izračunu ukupnih koeficijenata efektivne infiltracije sliva.

2. OPIS ISTRAŽIVANOG PODRUČJA

2.1. Geografski položaj

Sliv izvora Gradole obuhvaća područje veličine 159,6 km² južno od rijeke Mirne. Sam izvor Gradole nalazi se u porječju rijeke Mirne (Slika 2-1.), a u njegovoj neposrednoj blizini nalaze se još dva povremena izvora, uzvodno izvor Male Gradole i nizvodno izvor Očjak.

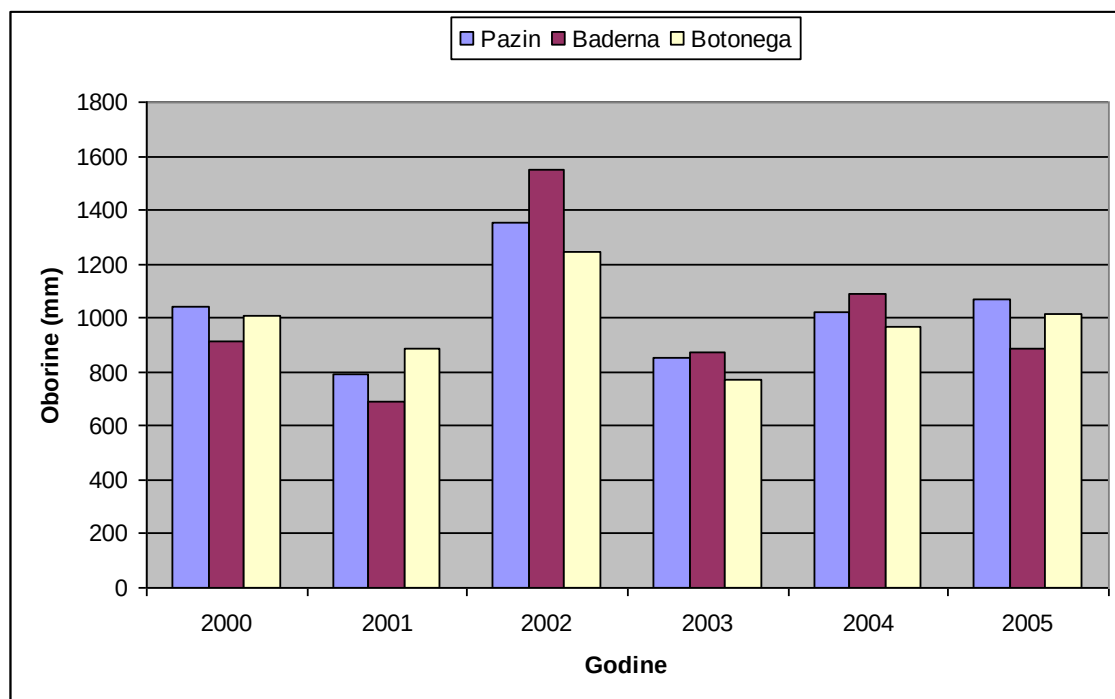


Slika 2-1. Lokacija sliva izvora Gradole prikazana na satelitskoj snimci (izvor: Google Earth).

U Istri prevladava umjereno topla i vlažna klima na koju podjednako utječu kontinent i more. Sa zapada i sjeverozapada osjeća se utjecaj Atlantika, koji je izvor topline i vlage. Sredozemno i Jadransko more ublažavaju utjecaje suhe i vruće sjeverne Afrike. Zračna masa s juga u Istri uzrokuje blage i vlažne zime, dok su ljeta vruća i sparna. Zimi preko Alpa i Dinarida iznad kontinentalnih dijelova Europe dotječe hladan i suh zrak (bura). Na temperaturu u Istri utječu kopno, more i nadmorska visina. Najniži obalni dio, do 150 m n.m., ima prosječnu siječanjску temperaturu od 4°C, a srpanjsku od 22 do 24°C. Utjecaj mora po dolinama rijeka seže duboko u unutrašnjost Istre. S porastom nadmorske visine prosječne siječanjске temperature snižavaju se na 2 do 4°C, a srpanjske na 20 do 22°C.

Prostorni raspored oborina u Istri pod neposrednim je utjecajem reljefa. Zračne mase koje dolaze s jugozapada sudaraju se s reljefnom preprekom između Slavnika i Učke. Brdoviti su dijelovi na sjeveroistoku najkišovitiji, godišnje imaju više od 1500 mm oborina, a Učka i više od 2000 mm. Najmanje kiše padne na zapadnoj obali i jugu. Duž obale od Valture do Novigrada padne od 800 do 900 mm, a na obali sjeverozapadne Istre od 900 do 1100 mm kiše (<http://www.istramet.hr/klima-u-istri/>).

Na Slici 2-2. prikazane su godišnje količine oborine sa tri najbliže kišomjerne stanice području sliva izvora Gradole, Pazin, Baderna i Botonega za vremensko razdoblje od 2000. do 2005. godine.



Slika 2-2. Godišnje količine oborina na kišomjernim stanicama Pazin, Baderna i Botonega (Parlov, 2010).

2.2. Izvor Gradole

Izvor se nalazi na lijevoj obali rijeke Mirne, oko 9,5 km uzvodno od njenoga ušća. Voda izvire iz krške kaverne ispod vapnenačke hridine kredne starosti. U prirodnom stanju izvor je imao oblik jezerca eliptičnoga oblika 8 x 16 m, a voda je izbijala iz kaverne na dnu bazena (Božićević, 1985). Preljevne vode se kanalima odводе prema rijeci Mirni.

Gulić (1973) zapaža kako kod visokih vodostaja i velike izdašnosti izvora sniženje vodostaja na izvoru praktički nije imalo utjecaja na izdašnost izvora. Navodi da se podizanjem praga preljeva usporava pražnjenje podzemne retencije i time povećava minimalna izdašnost izvora. Trasiranjima ponora Čiže traser se i kod niskih i kod visokih vodostaja pojavio jedino na izvoru Gradole. Takvi rezultati ukazuju na mogućnost regulacije vodnih količina preljevom. Točnih podataka o tome nema, a u prilog tome ne idu ni navodi kako su pri promjenama kote preljeva na izvoru Gradole uočene promjene na izvoru Očjak.

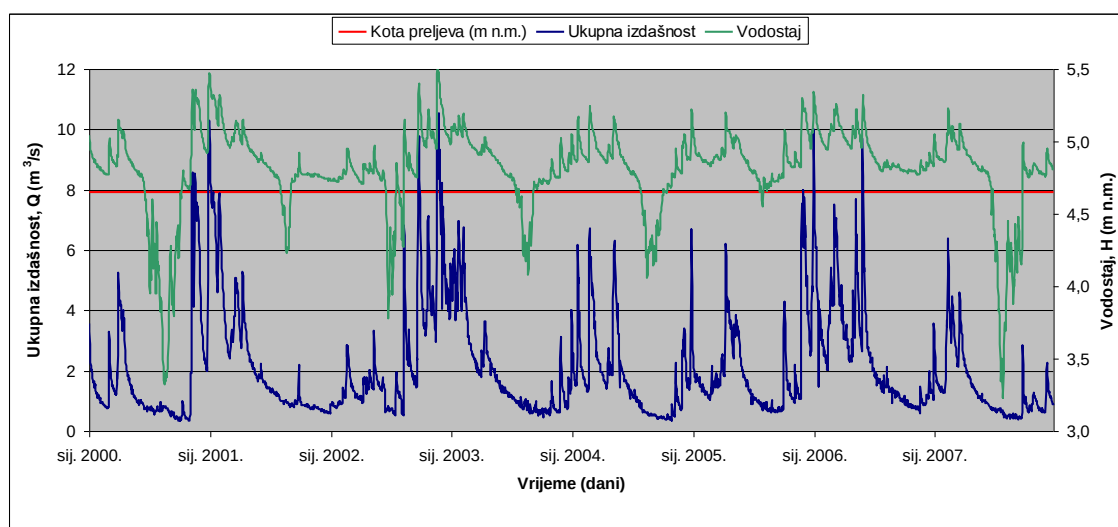
Granice i površinu sliva izvora Gradole odredili su Magdalenić i dr. (1993, 1995) na temelju geoloških podataka, podataka o tektonici, morfologiji, fotogeološkoj interpretaciji terena, hidrogeološkim značajkama stijena, krškim morfološkim pojavama i prema podacima trasiranja podzemnih voda. Oni su odredili granice sliva površine oko 104 km², a naknadnom kontrolom pomoću otjecajnog koeficijenta utvrdili su površinu od oko 113 km². Pri određivanju slivnog područja, zaključilo se da je glavna drenažna zona koja napaja izvor povezana s vodama koje dolaze iz ponora Čiže. Naknadnim istraživanjima utvrđeno je kako u istjecanju na izvoru Gradole sudjeluju znatno veće površine napajanja, odnosno znatno širi regionalni tokovi (Vazdar & Urumović, 1995). Prilikom određivanja zaštitnih zona (Bačani i dr., 2003) površina sliva izvora Gradole povećana je na $A = 159,6 \text{ km}^2$. Osim ponora Čiže dokazana je i veza s ponorima u Tinjanskoj dragi. Na tim ponorima vršena su trasiranja podzemnih voda u nekoliko navrata (Vlahović, 1999) te je dokazana veza s izvorom Gradole, a za vrijeme velikih voda dokazana je veza i s izvorima u dolini rijeke Raše i priobalnim izvorima.

Izdašnost izvora prvi je puta praćena u razdoblju rujan – studeni 1913. godine, kada su provedena hidrološka istraživanja u okviru studije vodoopskrbe. Ocijenjena minimalna izdašnost u tom razdoblju iznosila je 520 l/s. Izvor tada nije uključen u vodoopskrbu, već je prednost dana izvoru Sv. Ivan u Buzetu. Sredinom pedesetih godina planirano je navodnjavanje područja Donje Mirne vodom izvora Gradole. Republički hidrometeorološki

zavod (RHMZ) je 12.9.1956. na izvoru Gradole uspostavio vodokazna motrenja s kotom preljeva na 3,52 m n.m. Posljednji hidrotehnički zahvat izveden je 1996. godine s kotom preljeva 4,65 m n.m. Minimalni zabilježeni vodostaj iznosi $H_{\min} = -150$ cm (24.8.1993.), a najviši $H_{\max} = 155$ cm (23.10.1993.).

Prosječna godišnja vrijednost srednjih dnevnih protoka za razdoblje od 1989. do 2007. godine iznosi $2,17 \text{ m}^3/\text{s}$. Na razini dnevnih protoka, vrijednosti srednjih protoka kretale su se u rasponu između $0,264 \text{ m}^3/\text{s}$ (siječanj 1989.) i $18,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (listopad 1993.).

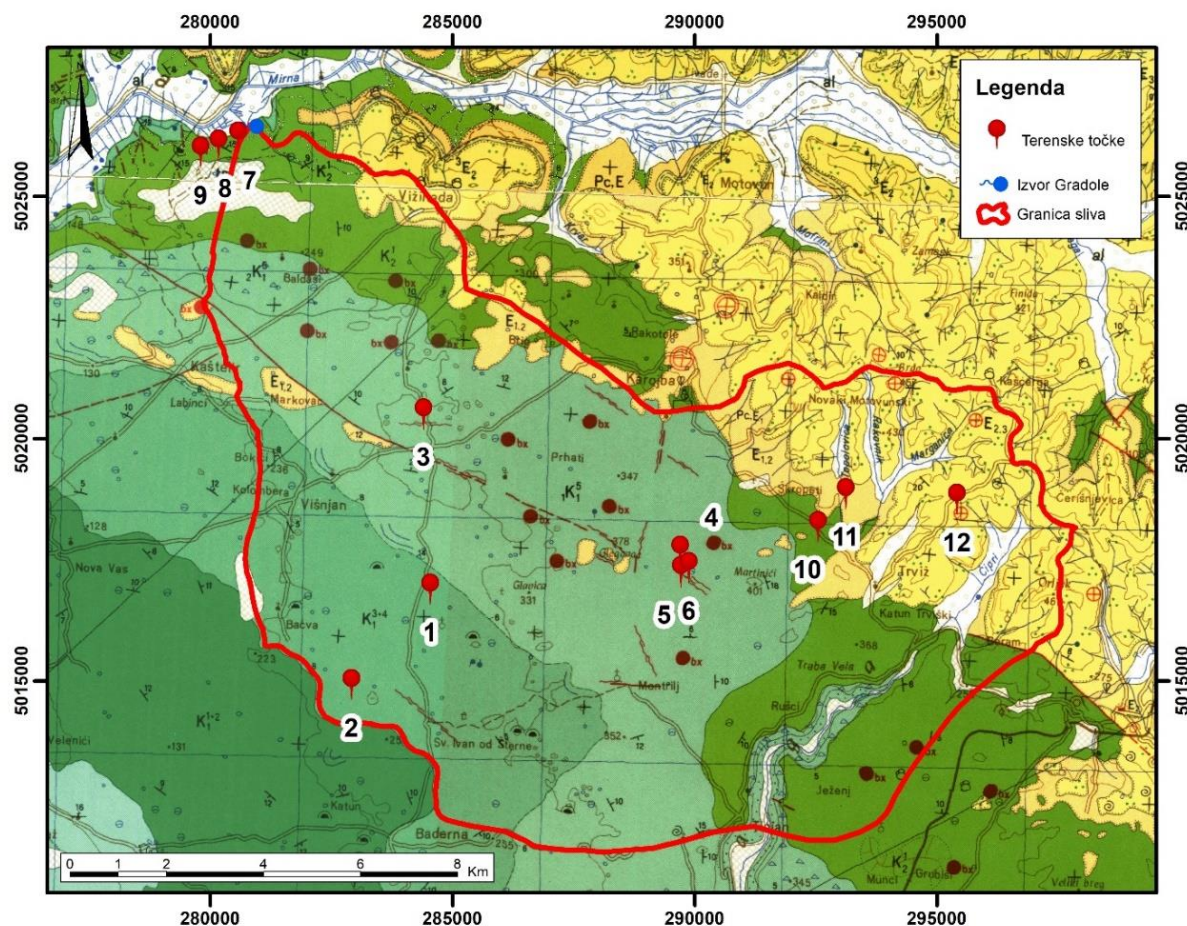
Općenito se može reći da maksimalna izdašnost izvora Gradole nastupa zimi i u proljeće, a minimalna izdašnost karakteristična je za jesen. Odnos minimalnih i maksimalnih izdašnosti obično se kreće oko 1:10 do 1:20, ali povremeno i višestruko premaši zadnju vrijednost, kako je prikazano na slici 2-3. Po svojoj izdašnosti u sušnom razdoblju to je najveći izvor na području cijeloga Istarskog poluotoka, jer pri minimalnim vodostajima gotovo 50 posto svih voda istječe na jednom mjestu, odnosno na izvoru Gradole (Parlov, 2010).



Slika 2-3. Nivogram srednjih dnevnih vodostaja i hidrogram srednjih dnevnih protoka izvora Gradole za razdoblje 1. 1. 2000. - 31. 12. 2007. godine (Parlov, 2010).

2.3. Geološka građa

Sliv izvora Gradole nalazi se na području izgrađenom od karbonatnih naslaga kredne i paleogenske starosti, paleogenskog fliša i vapnenačkih breča te kvartarnih naslaga (Slika 2-4.).



Slika 2-4. Geološka građa sliva izvora Gradole prema OGK 1:100 000 listova Rovinj (prema Polšak & Šikić, 1973) i Trst (Geološki zavod Ljubljana i Institut za Geološka istraživanja Zagreb, 1951-1964) s prikazom lokacija terenskih točaka.

2.3.1. Stratigrafski pregled

DONJA KREDA

Prema Polšak i Šikić (1973) naslage barem – apta (K_1^{3+4}) čine vapnenci koji se u donjem dijelu sastoje od brašnog vapnenca, bijele, svijetlosive, a rjeđe sivosmeđe boje. Debljina slojeva uglavnom iznosi 0,5 – 1 m, a ponegdje i do 2 m. Unutar vapnenca javljaju se ulošci šećerastog dolomita i tankopločastog vapnenca.

U nastavku slijedi svijetlosivi, jedri, pločasti vapnenac, u kojemu su u znatnoj mjeri zastupljeni ulošci breča, kalcirudita i kalkarenita. Ovaj vapnenac autohtonog je porijekla i ima mikrozrnatu strukturu, a često gramuloznu ili pseudoolitičnu strukturu. Ove stijene sadrže više od 97 % CaCO_3 . U manjoj mjeri javljaju se detritične stijene alohtonog postanka: kalkareniti, kalciruditi i bioklastični vapnenci. Kalkareniti se sastoje od sitnih čestica vapnenaca (pseudoliti), fosila i oolita. Kalciruditi i bioklastični vapnenci taloženi su u veoma plitkim dijelovima sedimentacijskog bazena, nedaleko od matične stijene, zbog čega nije bilo duljeg transporta pa su fragmenti stijena i kršje fosila vrlo slabo zaobljeni i loše sortirani. Ukupna debljina barem – aptskih naslaga iznosi 400 do 550 metara (Slika 2-8.).

Ove naslage relativno su bogate mikrofosilima, a najviše je *miliolida*, *ostrakoda* i *faverina*. Određeni su slijedeći oblici: *Salpingoporella muhibergii*, *Salpingoporella dinarica*, *Munieria baconica*, *Cuneolina camposaurii*, *Orbitolina (Palboritolina) lenticularis*, *Nummoloculina heimi*, *Coscinoconus sp.*

Barem – aptske naslage makroskopski su veoma slične naslagama alba, tako da je granica na geološkoj karti aproksimativna, a određena je na temelju nalaza navedenih provodnih fosila. Albske naslage označene su pojavom vrste *Cuneolina pavonia parva* i *Nezzazata simplex*.

Točka 1 (284533,81; 5016903,27)

Izdanak uočen na padini vrtače. Građen od svijetlosivih, jedrih vapnenaca (Slika 2-5.). Jasno su vidljivi slojevi debljina od 10 do 30 cm. Izmjerena slojna ploha 265/10.



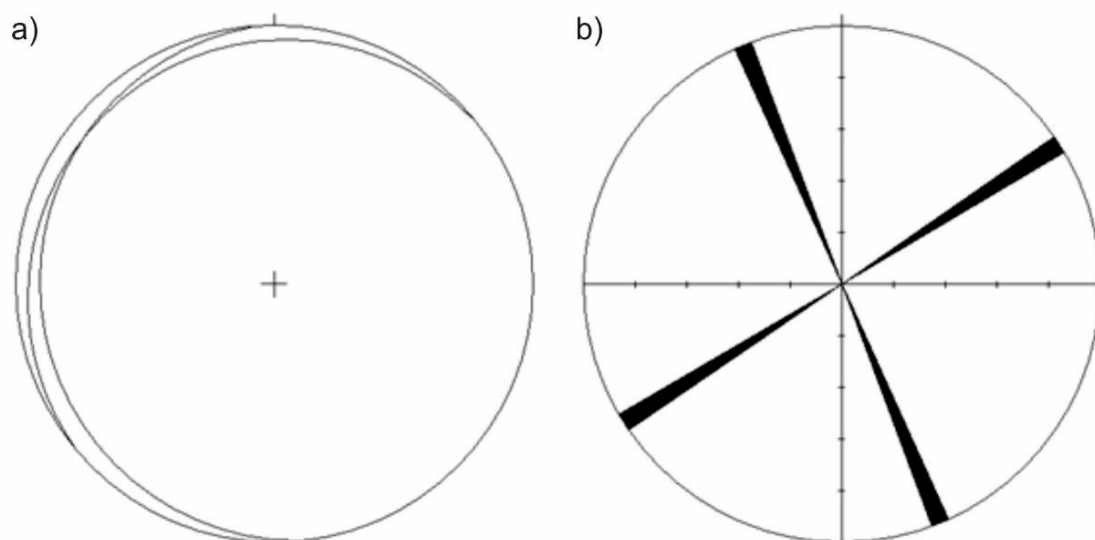
Slika 2-5. Izdanak vapnenca na točki 1.

Točka 2 (282902,16; 5014930,16)

Izdanak jedrog vapnenca sivosmeđe boje koji ima mikrozrnatu strukturu. Izdanak se nalazi na padini vrtače (Slika 2-6.). Debljina sloja veća je od 1 m, a izmjeren je položaj 320/08 (Slika 2-7.a). Izraženi su vertikalni setovi pukotina pružanja 160 – 340 i 60 – 240 (Slika 2-7.b).



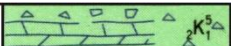
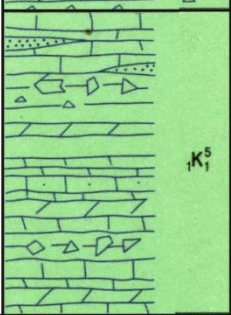
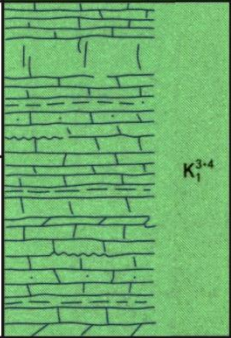
Slika 2-6. Izdanak vapnenca na točki 2.



Slika 2-7. Prikaz izmjerenih elemenata u barem – aptskim naslagama: a) stereografska projekcija slojnih ploha; b) rozeta dijagram setova pukotina.

Albske naslage (K_1^5) zauzimaju više od 40 % površine sliva izvora Gradole. Prema Polšak i Šikić (1973) po litološkom sastavu veoma su slične barem – aptskim naslagama. Izgrađene su od tankouslojenih vapnenaca debljine 20 – 40 cm, te od pločastih vapnenaca. Svijetlosive su do bijele boje, a rijetko tamnosive ili sivosmeđe boje. Struktura vapnenaca je mikroznata, ali često prekristalizirana u grumuloznu i pseudoolitičnu strukturu. Zastupljene su i detritične stijene, prevladava kalkarenit, a manje kalcruditi. Sve stijene su u kemijskom pogledu čisti vapnenci s preko 97 % CaCO_3 . Sporadično se javljaju i ulošci krupnih vapnenih breča, dolomita te proslojci lapora. Debljina naslaga alba iznosi 400 – 600 metara (Slika 2-8.).

Određeni su slijedeći mikrofosili: *Salpingoporella dinarica*, *Nezzazata simplex*, *Nummoloculina heimi*, *Cuneolina pavonia parva*, *Orbitolina sp.*, *Bacinella irregularis*. Od makrofosila, u pojedinim slojevima, česti su gastropodi (rod *Nerinea*), a javljaju se i fragmenti ljuštura školjkaša. Prisutnost vrsta *Nezzazata simplex* i *Cuneolina pavonia parva* ukazuju na pripadnost ovih naslaga albu.

Alb		70	Facijes pločastih vapnenaca, zrnastih dolomita i dolomitno-vapnene breče. Oplićavanje basena
		400	Tanko-uslojeni i pločasti vapnenac s ulošcima breča, dolomita i debelo uslojenog vapnenca. Gore proslojci glinca i leće kremenog pijeska. Neritski facijes s oplićavanjima i emerzijama. Nezzazata simplex, Nummoloculina heimi, Nerinea fleuriau.
Apt		450	Pretežno tanko-uslojeni i pločasti, manjim dijelom bankoviti vapnenac. Ulošci breča i dolomita, zatim glinca. Neritski facijes s povremenim oplićavanjima i emerzijama. Salpingoporella dinarica, Munieria baconica, Orbitolina (Palorbitolina) lenticularis, Requienia ammonia
Barreme			

Slika 2-8. Prikaz dijela geološkog stupa s OGK 1:100 000 lista Rovinj (prema Polšak & Šikić, 1973). Na slici je prikazan razvoj donjokrednih naslaga s osnovnim strukturno-teksturnim obilježjima te s približnim debljinama.

Točka 3 (284390,92; 5020520,32)

Vrtača dekametarskih dimenzija (Slika 2-9.). Uočen mali izdanak jedrog vapnenca svijetlosive boje i mikroznaste strukture.



Slika 2-9. Vrtača na točki 3.

Točka 4 (289690,77; 5017681,25)

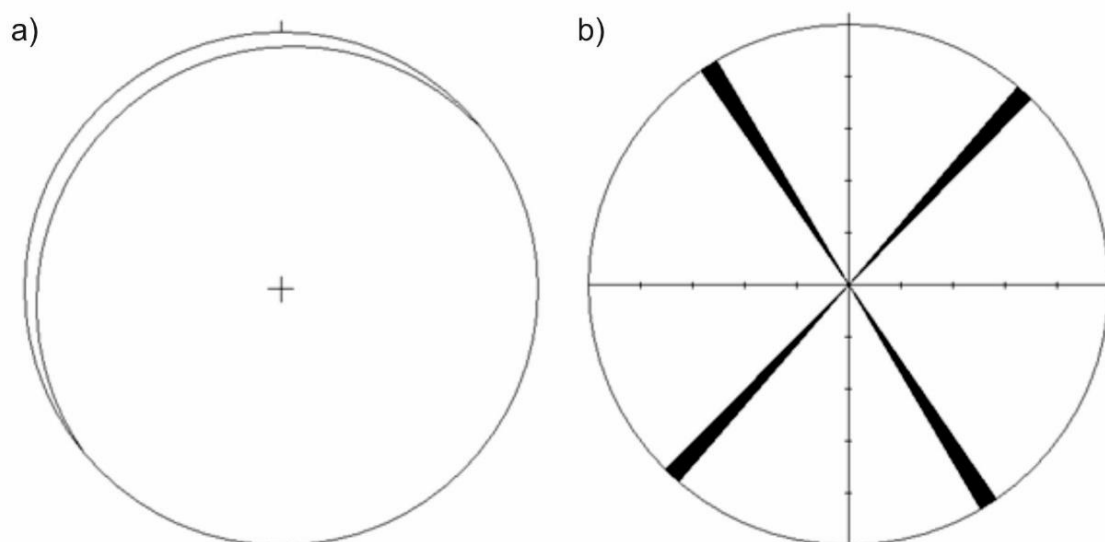
Na slici 2-10. prikazana je najveća i najdublja vrtača u Istri, vrtača Sopajac ili Veli Dol. Na obroncima vrtače izdanjuju svijetlosivi vapnenci (Slika 2-11.). Izmjeren je položaj sloja 320/08 (Slika 2-12.a), a debljina slojeva iznosi oko 50 cm. Izmjereni su i mogući vertikalni setovi pukotina pružanja 45 – 225 i 150 – 330 (Slika 2-12.b).



Slika 2-10. Vrtača Sopajac na točki 4.



Slika 2-11. Izdanak vapnenca na točki 4.



Slika 2-12. Prikaz izmjerenih elemenata u albskim naslagama: a) stereografska projekcija slojnih ploha; b) rozeta dijagram setova pukotina.

Točka 5 (289704,95; 5017266,07)

Slika 2-13. prikazuje vrtaču dekametarskih dimenzija.



Slika 2-13. Vrtača na točki 5.

Točka 6 (289866,87; 5017347,03)

Prikaz vrtače razvijene u albskim naslagama, promjera oko 100 metara (Slika 2-14.).

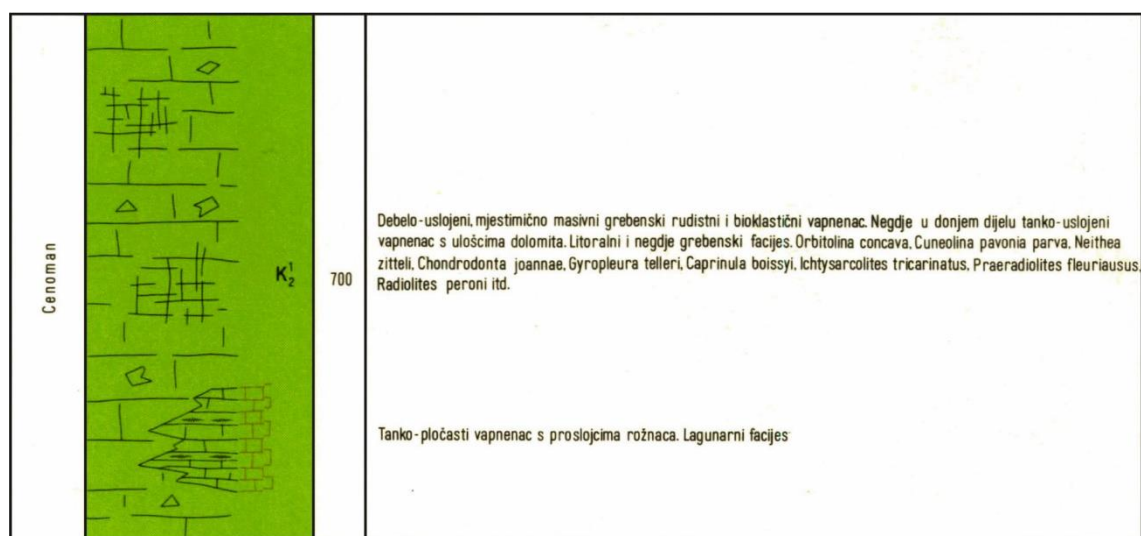


Slika 2-14. Vrtača na točki 6.

GORNJA KREDA

Prema Polšak i Šikić (1973) cenomanske naslage (K_2^1) na području sliva predstavljene su tankouslojenim, jedrim vapnencem svijetlosive, tamnosive ili sivosmeđe boje. U području sliva ovi vapnenci deblji su nego u ostatku Istre gdje debljine iznose 1 – 2 m. Mjestimično sadrži tanke uloške dolomita. Na kontaktu s transgresivnim paleogenim naslagama vapnenci su često ružičaste boje, zbog infiltriranja limonitne i boksitne supstance za vrijeme kopnene faze u kasnom senonu.

Struktura vapnenca najčešće je mikroznata ili grumulozna, a vrlo rijetko pseudoolitična. Bioklastični vapnenci, kalkareniti i kalciruditi su rijetko zastupljeni. Kršje je u ovim stijenama različitih dimenzija, a nije rijetkost da su ulomci u promjeru veći od 1 cm. Ove stijene pripadaju čistim vapnencima sa 97 % CaCO_3 . Debljina cenomanskih naslaga iznosi približno 600 – 800 metara (Slika 2-15.).



Slika 2-15. Prikaz dijela geološkog stupa s OGK 1:100 000 lista Rovinj (prema Polšak & Šikić, 1973). Na slici je prikazan razvoj gornjokrednih naslaga s osnovnim strukturno-teksturnim obilježjima te s približnim debljinama.

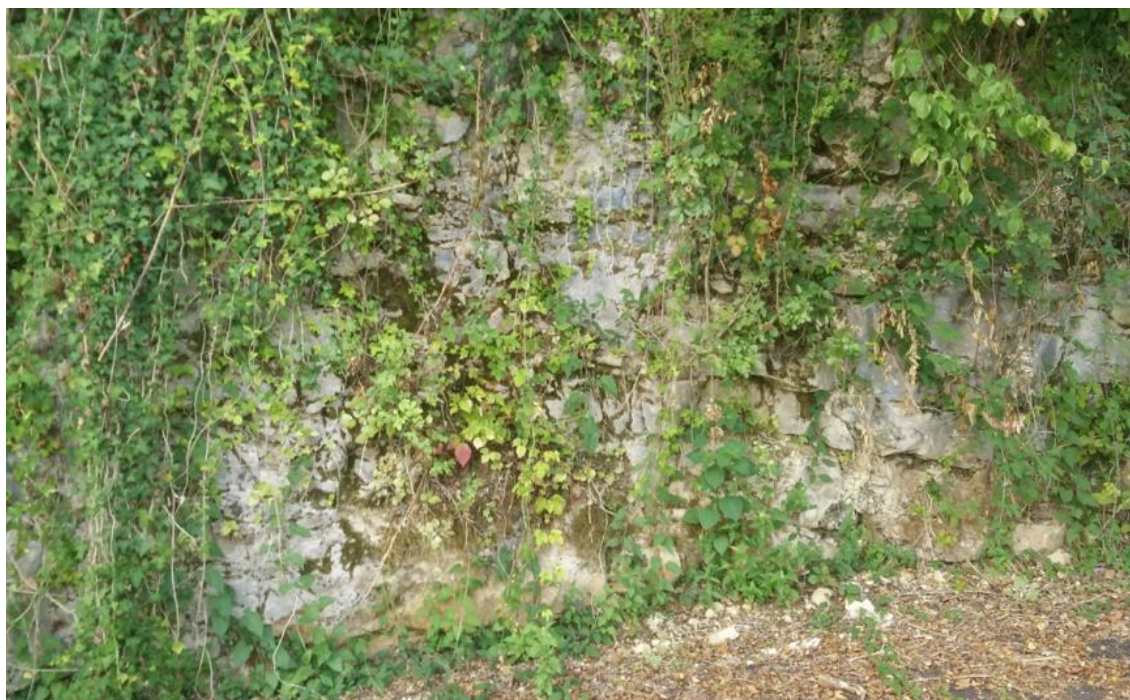
Značajni mikrofosili su rijetki u opisanim naslagama, ali su bogate provodnim makrofosilima. Određeni su slijedeći mikrofosili: *Thaumatoporella parvovesiculifera*, *Orbitolina concava*, *Orbitolina trochus*, *Rotalipora cf. appeninica*, *Nezzazata simplex*, *Cuneolina pavonia parva*, *Nummuloculina heimi*, *Flabellina sp.*, *Aeolisaccus kotori*, *Miliolidae*, *Ostracoda*. Od makrofosila najčešći su rudisti. Određeni su slijedeći oblici: *Radiolites peroni*, *Praeradiolites fleuriausius*, *Sauvagesia nicaisei villei*, *Sauvagesia*

charpei, *Gyropleura telleri*, *Ichthyosarcolithes tricarinatus*, *Sphaerucaprina forojulensis*, *Chondrodonta joannae*, *Chondrodonta munsoni*, *Neithea zitteli*, *Nerinea sp.*

Na pripadnost cenomanskom katu ukazuju osobito specifične cenomanske vrste: *Praeradiolites fleuriausius* i *Ichthyosarcolithes tricarinatus*. Kroz cijeli slijed naslaga protežu se rod *Chondrodonta*, a njihovo izostajanje označava i završetak slijeda.

Točka 7 (280566,22; 5026229,73)

Ova točka nalazi se na prilaznoj cesti izvora Gradole, a od samoga izvora udaljena je oko 300 metara. Na ovom zasjeku izdanjuju slabo trošeni vapnenci sive boje, koji imaju grumuloznu strukturu (Slika 2-16.). Slojevi su gotovo horizontalni debljine 30 – 100 cm. Izmjerena je slojna ploha 340/10 (Slika 2-20.).



Slika 2-16. Izdanak na točki 7.

Točka 8 (280156,65; 5026062,51)

Ova točka udaljena je oko 400 metara od prethodne. Tu se nalaze tanko slojeviti vapnenci sive boje (Slika 2-17.). Položaj slojeva iznosi 350/15 (Slika 2-20.), a debljina su od 1 do 15 cm.



Slika 2-17. Izdanak na točki 8.

Točka 9 (279792,58; 5025920,69)

Ova točka je također udaljena 400 m od prethodne. Ovdje izdanjuju jedri vapnenci bijele boje (Slika 2-18.). Na izdanku se ne razaznaje slojevitost.



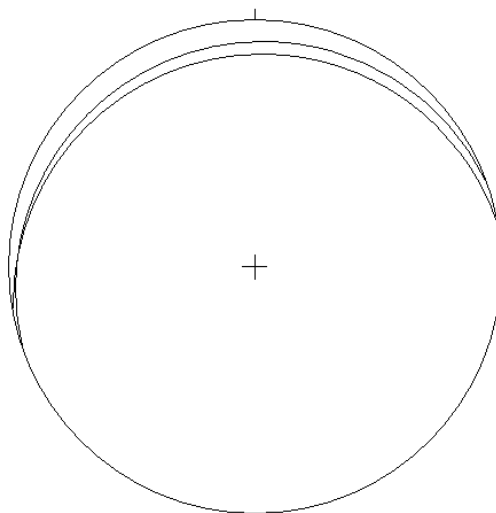
Slika 2-18. Izdanak na točki 9.

Točka 10 (292541,44; 5018194,34)

Slika 2-19. prikazuje izdanak tankouslojenih vapnenaca sivoružičaste boje. Slojevi generalno padaju prema sjeveru pod kutom do 10° , a debljina su do 30 cm. Stijenska masa je jako izlomljena i deformirana.



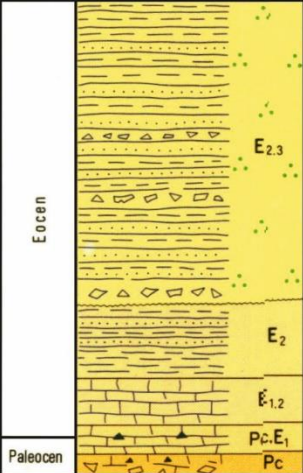
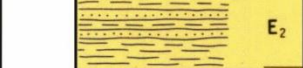
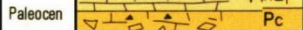
Slika 2-19. Izdanak na točki 10.



Slika 2-20. Stereografska projekcija slojnih ploha izmjenjenih u cenomanskim naslagama.

PALEOGEN

Prema Polšak i Šikić (1973) foraminiferski vapnenci taloženi su na liburnijske naslage (nisu prisutne u slivu), a dolaze zastupljeni s tri do četiri litostratigrafska varijeteta (Slika 2-22.). To su miliolidni, alveolinski i numulitni vapnenci te diskociklinski (koji se mogu izdvojiti kao najviši dio numulitnih vapnenaca).

Eocen		400	Lapori i pješčenjaci, vapnene breče, konglomerati i vapnenci. Neritski i litoralni facijes. Nummulites gizehensis. N. atacicus, N. perforatus, N. millecaput
		100	Lapori i manjim dijelom pješčenjaci. Batijalni facijes. U bazi laporoviti vapnenci i vapneni lapori. Litoralni facijes. Harpactocarcinus
		60	Numulitni vapnenac (Nummulites perforatus, N. millecaput, N. gizehensis). Alveolinski vapnenac (Alveolina ovoides, A. elongata, A. melo). Miliolidni vapnenac (Miliolidae, Coskinolina sp.) Neritski facijes pretežno litoralnog područja
		30 8-20	Bituminozni vapnenac s tragovima ugljena, breče i boksit. Miješani marinski i brakični facijes Bituminozni vapnenac s ugljenom i bazalna breča
Paleocen			

Slika 2-21. Prikaz dijela geološkog stupa s OGK 1:100 000 lista Rovinj (prema Polšak & Šikić, 1973). Na slici je prikazan razvoj paleogenskih naslaga s osnovnim strukturno-teksturnim obilježjima te s približnim debljinama.

Miliolidni vapnenac (Pc,E₁) nalazi se u bazi foraminiferskog vapnenca. Sastoji se od gustih, svijetlosmeđih ili sivkastih vapnenaca. Dobro su uslojeni i pretežito tankoslojeviti, debljina do 20 metara. Od fosila zastupljeni su rodovi *Coskinolina*, *Lituonella*, *Orbitolites* i druge foraminifere.

Miliolidni vapnenci postepeno prelaze u alveolinske vapnenice (E_{1,2}). Oni su uglavnom smeđasti, ali znaju biti i bijeli i sivkasti. Loše su uslojeni, a nekada gromadasti. Debljina im ne prelazi 30 m. Trošenjem se raspadaju pločasto, crijepoliko i u kršje. Pripadaju biokalkarenitima sa oko 99,90 % CaCO₃. Debljina im ne prelazi 30 metara.

Određene su slijedeće alveoline: *Alveolina melo*, *Alveolina elongata*, *Alveolina ovoidea*, *Alveolina boschi*, *Alveolina bacillum*, *Alveolina gigas*. Osim alveolina nalaze se i numuliti te školjkaši, puževi i ježinci.

Numulitni vapnenci (E_{1,2}) postupno se nastavljaju na alveolinske te se prostiru na istim područjima. Pretežno su smeđi, rjeđe žučkasti i sivi, a u gornjem dijelu brečasti. Ove naslage su homogenije i kompaktnije od alveolinskih vapnenaca. Slabo su ili nisu uslojeni.

Pripadaju kalkarenitima sa preko 99 % CaCO_3 . Sadržaj numulita se povećava, dok ne ispuni cijelu stijenu. Povećava se i količina asilina, pa se nazivaju i asilinski vapnenaci. Poznati su: *Nummulites perforatus*, *Nummulites complanatus*, *Nummulites gizehensis*, *Nummulites ramondi*, *Nummulites striatus*, *Nummulites laevigatus*.

Točka 11 (293110,03; 5018868,50)

Na ovoj točki nalazi se gromadasti izdanak vapnenca (Slika 2-21.). Vapnenac je tamno siv i sadrži alveoline.



Slika 2-22. Izdanak na točki 11.

Flišne naslage ($E_{2,3}$), prema Polšak i Šikić (1973) razvijene su u cijelom području Pazinskog paleogenskog bazena. U ovim naslagama izmjenjuju se lapori i pješčenjaci, a u njima su u znatnoj mjeri uložene breče (vapnenačke i foraminiferske), konglomerati i slojevi vapnenaca. U bazi naslaga nalaze se vapneno-pješčani lapori na koje slijede sivi vapneni lapori s vapnenačkim foraminiferama. Debljina flišne serije iznosi 400 do 600 metara (Slika 2-22.).

Flišne naslage veoma su bogate pretaloženim fosilima. Mikrofaunu sačinjavaju planktonske foraminifere od kojih su najznačajnije: *Turborotalia centralis*, *Globigerinothera barri*, *Globorotalia spinulosa*, *Globigeropsis indeks*, *Truncorotaloides rohri*, *Hantkenina alabamensis*. U znatno manjem broju prisutne su i aglutinirane foraminifere poput vrsta roda *Clavulinoides*, *Dorothia* i *Gaudrina*. Od makroforaminifera najznačajnije su: *Nummulites millicaput*, *Nummulites perforatus* i *Nummulites gizehensis*. Makrofaunu predstavljaju gastropodi, školjkaši, ježinci, koralji, briozoe, krinoide i ribe.

Točka 12 (295402,06; 5018754,86)

Slika 2-23. prikazuje izdanak trošenih lapora i pješčenjaka. Naslućuju se slojevi, ali zbog male veličine izdanka nije ih moguće izmjeriti. Izdanak na slici 2-23. nalazi se u zasjeku zemljanog puta iz kojeg izdanjuje tamni vapnenac prikazan na slici 2-24. Na izdanku trošnog vapnenca također nije bilo moguće izmjeriti strukturne elemente.



Slika 2-23. Izdanak pješčenjaka i lapora na točki 12.



Slika 2-24. Izdanak vapnenca na točki 12.

KVARTAR

Kvartarne naslage (q) pokrivaju 2,9 % površine sliva izvora Gradole. Sastoje se od zemlje crvenice (terra rossa) i aluvija.

Terra rossa (ts), prema Polšak i Šikić (1973) uglavnom se prostire u obliku tankog pokrivača (debljine 0,5 – 1 m) iz kojega često probijaju izdanci karbonatnih stijena. Pojedina područja pokrivaju naslage crvenice čija debljina dostiže i više od 20 metara. Naslage zemlje crvenice rijetko sadrže fosile.

Doline većih potoka ispunjene su *aluvijalnim nanosom* (al) koji se sastoji od gline i ilovače te u manjoj mjeri pijesaka i šljunaka. Glina i ilovača nastale su trošenjem flišnih naslaga (Polšak & Šikić, 1973).

2.3.2. Tektonika

Tektonska građa središnje Istre je relativno jednostavna. Sastoji se od samo dvije tektonske jedinice, koje se u pogledu geneze i strukture potpuno razlikuju. Prema Polšak i Šikić (1973) sastoji se od sljedećih strukturnih jedinica:

Zapadnoistarska jursko-kredna antiklinala nastala krajem krede tijekom laramijske orogenetske faze te predstavlja dio vanjskog jadranskog pojasa. Os antiklinale paralelna je pravcu SI-JZ te blago tone prema SI. Na kopnu je vidljiv samo JI dio antiklinale, dok se najveći dio nalazi JZ od Istre i potopljen je morem. U području sliva izvora Gradole nalazi se čeonni dio ove strukturne jedinice.

Karbonatne naslage koje izgrađuju ovu antiklinalu blago su i nepravilno sekundarno borane. Bore su dekametarskih dimenzija, a slojevi su pretežito nagnuti prema istoku. Rasjedi su prilično rijetki, a nastali su pod utjecajem radijalne tektonike. Uglavnom su vertikalni i subvertikalni, normalnog karaktera i male veličine skoka. Uz rasjede formirani su asocirani pukotinski sustavi, koji imaju važnu hidrogeološku ulogu.

Eocenski flišni bazen formiran je Istarsko – dalmatinskom orogenezom. Depresija u kojoj su taložene flišne naslage u širokom se pojasu pruža od Tršćanskog zaljeva preko Pazina do Labina. Dugačka i uska antiklinalna forma izgrađena od krednih naslaga dijeli depresiju na dva bazena: Tršćanski i Pazinski (Pleničar et al., 1965).

Naslage koje ispunjavaju bazen blago su borane, a slojevi su uglavnom blago nagnuti ili horizontalni. Izgrađene su od klastita, pješčenjaka i lapora – fliša. Cijela strukturna jedinica predstavlja prostranu sinklinalu. Izrazitije su poremećene samo naslage uz rubove bazena. Karbonatna osnova na kopnu se pojavljuje samo u dubokim dolinama rijeka i potoka.

2.4. Hidrogeološke značajke

Na području sliva izvora Gradole zastupljene su dvije osnovne grupe stijena različitih hidrogeoloških značajki: vodopropusne karbonatne stijene i vodonepropusne klastične stijene.

Vodopropusne karbonatne naslage karakterizira sekundarna poroznost, odnosno pukotinska i kavernoza poroznost koja omogućuje poniranje velikog dijela oborina i brze tokove podzemnih voda. Sekundarna poroznost obilježje je svih karbonatnih stijena, no s obzirom na razlike u litološkom razvitku mogu se pretpostaviti i određene hidrogeološke razlike (Parlov, 2010).

Najpropusnije naslage čine dobro slojeviti do gromadasti vapnenci donjokredne, gornjokredne i paleogenske starosti. Strukturni položaj i tektonske deformacije uvjetuju veliku propusnost, a u zonama koje su tektonski oštećene ostvaruju se koncentrirani tokovi podzemne vode. Slabije propusnosti su karbonatne naslage, donjokredne i gornjokredne starosti, u kojima se uz vapnence pojavljuju i dolomiti te tankopločasti vapnenci. Karbonatne naslage (donjokredne i gornjokredne starosti) u kojima se uz vapnence pojavljuju dolomiti i tankopločasti vapnenci osrednje su propusne.

Vodonepropusne klastične naslage na području sliva predstavljene su naslagama eocenskog fliša i kvartarnim naslagama.

Iako se naslage fliša prema svojim litološkim značajkama mogu smatrati nepropusnim, zbog vertikalnih i bočnih izmjena siltita, lapora, laporovitih vapnenaca, vapnenaca, breča i konglomerata, propusnost se unutar flišne formacije može znatno mijenjati. Bez obzira na heterogenost samih naslaga, flišne naslage generalno predstavljaju barijeru, kako u podzemlju tako i na površini terena. Osim što ove naslage utječu na površinsko otjecanje oborina i tokove podzemnih voda, na hidrogeološke odnose značajno utječe i snažna erozija koja uzrokuje zamućenja voda te taloženje materijala u dolinama rijeka i podzemnim šupljinama.

Od kvartarnih naslaga važniji hidrogeološki značaj imaju aluvijalne naslage u dolini rijeke Mirne. One se sastoje od praha i gline, a rijetko od pijesaka i nešto šljunaka, pa su praktički nepropusne. Osim aluvijalnih naslaga zastupljena je i crvenica, čija je propusnost međuzrnska.

3. MORFOMETRIJSKA I PROSTORNA ANALIZA VRTAČA

Morfometrija obuhvaća mjerenje i matematičku analizu Zemljine površine te oblika i dimenzija pojava koje se na njoj javljaju (Bates & Jackson, 1987). Pokazala se veoma korisnom u istraživanju krških oblika jer omogućuje objektivnu i kvantitativnu analizu.

Provedena morfometrijska istraživanja uglavnom su usmjerena na određivanje uvjeta koji utječu na postanak i razvoj vrtača. Pri tome se iznimna važnost pridaje litološkom sastavu stijenskog kompleksa i tektonskim obilježjima, ali i klimatsko-biološkim faktorima. Osim analizom morfometrijskih obilježja, važna se saznanja stječu ispitivanjem prostornog rasporeda vrtača. U većini se slučajeva pokušava dovesti u vezu prostorni položaj vrtača sa strukturnim elementima u podzemlju. Brojnim istraživanjima distribucije vrtača (Mihaljević, 1994; Florea, 2005) zaključeno je kako na intenzitet razvoja vrtača ponajviše utječu četiri čimbenika: litološki, strukturni, tektonski i klimatski.

Day (1983) istražuje potencijalnu vezu između morfometrijskih obilježja i starosti vrtača. Na području veličine 124,5 km² locira 1179, a istražuje 360 vrtača. Istraživano područje dijeli u 9 visinskih razreda po 30 metara. U odnosu na definirane razrede analizira morfometrijska obilježja, prostornu organizaciju (udaljenosti najbližih susjeda) i prostornu gustoću. U okviru morfometrijskih metoda analizira duljinu, širinu, promjer, dubinu, azimut dulje osi i odnose tih parametara.

Dakle, ukoliko se pretpostavi povezanost između prostornog položaja vrtača i strukturnih elemenata u podzemlju, može se pretpostaviti i hidrogeološka uloga pojedinih vrtača u napajanju vodonosnika. Analize morfometrijskih obilježja provedene su s ciljem otkrivanja mogućih različitosti u obilježjima pojedinih vrtača, uzroka tih različitosti i kakvu ulogu imaju u napajanju podzemlja. Prostornim analizama vrtača određene su zone različitih gustoća vrtača, na temelju kojih se mogu izdvojiti zone različite okršenosti tj. zone s različitom efektivnom infiltracijom.

U ovom radu, nakon vektorizacije podataka u računalnom programu ArcMap, prikupljeni podaci analizirani su u programima Microsoft Excel 2016 i GEOrient.

Za svaku su analizu u tekstu prikazani rezultati za cijelo slivno područje, a zatim su u tablicama prikazani rezultati grupirani prema visinskim razredima i prema pojedinom litološkom članu.

Visinski razredi određeni su s obzirom na najnižu i najvišu točku u slivu. Najniža točka sliva je sam izvor Gradole, koji se nalazi na 5,7 m n. m., a najviša točka je vrh Pilošćak koji se nalazi na 479,7 m n. m. Svaki visinski razred intervala je 50 m, što daje ukupno 7 visinskih razreda. Površina dijela sliva nižeg od 150 m n. m. zanemarivo je mala, stoga je radi preglednosti uključena u prvi visinski razred. U rezultatima nekih analiza nisu prikazani visinski razredi u kojima nema ulaznih podataka za tu analizu.

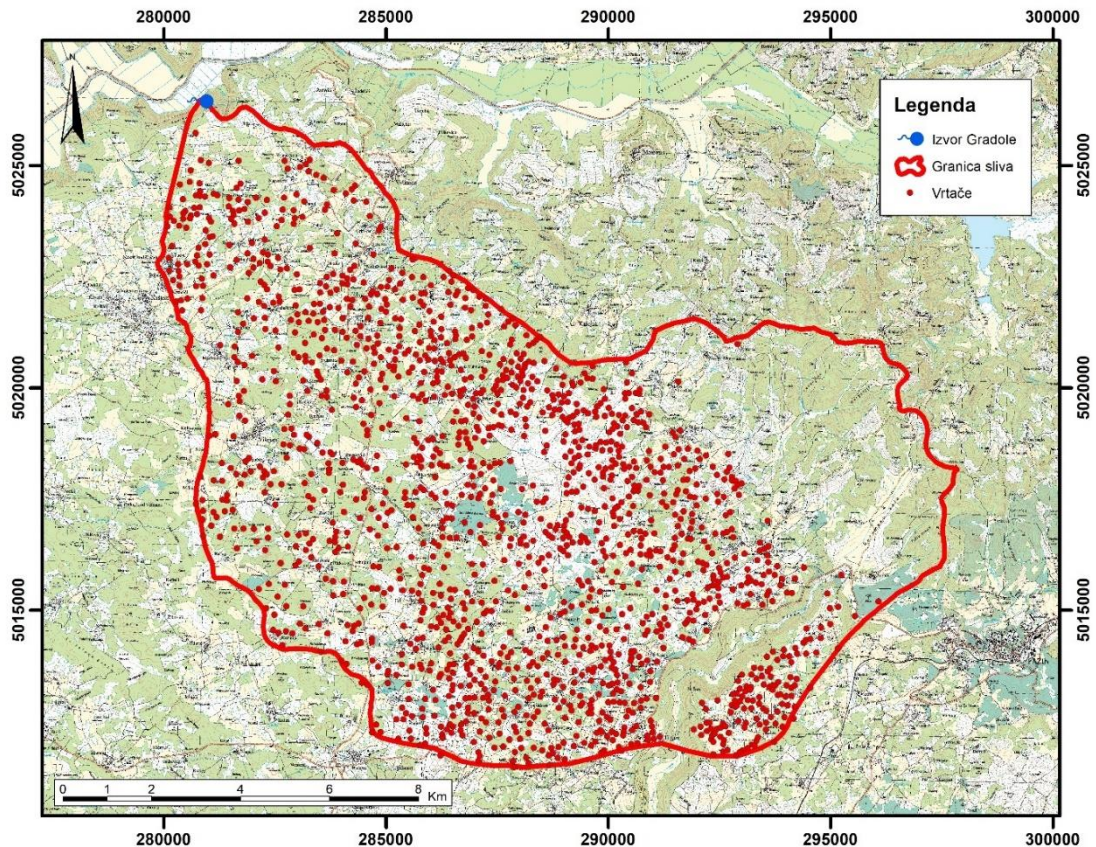
3.1. Digitalizacija podataka

Posljednjih desetljeća geoinformacijski Sustav (GIS) se uspješno koristi u kartiranju i otkrivanju površinskih oblika i pojava, stoga je danas neizostavan dio primijenjene geomorfologije.

U istraživanju vrtača potrebno je prikupiti podatke o položaju vrtača, ali i njihove morfometrijske parametre. Oni se uglavnom prikupljaju sa satelitskih snimki visoke rezolucije, digitalnih modela reljefa (DEM) ili digitalnih karti. Angel i dr., (2004) uspoređuju navedene metode prikupljanja podataka. Zaključuju da su razlike u broju vrtača izbrojanih „ručno“ i GIS metodama za njihovo područje statistički zanemarive te kako je u istraživanju velikih područja GIS neizostavan. Pri određivanju morfometrijskih parametara digitalnim modelima terena, poput SRTM-a ili ASTER-a, točnost ponajviše ovisi o rezoluciji modela, mjerilu i dimenzijama vrtača (Siart i dr., 2009). U svome radu Applegate (2013) uspoređuje kartiranje vrtača pomoću izohipsi digitalnih topografskih karata različitih mjerila. Definirao je tri faktora koji utječu na vidljivost vrtače na karti, to su: 1) mjerilo karte, 2) interval izohipsi, 3) nagib terena oko vrtače.

Vektorizacija prostornog položaja vrtača u sklopu provedenog istraživanja izvedena je u računalnom programu *ArcGIS Desktop* (verzija 10.5). Prilikom vektorizacije bilježena je točka koja predstavlja dno vrtače (Slika 3-1.). Podaci o položaju dna vrtača prikupljeni su s topografskih karata mjerila 1:25 000 i intervala izohipsi od 10 m. Baza podataka, za ovaj vektorski objekt (shapefile), sastoji se od identifikacijske oznake, nadmorske visine oboda

vrtače, nadmorske visine dna vrtače i dubine (Slike 3-2. i 3-3.). Svi objekti koji simboliziraju vrtače (1608 točaka) imaju podatak o nadmorskoj visini oboda vrtače, a podatak o nadmorskoj visini dna vrtače imaju one točke za koje je taj podatak upisan na kartu (1244 točaka).

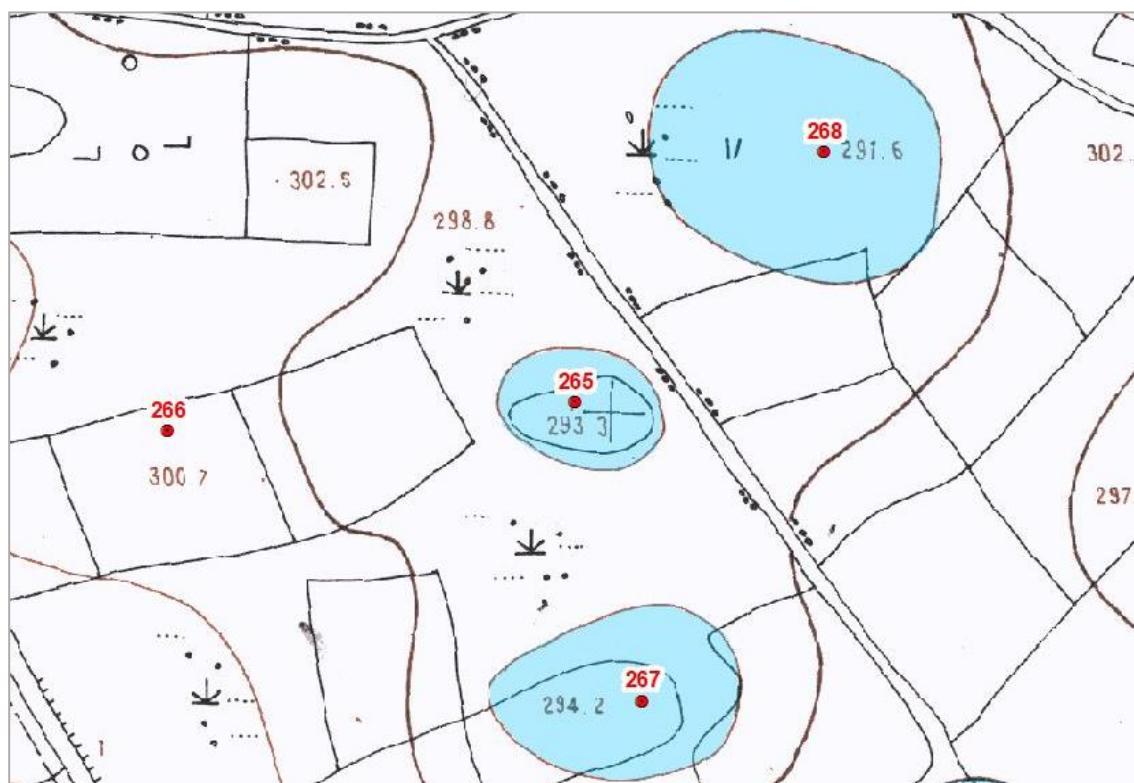


Slika 3-1. Karta dna vrtača u slivu izvora Gradole.

Plitke vrtače, za koje se iz izohipsi ne može odrediti oblik, često su na karti označene samo nadmorskom visinom dna. Kako bi se nadmorske visine vrtača mogle uspoređivati, za sve je vrtače određena nadmorska visina oboda. Kod plitkih vrtača, koje ne opisuje nijedna izohipsa, nadmorska visina oboda određena je na način da se nadmorska visina dna „zaokružila“ na sljedeći cijeli broj (ukoliko je nadmorska visina dna cijeli broj, visina ruba je pola metra veća). Dubina je određena kao razlika nadmorskih visina oboda i dna vrtače, sukladno tome podatak o dubini imaju one točke koje imaju i podatak o nadmorskoj visini dna vrtače.

OBJECTID *	SHAPE *	Obod	Dno	Dubina
265	Point	295	293.3	1.7
266	Point	301	<Null>	<Null>
267	Point	295	294.2	0.8
268	Point	295	291.6	3.4

Slika 3-2. Primjer atributne tablice za točkaste podatke.

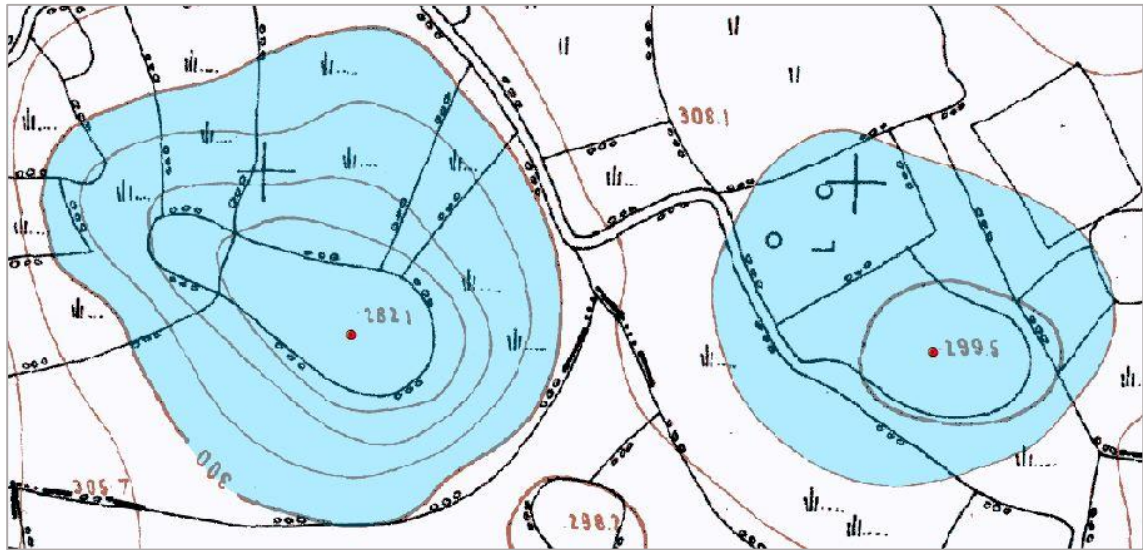


Slika 3-3. Prikaz oznaka dna vrtača i iscrtanih poligona, atributna obilježja ovih vrtača prikazana su na slici 3-2.

Za sve vrtače u slivu kojima je dubina veća od 0,5 m, iscrtani su poligoni. Poligoni su iscrtani i za 5 vrtača koje nemaju podatak o nadmorskoj visini dna, ali se iz izohipsi može zaključiti da su dublje od 0,5 m. Rubovi vrtača iscrtani su po hipsometrijski najvišoj, zatvorenoj izohipsi koja znatno ne odstupa od tipičnog, kružnog ili eliptičnog, oblika vrtače (Slika 3-4.). U većini slučajeva obod je iscrtan po izohipsi ucrtanoj na karti, ali se u nekim slučajevima, radi točnijeg poklapanja sa stvarnim vrtačama, obod iscrtao između dvije izohipse ucrtane na karti.

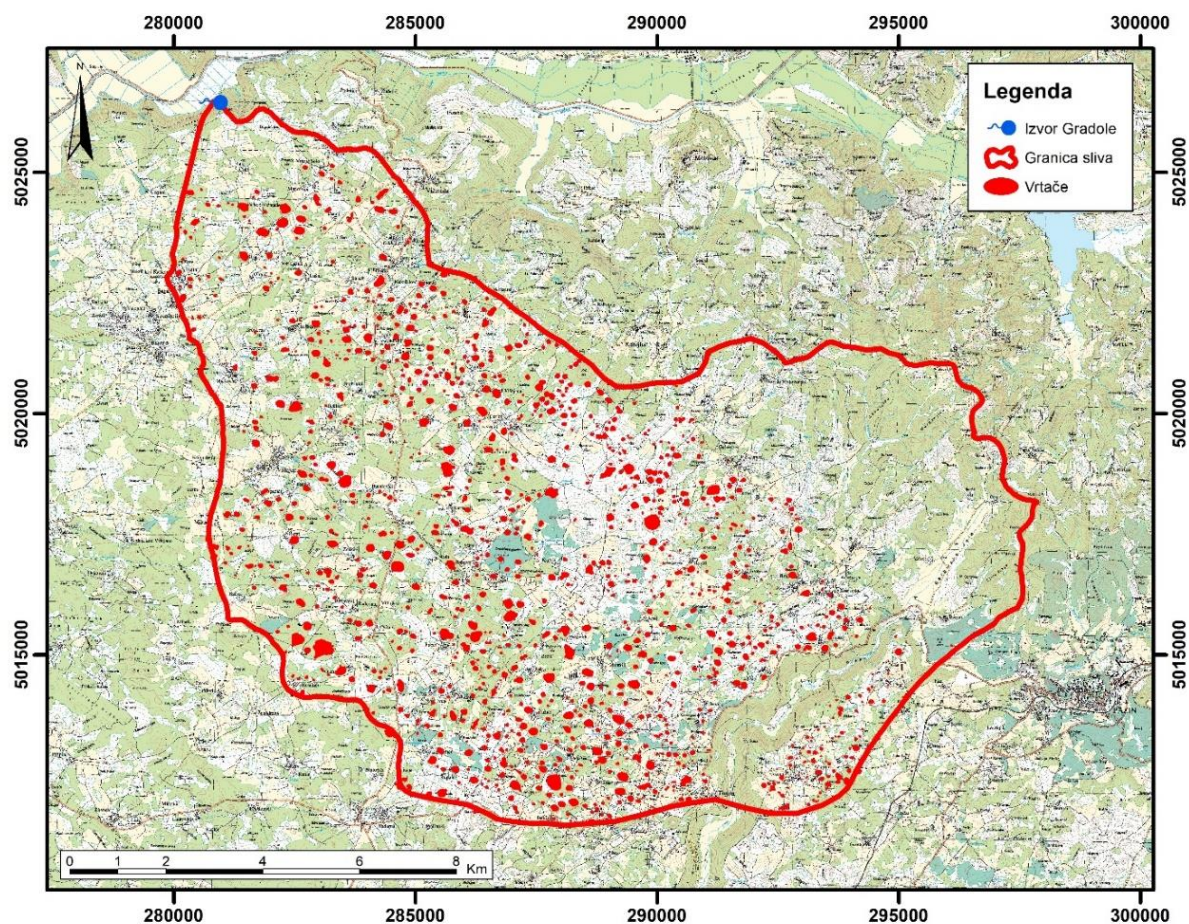
Prilikom ograničavanja površine vrtače korištena je Hrvatska osnovna karta (HOK) u mjerilu 1:5 000 i intervala izohipsi od 5 m (<http://geoportal.dgu.hr/wms?layers=HOK>). Prema izrazu koji je dao Applegate (2003), uz pretpostavku da su na karti prikazane samo vrtače

veće od 2 mm (na karti), može se izračunati kako su na karti mjerila 1:5 000 prikazane vrtače promjera većeg od 10 m.



Slika 3-4. Primjer iscrtanih poligona.

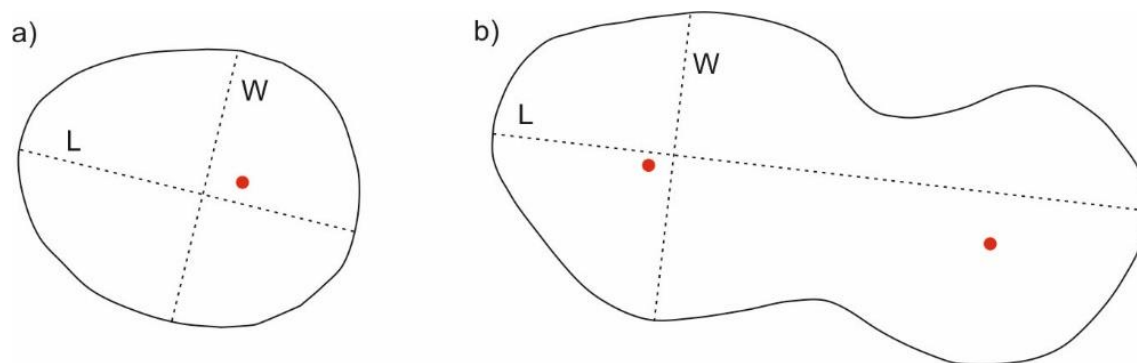
Ukupno je iscrtano 1117 poligona (Slika 3-5.). Prostornim preklapanjem poligona i točaka načinjena je baza podataka koja obuhvaća sva atributna obilježja preklapljenih podataka. Poligoni koji sadrže jedan točkasti podatak predstavljaju jednostavnu vrtanu, a ima ih 1071. Poligona koji predstavljaju sustav manjih vrtača zabilježeno je 46, od kojih 45 sadrže dva točkasta podatka, a samo jedan s tri točkasta podatka.



Slika 3-5. Karta poligona vrtača u slivu izvora Gradole.

3.2. Morfometrijska obilježja vrtača

Za sve vrtače, iscrtane poligonima (1117 vrtača), određena su morfometrijska obilježja. Bondesan i dr. (1992) detaljno su definirali morfometrijska obilježja vrtača. Osnovni parametri vrtače su duljina i širina. Dulja os je definirana kao dužina koja spaja dvije najudaljenije točke oboda pojedinog poligona. Kraća os predstavlja dužinu koja spaja dvije najudaljenije točke oboda poligona okomito na dulju os vrtače (Slika 3-6.).



Slika 3-6. Način određivanja duljine (L) i širine (W): a) jednostavne vrtače i b) sustava manjih vrtača. Crvenim točkama označena su dna vrtača.

U sklopu morfometrijske metode provedene su analize morfometrijskih obilježja vrtača, preciznije duljine, širine, promjera i dubine vrtača.

Aritmetička sredina duljina vrtača iznosi 117,29 m, a standardna devijacija iznosi 58,12 m. Aritmetička sredina svih širina analiziranih vrtača iznosi 87,9 m, a standardna devijacija iznosi 39,69 m. Promjer predstavlja aritmetičku sredinu duljine i širine vrtače (Day, 1983). Aritmetička sredina svih promjera iscrtanih poligona iznosi 102,59 m, a standardna devijacija iznosi 48,04 m. U tablicama 3-1. i 3-2. prikazana su morfometrijska obilježja vrtača grupiranih prema visinskim razredima, odnosno prema litološkim članovima.

Dubina vrtače je vertikalna udaljenost između dna i oboda vrtače (Bondesan i dr., 1992). Od ukupno 1608 vrtača, dubinu je bilo moguće odrediti za 1244 vrtače. Za preostalih 364 vrtače može se pretpostaviti da su dubina do 1 m, a zasigurno nisu dublje od 5 m. Dubina najdublje vrtače iznosi 76 m, a 10 % svih vrtača dublje je od 10 m. U tablici 3-3. prikazane su prosječne dubine vrtača i standardne devijacije prema visinskim razredima, a u tablici 3-4. prema litološkim članovima.

Tablica 3-1. Aritmetička sredina i standardna devijacija duljina, širina i promjera prema visinskim razredima.

Visinski razred [m n.m.]	Duljina [m]		Širina [m]		Promjer [m]	
	Aritmetička sredina [m]	Standardna devijacija [m]	Aritmetička sredina [m]	Standardna devijacija [m]	Aritmetička sredina [m]	Standardna devijacija [m]
<199,9	132,94	71,60	98,06	50,57	115,50	60,22
200 – 249,9	124,38	60,38	92,77	41,27	108,58	49,83
250 – 299,9	115,77	56,23	87,20	38,22	101,48	46,31
300 – 349,9	114,43	41,34	81,19	25,34	97,81	31,84
350 – 399,9	100,96	45,61	76,68	30,22	88,82	37,37

Tablica 3-2. Aritmetička sredina i standardna devijacija duljina, širina i promjera prema litološkim članovima.

Starost jedinice	Duljina [m]		Širina [m]		Promjer [m]	
	Aritmetička sredina [m]	Standardna devijacija [m]	Aritmetička sredina [m]	Standardna devijacija [m]	Aritmetička sredina [m]	Standardna devijacija [m]
K ₁ ³⁺⁴	122,98	60,79	92,68	43,43	107,83	51,36
K ₁ ⁵	118,82	58,12	89,31	40,28	104,06	48,34
K ₂ ¹	108,71	54,93	80,65	34,93	94,68	44,15
E _{1,2}	103,99	46,46	78,50	24,89	91,24	34,58
E _{2,3}	151,79	73,84	96,61	17,06	124,20	43,17

Tablica 3-3. Broj vratača, prosječna dubina i standardna devijacija prema visinskim razredima.

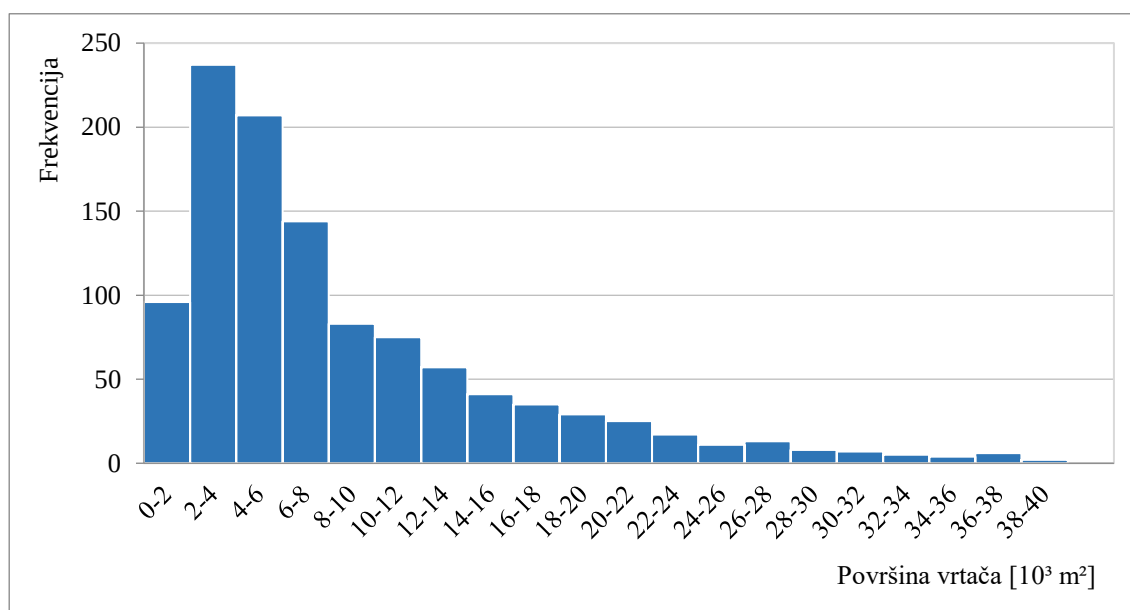
Visinski razred [m n.m.]	Broj vrtača	Prosječna dubina [m]	Standardna devijacija [m]
<199,9	27	6,04	4,40
200 – 249,9	177	6,47	5,38
250 – 299,9	393	5,53	4,69
300 – 349,9	737	5,17	5,16
350 – 399,9	273	5,11	3,94
400 – 449,9	1		
450 – 479,7			
	1608	5,40	4,87

Tablica 3-4. Broj vrtača, prosječna dubina i standardna devijacija prema litološkim članovima.

Starost jedinice	Broj vrtača	Prosječna dubina [m]	Standardna devijacija [m]
K ₁ ³⁺⁴	287	5,92	5,05
K ₁ ⁵	900	5,27	5,13
K ₂ ¹	352	5,22	4,01
Pc,E ₁	4		
E _{1,2}	55	3,60	2,54
E _{2,3}	10	4,34	1,54
	1608	5,34	4,84

3.3. Površina vrtača

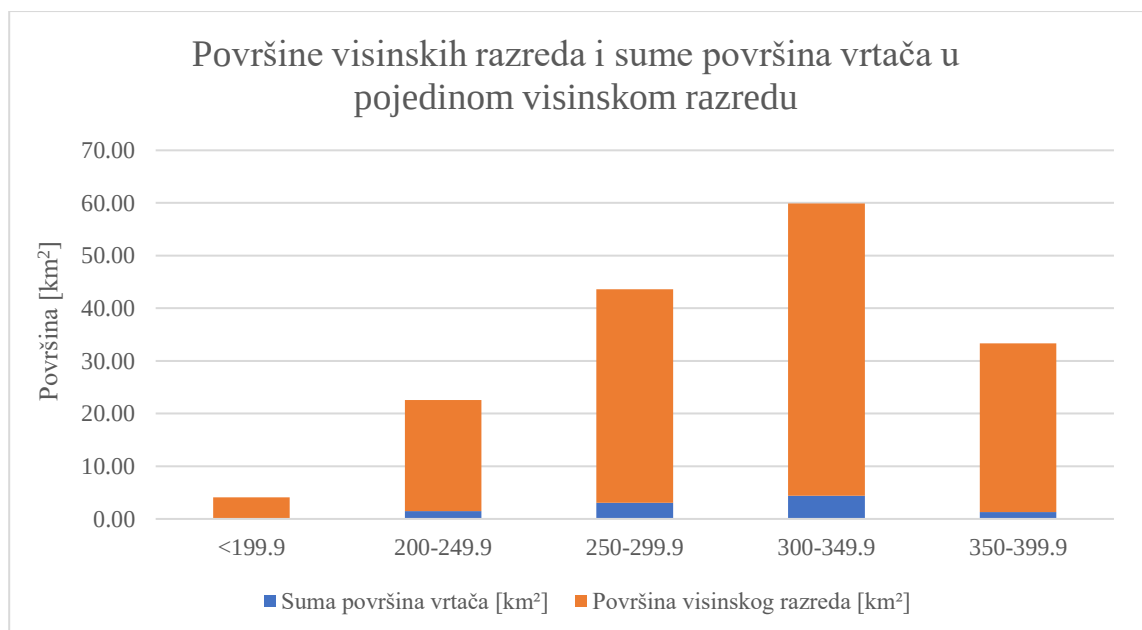
Određena je površina za 1117 vrtača, za koje su i iscrtani poligoni. Ukupna površina koje prekrivaju vrtače u slivu izvora Gradole iznosi 10,38 km². Prosječna površina vrtača iznosi 9295,6 m², a standardna devijacija 9590,6 m². Vrijednosti površina su u rasponu od 201 – 119 449 m². Više od 50 % zabilježenih vrtača ima površinu do 7000 m², a samo 1,3 % vrtača veće je od 40 000 m² (Slika 3-7.). Ukupna površina vrtača pokriva 6,5 % površine sliva. U tablici 3-5. prikazane su vrijednosti sume površine te prosječne površine vrtača u pojedinim visinskim razrednima. Na slici 3-8. grafički su prikazani rezultati iz tablice 3-5. Tablica 3-6. i slika 3-9. prikazuju udjele suma površina vrtača u pojedinom litološkom članu.



Slika 3-7. Frekvencije vrtača s obzirom na njihovu površinu.

Tablica 3-5. Vrijednosti suma površina i prosječne površine u pojedinom visinskom razredu te udjeli vrtača u razredu.

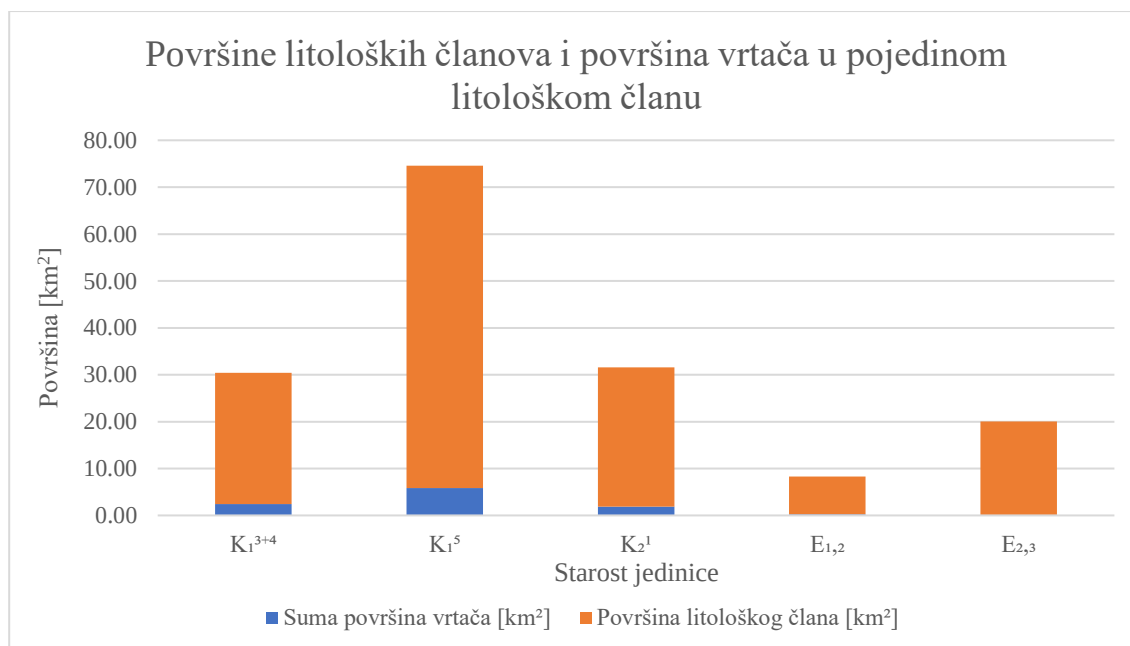
Visinski razred [m n.m.]	Suma površina vrtača [m ²]	Prosječna površina vrtača [m ²]	Površina visinskog razreda [km ²]	Udio površine vrtača u razredu [%]
<199,9	153984,65	7699,23	3,93	3,9
200-249,9	1475667,01	11900,54	21,08	7,0
250-299,9	3041050,38	10414,56	40,59	7,5
300-349,9	4385231,13	9060,39	55,51	7,9
350-399,9	1327268,35	6737,40	31,99	4,1



Slika 3-8. Grafički prikaz odnosa površina visinskih razreda i sume površine vrtača u njima.

Tablica 3-6. Vrijednosti suma površina i prosječne površine u pojedinom litološkom članu te udjeli vrtača u pojedinom članu.

Starost jedinice	Suma površina vrtača [m²]	Prosječna površina vrtača [m²]	Površina litološkog člana [km²]	Udio u površini litološkog člana [%]
K ₁ ³⁺⁴	2409238,07	10429,60	28,01	8,60
K ₁ ⁵	5807649,84	9505,16	68,75	8,45
K ₂ ¹	1873402,58	7904,65	29,69	6,31
E _{1,2}	223252,30	6976,63	8,05	2,77
E _{2,3}	69658,73	11609,79	19,95	0,35



Slika 3-9. Grafički prikaz odnosa površina litoloških članova i površine vrtača u njima.

3.4. Gustoća vrtača

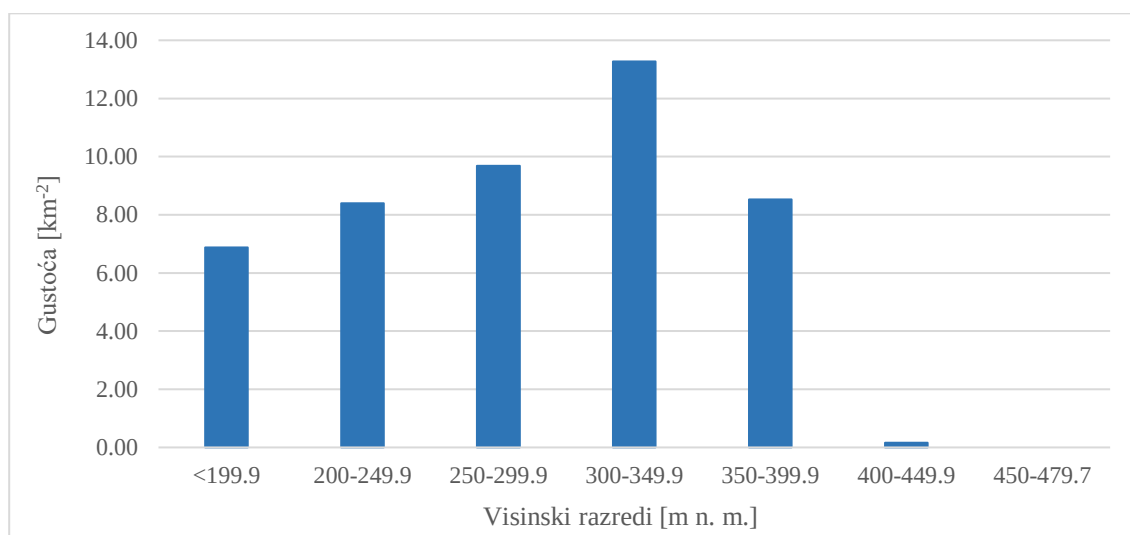
Za određivanje vjerojatnosti pojave vrtača na nekom području i vezu sa čimbenicima koji na to utječu koriste se razne metode. Najtočnije rezultate vjerojatnosti pojavljivanja daju gustoća vrtača i metoda najbližih susjeda, ali one ne uključuju čimbenike, stoga je njihova interpretacija otežana (Galve i dr., 2009).

Kako bi se iz prikupljenih podataka izvuklo što više informacija, gustoća vrtača izračunata je s obzirom na pojedine visinske razrede, na litološke jedinice i jednostavnom kernel metodom. Prilikom izračuna gustoće korišteni su podaci dobiveni vektorizacijom dna vrtača. U slivu veličine 159,62 km², ukupno je zabilježeno 1608 vrtača. Prosječna gustoća vrtača u cijelom slivu iznosi 10,07 vrtača po km².

U tablici 3-7. prikazane su gustoće prema visinskim razredima, a na slici 3-10. grafički su prikazane vrijednosti gustoća iz tablice 3-7.

Tablica 3-7. Prikaz vrijednosti površina pojedinih visinskih razreda te njihovog udjela u slivu, broj vrtača i gustoća vrtača u pojedinom visinskom razredu.

Visinski razred [m n.m.]	Površina [km ²]	Udio u slivu [%]	Broj vrtača	Gustoća [km ⁻²]
<199,9	3,93	2,5 %	27	6,88
200 – 249,9	21,08	13,2 %	177	8,35
250 – 299,9	40,59	25,4 %	393	9,68
300 – 349,9	55,51	34,8 %	737	13,28
350 – 399,9	31,99	20,0 %	273	8,53
400 – 449,9	6,11	3,8 %	1	0,16
450 – 479,7	0,41	0,3 %	0	0,00
	159,62	100,0 %	1608	10,07

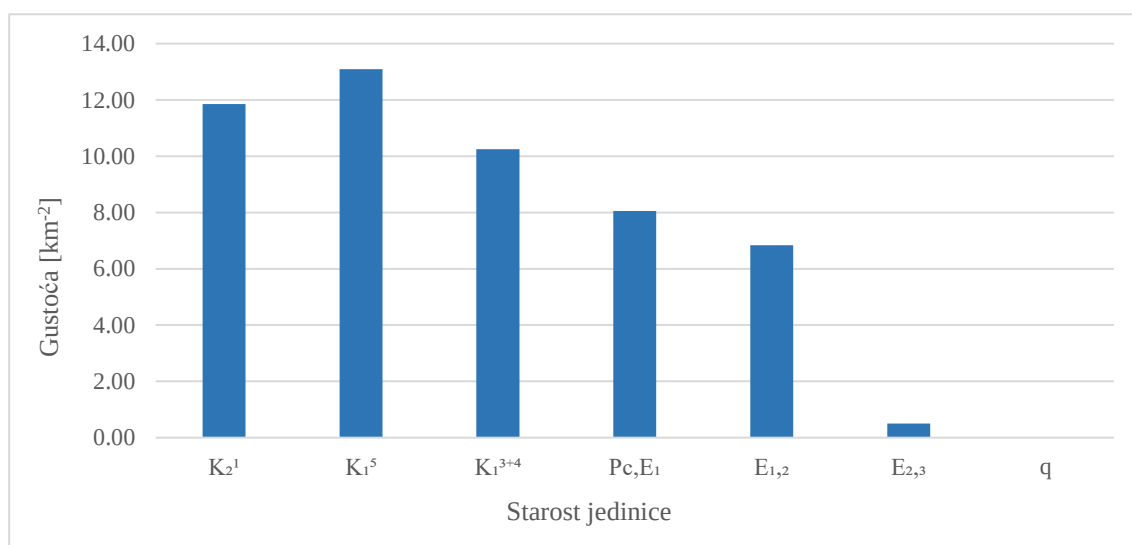


Slika 3-10. Grafički prikaz gustoća vrtača u pojedinom visinskom razredu.

U tablici 3-8. prikazane su vrijednosti gustoća pojedinih kronostratigrafskih jedinica, a grafički su prikazane na slici 3-11. Gotovo 80 % sliva zauzimaju kredne naslage u kojima se nalazi više od 95 % svih zabilježenih vrtača. Najveća gustoća vrtača je na području koje pokrivaju naslage albske starosti (K₁⁵).

Tablica 3-8. Prikaz vrijednosti površina pojedinih litoloških članova te broja i gustoće vrtača u njima.

Starost jedinice	Površina [km ²]	Broj vrtača	Gustoća [km ⁻²]
K ₁ ³⁺⁴	28,01	287	10,25
K ₁ ⁵	68,75	900	13,09
K ₂ ¹	29,69	352	11,85
Pc,E ₁	0,50	4	8,05
E _{1,2}	8,05	55	6,83
E _{2,3}	19,95	10	0,50
q	4,66	0	0,00
	159,62	1608	10,07



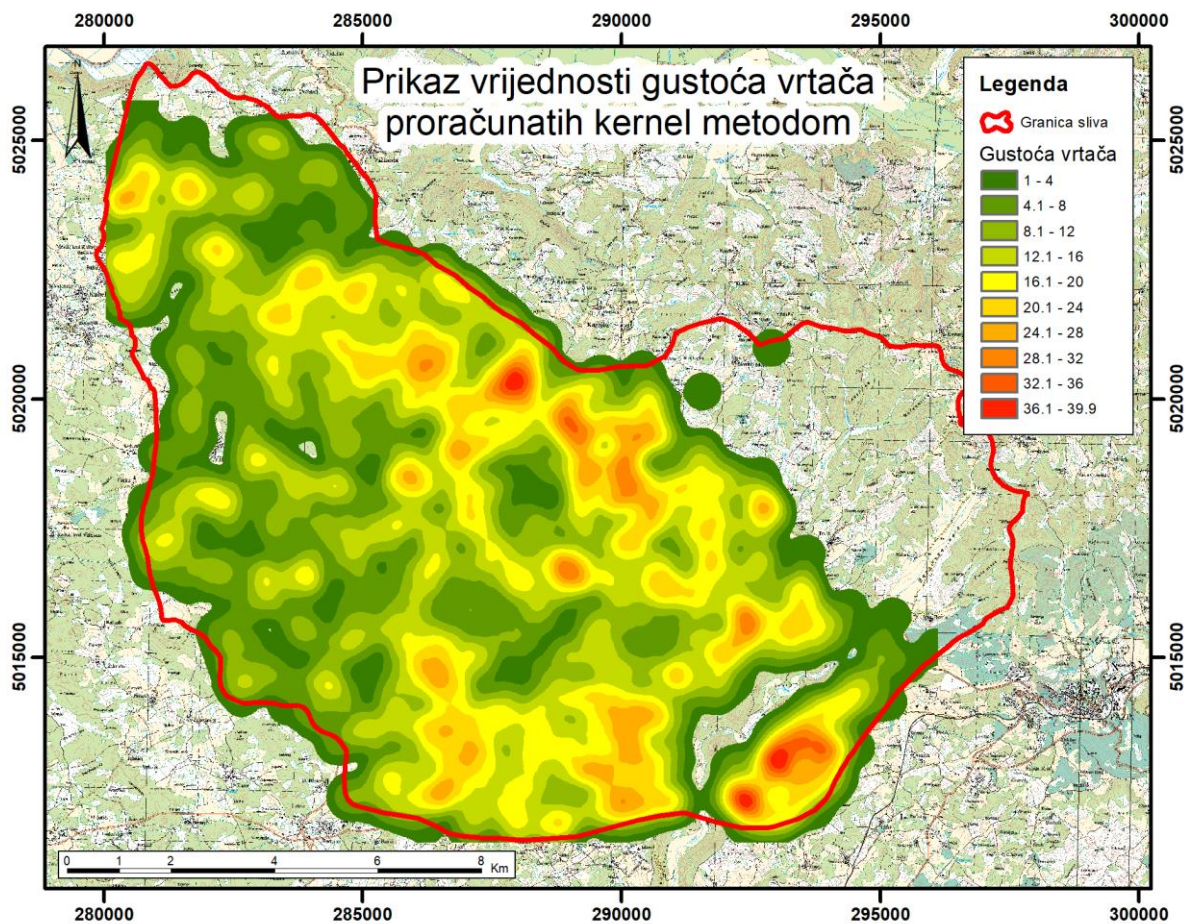
Slika 3-11. Grafički prikaz gustoće vrtača u pojedinim litološkim članovima.

Gustoća točkastog uzorka može se proračunati korištenjem raznih metoda proračuna. Metode se dijele na dvije skupine. Prvu skupine čine metode kojima se računa gustoća točkastog uzorka unutar određene jedinične površine, a drugu skupinu čine kernel (jezgrene) metode. U ovome radu korištena je jednostavna kernel metoda koja se temelji na proračunu gustoće točkastog uzorka na bilo kojoj lokaciji unutar samoga sebe. Oko svake vrtače određuje se broj pojava unutar proizvoljnog radijusa r , a ta vrijednost dijeli se s površinom kruga istoga radijusa. Lokacije vrtača t definirane su ćelijama pravilne mreže, pa su i dobiveni rezultati prikazani u rasterskom obliku. Gustoća pojave λ_t na lokaciji t određena je izrazom:

$$\lambda_t = \frac{br.[S \in K(t,r)]}{\pi r^2} \quad (3-1)$$

gdje je *br.* broj točaka (dna vrtača) koje čine skup *S* i pripadaju krugu $K(t,r)$ radijusa *r*, sa središtem na lokaciji *t*. Kako bi dobiveni rezultati imali smisla potrebno je pažljivo izabrati vrijednost radijusa *r*. Ukoliko je radijus *r* prevelik, vrijednosti gustoća biti će jednake za sve ćelije i težiti će vrijednosti prosječne gustoće u danom uzorku. Kod premale vrijednosti radijusa *r* gustoća uzorka biti će vezana uz pojedinu pojavu uzorka, a ne gustoću u njegovu okružju (Pahernik, 2012). Kako bi dobiveni rezultati bili pogodni za usporedbu s rezultatima dobivenim drugim metodama, uzeta je površina kruga K 1 km², koja odgovara radijusu od 564 m.

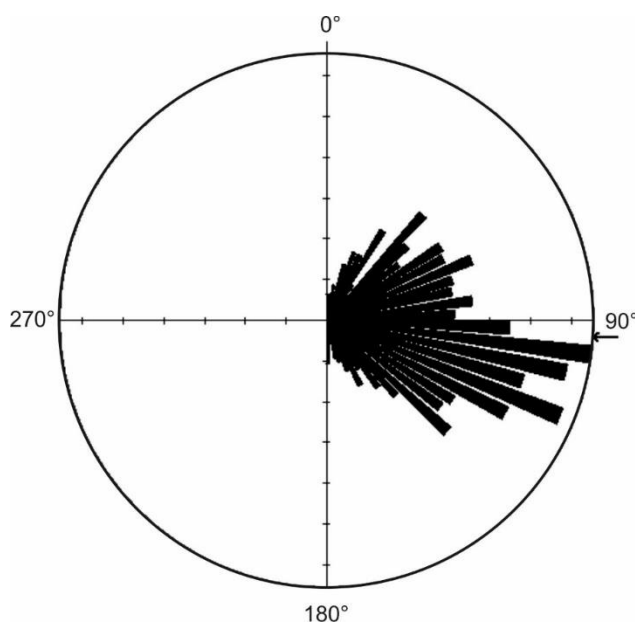
Slika 3-12. prikazuje raspodjelu gustoća izračunatu pomoću alata „*Kernel density*“, koji se nalazi u skupu alata „*Spatial analyst tools*“ u *ArcToolbox* proširenju za računalni softver *ArcGIS Desktop*. Najveća gustoća vrtača u slivu iznosi 39,93 km⁻², aritmetička sredina iznosi 6,94 km⁻², a standardna devijacija 7,76 km⁻². Gustoću manju od 1 km⁻² ima područje veličine 29,37 km² (18,4 % ukupne površine sliva).



Slika 3-12. Prikaz vrijednosti gustoća vrtača proračunatih kernel metodom.

3.5. Orijentacije vrtača

Ispitivanje postojanja preferiranih orijentacija vrtača može biti od pomoći pri utvrđivanju čimbenika koji potencijalno utječu na razvitak vrtača. Orijentacija vrtače određena je azimutom dulje osi vrtače. Prikupljeno je ukupno 1117 podataka o orijentaciji, a vrijednosti orijentacija su u rasponu od 0° do 180°. Podaci su u računalnom softveru *GEOrient* (verzija 9.5.0) analizirani i razvrstani u 36 razreda intervala 5°. Aritmetička sredina svih orijentacija iznosi 93°, a najčešća orijentacija je u razredu intervala 100° – 105° (Slika 3-13).

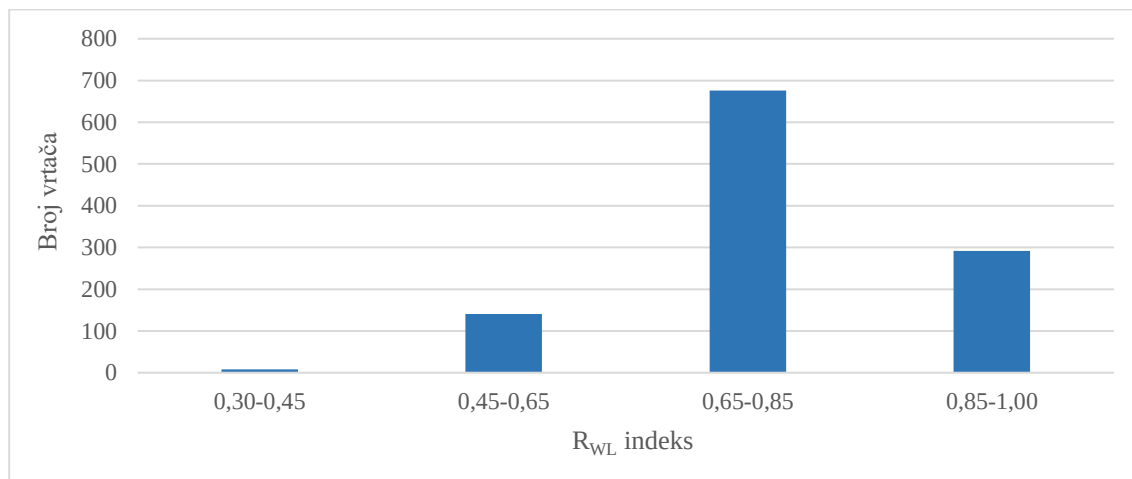


Slika 3-13. Rozeta dijagram orijentacija svih vrtača u slivu.

Za sve vrtače, kojima je određena orijentacija, izračunat je indeks R_{WL} . Taj indeks predstavlja odnos širine i duljine vrtače, tj. kraće i dulje osi vrtače. Teoretski su moguće vrijednosti u rasponu od 0 do 1. Vrijednosti indeksa R_{WL} govore o izduženosti vrtača, gdje manje vrijednosti označavaju veću izduženost, a veće označavaju približavanje kružnom obliku. Najmanja vrijednost R_{WL} indeksa iznosi 0,36, a najveća 0,96. Vrtake su razvrstane u četiri razreda s obzirom na vrijednost R_{WL} indeksa. Najviše vrtača nalazi se u razredima 0,65 – 0,85 i 0,85 – 1,00 (Tablica 3-9., Slika 3-14.).

Tablica 3-9. Broj vrtača u pojedinim R_{WL} razredima.

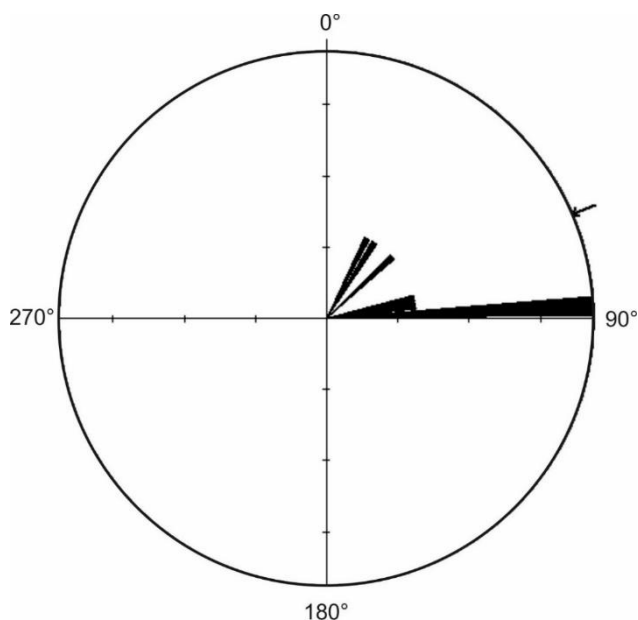
R_{WL} razred	Broj vrtača
0,30 – 0,45	8
0,45 – 0,65	141
0,65 – 0,85	676
0,85 – 1,00	292



Slika 3-14. Grafički prikaz broja vrtača u pojedinom R_{WL} razredu.

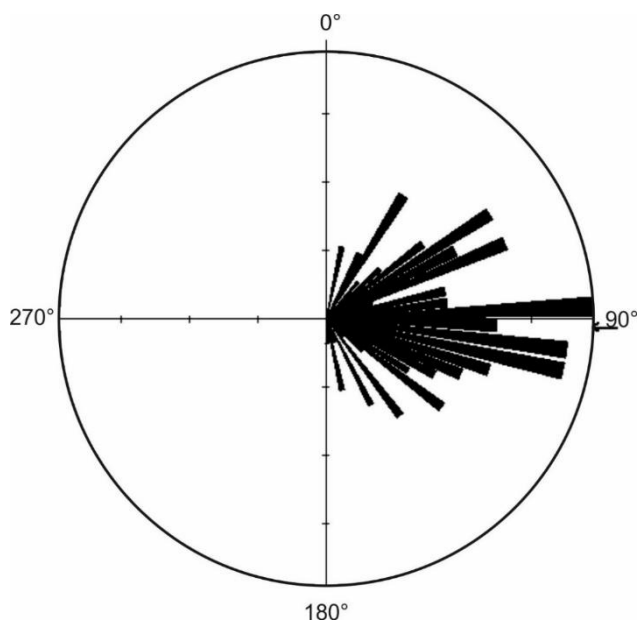
3.5.1. Orijentacije vrtača unutar pojedinih R_{WL} razreda

Razred 0,30 – 0,45 sadrži 8 vrtača, a njihove orijentacije prikazane su na slici 3-15. Prosječna orijentacija je 67° , a na rozeta dijagramu označena je strelicom.



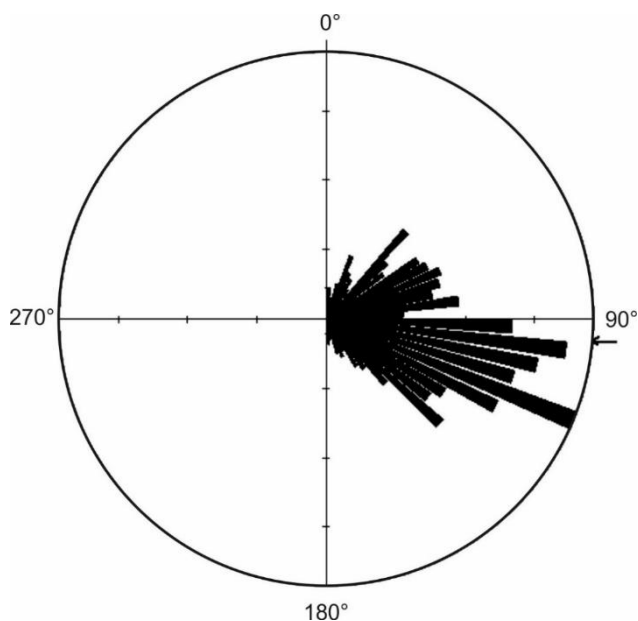
Slika 3-15. Rozeta dijagram orijentacija vrtača za razred 0,30 – 0,45.

Na temelju R_{WL} indeksa u *razred 0,45 – 0,65* smješteno je 141 vrtača, prosječne orijentacije 92° . Orijentacije su prikazane na rozeta dijagramu na slici 3-16.



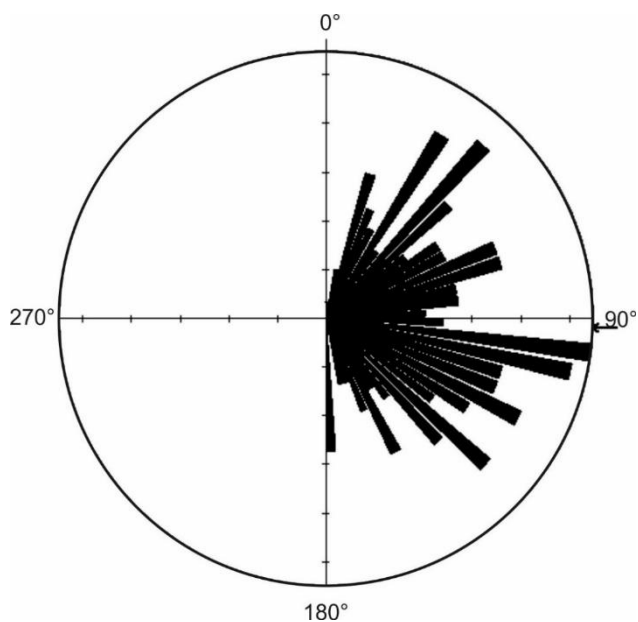
Slika 3-16. Rozeta dijagram orijentacija vrtača za razred 0,45 – 0,65.

Najviše vrtača nalazi se u *razredu* 0,65 – 0,85, njih 676. Njihova prosječna orijentacija iznosi 95°. Orijentacije su prikazane na slici 3-17.



Slika 3-17. Rozeta dijagram orijentacija vrtača za razred 0,65 – 0,85.

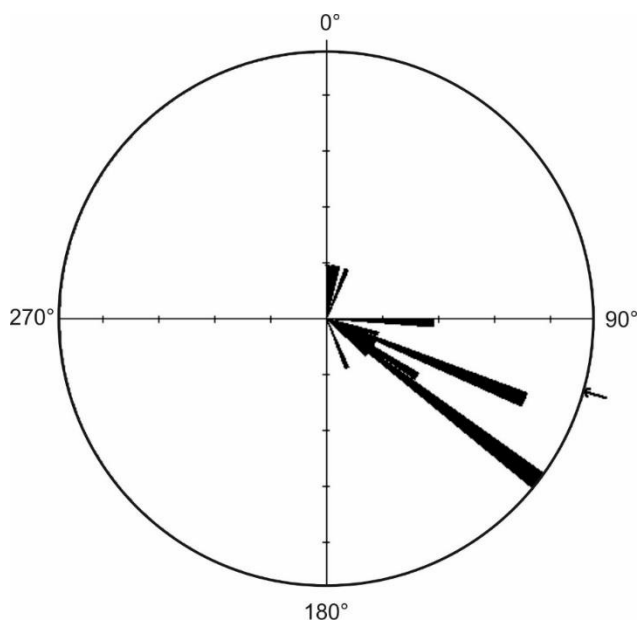
U *razredu* 0,85 – 1,00 sadržane su 292 vrtače. Orijentacije su prikazane rozeta dijagramom (Slika 3-18.), a prosječna iznosi 92°.



Slika 3-18. Rozeta dijagram orijentacija vrtača za razred 0,85 – 1,00.

3.5.2. Orijentacije rasjeda

Podaci o položajima i orijentacijama rasjeda, rasjednih zona i velikih pukotina prikupljeni su iz OGK list Rovinj (Polšak & Šikić, 1973). Kako se radi o zaravnjenom području s malo izdanaka, i geološkoj karti mjerila 1:100 000, na karti nije ucrtan znatan broj strukturnih elemenata. Prikupljen je 21 podatak, a orijentacije su im prikazane na slici 3-19. Dominantna orijentacija je SZ—JI, aritmetička sredina iznosi 106° , a medijan 115° .



Slika 3-19. Rozeta dijagram orijentacija rasjeda i pukotina.

4. NAPAJANJE VODONOSNIKA IZVORA GRADOLE

Napajanje krških vodonosnika odvija se infiltracijom kroz nekonsolidirani materijal koji pokriva okršene stijene. Javljaju se dva tipa napajanja, difuzno i koncentrirano napajanje. Iako su mnogi karbonatni vodonosnici karakterizirani s oba tipa napajanja, najčešće jedan tip napajanja dominira.

Difuzno napajanje karakterizirano je izravnim ulazom vode u okršenu i raspucanu stijensku masu cijelom površinom i kao dominantno, javlja se u manje okršnim vodonosnicima sa slabo razvijenim površinskim krškim strukturama.

Koncentrirano napajanje odnosi se na koncentrirano poniranje površinskih tokova izravno u dublje dijelove vodonosnika. Dobro okršeni karbonatni vodonosnici općenito su razvijeni ispod starih krških terena s dobro razvijenim ponorima i vrtačama koji prikupljaju i infiltriraju površinsku vodu izravno u sustav podzemnih kanala.

Najveće napajanje vodonosnika odvija se upravo u zonama s najrazvijenijim vrtačama, tj. u zonama visoke okršenosti. Upravo je iz tog razloga istraživanje vrtača ključno u shvaćanju hidroloških odnosa u slivu i kvantifikacije napajanja. Za proračune količine napajanja koristi se koeficijent otjecanja, odnosno koeficijent efektivne infiltracije.

Otjecanje je dio oborine koji se pojavljuje kao vodotok. Često je jedini pokazatelj koji upućuje na visinu evapotranspiracije, infiltracije, punjenje i pražnjenje vodonosnika. Otjecanje ovisi o nizu čimbenika među kojima su najvažniji: intenzitet i raspored oborina, morfologija i veličina sliva, vegetacijski pokrivač, geološke i hidrogeološke značajke (Bačani, 2006).

Koeficijent otjecanja c je odnos efektivne (neto) oborine, tj. oborine koja površinski otječe i stvara površinske tokove, P_e i oborine koja padne na sliv (bruto oborine) P :

$$c = \frac{P_e}{P} \quad (4.1)$$

Koeficijent otjecanja sa sliva predstavlja postotak površinskog otjecanja u odnosu na bruto količinu oborine koja padne na neko slivno područje (Žugaj, 2000). Koeficijent otjecanja poznat je i kao racionalni koeficijent koji u racionalnoj formuli zastupa sve čimbenike otjecanja, osim površine i čimbenika koji su obuhvaćeni pri određivanju kišnog

intenziteta. Racionalna formula je formula za izračunavanje maksimalnih protoka s malih slivova (do 200 km²), kao umnoška slivne površine, mjerodavnog kišnog intenziteta i koeficijenta otjecanja. Koeficijent otjecanja za srednji protok je:

$$c = \frac{Q T}{P A} \quad (4.2)$$

gdje je:

Q (m³/s) – srednji protok (mjesečni, godišnji, višegodišnji),

T (s) – trajanje srednjega protoka,

P (m) – oborina koja padne na sliv,

A (m²) – površina sliva.

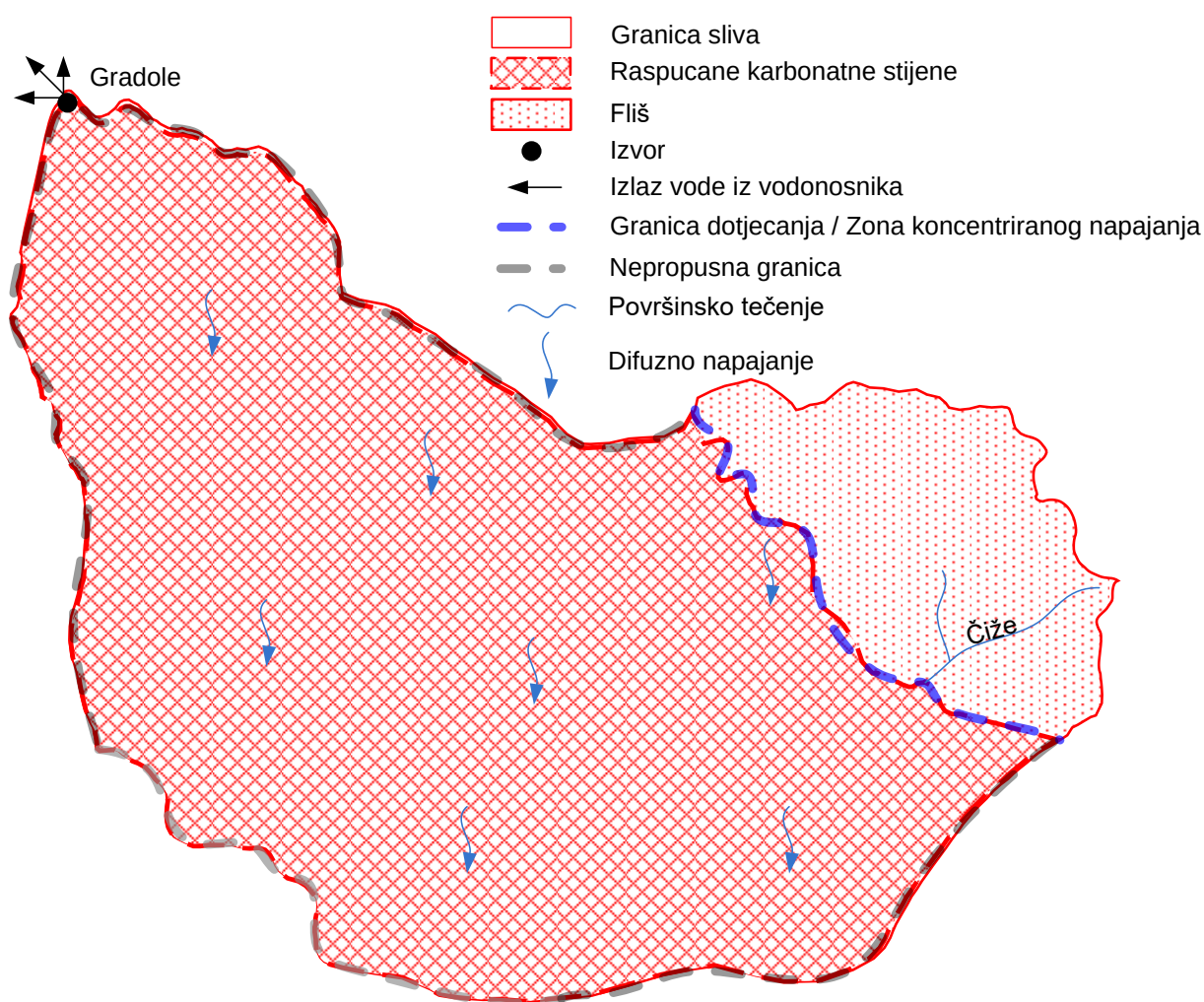
Vrlo je važno razlikovati koeficijent otjecanja od koeficijenta efektivne infiltracije. U hidrologiji koeficijent otjecanja predstavlja postotak oborine koji sudjeluje u površinskom otjecanju, tj. postotak oborine koji se nije infiltrirao u podzemlje, a u izrazu 4.2 srednji protok se odnosi na količinu vode koja protječe kroz neki poprečni profil površinskog vodotoka. Teoretska vrijednost koeficijenta otjecanja kreće se između 0 i 1, pri čemu veći koeficijent otjecanja ukazuje na manju propusnost površinskih naslaga, odnosno izraženije površinsko otjecanje.

U hidrogeologiji se također koristi izraz 4.2 no ima posve drugo značenje, jer se srednji protok odnosi na količinu istjecanja na izvoru, što znači da se više ne radi o koeficijentu otjecanja već o koeficijentu efektivne infiltracije. U skladu s tim, koeficijent efektivne infiltracije, c_i predstavlja odnos količine istjecanja na izvoru i oborine koja je pala na sliv, odnosno predstavlja postotak oborine koja se infiltrirala u podzemlje i doprla do podzemne vode te se izraz 4.1 pretvara u:

$$c_i = \frac{P_e}{P} \quad (4.3)$$

gdje je P_e neto oborina u hidrogeološkom kontekstu, tj. količina oborina koja je doprla do podzemne vode i sudjeluje u napajanju vodonosnika. Stoga veći koeficijent efektivne infiltracije ukazuje na veću propusnost površinskih naslaga. Koeficijenti efektivne infiltracije teoretski mogu imati vrijednosti od 0 do 1, no u stvarnosti su rijetko veći od 0,8.

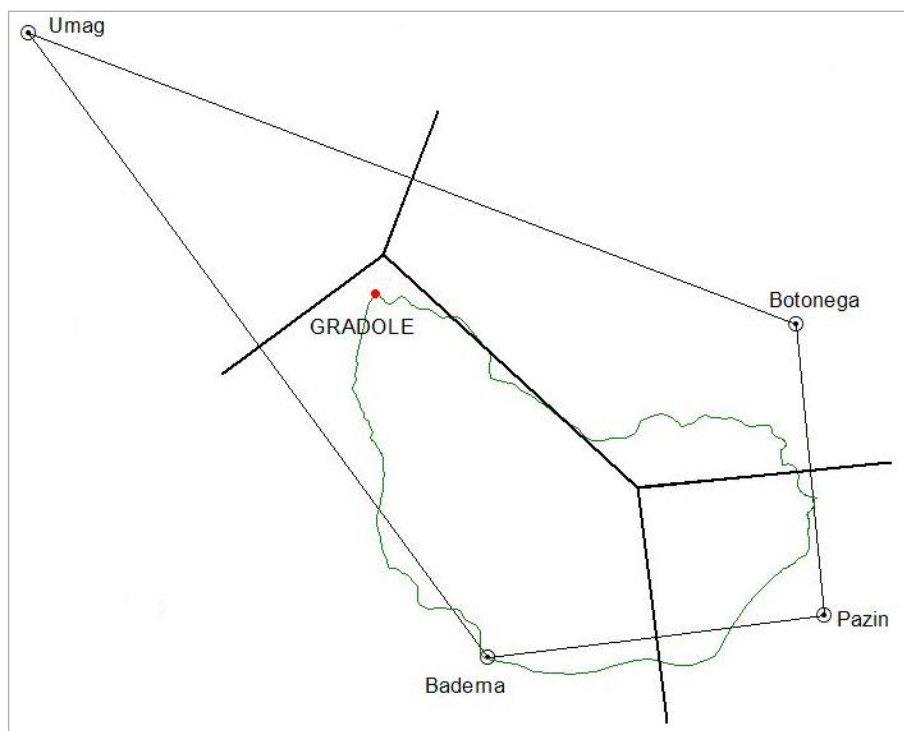
U slivu izvora Gradole ukupne površine 159,62 km², karbonatne propusne naslage pokrivaju 85 %, a flišne slabopropusne naslage 15 % te se može reći da je karakteriziran s oba tipa napajanja (Slika 4-1.). Naime, u karbonatnim naslagama razvijen je velik broj vrtača koje zbog omogućavanja izravne veze površinske vode s podzemljem imaju važnu ulogu u napajanju vodonosnika. Dok je za flišne naslage karakteristična pojava površinskih tokova koji poniru na kontaktu s okršnim karbonatnim naslagama. Jedini površinski tok koji se javlja u slivu izvora Gradole je potok Čiže, koji na kontaktu karbonatnih i flišnih naslaga ponire.



Slika 4-1. Shematski prikaz raspodjele napajanja u slivu izvora Gradole (prema Parlov, 2010).

Kako je za definiranje napajanja ključno poznavanje količine oborina, prvi korak je prikupljanje podataka o oborinama unutar sliva. U slivu izvora Gradole nalazi se samo kišomjerna stanica Baderna koja je smještena na južnoj granici sliva. Dvorabić (2010) stoga

u svome radu, za izračun prosječne količine oborine u slivu izvora Gradole, koristi podatke i s obližnjih kišomjernih stanica Pazin i Botonega. Na slici 4-2. prikazani su Thiessen-ovi poligoni sliva izvora Gradole, koji označavaju utjecajne površine pojedine kišomjerne stanice (kišomjerna stanica Umag nema utjecaja na područje sliva izvora Gradole).



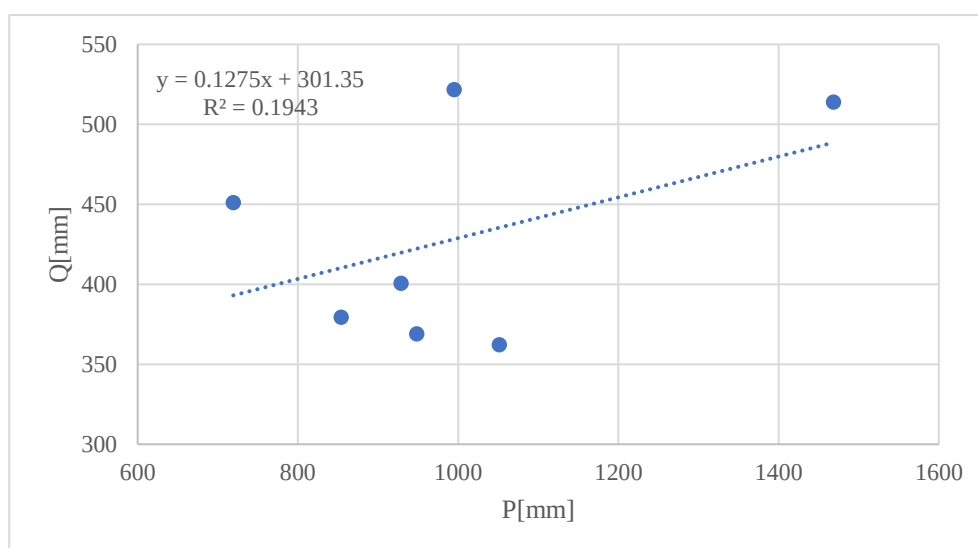
Slika 4-2. Thiessen-ovi poligoni kišomjernih stanica za sliv izvora Gradole (Dvorabić, 2010).

U tablici 4-1. prikazane su vrijednosti ulaznih parametara (oborine i istjecanje na izvoru) te proračun godišnjih koeficijenata efektivne infiltracije za vremensko razdoblje od 1.1.2000. do 31.12.2006. godine. Vrijednosti koeficijenta efektivne infiltracije kreću se u rasponu od 0,34 do 0,63. Ovako veliki hod godišnjih vrijednosti može se objasniti nedovoljnim brojem kišomjernih stanica u slivu, za koji su karakteristične lokalne kratkotrajne oborine velikog intenziteta.

Tablica 4-1. Koeficijenti efektivne infiltracije za sliv izvora Gradole u vremenskom razdoblju 2000.-2006. godine.

Kalendarska godina	Oborine P [mm]	Protok Q_{sr} [m ³ /s]	Koeficijent efektivne infiltracije c_i
2000	948,3	1,867	0,39
2001	719,3	2,282	0,63
2002	1468,5	2,601	0,35
2003	853,9	1,920	0,44
2004	1051,3	1,833	0,34
2005	928,5	2,028	0,43
2006	994,8	2,640	0,52

Na slici 4-3. prikazan je odnos oborina palih na sliv i otjecanja na izvoru Gradole. Slaba korelacija ($r = 0,4407$) oborina i istjecanja na izvoru ukazuje na potencijalne podzemne gubitke vode, a mogući uzrok je i istjecanje vode na manjim izvorima, Male Gradole i Očjak.



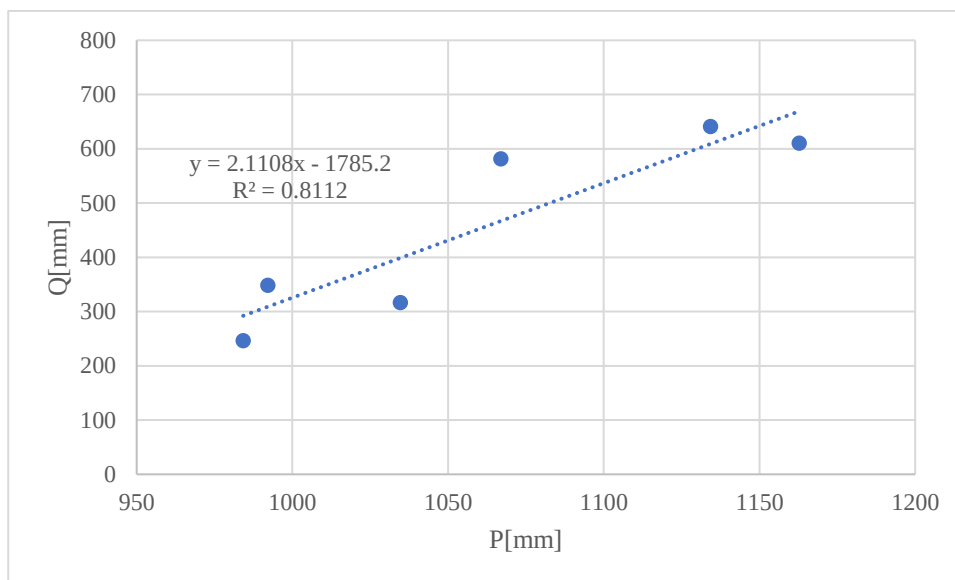
Slika 4-3. Odnos godišnje količine oborine koja padne P i otječe Q.

Tablica 4-1. prikazuje mjerene podatke oborina i istjecanja za kalendarske godine. Zbog slabe korelacije oborina i istjecanja (Slika 4-3.) napravljena je analiza s istim ulaznim podacima ali ovaj puta organiziranim u hidrološke godine. U tablici 4-2. prikazane su vrijednosti oborina i istjecanja te izračunatih koeficijenata efektivne infiltracije za hidrološke godine 2001. do 2006. (2000. nije uzeta u obzir zbog nedostatka podataka).

Odnos oborina i otjecanja na izvoru za hidrološke godine 2001. – 2006. (Slika 4-4.) pokazuje čvrstu korelaciju ($r = 0,9$).

Tablica 4-2. Koeficijenti efektivne infiltracije za sliv izvora Gradole u vremenskom razdoblju 2000.-2006. hidrološke godine.

Hidrološka godina	Oborine P [mm]	Protok Q_{sr} [m ³ /s]	Koeficijent efektivne infiltracije c_i
2001	1067	581,594	0,55
2002	984,2	246,698	0,25
2003	1134,3	641,408	0,57
2004	992,1	348,792	0,35
2005	1034,7	316,341	0,31
2006	1162,8	610,522	0,53



Slika 4-4. Odnos količine oborine koja padne P i otječe Q za hidrološke godine.

Problemom određivanja koeficijenta efektivne infiltracije u slivu izvora Gradole bavio se i Bonacci (2001). U radu je obradio podatke za vremensko razdoblje od 1987. – 1998. godine te je izračunao godišnje koeficijente efektivne infiltracije koji su također bili u velikom rasponu, od 0,35 do 0,76. Godišnji koeficijenti za razdoblje 2000. – 2006., izračunati u ovome radu, nastavljaju raniji trend velikog hoda (0,34 – 0,63).

Bonacci (2001) utvrđuje jaku vezu ($r = 0,987$) između prosječne mjesečne temperature zraka i mjesečnog koeficijenta efektivne infiltracije. Infiltracija je veća tijekom hladnijeg dijela godine u odnosu na topliji dio kada je infiltracija manja. Na temelju toga zaključuje kako do razlika u godišnjim koeficijentima efektivne infiltracije dolazi zbog različite

raspodjele oborina unutar pojedine godine. Na temelju toga provedena je analiza na podacima za razdoblje od 2000. do 2006. godine. Rezultati su prikazani u tablici 4-3.

Tablica 4-3. Prikaz raspodjele oborina tijekom kalendarskih godina od 2000. do 2006.

Kalendarske godine							
	2000.	2001.	2002.	2003.	2004.	2005.	2006.
Siječanj	4,40	143,40	26,10	79,40	69,30	20,90	80,30
Veljača	28,20	12,10	66,70	34,50	98,20	27,90	49,50
Ožujak	81,90	89,60	1,90	7,40	21,50	50,80	99,80
Travanj	75,60	50,30	89,10	111,20	88,50	97,40	81,90
Svibanj	54,10	24,70	81,00	13,10	143,30	78,90	162,00
Lipanj	4,70	89,40	122,90	78,50	51,20	31,20	4,60
Srpanj	89,40	46,90	125,40	33,50	23,90	68,80	29,40
Kolovoz	7,10	7,70	215,90	37,20	37,10	140,50	243,20
Rujan	60,00	143,80	260,40	98,70	82,80	101,60	70,90
Listopad	133,80	44,20	170,10	129,80	181,30	117,40	22,10
Studenj	293,50	52,00	207,10	135,20	85,00	101,30	90,20
Prosinac	115,60	15,20	101,90	95,40	169,20	91,80	60,90
God. oborina P	948,3	719,3	1468,5	853,9	1051,3	928,5	994,8
Hladni dio god.	657,4	356,5	573,8	481,7	624,5	410,1	402,8
% god. oborine	69 %	50 %	39 %	56 %	59 %	44 %	40 %
Topli dio god.	290,90	362,80	894,70	372,20	426,80	518,40	592,00
% god. oborine	31 %	50 %	61 %	44 %	41 %	56 %	60 %
c_i	0,39	0,63	0,35	0,44	0,34	0,43	0,52

Obzirom da raspodjela oborina u kalendarskim godinama ne objašnjava dobivene koeficijente efektivne infiltracije, provedene su i analize na podacima organiziranim u hidrološke godine (tablica 4-4.). Za hidrološke godine odnosi raspodjela oborina i odgovarajućih koeficijenata efektivne infiltracije bolje odgovaraju Bonaccijevom zaključku. To se najbolje vidi na primjeru 2002. godine, za koju je dobiven najmanji koeficijent efektivne infiltracije (0,25), a za vrijeme toplijeg dijela godine je palo 79 % godišnje oborine.

Tablica 4-4. Prikaz raspodjele oborina tijekom hidroloških godina od 2001. do 2006.

Hidrološke godine						
	2001.	2002.	2003.	2004.	2005.	2006.
Rujan	60,00	143,80	260,40	98,70	82,80	101,60
Listopad	133,80	44,20	170,10	129,80	181,30	117,40
Studen	293,50	52,00	207,10	135,20	85,00	101,30
Prosinac	115,60	15,20	101,90	95,40	169,20	91,80
Siječanj	143,40	26,10	79,40	69,30	20,90	80,30
Veljača	12,10	66,70	34,50	98,20	27,90	49,50
Ožujak	89,60	1,90	7,40	21,50	50,80	99,80
Travanj	50,30	89,10	111,20	88,50	97,40	81,90
Svibanj	24,70	81,00	13,10	143,30	78,90	162,00
Lipanj	89,40	122,90	78,50	51,20	31,20	4,60
Srpanj	46,90	125,40	33,50	23,90	68,80	29,40
Kolovoz	7,70	215,90	37,20	37,10	140,50	243,20
God. oborina P	1067,0	984,2	1134,3	992,1	1034,7	1162,8
Hladni dio god.	788	206,1	600,4	549,4	535,1	540,1
% god. oborine	74 %	21 %	53 %	55 %	52 %	46 %
Topli dio god.	279,00	778,10	533,90	442,70	499,60	622,70
% god. oborine	26 %	79 %	47 %	45 %	48 %	54 %
Ci	0,55	0,25	0,57	0,35	0,31	0,53

Pokušaji izračuna mjesečnih koeficijenata efektivne infiltracije davali su vrijednosti koje bi za neke mjesece prelazile 1, što ni teoretski nije moguće. Također odnos godišnjih efektivnih i bruto oborina nije pokazivao čvrstu vezu ($r = 0,3183$). Problem je riješen uzevši u obzir retencijske sposobnosti vodonosnika (vrijeme retencije iznosi 62,5 dana), tj. utjecaj mjesečnih oborina na sljedeće mjesece. Korelacija godišnjih efektivnih i bruto oborina poboljšana je primjenom tih korekcija ($r = 0,8738$). Na temelju svih izračuna i korekcija određen je prosječni koeficijent efektivne infiltracije za sliv izvora Gradole koji iznosi 0,57.

Slaba korelacija dobivena za razdoblje 2000. – 2006. (Slika 4-3.) podudara se s korelacijom za razdoblje 1987. – 1998., stoga se može pretpostaviti kako bi primjena istih korekcija rezultirala boljom korelacijom.

Drugi način određivanja koeficijenta efektivne infiltracije sliva provodi se dodjeljivanjem odgovarajućih koeficijenta različitim zonama unutar sliva. U prethodnim izračunima dobivene su vrijednosti koeficijenta efektivne infiltracije sliva izvora Gradole od 0,34 do 0,63.

Unutar sliva flišne naslage zauzimaju 15 %, a karbonatne 85 % površine. U dijelu sliva kojeg izgrađuju karbonatne naslage vrtače zauzimaju 10,38 km², što je 7,65 % ukupne površine. Za tu površinu također se može pretpostaviti koncentrirano napajanje koje se odvija kroz dna vrtača, stoga se za te površine može pretpostaviti i veći koeficijent efektivne infiltracije. Za ostatak površine od 115 km², izgrađene od karbonatnih naslaga, može se pretpostaviti difuzni tip napajanja.

Prema Magdalenić i dr. (1995) teoretski prosječni koeficijent efektivne infiltracije za fliš iznosi 0,35, a za karbonate od 0,5 do 0,7 (za izračun je uzet 0,6).

$$c_{uk} = 0,35 \cdot 0,15 + 0,6 \cdot 0,85 = 0,5625 \quad (4.4)$$

Ukupna površina vrtača u slivu iznosi 10,38 km², što je 7,65 % površine karbonatnih naslaga u slivu. Ako teoretski prosječni koeficijent efektivne infiltracije vrtača iznosi 0,7, a ostatka karbonatnih naslaga 0,5, onda koeficijent efektivne infiltracije sliva iznosi:

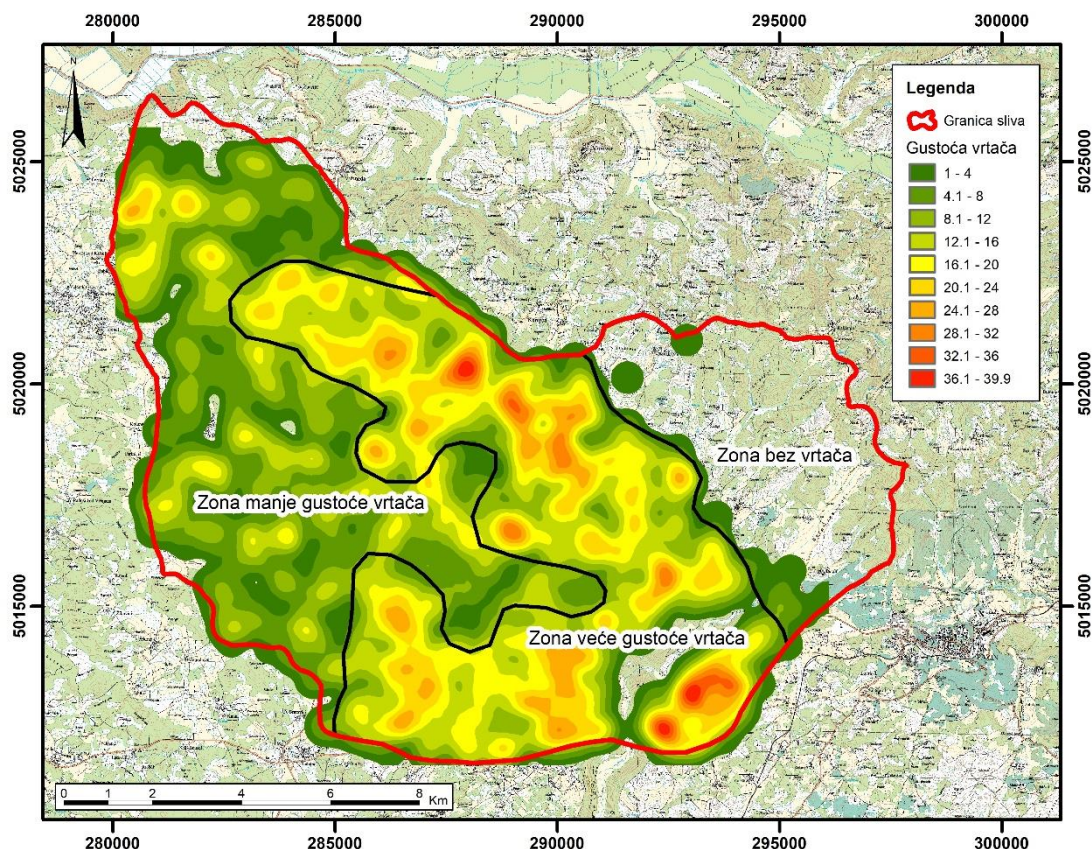
$$c_{uk} = 0,35 \cdot 0,15 + (0,7 \cdot 0,0765 + 0,5 \cdot 0,9236) \cdot 0,85 = 0,4905 \quad (4.5)$$

Uz pretpostavku da su vrtače orijentacija sličnih orijentacijama rasjeda i pukotinskih zona u podzemlju ujedno i bolje povezane s njima, tj. da se kroz njih ostvaruje veće napajanje nego kroz ostale vrtače, tada im se mogu pretpostaviti i veći koeficijenti efektivne infiltracije. Ukupna površina vrtača orijentacija između 100° i 150° iznosi 4,36 km², odnosno 42 % površine svih vrtača. Suma površina vrtača čije orijentacije odstupaju od orijentacija rasjeda i pukotina iznosi 6,02 km², odnosno 58 % površine svih vrtača. Ako se u izrazu (4.5) koeficijent efektivne infiltracije za sve vrtače (0,7) zamijeni s koeficijentima efektivne infiltracije za vrtače orijentacija bliskih orijentacijama rasjeda (0,8) i za sve ostale vrtače (0,7), onda slijedi:

$$c_{uk} = 0,35 \cdot 0,15 + [(0,8 \cdot 0,42 + 0,7 \cdot 0,58) \cdot 0,0765 + 0,5 \cdot 0,92] \cdot 0,85 = 0,4932 \quad (4.6)$$

Koeficijent efektivne infiltracije sliva izračunat je i na temelju zona različitih gustoća vrtača u slivu. Zone različitih gustoća vrtača izdvojene su na temelju karte vrijednosti gustoća vrtača proračunatih kernel metodom (Slika 3-12.). Izdvojene su tri zone: zona bez vrtača, zona veće gustoće i zona manje gustoće vrtača (Slika 4-5.). Zona bez vrtača, tj. područje koje najvećim dijelom pokrivaju flišne naslage, zauzima 17,76 % površine sliva, a teoretski prosječni koeficijent efektivne infiltracije za ovu zonu je 0,35. Zona veće gustoće vrtača zauzima 43,52 % sliva, a za izračun je pretpostavljen koeficijent efektivne infiltracije 0,7. Ostatak sliva, preciznije 38,63 %, obuhvaća zona manje gustoće vrtača, pretpostavljenog koeficijenta efektivne infiltracije 0,6.

$$c_{uk} = 0,35 \cdot 0,1776 + 0,7 \cdot 0,4352 + 0,6 \cdot 0,3863 = 0,6050 \quad (4.7)$$



Slika 4-5. Prikaz zona različitih gustoća vrtača.

Prvi način izračuna koeficijenta efektivne infiltracije dao je širi raspon rezultata, 0,34 – 0,63. Iako je u izračunu korišten velik broj podataka, kako bi se dobili kvalitetniji podaci potrebno je uzeti u obzir karakteristike vodonosnika te izvršiti potrebne korekcije.

Drugi način određivanja istog koeficijenta pomoću izraza 4.4 jednostavniji je i brži te koristi manje ulaznih podataka, a rezultat od 0,5625 vrlo je blizu prosječnom koeficijentu efektivne infiltracije dobivenom proračunima Bonaccia (2001), koji su zahtijevali višegodišnje podatke količina oborina te složene korekcije istih, koji iznosi 0,57.

Proširenjem izraza 4.4. koje je zahtijevalo više ulaznih podataka o vrtačama (površine, orijentacije i gustoće) dobiveni su rezultati u rasponu od 0,4905 do 0,6050. Rezultati detaljnijih izračuna ne odstupaju značajno od rezultata dobivenog izrazom 4.4. kao ni od Bonaccijevog rezultata. Slab utjecaj vrtača na ukupni koeficijent efektivne infiltracije nije očekivan, no može se protumačiti debelo razvijenim površinskim pokrivačem odnosno debelom trošnom zonom koja usporava infiltraciju i umanjuje ulogu vrtača u koncentriranom napajanju vodonosnika sliva izvora Gradole.

5. ZAKLJUČAK

Cilj ovoga rada bio je izdvojiti zone različite okršenosti u slivu izvora Gradole. Zone visokog stupnja okršenosti su područja u kojima se očekuje veća efektivna infiltracija oborina, stoga ih je pri definiranju hidroloških odnosa nužno poznavati. Izdvajanje zona je provedeno analizom prostorne raspodjele vrtača, a analizom morfometrijskih obilježja ispitane su veze s čimbenicima koji mogu utjecati na pojavu vrtača.

Analizom rezultata morfometrijskih obilježja vrtača vidljivo je kako se duljina i širina vrtača smanjuju s nadmorskom visinom. To potvrđuju i rezultati analize površina vrtača iz kojih se vidi da se prosječne površine vrtača smanjuju s nadmorskom visinom. Također, promjene dubina vrtača u skladu su s promjenama površina, tj. smanjuju se s povećanjem nadmorske visine. Dok se udjeli suma površina vrtača unutar pojedinih visinskih razreda bitno ne razlikuju.

Iako postoje razlike u morfometrijskim obilježjima vrtača različitih visinskih razreda, ne može se sa sigurnošću zaključiti da je isključivo nadmorska visina uzrok promjenama morfometrijskih obilježja.

U krednim naslagama nalazi se oko 96 % vrtača, a preostalih 4 % nalazi se u paleogenskim naslagama. Iz toga se jasno zaključuje kako je litologija najvažniji čimbenik u razvoju vrtača na nekom području. No, usporedbom morfometrijskih obilježja vrtača u pojedinim litološkim članovima kredne starosti vidi se da ne postoje značajne razlike. S ovakvim rezultatima slažu se i proračuni gustoća. Vrijednosti gustoća vrtača u krednim naslagama očekivano su puno veće od vrijednosti gustoća u paleogenskim naslagama. Između litoloških članova kredne starosti vrijednosti gustoća se bitno ne razlikuju.

Prosječna gustoća vrtača u slivu iznosi $10,07 \text{ km}^{-2}$. Gustoća vrtača visinskih razreda najveća je za razred 300-349,9. Taj razred ima i najveći udio površine u slivu, a u ovom visinskom razredu smješten najveći dio zaravnjenog terena. Ovakvi rezultati nisu neobični iz razloga što su ravni tereni pogodniji za razvitak vrtača od nagnutih, stoga se iz njih ne može zaključivati o razlikama s obzirom na nadmorsku visinu.

Na karti vrijednosti gustoća proračunatih kernel metodom vidi se kako u slivu izvora Gradole najveće vrijednosti imaju područja u karbonatnim naslagama uz kontakt sa paleogenskim naslagama. Mogući uzrok takvoj prostornoj raspodjeli gustoća je povećana

količina vode u ovim područjima, zbog dotjecanja oborinskih voda po slabopropusnim flišnim naslagama i posljedično izraženiji i brži proces okršavanja.

Karta vrijednosti gustoća vrtača može se promatrati i kao karta indeksa okršenosti. Na njoj se jasno mogu izdvojiti različite zone okršenosti. Zone različitog intenziteta okršenosti nužno je poznavati kod proračuna napajanja vodonosnika, određivanja zona zaštite te također mogu poslužiti kao podloga za određivanje prirodne ranjivosti vodonosnika.

Za sve vrtače kojima je određena orijentacija izračunat je i indeks R_{WL} , on predstavlja odnos širine i duljine vrtače te govori o izduženosti vrtača. Tablica 3-9. prikazuje broj vrtača u pojedinom R_{WL} razredu. Za vrtače koje imaju R_{WL} indeks 0,85 – 1,00 može se reći da su približno kružnog oblika. U slivu su zabilježene 292 takve vrtače, odnosno 26 % svih vrtača. Ostale vrtače, R_{WL} indeksa manjeg od 0,85, smatramo izduženima ili elipsoidnima. Takvih je ukupno 825 ili 74 %.

Iz rozeta dijagrama koji prikazuju orijentacije vrtača pojedinih R_{WL} razreda može se prepoznati dominantna orijentacija vrtača. Orijetacije većine vrtača manjeg R_{WL} indeksa približno se pružaju pravcem istok – zapad. S povećanjem R_{WL} indeksa, tj. kružnom obliku vrtača, povećava se broj vrtača različitih orijentacija, ali je dominantna orijentacija približno pravcima istok – zapad i jugoistok – sjeverozapad. Česte su i orijentacije sjeveroistok – jugozapad.

Orijentacije rasjeda i pukotinskih zona ucrtanih na geološkoj karti u najvećem su broju paralelne pravcu sjeverozapad - jugoistok, a manje pravcu sjeveroistok – jugozapad. Takve orijentacije potvrđuju i podaci orijentacija setova pukotina koji su prikupljeni terenskim istraživanjima. Setovi pukotina jasno su vidljivi u naslagama barem – alpske i albske starosti, a u naslagama cenomanske starosti pukotine su slabije izražene.

Uspoređujući orijentacije vrtača u slivu s orijentacijama rasjeda i pukotina zaključeno je da su pojave vrtača vezane uz tektonsku oštećenost te da su njihove orijentacije i sam razvitak uvjetovane pukotinskim sustavima u karbonatnim stijenama.

Kako bi se pobliže prikazao utjecaj vrtača na napajanje vodonosnika, na više je načina izračunat ukupni koeficijent efektivne infiltracije sliva izvora Gradole. Izračun u kojem su se kao ulazni podaci koristili mjereni podaci oborina i istjecanja dao je širok raspon vrijednosti, od 0,34 – 0,63. Određivanje ukupnog koeficijenta efektivne infiltracije sliva

dodjeljivanjem pretpostavljenih prosječnih koeficijenata pojedinim dijelovima odnosno zonama u slivu pokazalo se jednostavnijim i bržim, a također i preciznijim. Ovi proračuni ne bi bili mogući bez rezultata analiza provedenih u 3. poglavlju. Vrijednosti koeficijenata određenih na ovaj način kreću se u rasponu od 0,4905 do 0,6050. Usporedbom dobivenih rezultata s koeficijentom efektivne infiltracije sliva izvora Gradole, koji je Bonacci (2001) izračunao koristeći se podacima oborina i istjecanja 12-godišnjeg razdoblja, može se zaključiti kako je u slučaju izvora Gradole najjednostavniji način određivanja koeficijenta efektivne infiltracije (s dovoljno preciznim rezultatom) taj da se sliv podijeli na zone s različitom propusnosti te se svakoj dodijeli prosječni teoretski koeficijent efektivne infiltracije.

6. LITERATURA

- ANGEL, J. C., NELSON, D. O., PANNO, S. V., 2004. Comparison of a new GIS-based technique and a manual method for determining sinkhole density: An example from Illinois's sinkhole plain. *Journal of Cave and Karst Studies*, 66 (1), str. 9–17.
- ANONIMNO, 1951. – 1964. Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000 List Trst L 33–88. Ljubljana: Institut za geološka istraživanja Zagreb.
- APPLEGATE, P., 2003. Detection of sinkholes developed on shaly Ordovician limestones, Hamilton Country, Ohio, using digital topographic data: Dependence of topographic expression of sinkholes on scale, contour interval, and slope. *Journal of Cave and Karst Studies*, 65 (2), str. 126–129.
- BAČANI, A., PARLOV, J., POSAVEC, K., PERKOVIĆ, D., RUBINIĆ, J., 2003. Istraživanja u cilju zaštite izvorišta vodoopskrbe na području istarskog poluotoka. Projekt. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- BAČANI, A., 2006. Hidrogeologija I. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- BATES, R.L., JACKSON, J., 1987. Glossary of geology: Alexandria, Virginia. American Geological Institute.
- BONACCI, O., 2001. Monthly and annual effective infiltration coefficients in Dinaric karst: example of the Gradole karst spring catchment. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 46(2), str. 287–299.
- BONDESAN, A., MENEGHEL, M., SAURO, U., 1992. Morphometric analysis of dolines, *International Journal of Speleology*, 21 (1–4), 55.
- BOŽIČEVIĆ, S., 1985. Morfogeneza speleoloških pojava Istre i njihova zavisnost o geološkim i hidrogeološkim uvjetima. Disertacija. Zagreb: Prirodoslovno – matematički fakultet.

- DAY, M., 1983. Doline Morphology and Development in Barbados. *Annals of the Association of American Geographers*, 73 (2), str. 206–219.
- DVORABIĆ, A., 2010. Hidrogeološke značajke sliva izvora Gradole i analiza količine preljeva na izvoru. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- FLOREA, L., 2005. Using state-wide GIS data to identify coincidence between sinkholes and geologic structure. *Journal of Cave and Karst Studies*, 67 (2), str. 120–124.
- GALVE, J. P., GUTIÉRREZ, F., REMONDO, J., BONACHEA, J., LUCHA, P., CENDRERO, A., 2009. Evaluating and comparing methods of sinkhole susceptibility mapping in the Ebro Valley evaporite karst (NE Spain). *Geomorphology*, 111, str. 160–172.
- GULIĆ, I., 1973. Izvor Gradole – Krški fenomen u dolini Mirne. *Građevinar*, 5, XXV (XCIII), 152-158.
- ISTRAMET. Klima u Istri. URL: <http://www.istramet.hr/klima-u-istri/> (15.8.2018.).
- MAGDALENIĆ, A. & VAZDAR, T., 1993. Hidrogeološka interpretacija trasiranja podzemnih voda u središnjoj Istri. *Hrvatske vode*, Zagreb, 1/4, 231–238.
- MAGDALENIĆ, A., VAZDAR, T. & HLEVNJAK, B., 1995. Hydrogeology of Gradole Spring Drainage Area in Central Istria. *Geologica Croatica*, Zagreb, 48/1, 97–106.
- MIHALJEVIĆ, D., 1994. Analysis of spatial characteristic in distribution of sink-holes, as an geomorphological indicator of recent deformations of geological structures. *Acta Geographica Croatica*, 29, str. 29–36.
- PAHERNIK, M., 2012. Prostorna gustoća ponikava na području Republike Hrvatske. *Hrvatski geografski glasnik*, 74 (2), str. 5–26.
- PARLOV, J., 2010. Identifikacija parametara za modeliranje toka podzemne vode glavnih izvora u porječju Mirne. Disertacija. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- PLENIČAR, M., POLŠAK, A. & ŠIKIĆ, D., 1965. Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000 Tumač za list Trst L 33–88. Ljubljana: Institut za geološka istraživanja Zagreb.

- POLŠAK, A. & ŠIKIĆ, D., 1969. Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, list Rovinj L 33–100. Beograd: Savezni geološki zavod.
- POLŠAK, A. & ŠIKIĆ, D., 1973. Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000 Tumač za list Rovinj L 33–100. Beograd: Savezni geološki zavod.
- SIART, C., BUBENZER, O., EITEL, B., 2009. Combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: A multi-component case study on Mediterranean karst in Central Crete. *Geomorphology*, 112, str. 106–121.
- VAZDAR, T. & URUMOVIĆ, K., 1995. Hidrogeološka interpretacija utjecaja okoliša na krške vodonosnike središnje Istre. Zbornik radova 1. Hrvatskog geološkog kongresa s međunarodnim sudjelovanjem, Opatija, knjiga 2, Institut za geološka istraživanja, Zagreb, 635–340.
- VLAHOVIĆ, T., 1999. Utjecaj okoliša na podzemne vode u Istri. Disertacija. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- ŽUGAJ, R., 2000. Hidrologija. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- WMS SERVISI. Državna geodetska uprava, Republika Hrvatska.
URL: <http://geoportal.dgu.hr/wms?layers=HOK> (10.5.2018.).