# Hidrogeološke značajke sliva Mrežnice uzvodno od hidrološke postaje Juzbašići

**Markotić, Ivan**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

*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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:881864

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-04-24**

*Repository / Repozitorij:*

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij geološkog inženjerstva

# HIDROGEOLOŠKE ZNAČAJKE SLIVA MREŽNICE UZVODNO OD HIDROLOŠKE POSTAJE JUZBAŠIĆI

Diplomski rad

Ivan Markotić
GI 344

Zagreb, 2019.

*Zahvaljujem se svojoj mentorici, izv. prof. dr. sc. Jeleni Parlov, na uloženom vremenu, strpljenju i velikoj pomoći tijekom izrade diplomskog rada.*

*Posebna zahvala ide mojoj obitelji, rodbini i djevojci Luciji, koji su uvijek bili uz mene i pružali mi potporu, podršku i snagu, kada je to bilo najpotrebnije.*

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

# HIDROGEOLOŠKE ZNAČAJKE SLIVA MREŽNICE UZVODNO OD HIDROLOŠKE POSTAJE JUZBAŠIĆI

IVAN MARKOTIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

## Sažetak

Krško područje može se smatrati tzv. „crnom kutijom“, čiju osnovu čini specifična geološka građa – topive stijene, poput vapnenaca i dolomita, na koju su potom djelovali strukturno – tektonski procesi i klimatski uvjeti. U ovom diplomskom radu obrađeno je područje, koje je obuhvatilo sliv gornjeg toka rijeke Mrežnice, od njenog izvora do hidrološke postaje Juzbašići. Opisane su najvažnije topografske, klimatološke, geološke, strukturno - tektonske i hidrogeološke značajke. Cilj rada bio je odrediti pripadajuće slivno područje, odnosno odrediti prostor u sklopu kojega se odvija ulaz, tok vode i izlaz iz hidrogeološkog sustava. Provedeno je definiranje razvodnice prema poznatim topografskim i hidrogeološkim odnosima, no ono isprva nije dalo dobre rezultate u bilanci voda. Proširenjem sliva na područje Dabarskog polja i ponovnim bilanciranjem dobivena je ukupna bilanca $\Delta Q$ = -0,55 $m^3/s$. Ona ukazuje na nešto veći ulaz od izlaza, no može se smatrati zadovoljavajućim rezultatom u okvirima preciznosti i mogućnosti kojima je rad napravljen.

Ključne riječi: hidrogeologija, rijeka Mrežnica, sliv, bilanca voda

Diplomski rad sadrži: 30 stranica, 9 tablica, 15 slika, 6 priloga i 13 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

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

Voditelj: Dr. sc. Jelena Parlov, izvanredni profesor RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Jelena Parlov, izvanredni profesor RGNF
Dr. sc. Zoran Kovač, docent RGNF
Dr. sc. Dario Perković, docent RGNF

Datum obrane: 6. rujna 2019.

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master's
Thesis

# HYDROGEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF MREŽNICA RIVER CATCHMENT AREA UPSTREAM OF HYDROLOGICAL STATION JUZBAŠIĆI

IVAN MARKOTIĆ

Thesis completed in: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum engineering
Department of Geology and Engineering geology,
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

## Abstract

Karst can be considered as a „black box", whose base forms specifical geology – soluble rocks, like limestone and dolomite – who were affected by structural – tectonic processes and climatic conditions. This thesis deals with catchment area of upper part of river Mrežnica, from its source to hydrological station Juzbašići. Most important topographical, climatic, geological, structural – tectonic i hydrogeological characteristics were described. Goal of this work was determination of belonging catchment area, in which entrance, flow and exit from the hydrogeological system occurs. Topographical and hydrogeological border of catchment area was assigned, but it didn't give good results in water balance calculation. Catchment area was then extended to a territory of Dabar field, and with water balance calculation carried out again, there was $\Delta Q = -0{,}55$ $m^3/s$ water balance in total. It indicates on a bigger input of water, rather than a output, but it can be considered as a correct result, due to accuracy and available possibilities.

Keywords: hydrogeology, river Mrežnica, catchment area, water balance
Thesis contains: 30 pages, 9 tables, 15 figures, 6 enclosures and 13 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: PhD Jelena Parlov, Associate Professor

Reviewers: PhD Jelena Parlov, Associate Professor
PhD Zoran Kovač, Assistant Professor
PhD Dario Perković, Assistant Professor

Date of defense: September 06, 2019

**SADRŽAJ:**

1. UVOD ..... 1

2. GEOGRAFSKI SMJEŠTAJ, TOPOGRAFSKE I KLIMATOLOŠKE ZNAČAJKE ..... 2

3. GEOLOŠKE I STRUKTURNO - TEKTONSKE ZNAČAJKE ..... 9

4. HIDROGEOLOŠKE ZNAČAJKE ..... 11

4.1. Geomorfološke značajke ..... 12

4.2. Određivanje slivnog područja ..... 14

4.2.1. Obrada hidroloških podataka ..... 14

4.2.2. Bilanca voda ..... 17

4.2.3. Izračun teoretske površine sliva preko teoretskog koeficijenta efektivne infiltracije ..... 22

4.2.4. Korekcija slivne površine i ponovni izračun bilance voda ..... 24

5. ZAKLJUČAK ..... 29

6. LITERATURA ..... 30

**POPIS SLIKA:**

Slika 2.1. Rijeke Crnomorskog sliva u Hrvatskoj. Vodotok Mrežnice označen je crvenom linijom (https://www.dinarskogorje.com/rijeke-crnomorskog-sliva-slijeva.html)..... 2
Slika 2.2. Geografski položaj rijeke Mrežnice i istraživanog područja (Petric, 2008)..... 3
Slika 2.3. Milkovića slap na Mrežnici, 15-ak kilometara zapadno od Slunja (https://www.facebook.com/hpdVinica/photos/milkovi%C4%87a-slap-mre%C5%BEnica-photo-by-emil-ivani%C5%A1evi%C4%87/1028340993947822/)..... 4
Slika 2.4. Kretanje dnevne temperature na klimatološkoj postaji Slunj za razdoblje od 2005. do 2017. godine..... 6
Slika 2.5. Godišnja količina oborina za vremensko razdoblje 2005. – 2017. godine – Modruš..... 7
Slika 2.6. Godišnja količina oborina za vremensko razdoblje 2005. – 2017. godine - Plaški..... 7
Slika 2.7. Godišnja količina oborina za vremensko razdoblje 2005. – 2017. godine – Saborsko..... 8
Slika 2.8. Godišnja količina oborina za vremensko razdoblje 2005. – 2017. godine – Slunj 8
Slika 4.1. Hidrološka postaja Juzbašići (http://hidro.dhz.hr/)..... 15
Slika 4.2. Dnevni protoci Mrežnice na hidrološkoj postaji Juzbašići u razdoblju od 2005. do 2017. godine..... 15
Slika 4.3. Krivulja trajanja protoka i srednja dnevna vrijednost protoka za razdoblje od 2005. do 2017. godine..... 16
Slika 4.4. Podjela definiranog slivnog područja na Thiessenove poligone..... 18
Slika 4.5. Proširenje prijašnjeg slivnog područja..... 24
Slika 4.6. Korigirano slivno područje..... 25
Slika 4.7. Thiessenovi poligoni korigiranog sliva..... 26

**POPIS TABLICA:**

Tablica 4.1. Rezultati godišnjih prosječnih visina oborina ($P_{sr}$) dobivenih metodom Thiessenovih poligona ..... 19
Tablica 4.2. Dobivene vrijednosti evapotranspiracije iz podataka o količini oborina $P_{sr}$ i temperaturi zraka $T_{sr}$ ..... 20
Tablica 4.3. Proračun bilance voda za definirano slivno područje ..... 21
Tablica 4.4. Odabrane vrijednosti koeficijenta efektivne infiltracije za različite naslage ... 22
Tablica 4.5. Podaci za izračun prosječnog teoretskog koeficijenta efektivne infiltracije *c*. 23
Tablica 4.6. Izračun teoretske površine sliva ..... 23
Tablica 4.7. Rezultati godišnjih prosječnih visina oborina ($P_{sr}$) dobivenih metodom Thiessenovih poligona za korigirani sliv ..... 26
Tablica 4.8. Dobivene vrijednosti evapotranspiracije iz podataka o količini oborina $P_{sr}$ i temperaturi zraka $T_{sr}$ za korigirani sliv ..... 27
Tablica 4.9. Proračun bilance voda za korigirano slivno područje ..... 27

**POPIS PRILOGA:**

PRILOG 1: Lokacija vrtača na slivnom području

PRILOG 2: Karta intenziteta okršenosti slivnog područja

PRILOG 3: Hidrogeološka karta slivnog područja

PRILOG 4: Lokacija vrtača na korigiranom slivnom području

PRILOG 5: Karta intenziteta okršenosti korigiranog slivnog područja

PRILOG 6: Hidrogeološka karta korigiranog slivnog područja

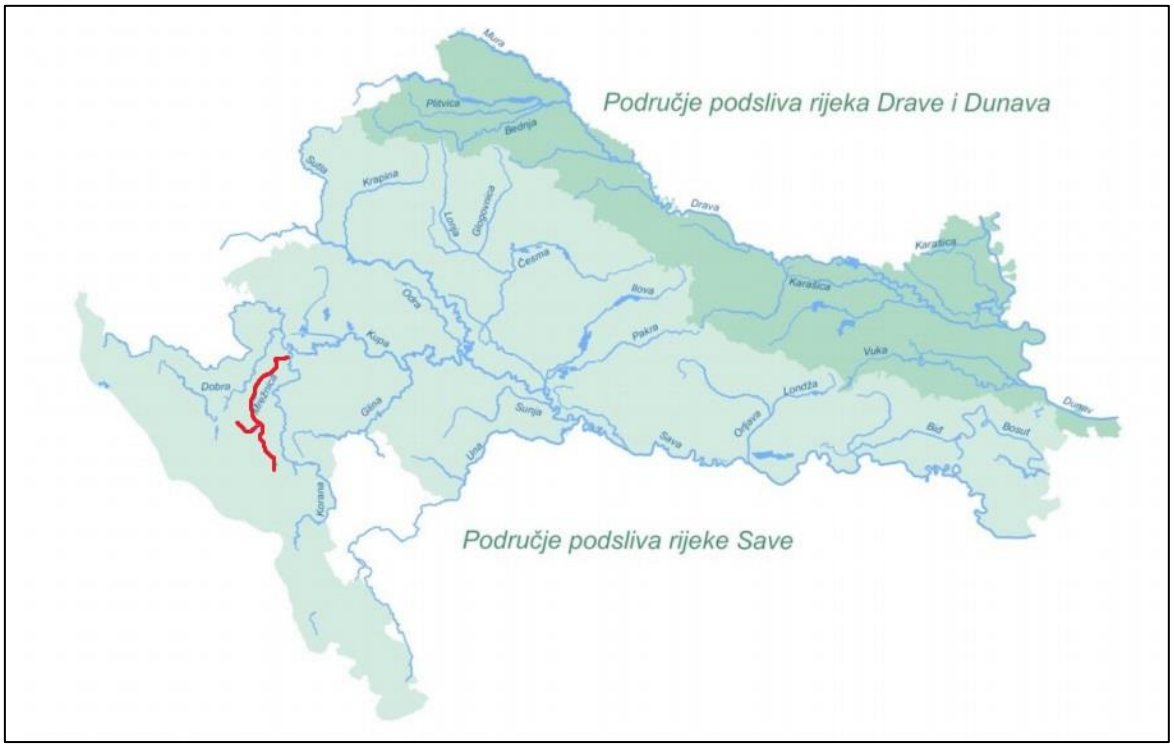
# 1. UVOD

Rijeka Mrežnica, odnosno njen uzvodni dio, od izvora do hidrološke postaje Juzbašići, smješten je u krškom području Republike Hrvatske, koje tvori gotovo 50% državnog teritorija. Krš je specifičan geološki prostor, kojega izgrađuju većinom topive stijene, vapnenci i dolomiti, a na koje potom djeluju strukturno – tektonski procesi i posebni klimatski uvjeti.

Na temelju saznanja o geološkim i hidrogeološkim odnosima obrađenog područja, iscrtano je pripadajuće slivno područje. Opisane su najvažnije topografske, klimatološke, geološke, strukturno - tektonske i hidrogeološke značajke Mrežnice na spomenutom prostoru. Krajnji cilj rada bio je, na temelju višegodišnjih podataka o temperaturama i oborinama klimatoloških/kišomjernih postaja, te dnevnih vrijednosti protoka na Juzbašićima, provesti bilanciranje voda i ocijeniti pouzdanost, odnosno točnost dodijeljene slivne površine.

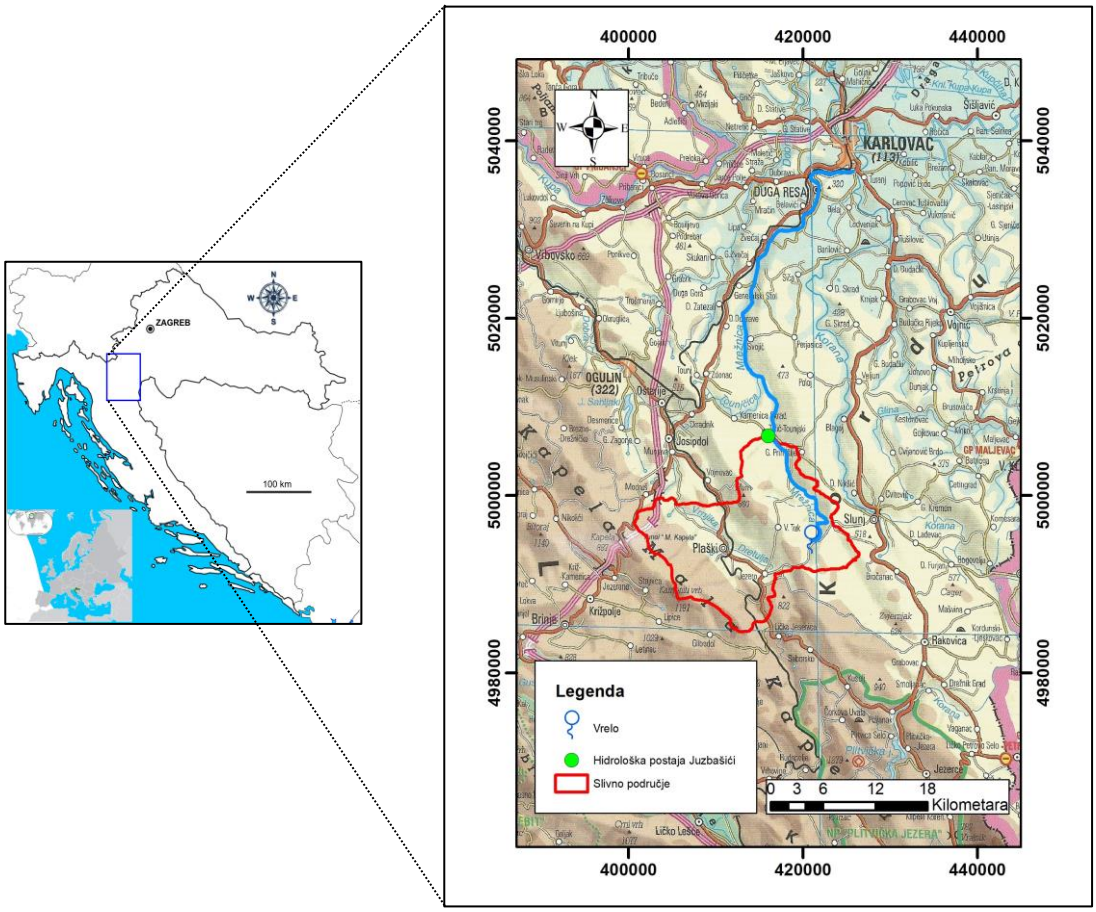
## 2. GEOGRAFSKI SMJEŠTAJ, TOPOGRAFSKE I KLIMATOLOŠKE ZNAČAJKE

Rijeka Mrežnica nalazi se „stiješnjena“ između rijeke Dobre i Korane, na način da njeno porječje graniči s porječjem Dobre na zapadu, a s porječjem Korane na istoku. Izvire podno Popovića vrha (479 m n. m.), ulijeva se u Koranu kod mjesta Turanj pokraj Karlovca, a glavna i najjača pritoka joj je rijeka Tounjčica. Čitavi tok Mrežnice proteže se na ukupno 64 kilometra. To je rijeka koja pripada Crnomorskom slivu, odnosno području podsliva rijeke Save, što je vidljivo na slici 2.1.



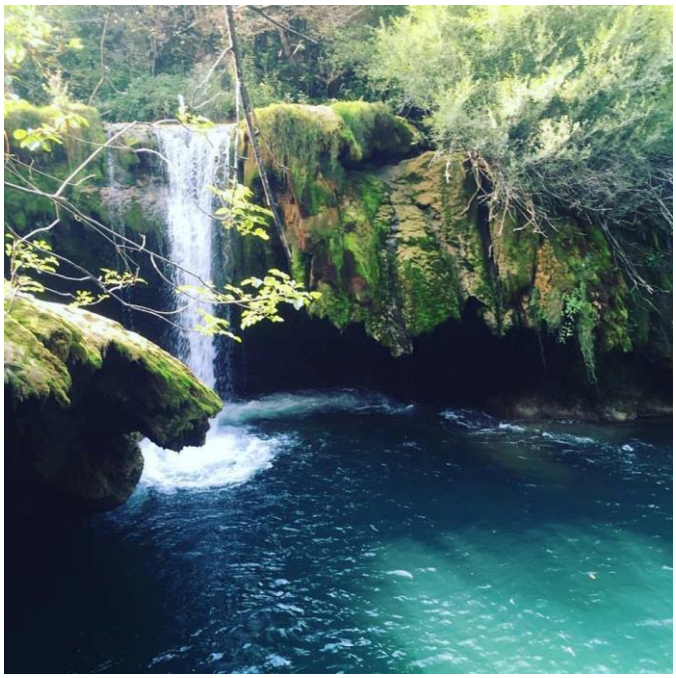

Slika 2.1. Rijeke Crnomorskog sliva u Hrvatskoj. Vodotok Mrežnice označen je crvenom linijom (https://www.dinarskogorje.com/rijeke-crnomorskog-sliva-slijeva.html)

Rijeka Mrežnica geografski je smještena u središnjoj Hrvatskoj, točnije na sjevernom dijelu dinarskog prostora Hrvatske, u području mikroregije Korduna (slika 2.2). Na istoj slici crvenom linijom označeno je istraživano područje.




Slika 2.2. Geografski položaj rijeke Mrežnice i istraživanog područja (Petric, 2008)

Mrežnica je možda i najpoznatija po svoja 93 slapa, koji se u nejednolikom rasporedu javljaju duž njena toka (slika 2.3). Primjerice, u gornjem dijelu toka, u duljini od svega 5 kilometara nalazi se 26 slapova, dok se u donjem dijelu toka nalazi isto toliko slapova, ali u duljini od 39 kilometara. Razlog tolikom broju slapova jesu pogodni uvjeti za nastanak sedrenih barijera, koje ujedno i stvaraju ujezerene dijelove toka i brzace.



Slika 2.3. Milkovića slap na Mrežnici, 15-ak kilometara zapadno od Slunja (https://www.facebook.com/hpdVinica/photos/milkovi%C4%87a-slap-mre%C5%BEnica-photo-by-emil-ivani%C5%A1evi%C4%87/1028340993947822/)

Također, „rijeka sa stotinu slapova“, kako od milja Mrežnicu nazivaju lokalni stanovnici, prolazi područjem koje je izrazito okršeno, stoga je ona tipična krška rijeka. Mnoštvo vrtača, koje se nalaze u njenom neposrednom okruženju, upućuju na izrazito okršenu sredinu. Kovačević (2005) definira Mrežnicu kao granicu između dvije regionalne cjeline: Karlovačkog niskog krša i Korduna.

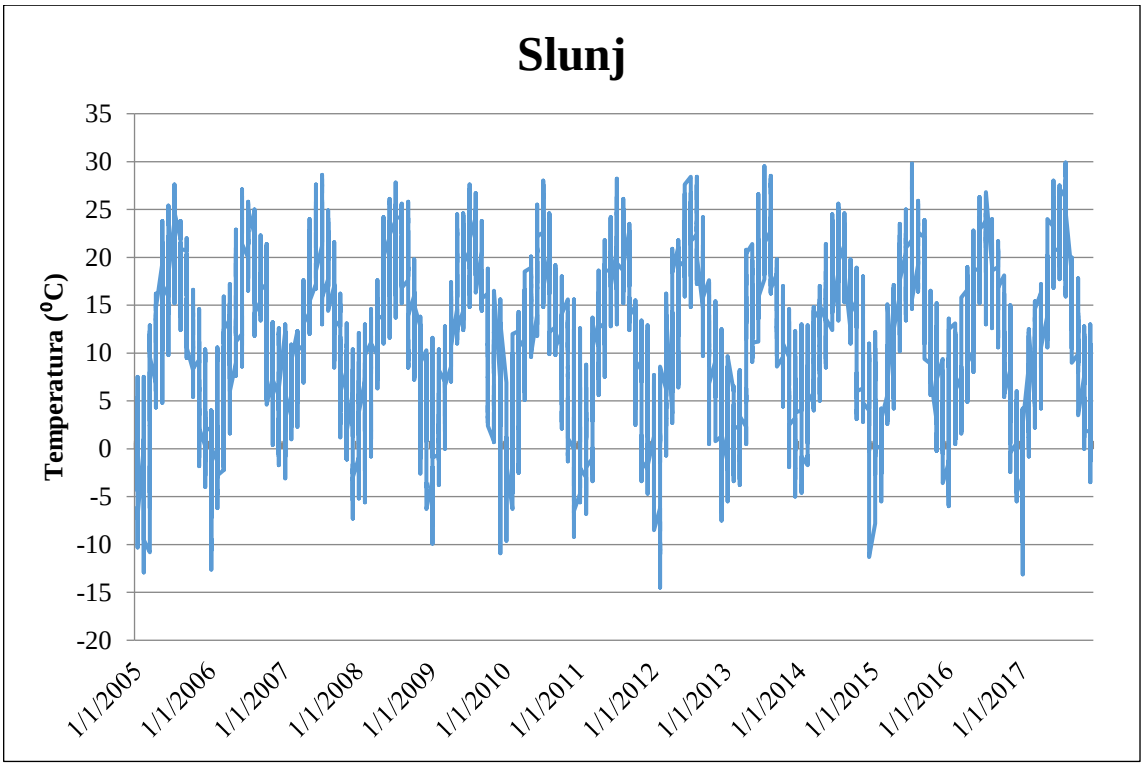
Topografski gledano, predmetno područje istraživanja nalazi se u gornjem, uzvodnom dijelu toka Mrežnice. Upravo taj gornji tok rijeke ima kanjonske elemente krajobraza (stjenovite obale) sa šumskim predjelima, a kako se ide nizvodnije obale postaju sve dostupnije, te prevladava nizinska vegetacija (Hršak, 2010). Kanjon kojim protječe Mrežnica u gornjem dijelu toka rezultat je dubinske erozije tijekom geološke prošlosti, a smatra se da je u pleistocenu ona zaustavljena usred stvaranja već spomenutih sedrenih barijera (Hršak, 2010). Širina toka na nekim dionicama je varijabilna, no u prosjeku iznosi oko 35 metara.

Mrežnicu tvore dvije ponornice: Istočna Mrežnica (slivovi Dretulje i Kordunske Mrežnice), te Zapadna Mrežnica (slivovi Zagorske Mrežnice i Tounjčice) (Hršak, 2010). Već nakon 7 kilometara dobiva svoju prvu pritoku, Suvaču, a prosječan protok Mrežnice iznosi 34 $m^3/s$, gledajući cijeli tok. Međutim, općenito gledajući, na razmatranom području

Mrežnica ima vrlo slabo razvijenu hidrografsku mrežu, što je jedan od pokazatelja da se radi o tipičnoj krškoj rijeci. Karakteristike, glavni elementi i ponašanje ove rijeke između ostalog su i odraz specifične topografije terena kojom ona protječe.

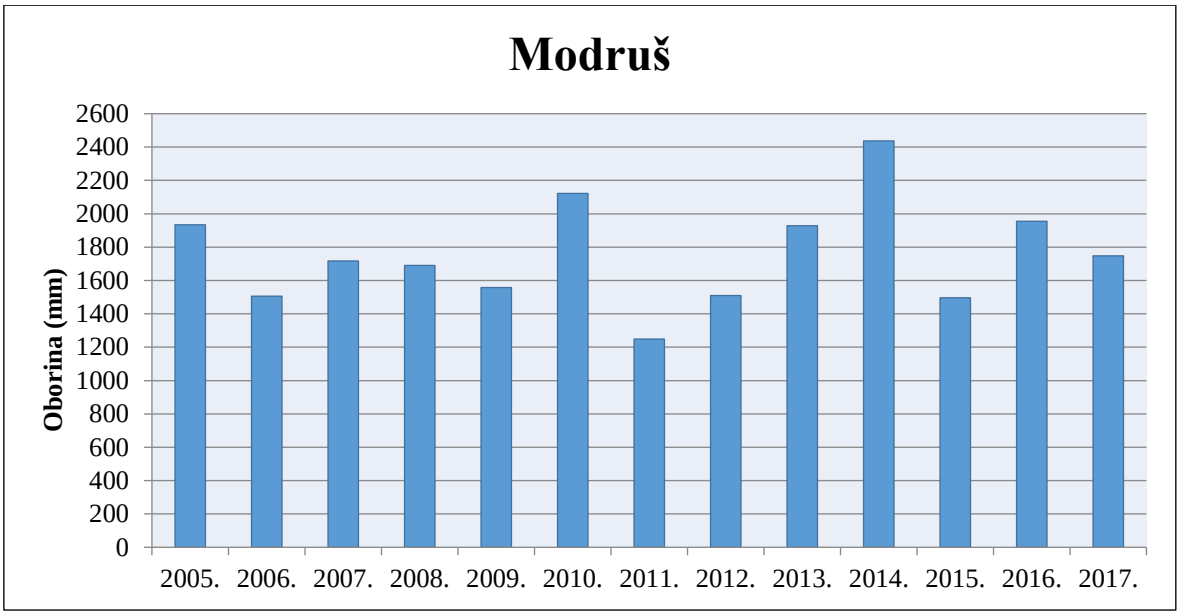
Prostorom, koji je analiziran u ovom radu, protječe 17,63 kilometra površinskog toka Mrežnice (27,5% od ukupne duljine toka), gdje se javlja ukupno 20 slapova. Vrelo Mrežnice, koje se nalazi u sklopu vojnog vježbališta „Eugen Kvaternik“, pozicionirano je na 270 m n. m., a na krajnjem sjeveru sliva postavljena je hidrološka postaja Juzbašići (oko 210 m n. m.), što znači da je ukupan pad rijeke, odnosno visinska razlika od izvora do hidrološke postaje 60 metara. Dakle, prosječan pad rijeke iznosi 0,34%, odnosno 3,4 metra po jednom kilometru duljine toka. Većina terena pripada blagim krškim zaravnima. Tek se lokalno mogu uočiti brda čiji vrhovi ne prelaze visine od 500 - 600 m n. m. Sredinom istraživanog područja dominira Plaško polje. Radi se o krškom polju, pružanja sjeverozapad – jugoistok, a kojim protječe ponornica Dretulja s pritokama. Općenito, nadmorske visine su na cijelom prostoru varijabilne, no ne prelaze 1000 m n. m., uz iznimku planinskog lanca Mala Kapela na jugozapadu, a čija visina u pojedinim točkama premašuje i 1000 m n. m.

Istraživano područje obilježava umjerena kontinentalna klima s blagim ljetima i umjereno hladnim zimama te povoljnim rasporedom oborina (http://tz-slunj.hr/clanak/zemljopisni-polozaj-i-klima). Prema dostupnim temperaturnim podacima s postaja Brinje, Plaški i Slunj, prosječna godišnja temperatura na ovim prostorima za razdoblje od 2005. do 2017. godine iznosila je 10,53 ° C. Na slici 2.4 može se vidjeti kretanje temperature zabilježeno na klimatološkoj postaji Slunj za navedeni period.

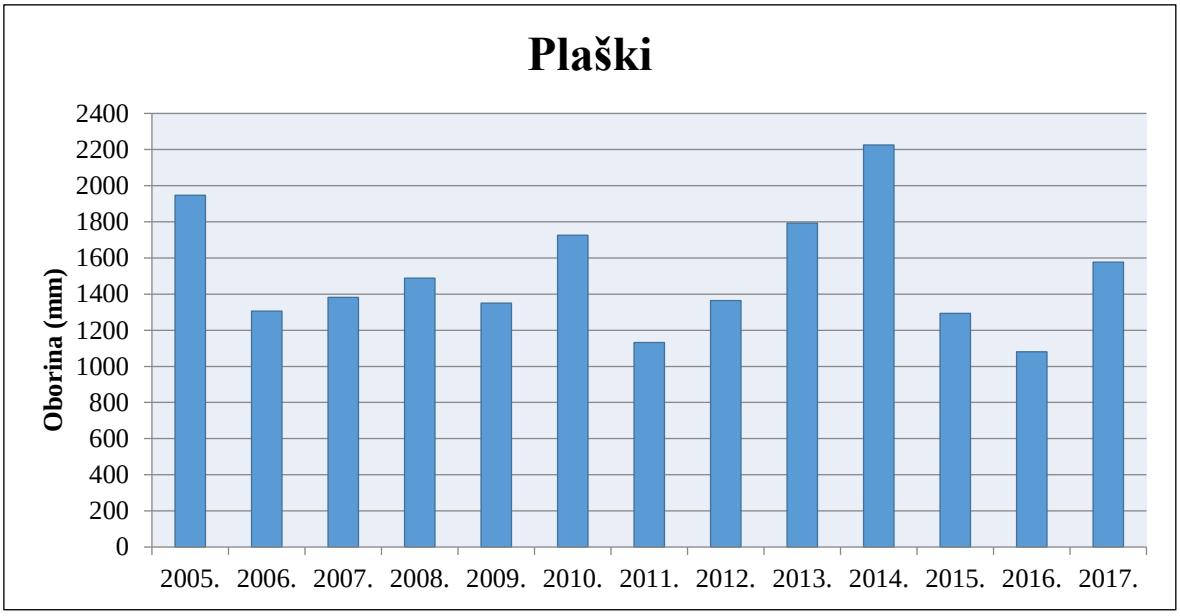



Slika 2.4. Kretanje dnevne temperature na klimatološkoj postaji Slunj za razdoblje od 2005. do 2017. godine

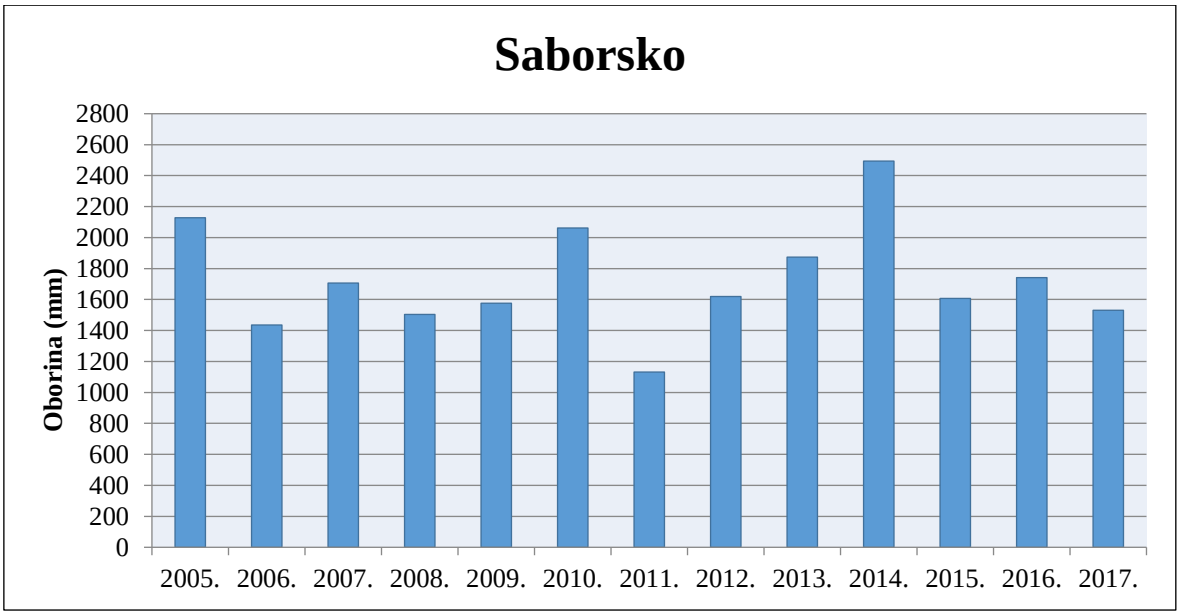
Za potrebe diplomskog rada prikupljeni su podaci sa dviju najbližih kišomjernih postaja (Modruš i Saborsko), te dviju klimatoloških (Plaški i Slunj), a iste je ustupio Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ). Na kišomjernim postajama mjere se dnevne količine oborine i vrše opažanja osnovnih meteoroloških pojava, dok se na klimatološkim postajama obavljaju motrenja osnovnih meteoroloških elemenata. Pregled prosječnih godišnjih oborina sa navedenih postaja dan je na slikama 2.5, 2.6, 2.7 i 2.8. Na grafikonima se može primijetiti manje-više ujednačen raspored količina oborina po godinama. Maksimalna oborina zabilježena je na svim postajama 2014. godine (od 1757 do 2494 mm), a minimalna 2011. na postaji Slunj (883 mm).



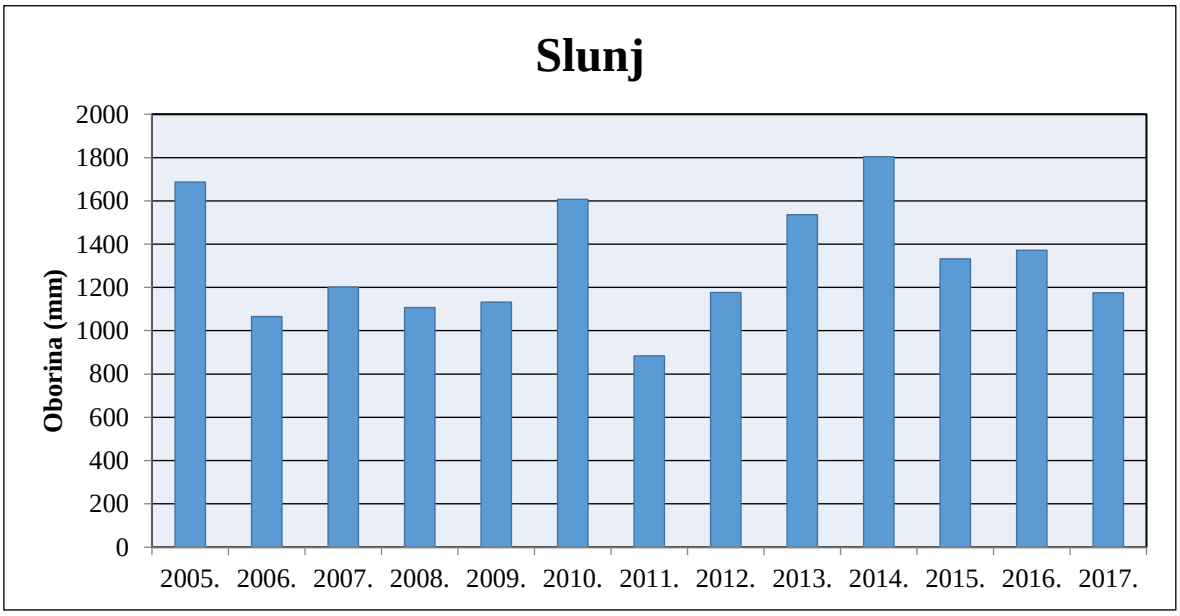

Slika 2.5. Godišnja količina oborina za vremensko razdoblje 2005. – 2017. godine – Modruš




Slika 2.6. Godišnja količina oborina za vremensko razdoblje 2005. – 2017. godine - Plaški




Slika 2.7. Godišnja količina oborina za vremensko razdoblje 2005. – 2017. godine – Saborsko




Slika 2.8. Godišnja količina oborina za vremensko razdoblje 2005. – 2017. godine – Slunj

## 3. GEOLOŠKE I STRUKTURNO - TEKTONSKE ZNAČAJKE

Geološka građa razmatranog područja odlikuje se relativno homogenom litologijom, ali u sebi sadrži i vrlo kompleksne strukturno – tektonske odnose između litoloških jedinica. Prema dostupnim informacijama iz Osnovne geološke karte SFRJ, listovi Slunj, Ogulin i Otočac (Korolija et al., 1979; Velić i Sokač, 1981; Velić et al., 1974), zajedno s odgovarajućim tumačima (Korolija et al., 1981; Velić i Sokač, 1982; Sokač et al., 1976), u nastavku je dan opis litoloških jedinica na istraživanom prostoru. Generalno, mogu se izdvojiti naslage jurske i kredne starosti, koje su prekrivene relativno tankim površinskim slojem zemlje/humusa, te nešto malo paleocenskih i kvartarnih naslaga.

Jurski sedimenti, lijaske ($J_1$) i malmske starosti ($J_3$, točnije $^1J_3$, $^2J_3$, $^3J_3$ i $J_3^{2,3}$), učestalo se javljaju na definiranom slivnom području Mrežnice. Radi se o algalnim i foraminiferskim vapnencima, grebensko – prigrebenskog facijesa, te dolomitima s rožnjacima i lećama vapnenaca. Vapnenci dominiraju u obliku mikrita i odlikuje ih bogata fosilifernost, koja je lokalno „uništena“ dolomitizacijom vapnenaca. Ove stijene pojavljuju se na sjeverozapadnom dijelu područja, većinom oko lokaliteta Rončevići, Glumci, Primišlje, Gornje Primišlje, Miloševići i Kolundžije, te u središnjem dijelu područja, sjeverno i južno od naselja Plaški. Većinom su se razvile kontinuiranom sedimentacijom u uvjetima plitkog i toplog mora na karbonatnim pragovima (lagunama). Ukupna debljina ovih naslaga kreće se oko 1900 metara.

Kredne naslage otkrivene su na većini razmatranog prostora, a javljaju se na potezu zapadno od Slunja, te jugoistočno i južno od Ogulina. Podjednako su zastupljene stijene donjokredne i gornjokredne starosti. Izgrađuju ih vapnenci, foraminiferski vapnenci, foraminifersko – algalni i prigrebenski vapnenci s uloščima dolomita ($K_1^{1+2}$, $K_1^3$, $K_1^4$ i $K_1^5$), vapnenci s uloščima dolomita ($K_1^{3-5}$), te u manjoj mjeri dolomiti, dolomitizirani vapnenci i dolomitizirane breče ($K_{1-2}$), odnosno bioakumulirani vapnenci gornje krede ($K_2^{1+2}$ i $K_2^3$). Kontakti između pojedinih katova krede su uglavnom pokriveni, ili su rasjednog karaktera. Donjokredni vapnenci sadrže mnoštvo fosilnih ostataka različitih foraminifera i algi, dok su gornjokredni nešto siromašniji zbog dolomitizacije i formiranja breča. Ove naslage neprekinuto se nastavljaju na jurske sedimente, i poput njih talože se u uvjetima plitkomorske karbonatne sedimentacije. Ukupna debljina krednih naslaga na ovom području iznosi 2400 metara.

Stijene koje datiraju iz razdoblja paleocena nalaze se na vrlo malom prostoru, isključivo oko sela Grahovci. Tamo su otkrivene heterogene naslage bioakumuliranih vapnenaca, te breče i konglomerati. Granica prema gornjoj kredi je transgresivna. Fosilifernost im je oskudna, a njihov postanak najčešće se veže uz bazenski klastični razvoj. Ukupna debljina paleocenskih stijena je oko 100 metara.

Najmlađe naslage koje se pojavljuju na istraživanom području su kvartarni sedimenti, koji su razvijeni na području Plaškog polja, kojim teče ponornica Dretulja, te na prostoru Blaćanskog jezera. Sastoje se od proluvija gornjeg pleistocena, te organogeno – barskih sedimenata i aluvija iz razdoblja holocena. Karakteriziraju ih uglavnom slabo vezani ili nevezani sedimenti, poput šljunaka, pijesaka, gline, treseta i slično, a predstavljaju trošeni materijal karbonatne podloge s viših područja, kojeg onda rijeke i potoci donose niže u uvale i polja. Ukupna debljina ovih sedimenta je oko 20 metara.

Istraživani prostor karakteriziran je tektogenetskom evolucijom unutarnjih i rubova Vanjskih Dinarida s izrazitom navlačnom tektonikom, koja se ovdje odvijala od paleozoika do danas (Hržak, 2010). Cijelo područje izrazito je tektonski deformirano i poremećeno mnogobrojnim rasjedima, čije pružanje uglavnom prati dinarski smjer pružanja (sjeverozapad – jugoistok), s blagim tonjenjem prema jugoistoku. Primjerice, list Ogulin predstavlja jedno od tektonski najkompleksnijih područja krškog dijela Dinarida u Hrvatskoj (Velić i Sokač, 1982**)**. Stijenske jedinice najčešće su relativno pomaknute uslijed mlade blokovske tektonike, pa se predisponirano pružaju u obliku vrlo uskih fragmenata, koji tvore karakterističnu ljuskavu strukturu. Jedan određeni dio rasjeda, koji je fotogeološki pretpostavljen, presijeca reversni rasjed regionalnog značaja (odjeljuje jurske naslage od krednih, koje su i same razlomljene i ponegdje navučene). Općenito, rasjedi na ovom prostoru predstavljaju vidljive „ožiljke“ zbog dezintegracije karbonatne platforme, koja je započela već sredinom mezozoika. Od ostalih značajnijih tektonskih elemenata mogu se izdvojiti četiri bore, odnosno sinklinale: jedna kod brda Drenovica, zatim kod mjesta Tobolić, a dvije zapadno i južno od vrela Mrežnice.

# 4. HIDROGEOLOŠKE ZNAČAJKE

Hidrogeološki sustav razmatranog područja već je na prvi pogled iznimno kompleksan, što je posljedica složene geološke građe i intenzivnih tektonskih pokreta u Dinaridima, koji su započeli još od kraja mezozoika. Litološka različitost naslaga uz rezultate tektonskih karakteristika preduvjet je za određenu izdašnost, provodnost i poroznost karbonatnog medija (Hršak, 2010).

Dosta poteškoća u definiranju preciznih hidrogeoloških svojstava Mrežnice, a posebice puta kojim teče podzemna voda, stvara nepodudaranje topografske i podzemne razvodnice. „Raskorak" između tih dviju razvodnica rezultat je njihovog pomicanja u prostoru, koji ovisi o hidrološkim uvjetima, odnosno sušnom i kišnom razdoblju**,** a koji onda konstantno mijenjaju razine podzemne vode (Parlov, 2018). Teoretski to znači da dio vode, koji prema topografskoj razvodnici pripada primjerice susjednoj rijeci Korani, može podzemnim putem oteći preko te razvodnice u sliv Mrežnice. Bitnu ulogu u međusobnoj (ne)povezanosti susjednih slivova na ovom prostoru igraju i brojni strukturni elementi (bore, rasjedi, navlake i dr.), koji lokalno i regionalno mogu predstavljati barijere tečenju podzemne vode. Stoga, jedini pouzdani način za određivanje hidrogeološke razvodnice u kršu jest utvrđivanje podzemnih veza pomoću postupaka trasiranja.

Međutim, da bi se mogla razumjeti hidrogeološka problematika ovog prostora visokog krša, neophodno je klasificirati stijene i sedimente na dobropropusne, srednjepropusne i relativno nepropusne naslage. Za lakše razlikovanje stijena, između ostalog, poslužila je i ranije spomenuta karta intenziteta okršenosti (pogl. 4.1). Na taj način bilo je jednostavnije utvrditi gdje oborina najbrže ulazi u podzemni kompleks i „hrani" krški sustav istraživanog dijela Mrežnice.

### 4.1. Geomorfološke značajke

Geomorfologija terena izravan je odraz djelovanja raznih čimbenika (oborine, erozijski i taložni procesi, klima, antropogeni utjecaj i sl.), što je u krškim područjima posebno izraženo. Naime, krš izgrađuju sedimentne stijene, uglavnom karbonati, a nešto manje gips i soli. Sve te stijene izrazito su podložne specifičnoj vrsti erozije – kemijskom trošenju – koje nastaje uslijed korozivnog djelovanja vode obogaćene otopljenim ugljikovim dioksidom ($CO_2$). Uz preduvjet da je stijenska masa tektonski oštećena, te ako se pridodaju vanjski faktori (naročito velika količina oborina), u navedenim stijenama doći će do procesa okršavanja i oblikovanja specifičnog krškog reljefa (Parlov, 2018). U krškoj geomorfologiji postoje dva najuočljivija površinska indikatora okršenosti terena: slabo razvijena hidrografska mreža, te pojava vrtača.

Po definiciji, vrtače (ponikve, doci) su ljevkasta ili zdjelasta udubljenja u kršu, nastale otapanjem karbonatnog materijala i njegovim urušavanjem u podzemlje. Razmatrani dio sliva Mrežnice većinom se prostire na okršenoj zaravni, osim jugozapadnog područja, gdje se smjestio planinski lanac Male Kapele. Na istraživanom području vrtače su najrasprostranjeniji znak okršavanja, pa su stoga za potrebe ovog rada označene njihove geografske pozicije na topografskoj karti 1:25 000 (Prilog 1). Detektirano je nekoliko tisuća vrtača, a svrha njihovog točnog lociranja bila je izrada karte intenziteta okršenosti (Prilog 2). Ona prikazuje prostorni raspored vrijednosti koeficijenta okršavanja, odnosno broj vrtača po $km^2$. Na karti, generiranoj iz GIS softvera ArcGIS for Desktop, pomoću alata „*Point density*“, može se vidjeti kako se najveći broj vrtača nalazi neposredno uz rijeku Mrežnicu, i do 120 vrtača po $km^2$. Zanimljivo je primijetiti kako su vrtače dominantno razvijene u smjeru sjeverozapad – jugoistok, odnosno prate pružanje većine rasjeda na tom prostoru. U preostalom području razvijeno je mnogo manje vrtača, te je stoga i taj prostor znatno slabije okršen. Vidljivo je da je visok intenzitet okršavanja vezan uz tektonski razlomljene i raspucane kredne karbonate, čime je olakšano dreniranje vode u podzemlje.

S kreiranom kartom intenziteta okršenosti moguće je bilo napraviti klasifikaciju stijena na dobropropusne, srednjepropusne i slabopropusne naslage, koja je detaljnije opisana u narednom tekstu.

Među dobropropusne stijene mogu se ubrojiti raspucani jurski vapnenci (malmske starosti; $^{1}J_3$ i $^{2}J_3$) i kredni karbonati ($K_1^{1+2}$, $K_1^{3}$, $K_1^{4}$, $K_1^{5}$ $K_1^{3-5}$ $K_2^{1+2}$ i $K_2^{3}$). To su stijene koje su iznimno podložne kemijskom otapanju, te pokazuju najveći stupanj intenziteta okršenosti. U njima je dobro razvijena mreža pukotina, kanala i kaverni, koje omogućuju izravan ulazak vode u podzemlje i njeno podpovršinsko tečenje. Na taj način voda relativno brzo može prijeći velike udaljenosti, te se ponovno pojaviti na površini u vidu krških izvora. U prilog visokoj propusnosti spomenutih stijena idu i učestale pojave vrtača, rasjeda, ponora, jama u površinskoj i podzemnoj zoni.

Srednjepropusnim stijenama mogu se smatrati lijaski ($J_1$) i malmski dolomiti ($^{3}J_3$) te malmski vapnenci i dolomiti ($J_3^{2,3}$), dolomiti, dolomitne breče i dolomitizirani vapnenci krede ($K_{1-2}$), te breče, konglomerati i bioakumulirani vapnenci paleocenske starosti (Pc). Iako i ove stijene odlikuje dobra propusnost, one također mogu imati funkciju djelomičnog zadržavanja vode, poput dolomitnih kompleksa, a imaju i nešto uže pukotine. Intenzitet vodopropusnosti ovisi o tektonskoj razlomljenosti stijena, te o prisutnosti slabopropusnih leća s primarnom poroznošću.

Slabopropusnim ili praktički nepropusnim naslagama pripadaju kvartarne tvorevine s međuzrnskom poroznošću, to jest sedimenti gornjeg pleistocena i holocena: glinoviti i prašinasti materijali s različitim udjelima šljunka i pijeska, no uglavnom se mogu smatrati slabijepropusnima, zatim organogeni sedimenti i slično. Spomenute nevezane stijene mogu imati i vrlo heterogeno raspodjelu hidrauličke vodljivosti, ali je većinom vrlo niska. Obično po ovakvim stijenama/sedimentima vode površinski otječu, a zatim poniru na kontaktu s mnogo propusnijim karbonatnim medijem. Klasičan primjer takve pojave iz obrađenog područja jest ponornica Dretulja u Plaškom Polju.

Pregledna hidrogeološka karta, s dodijeljenim značajkama propusnosti pojedinim stijenskim jedinicama, te zajedno s katastrom vodnih i speleoloških objekata prikazana je na kraju ovog rada kao Prilog 3.

U nastavku poglavlja dan je opis metodologije rada, u kojem je prikazana obrada podataka sa četiriju kišomjernih postaja te jedne hidrološke postaje, a na temelju kojih je izveden proračun bilance vode.

## 4.2. Određivanje slivnog područja

Kako je već ranije spomenuto, za potrebe ovog diplomskog rada pribavljeni su podaci o temperaturama i oborina sa četiriju kišomjernih i klimatoloških stanica (Modruš, Plaški, Saborsko i Slunj), te podaci o dnevnim protocima Mrežnice na hidrološkoj postaji Juzbašići. Sve te informacije ustupio je Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ), a obrada podataka obuhvatila je vremensko razdoblje od 2005. do 2017. godine. U tu svrhu korištena su dva softvera: ESRI ArcGIS for Desktop 10.1, odnosno njegov glavni kartografski modul ArcMap (s HTRS96 Croatia TM koordinatnim sustavom), te Microsoft Excel 2016 iz programskog paketa Microsoft Office.

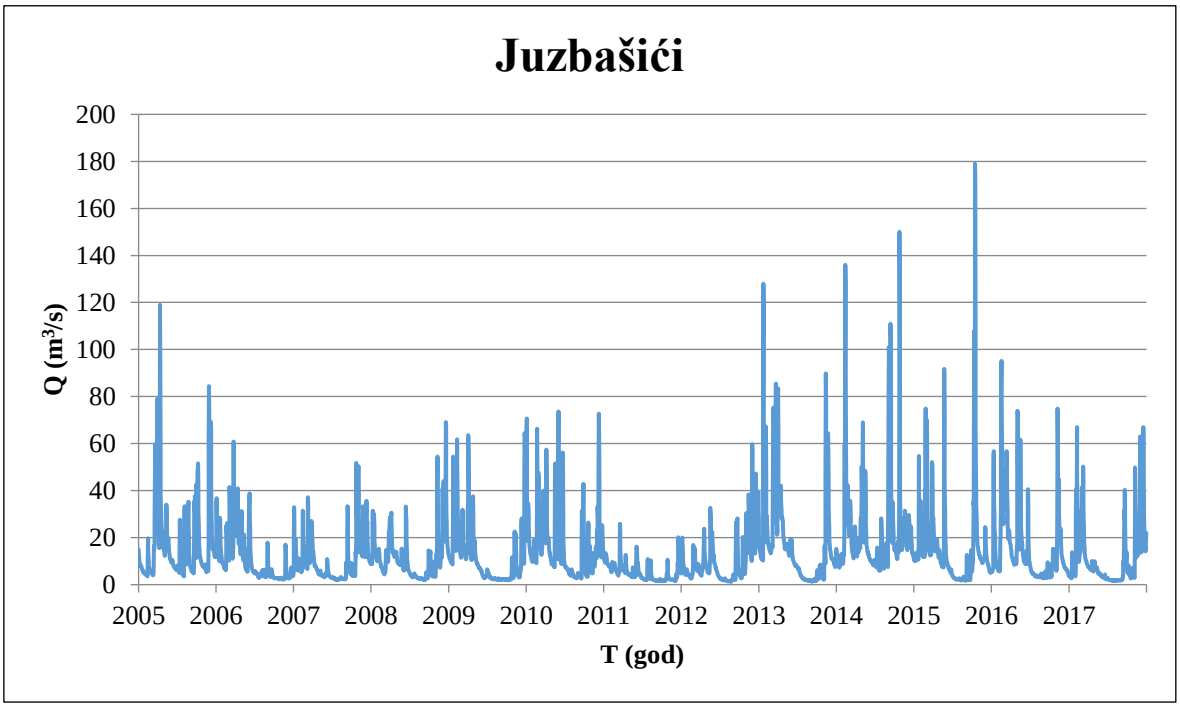
Budući da su izvorni podaci bili pohranjeni u obliku tekstualnih (ASCII) datoteka, koje su poprilično neprikladne za rad, najprije se pristupilo njihovoj konverziji u Excel programske datoteke, s .xls datotečnom ekstenzijom. Zatim su se novodobivene Excel datoteke organizirale u kalendarska mjerenja po danima, mjesecima i godinama pomoću Excelovog alata za pretvaranje teksta u stupce. Tako posložen skup podataka je potom sortiran u obliku vremenskih nizova po danima.

### 4.2.1. Obrada hidroloških podataka

Hidrološki podaci prikupljeni su s hidrološke postaje Juzbašići (slika 4.1), i to za razdoblje od 2005. do 2017. godine. Postaja neprekidno radi od 1946. godine, i na njoj se redovito mjere vodostaji i protoci gornjeg dijela toka rijeke Mrežnice.

Slika 4.1. Hidrološka postaja Juzbašići (http://hidro.dhz.hr/)

Mjerenja na postaji za spomenuto razdoblje provodila su se kontinuirano na dnevnoj bazi, pa je u obradu, za vremenski interval od sveukupno 4748 dana, uvršteno 4748 srednjih dnevnih mjerenja protoka u $m^3/s$. Podaci su posloženi u niz i iz njih je konstruiran hidrogram, odnosno grafički prikaz dnevnih protoka Mrežnice u vremenu (slika 4.2).

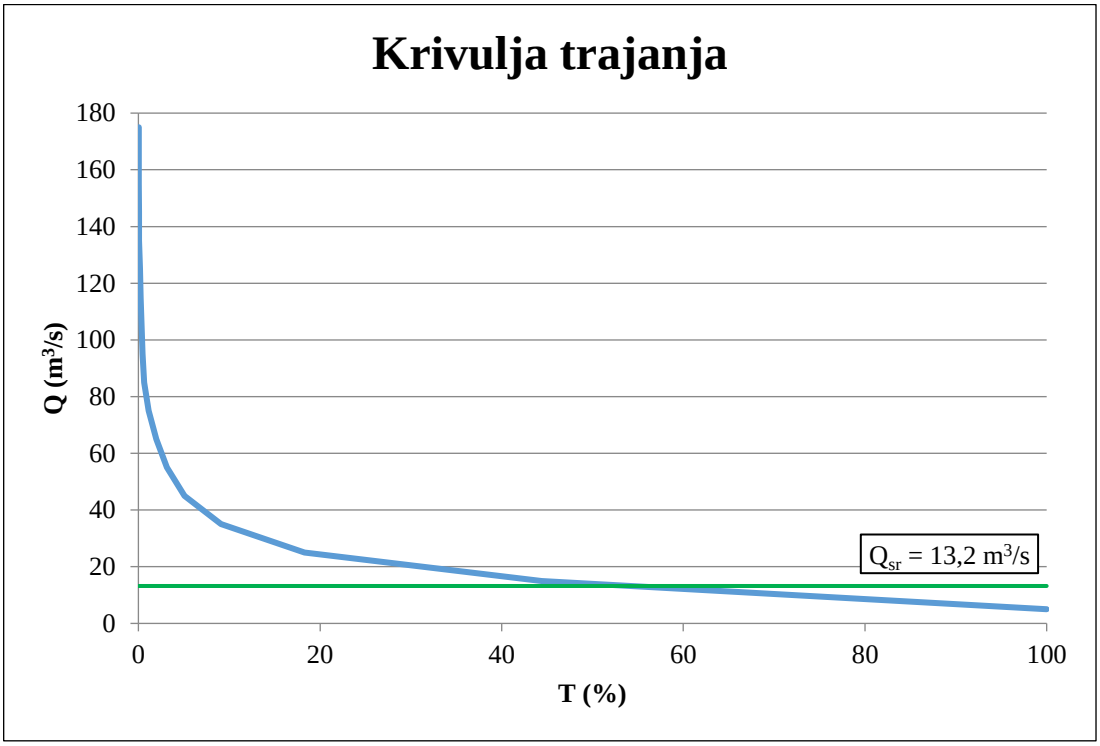



Slika 4.2. Dnevni protoci Mrežnice na hidrološkoj postaji Juzbašići u razdoblju od 2005. do 2017. godine

Na hidrogramu se može vidjeti osciliranje protoka kroz vrijeme, i uočiti neke pravilnosti u njegovom ponašanju. U pravilu Mrežnica ostvaruje najveće protoke početkom i krajem kalendarske godine, kada u sustav, zbog topljenja snijega i velikih oborina, ulazi mnogo

vode. Niski protoci javljaju se tokom sušnih ljetnih mjeseci, no važno je napomenuti kako Mrežnica nikada ne presušuje. Maksimalni protok u periodu od 2005. do 2017. godine zabilježen je 16.10.2015. i iznosio je 179 $m^3/s$, dok je minimalni protok od 1,15 $m^3/s$ zapažen 22.08.2012. Metodom aritmetičke sredine dobiven je prosječni dnevni protok, koji za cjelokupno razmatrano vrijeme iznosi 13,2 $m^3/s$.

Podaci o protocima u hidrologiji se uobičajeno prikazuju i pomoću tzv. krivulja trajanja (slika 4.3). Po definiciji, to je krivulja koja prikazuje postotak vremena ili broj dana u godini tijekom kojih je protok jednak danim količinama ili veći od njih, bez obzira na kronološki red (Žugaj, 2015). Pomoću ove krivulje može se recimo izračunati da su srednji protoci $Q_{sr}$ = 13,2 $m^3/s$ i svi protoci veći od njega trajali oko 50% vremena u 13 godina mjerenja.




Slika 4.3. Krivulja trajanja protoka i srednja dnevna vrijednost protoka za razdoblje od 2005. do 2017. godine

Općenito govoreći, hidrogeološke sustave u kršu možemo opisati pomoću tzv. „crne kutije“, unutar koje je nepoznato kretanje vode, ali se mogu odrediti ulaz i izlaz. U ovom radu upravo protoci Mrežnice na profilu Juzbašići predstavljaju izlaznu komponentu u bilanci voda, koja će biti prikazana u sljedećem potpoglavlju.

### 4.2.2. Bilanca voda

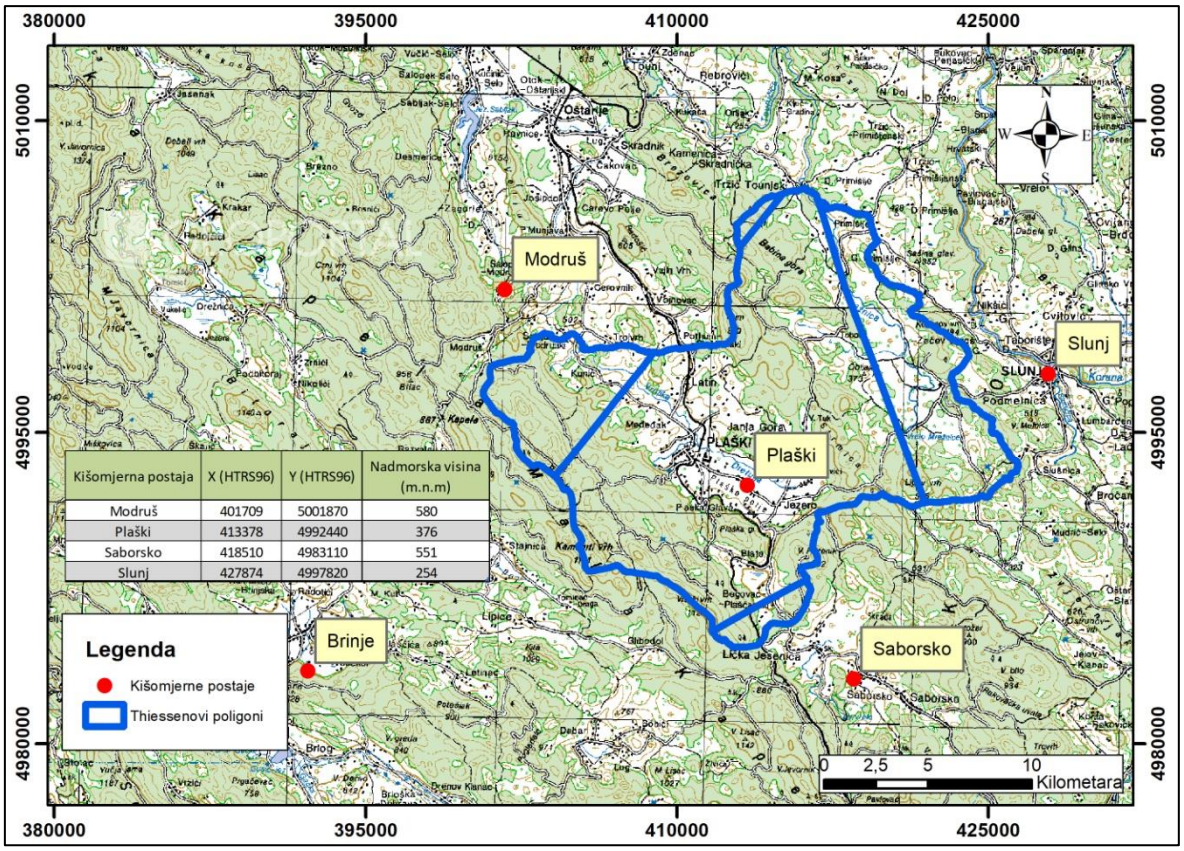
Pod bilancom podzemnih voda općenito se smatra proučavanje ulaza, izlaza i zadržavanja podzemne vode u određenom području i određenom vremenu (Parlov, 2018). Općenita jednadžba (4 - 1) vodne bilance glasi:

$$U - I = \pm \Delta W \qquad (4 - 1)$$

gdje je $U$ - ulaz vode u sustav (oborine, podzemni i površinski dotok), $I$ – izlaz vode iz sustava (isparavanje, podzemno i površinsko otjecanje), a $\Delta W$ – promjena mase (volumena) vode. Bitno je odmah naglasiti kako rezultati bilanciranja ovise o duljini vremena u kojem se provodi. Ovdje je napravljeno višegodišnje bilanciranje, koje u principu može dati vrijedne podatke o srednjem podzemnom dotjecanju u sliv, jer $\Delta W$ teži nuli (Parlov, 2018).

Ulazne podatke predstavljale su vrijednosti srednje temperature zraka u razdoblju 2005.-2017. godine, površine propusnih, srednjepropusnih i slabopropusnih/nepropusnih dijelova sliva, količine oborina, površine Thiessenovih poligona pojedinih kišomjernih stanica, te vrijednosti protoka Mrežnice na hidrološkoj postaji Juzbašići.

Prvi korak u analizi bio je odrediti utjecajne površine kišomjernih stanica, odnosno Thiessenove poligone za priljevno područje. Za to je poslužio alat „*Euclidian Allocation*“ iz ArcMap-ovog *Toolboxa*. Pomoću te naredbe program je konstruirao četiri poligona unutar definiranog slivnog područja (slika 4.4).




Slika 4.4. Podjela definiranog slivnog područja na Thiessenove poligone

Kreirani Thiessenovi poligoni omogućuju izračun srednjih godišnjih oborina ($P_{sr}$ u mm) za svaku kišomjernu stanicu, preko izraza (4 – 2):

$$P_{sr} = \sum_{i=1}^{n} \frac{a_i P_i}{A} \qquad (4-2)$$

gdje je i = redni broj kišomjerne stanice, n = ukupni broj kišomjernih stanica, $a_i$ = površina Thiessenovog poligona za i-tu stanicu [$m^2$], $P_i$ = količina oborine za i-tu postaju [mm], te A = ukupna površina sliva [$m^2$]. Utjecajne površine iznosile su za svaku godinu jednako:

- Modruš: 32 103 474 $m^2$ (32,10 $km^2$);
- Plaški: 189 992 000 $m^2$ (189,99 $km^2$);
- Saborsko: 6 279 190 $m^2$ (6,28 $km^2$);
- Slunj: 48 794 700 $m^2$ (48,79 $km^2$).

Pregled dobivenih rezultata prikazan je u tablici 4.1.

Tablica 4.1. Rezultati godišnjih prosječnih visina oborina ($P_{sr}$) dobivenih metodom Thiessenovih poligona

| Godina | MODRUŠ | PLAŠKI | SABORSKO | SLUNJ | $P_{sr}$ (mm) |
|---|---|---|---|---|---|
| 2005. | 1934,2 | 1946,9 | 2128,6 | 1687,6 | 1903,90 |
| 2006. | 1506 | 1306,4 | 1435 | 1065,2 | 1289,97 |
| 2007. | 1717,9 | 1382,6 | 1706,4 | 1202,5 | 1397,07 |
| 2008. | 1689,8 | 1489,1 | 1504 | 1107,4 | 1445,49 |
| 2009. | 1558,6 | 1349,4 | 1575,3 | 1131,9 | 1340,46 |
| 2010. | 2121,6 | 1725,5 | 2062,4 | 1606,4 | 1758,04 |
| 2011. | 1247,8 | 1132,8 | 1130,9 | 883,8 | 1102,24 |
| 2012. | 1509,4 | 1363,6 | 1620,4 | 1176,4 | 1353,35 |
| 2013. | 1928,7 | 1793,7 | 1873,8 | 1536,6 | 1765,89 |
| 2014. | 2436,7 | 2225,1 | 2494,3 | 1804,4 | 2181,64 |
| 2015. | 1496,6 | 1292,5 | 1606,3 | 1331,9 | 1330,19 |
| 2016. | 1955,7 | 1081 | 1740,9 | 1371,2 | 1248,35 |
| 2017. | 1748,2 | 1577 | 1531,2 | 1175,9 | 1525,18 |

Nakon proračuna srednjih godišnjih oborina pristupilo se određivanju veličine evapotranspiracije, koja podrazumijeva ukupno isparavanje s promatranog područja, a obuhvaća isparavanje s vodene površine, s površine tla i transpiraciju biljaka (Bačani, 2006). Ovaj je parametar dobiven pomoću formule (4 – 3) koju je dao Turc (1953):

$$E_t = \frac{P}{\sqrt{0{,}9+\frac{P^2}{L^2}}} \qquad L = 300 + 25T + 0{,}05T^3 \qquad (4-3)$$

gdje je P = visina oborina [mm], dobivena metodom Thiessenovih poligona, a T = srednja temperatura zraka [°C], dobivena usrednjavanjem temperatura preko korištenja utjecajnih Thiessenovih poligona za postaje Plaški i Slunj (s drugih postaja nema dostupnih podataka o izmjerenim temperaturama). Tablica 4.2 zorno prikazuje dobivenu veličinu evapotranspiracije u mm.

Tablica 4.2. Dobivene vrijednosti evapotranspiracije iz podataka o količini oborina $P_{sr}$ i temperaturi zraka $T_{sr}$

| Godina | $P_{sr}$ (mm) | $T_{sr}$ (°C) | L | $E_t$ (mm) |
|---|---|---|---|---|
| 2005. | 1903,90 | 7,95 | 523,76 | 506,79 |
| 2006. | 1289,97 | 8,87 | 556,78 | 515,25 |
| 2007. | 1397,07 | 9,27 | 571,54 | 532,82 |
| 2008. | 1445,49 | 9,36 | 574,86 | 537,85 |
| 2009. | 1340,46 | 9,36 | 575,06 | 532,64 |
| 2010. | 1758,04 | 8,44 | 541,19 | 519,49 |
| 2011. | 1102,24 | 8,75 | 552,38 | 498,87 |
| 2012. | 1353,35 | 9,45 | 578,40 | 536,02 |
| 2013. | 1765,89 | 8,92 | 558,46 | 534,90 |
| 2014. | 2181,64 | 10,01 | 600,30 | 580,84 |
| 2015. | 1330,19 | 9,58 | 583,33 | 538,58 |
| 2016. | 1248,35 | 9,18 | 568,09 | 521,56 |
| 2017. | 1525,18 | 9,56 | 582,55 | 547,70 |

Zaključno s izračunatim vrijednostima evapotranspiracije ostvareni su svi preduvjeti za bilanciranje voda definiranog slivnog područja Mrežnice, čiji je konačan rezultat vidljiv u tablici 4.3. Najprije je razlikom srednje količine oborine i evapotranspiracije ($P_{sr} - E_t$) određena efektivna oborina koja se infiltrira u podzemlje. Taj ukupni volumen vode koji „uđe“ u podzemlje (Ulaz) dobiven je umnoškom efektivne oborine i ukupne površine sliva. Izlazna komponenta (Izlaz) proračunata je iz aritmetičke sredine vrijednosti dnevnih protoka na profilu Juzbašići, pojedinačno za svaku godinu u razdoblju od 2005. do 2017. godine. Na samom je kraju proračuna taj izlazni dio oduzet od ulaznog (Ulaz – Izlaz).

Tablica 4.3. Proračun bilance voda za definirano slivno područje

| Godina | $E_t$ (mm) | $P_{sr}$ (mm) | Efektivna oborina ($P_{sr}$ - $E_t$) | Ulaz ($m^3/s$) | Izlaz ($m^3/s$) | Ulaz-izlaz ($m^3/s$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **2005.** | 506,79 | 1903,90 | 1397,11 | 12,28 | 16,86 | -4,58 |
| **2006.** | 515,25 | 1289,97 | 774,72 | 6,81 | 10,57 | -3,76 |
| **2007.** | 532,82 | 1397,07 | 864,25 | 7,60 | 10,30 | -2,70 |
| **2008.** | 537,85 | 1445,49 | 907,63 | 7,98 | 11,33 | -3,35 |
| **2009.** | 532,64 | 1340,46 | 807,82 | 7,10 | 11,28 | -4,18 |
| **2010.** | 519,49 | 1758,04 | 1238,55 | 10,89 | 16,02 | -5,13 |
| **2011.** | 498,87 | 1102,24 | 603,37 | 5,30 | 5,18 | 0,13 |
| **2012.** | 536,02 | 1353,35 | 817,33 | 7,18 | 9,74 | -2,56 |
| **2013.** | 534,90 | 1765,89 | 1230,98 | 10,82 | 17,10 | -6,28 |
| **2014.** | 580,84 | 2181,64 | 1600,80 | 14,07 | 21,59 | -7,52 |
| **2015.** | 538,58 | 1330,19 | 863,65 | 6,96 | 15,53 | -8,57 |
| **2016.** | 521,56 | 1248,35 | 811,38 | 6,39 | 15,29 | -8,91 |
| **2017.** | 547,70 | 1525,18 | 977,47 | 8,59 | 10,91 | -2,32 |

Dobivene brojke u posljednjem stupcu tablice 4.3 teoretski pokazuju postoji li u sustavu višak ili manjak vode. U ovom slučaju postoji očigledna razlika između ulaza i izlaza, koja ponegdje iznosi i preko 8 $m^3/s$. Prosječna bilanca iznosi $\Delta Q$ = - 4,60 $m^3/s$. Prirodno se nameće pitanje zbog čega se javlja takvo veliko odstupanje. Razlozi mogu biti brojni, no najčešći je razlog neodgovarajuća veličina slivnog područja koja je pripisana. Na primjeru Mrežnice ovaj se problem vrlo često javlja zbog, kako je već ranije spomenuto, nepodudaranja topografske i podzemne razvodnice, te znatno otežava opisivanje tokova podzemne vode. Prema rezultatima bilanciranja trebalo bi značajno povećati slivno područje, jer je izlaz veći od ulaza. Za uvid, u kolikoj mjeri treba korigirati sliv gornjeg toka Mrežnice, poslužilo je determiniranje faktora koji se u hidrogeologiji krša naziva teoretski koeficijent efektivne infiltracije, opisan u narednom potpoglavlju.

### 4.2.3. Izračun teoretske površine sliva preko teoretskog koeficijenta efektivne infiltracije

Koeficijent efektivne infiltracije (c) predstavlja odnos količine istjecanja na izvoru i oborine koja je pala na sliv, to jest postotak oborine koja se infiltrirala u podzemlje i doprla do podzemne vode (Parlov, 2018). Njegova vrijednost kreće se od 0 do 1. Veće vrijednosti koeficijenta c upućuju na veću propusnost površinskih naslaga i obrnuto. Spomenuti je odnos definiran formulom (4 – 4):

$$c = \frac{QT}{PA} \qquad (4 - 4)$$

gdje je Q = protok na hidrološkoj postaji, tj. „izlaz“ iz sustava [$m^3/s$], T = vrijeme, u ovom slučaju jedna godina [s], P = količina oborina [m] i A = ukupna površina sliva [$m^2$].

Svrha računanja koeficijenta efektivne infiltracije jest određivanje teoretske veličine sliva, koja se potom može usporediti s početnom veličinom sliva. Ako je iscrtani sliv veći od teoretskog, to znači da ga treba smanjiti na veličinu teoretskog, i obrnuto.

Da bi se uspješno proveo ovaj postupak, potrebno je najprije izračunati teoretski koeficijent efektivne infiltracije. Njegova vrijednost ovisi o stijenama koji izgrađuju istraživani prostor. Iz literature se najčešće uzimaju prosječne vrijednosti 0,5 – 0,7 za karbonatne terene, a 0,3 – 0,4 za flišno područje. U tablici 4.4 navedeni su odabrani koeficijenti za dobropropusne, srednjepropusne i nepropusne naslage.

Tablica 4.4. Odabrane vrijednosti koeficijenta efektivne infiltracije za različite naslage

| Materijal | Vrijednost koeficijenta efektivne infiltracije c (-) |
|---|---|
| Dobropropusne naslage | 0,7 |
| Srednjepropusne naslage | 0,5 |
| Slabopropusne/nepropusne naslage | 0,35 |

Vrijednosti koeficijenta efektivne infiltracije su potom pomnoženi s postotnim udjelima svih tipova naslaga po propusnosti, i zatim je sve zbrojeno:

c = (0,7 x 0,6533) + (0,5 x 0,2971) + (0,35 x 0,0496) = **0,62**

Pregled ulaznih parametara za gore prikazani izračun dan je u tablici 4.5.

Tablica 4.5. Podaci za izračun prosječnog teoretskog koeficijenta efektivne infiltracije *c*

| **Površina dobropropusnih naslaga ($m^2$) i postotni udio u ukupnoj površini** | **Površina srednjepropusnih naslaga ($m^2$) i postotni udio u ukupnoj površini** | **Površina slabopropusnih/nepropusnih naslaga ($m^2$) i postotni udio u ukupnoj površini** | **Prosječni teoretski koeficijent efektivne infiltracije *c*** |
|---|---|---|---|
| 181063528,6 | 82353676,82 | 13753388,95 | **0,62** |
| 65,33% | 29,71% | 4,96% | |

Ako se izraz 4 – 4 napiše u nešto u nešto drugačijem obliku (4 – 5):

$$A = \frac{QT}{Pc} \qquad (4 - 5)$$

dobiva se formula koja je uporabljena za izračun teoretske površine sliva u $m^2$ za sve godine obuhvaćene ovim radom (tablica 4.6). Za proračun je korišteno vrijeme u trajanju od jedne godine, te prethodno izračunati koeficijent c = 0,62.

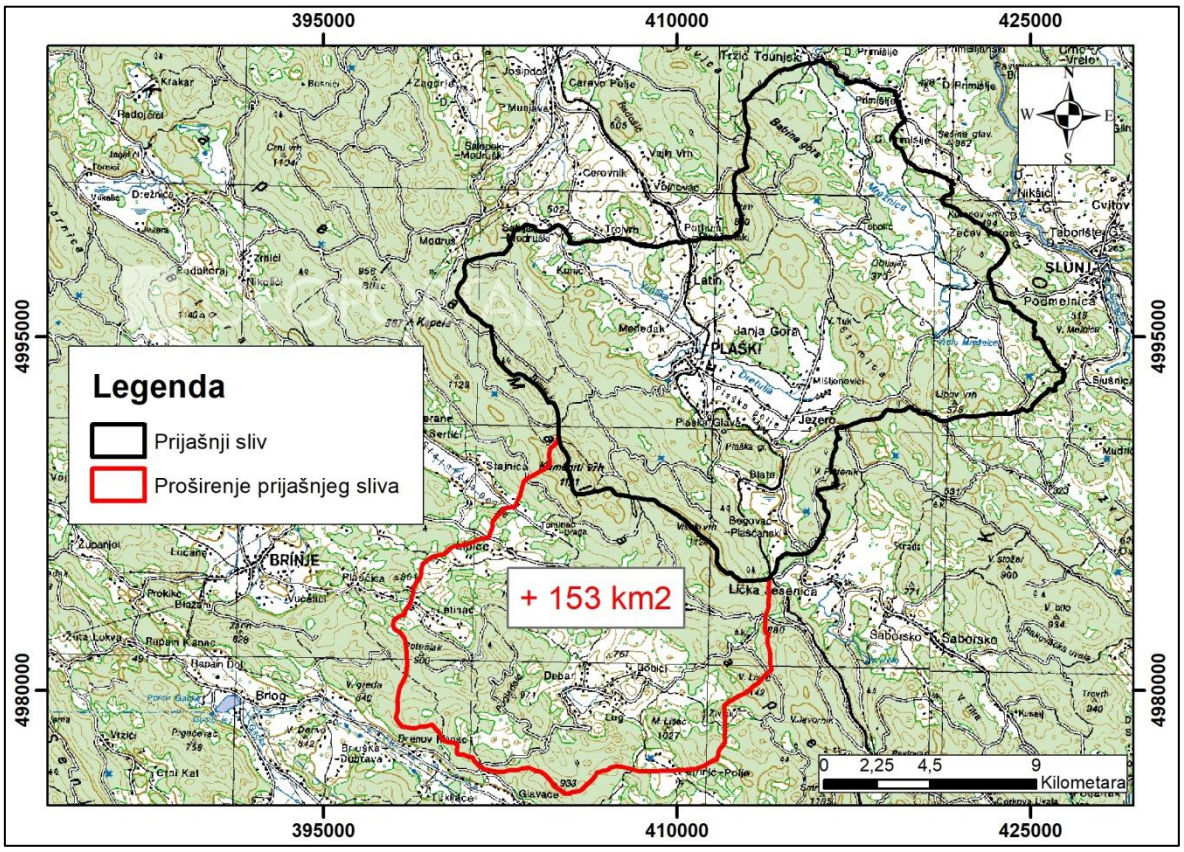
Tablica 4.6. Izračun teoretske površine sliva

| Godina | $P_{sr}$ (m) | Izlaz ($m^3/s$) | A ($km^2$) |
|---|---|---|---|
| 2005. | 1,90 | 16,86 | 450,36 |
| 2006. | 1,29 | 10,57 | 416,71 |
| 2007. | 1,40 | 10,30 | 374,92 |
| 2008. | 1,45 | 11,33 | 398,64 |
| 2009. | 1,34 | 11,28 | 428,19 |
| 2010. | 1,76 | 16,02 | 463,37 |
| 2011. | 1,10 | 5,18 | 238,93 |
| 2012. | 1,35 | 9,74 | 366,03 |
| 2013. | 1,77 | 17,10 | 492,44 |
| 2014. | 2,18 | 21,59 | 503,41 |
| 2015. | 1,33 | 15,53 | 593,83 |
| 2016. | 1,25 | 15,29 | 623,19 |
| 2017. | 1,53 | 10,91 | 363,93 |

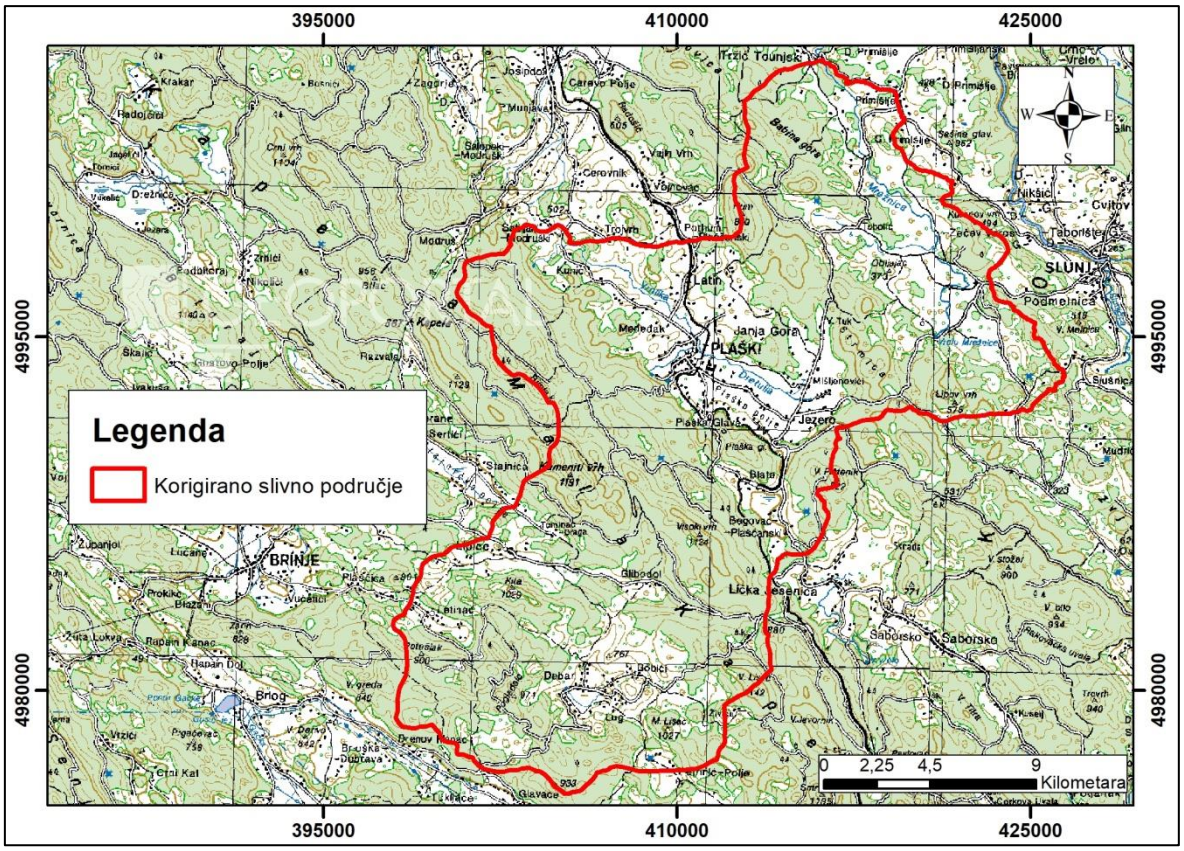
Iz proračunatih površina može se uočiti da variraju u intervalu od 238 do čak 623 km$^2$, s prosječnom vrijednošću od 439 km$^2$. Dakle, ponovno se zaključiti da je iscrtana površina sliva (277 km$^2$) neprikladna, i da bi ju trebalo korigirati, odnosno povećati za oko 150 km$^2$.

### 4.2.4. Korekcija slivne površine i ponovni izračun bilance voda

Budući da je proračun bilance voda nedvojbeno pokazao kako je definirana slivna površina gornjeg toka rijeke Mrežnice premala, pristupilo se njenoj korekciji. Prostor za proširenje sliva otvorio se na jugu, točnije na području Dabarskog polja, koje je povezano s izvorima kod Plaškog. Ovim „zahvatom“ sliv je proširen za oko 153 km$^2$, na veličinu od 430 km$^2$ (slike 4.5 i 4.6), a koja je vrlo bliska prosječnoj teoretskoj površini sliva od 439 km$^2$.




Slika 4.5. Proširenje prijašnjeg slivnog područja



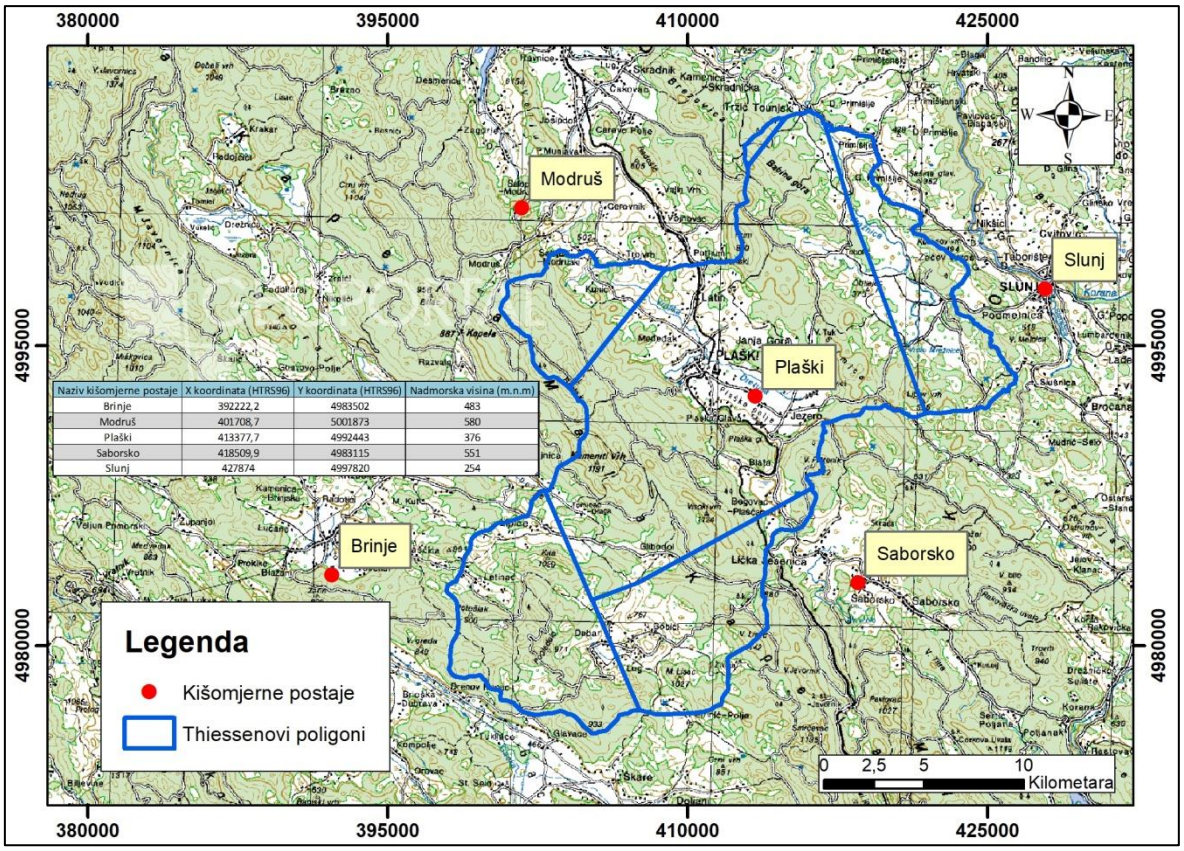

Slika 4.6. Korigirano slivno područje

Kao dodatak provedenoj korekciji sliva, na kraju rada priloženi su ispravljeni prilozi (Prilog 4, 5 i 6 – lokacija vrtača, karta intenziteta okršenosti i hidrogeološka karta).

Za razliku od prethodnog slučaja, ovaj put je u cjelokupni postupak izračuna i bilanciranja ubačena i klimatološka postaja Brinje, odnosno njeni mjereni podaci temperatura i oborina. Kako ta postaja nije svojom utjecajnom površinom dopirala do „starog“ sliva, nije bila uvrštena u raniji proračun. Stoga su ponovno kreirani pripadajući Thiessenovi poligoni, njih ukupno 5, za svaku postaju zasebno (slika 4.7).

Dobivene su i nove utjecajne površine, sljedećim redom:

- Brinje: 66 101 200 $m^2$ (66,10 $km^2$);
- Modruš: 31 611 910 $m^2$ (31,61 $km^2$);
- Plaški: 227 263 000 $m^2$ (227,26 $km^2$);
- Saborsko: 56 478 400 $m^2$ (56,49 $km^2$);
- Slunj: 48 863 600 $m^2$ (48,86 $km^2$).




Slika 4.7. Thiessenovi poligoni korigiranog sliva

Zatim su nanovo izračunate srednje godišnje oborine $P_{sr}$ (tablica 4.7).

Tablica 4.7. Rezultati godišnjih prosječnih visina oborina ($P_{sr}$) dobivenih metodom Thiessenovih poligona za korigirani sliv

| Godina | BRINJE | MODRUŠ | PLAŠKI | SABORSKO | SLUNJ | $P_{sr}$ (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2005. | 1107,8 | 1934,2 | 1946,9 | 2128,6 | 1687,6 | 1811,48 |
| 2006. | 1074,9 | 1506 | 1306,4 | 1435 | 1065,2 | 1274,99 |
| 2007. | 1471,8 | 1717,9 | 1382,6 | 1706,4 | 1202,5 | 1442,98 |
| 2008. | 1223,1 | 1689,8 | 1489,1 | 1504 | 1107,4 | 1421,60 |
| 2009. | 1103,6 | 1558,6 | 1349,4 | 1575,3 | 1131,9 | 1331,96 |
| 2010. | 1562,4 | 2121,6 | 1725,5 | 2062,4 | 1606,4 | 1760,24 |
| 2011. | 857,6 | 1247,8 | 1132,8 | 1130,9 | 883,8 | 1070,45 |
| 2012. | 1115,1 | 1509,4 | 1363,6 | 1620,4 | 1176,4 | 1348,59 |
| 2013. | 1464,1 | 1928,7 | 1793,7 | 1873,8 | 1536,6 | 1734,31 |
| 2014. | 1757,9 | 2436,7 | 2225,1 | 2494,3 | 1804,4 | 2156,44 |
| 2015. | 1172 | 1496,6 | 1292,5 | 1606,3 | 1331,9 | 1334,64 |
| 2016. | 1442,6 | 1955,7 | 1081 | 1740,9 | 1371,2 | 1320,37 |
| 2017. | 1248,4 | 1748,2 | 1577 | 1531,2 | 1175,9 | 1487,54 |

Pomoću podataka o srednjim godišnjim oborinama dobivena je veličina evapotranspiracije (tablica 4.8). Kao što je vidljivo u tablici, ni podaci temperatura nisu ponovno isti kao u prethodnom slučaju, jer je u proračun uključena i klimatološka postaja Brinje.

Tablica 4.8. Dobivene vrijednosti evapotranspiracije iz podataka o količini oborina $P_{sr}$ i temperaturi zraka $T_{sr}$ za korigirani sliv

| Godina | $P_{sr}$ (mm) | $T_{sr}$ (°C) | L | $E_t$ (mm) |
|---|---|---|---|---|
| 2005. | 1811,48 | 9,05 | 563,38 | 540,35 |
| 2006. | 1274,99 | 10,15 | 606,01 | 552,44 |
| 2007. | 1442,98 | 10,60 | 624,55 | 577,74 |
| 2008. | 1421,60 | 10,71 | 629,35 | 580,25 |
| 2009. | 1331,96 | 10,73 | 629,91 | 574,72 |
| 2010. | 1760,24 | 9,64 | 585,65 | 558,49 |
| 2011. | 1070,45 | 10,05 | 601,88 | 531,05 |
| 2012. | 1348,59 | 10,79 | 632,72 | 578,05 |
| 2013. | 1734,31 | 10,21 | 608,67 | 577,50 |
| 2014. | 2156,44 | 11,46 | 661,73 | 635,35 |
| 2015. | 1334,64 | 10,93 | 638,37 | 581,32 |
| 2016. | 1320,37 | 10,47 | 619,24 | 565,77 |
| 2017. | 1487,54 | 10,82 | 633,75 | 587,58 |

Konačno, naposljetku je ponovno provedeno bilanciranje voda, čiji su rezultati vidljivi u tablici 4.9.

Tablica 4.9. Proračun bilance voda za korigirano slivno područje

| **Godina** | **$E_t$ (mm)** | **$P_{sr}$ (mm)** | **Efektivna oborina ($P_{sr}$ - $E_t$)** | **Ulaz ($m^3/s$)** | **Izlaz ($m^3/s$)** | **Ulaz-izlaz ($m^3/s$)** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **2005.** | 540,35 | 1811,48 | 1271,13 | 17,34 | 16,86 | 0,49 |
| **2006.** | 552,44 | 1274,99 | 722,55 | 9,86 | 10,57 | -0,71 |
| **2007.** | 577,74 | 1442,98 | 865,24 | 11,81 | 10,30 | 1,51 |
| **2008.** | 580,25 | 1421,60 | 841,35 | 11,48 | 11,33 | 0,15 |
| **2009.** | 574,72 | 1331,96 | 757,24 | 10,33 | 11,28 | -0,95 |
| **2010.** | 558,49 | 1760,24 | 1201,75 | 16,40 | 16,02 | 0,38 |
| **2011.** | 531,05 | 1070,45 | 539,40 | 7,36 | 5,18 | 2,18 |
| **2012.** | 578,05 | 1348,59 | 770,54 | 10,51 | 9,74 | 0,78 |
| **2013.** | 577,50 | 1734,31 | 1156,81 | 15,78 | 17,10 | -1,31 |
| **2014.** | 635,35 | 2156,44 | 1521,08 | 20,76 | 21,59 | -0,84 |
| **2015.** | 581,32 | 1334,64 | 753,32 | 10,28 | 15,53 | -5,25 |
| **2016.** | 565,77 | 1320,37 | 754,59 | 10,30 | 15,29 | -5,00 |
| **2017.** | 587,58 | 1487,54 | 899,97 | 12,28 | 10,91 | 1,37 |

Na temelju rezultata razlike ulaza i izlaza vode iz sustava (tablica 4.9), neosporno se može ustvrditi, da korigirana slivna površina svojom veličinom mnogo bolje odgovara mjerenim podacima nego prvotno određeni sliv. Prosječna količina vode koja uđe u sustav iznosi 12,7 $m^3/s$, a ona koja izađe 13,2 $m^3/s$, što u prosjeku daje konačnu bilancu od -0,55 $m^3/s$. No, praktički gledano, u svim obrađenim godinama količina vode koje uđe u podzemlje približno je jednaka onoj koja se mjeri na izlazu, to jest na hidrološkoj postaji Juzbašići. Upravo takva spoznaja je potkrjepa principa na kojem se temelji opisivanje hidrogeoloških sredina u kršu (jednadžba 4 – 1). Ipak, kao iznimka se mogu izvoditi 2015. i 2016. godina, no na te rezultate je značajno utjecala činjenica da je nedostajalo podosta dnevnih mjerenja temperature i oborina na pojedinim stanicama, odnosno ona su bila poništena iz nekog razloga.

## 5. ZAKLJUČAK

Određivanje hidrogeoloških značajki bilo koje krške rijeke, ili barem nekog njenog dijela, kao što je to ovdje bio slučaj, nikada nije jednostavno i posve jednoznačno. Pokazalo se, da problematici u karakteriziranju i shvaćanju hidrogeologije krških terena, čijem tematskom sklopu pripada i obrađivano područje sliva gornjeg toka rijeke Mrežnice do hidrološke postaje Juzbašići, mora pristupiti sustavno i temeljito.

Preduvjet za provedbu bilo kakvih istraživanja u kršu čini poznavanje geološke građe i tektonike područja od interesa proučavanja. Oni kao takvi zajedno formiraju jedinstven „crnu kutiju“ površinskih i podzemnih prostora, kojima voda može prolaziti i/ili se zadržavati uz veće ili manje poteškoće. Ako se svemu tome u obzir pridodaju klimatološke i morfološke informacije (topografija, intenzitet okršenosti), onda se može s pravom reći da je stvorena dobra osnova za svaki daljnji rad. Konkretno, najzanimljiviji prostori za infiltraciju vode u definiranom slivu u podzemlje unutar definiranog sliva jesu okršeni i vrlo dobro propusni kredni karbonati, koji su većinom koncentrirani oko površinskog vodotoka Mrežnice. Pogodni raspored oborina, te ujednačena temperatura kroz godine pogoduju stabilnim protocima i kontinuiranom održavanju i razvoju krškog modela.

U ovom radu definirano je slivno područje gornjeg toka rijeke Mrežnice veličine 430 $km^2$. U determiniranju razvodnice pomogli su topografski i hidrogeološki odnosi, odnosno podaci o kvalitativnim trasiranjima. Preko ulaznih parametara, podataka o temperaturi i oborinama s klimatoloških/kišomjernih stanica (Brinje, Modruš, Plaški, Saborsko i Slunj), te provedenim proračunom, dobivena je prosječna količina vode koja ulazi u sustav, 12,7 $m^3/s$. Uz prosječni izlaz vode od 13,2 $m^3/s$, koji se mjeri na hidrološkoj postaji Juzbašići, ostvaruje se prosječna bilanca vode od -0,55 $m^3/s$. Ovakav rezultat može se, u okvirima mogućnosti i preciznosti kojim je rad napravljen, smatrati zadovoljavajućim. Manje – više zadovoljeno je temeljno načelo, od kojeg se i krenulo s cijelim proračunom: razlika ulaza i izlaza vode iz sustava mora pretendirati prema nuli, da bi sustav težio ravnoteži ($\Delta W \rightarrow 0$). Proračunom se jasno ispostavilo da prvotno određeni sliv od 277 $km^2$ nije ni približno mogao udovoljiti spomenutom principu.

Na kraju, ipak treba konstatirati, kako svaki dan dolazi do novih spoznaja o hidrogeološkim kompleksima u kršu. Kao što je već rečeno, svaka „crna kutija“ je specifičan i neponovljiv fenomen, stoga je svako istraživanje u toj domeni vrijedan doprinos znanstvenoj zajednici, ali i šire.

## 6. LITERATURA


BAČANI, A. (2006): Hidrogeologija 1. Rudarsko-geološko-naftni fakultet. Sveučilište u Zagrebu, 198 str.

HRŠAK, V. (2010): Stručna podloga za zaštitu porječja rijeke Mrežnice. Zagreb: Državni zavod za zaštitu prirode, 147 str.

KOROLIJA, B., ŽIVALJEVIĆ, T., ŠIMUNIĆ, A. (1979): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000 List Slunj, L 33-104. Inst. za geologiju-Sarajevo (1968-1972). Savezni geološki zavod Beograd.

KOROLIJA, B., ŽIVALJEVIĆ, T., ŠIMUNIĆ, A. (1981): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000, Tumač za list Slunj, L 33-104, Institut za geološka istraživanja Zagreb 1972., Geološki zavod Sarajevo, 43 str.

KOVAČEVIĆ, A. (2005): Hidrološke značajke Karlovačke županije. Magistarski rad. Zagreb, Knjižnica Rudarsko – geološko – naftnog fakulteta, 127 str.

PARLOV, J. (2018): Hidrogeologija krša. Skripta za akademsku godinu 2018/2019. Zagreb, Rudarsko – geološko – naftni fakultet, 186 str.

PETRIC, M. (2008): Geografski atlas za 8. razred osnovne škole. Alfa, Zagreb, 72 str.

SOKAČ, B., BAHUN, S., VELIĆ, I., GALOVIĆ, I. (1976): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000, Tumač za list Otočac L 33-115. Geološki zavod, Zagreb, Savezni geološki zavod, Beograd, 43 str.

TURC L. (1953): Le bilan d´eau des sols: relations entre les precipitations, l´ evaporation et l´ecoulement, Institut national de la recherche agronomique, Paris, 252 str.

VELIĆ, I., BAHUN, S., SOKAČ, B., GALOVIĆ, I. (1974.): Osnovna geološka karta SFRJ 1: 100 000: List Otočac L 33-115. Institut za geološka istraživanja, Zagreb, (1970.); Savezni geološki zavod, Beograd.

VELIĆ, I., SOKAČ, B. (1981): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000 List Ogulin, L 33-103. OOUR za geologiju i paleontologiju Zagreb (1969-1980). Savezni geološki zavod, Beograd.

VELIĆ, I., SOKAČ, B., ŠĆAVNIČAR, B. (1982): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000, Tumač za list Ogulin, L 33-103, Geološki Zavod Zagreb, 41 str.

ŽUGAJ, R. (2015): Hidrologija. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 538 str.

395000 410000 425000

4995000

**Tumač oznaka**

Slivno područje

Vrtače

N W E S

0 1 2 4 6 Kilometara

Prilog 1: Lokacija vrtača na slivnom području

395000 410000 425000

4995000

## Tumač oznaka

Slivno područje

**Gustoća vrtača po km2**

- 0 - 10
- 11 - 20
- 21 - 30
- 31 - 40
- 41 - 50
- 51 - 60
- 61- 70
- 71- 80
- 81- 90
- 91- 100
- 101- 110
- 111- 120

N W E S

0 1 2 4 6 Kilometara

Prilog 2: Karta intenziteta okršenosti slivnog područja

395000

410000

425000

4995000

4995000

N

W

E

S

## Tumač oznaka

- Ponori
- Crpke
- Bunari
- Rezervoari
- Cisterne
- Izvori
- Vrelo Mrežnice
- Trasiranja
- Slivno područje

**Propusnosti**

- dobro
- srednje
- slabo/nepropusno

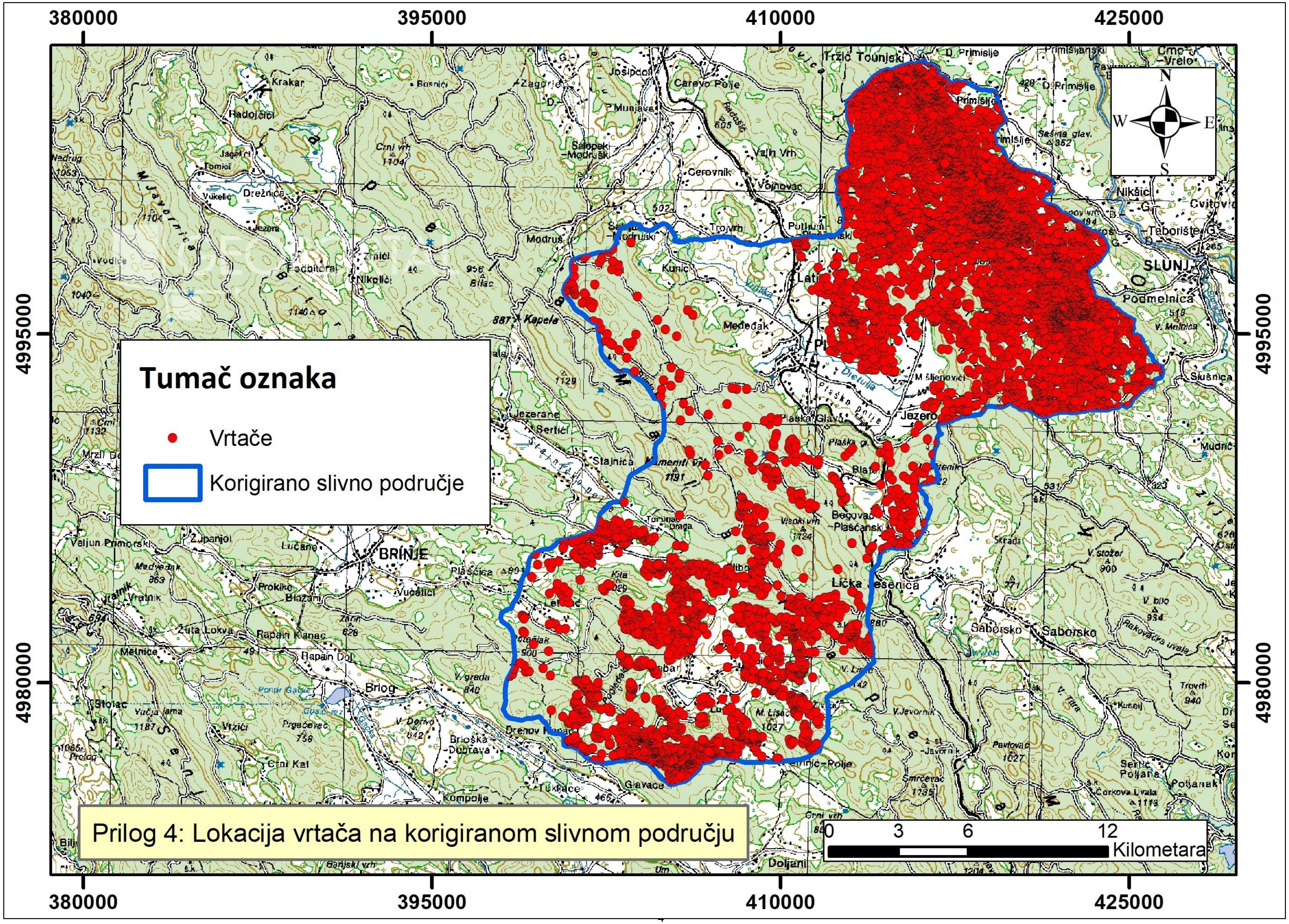
0 1,5 3 6 Kilometara

Prilog 3: Hidrogeološka karta slivnog područja

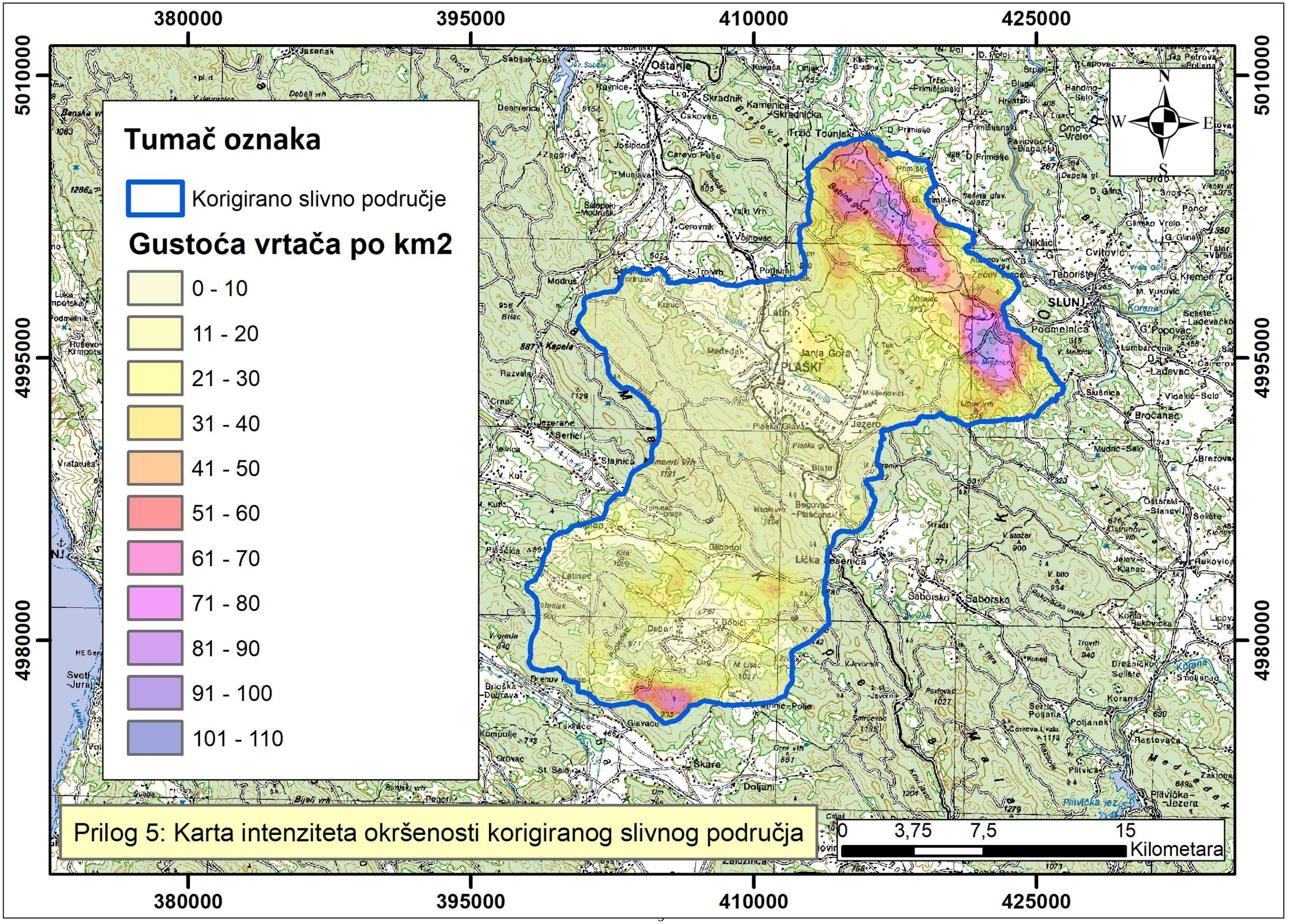
395000

410000

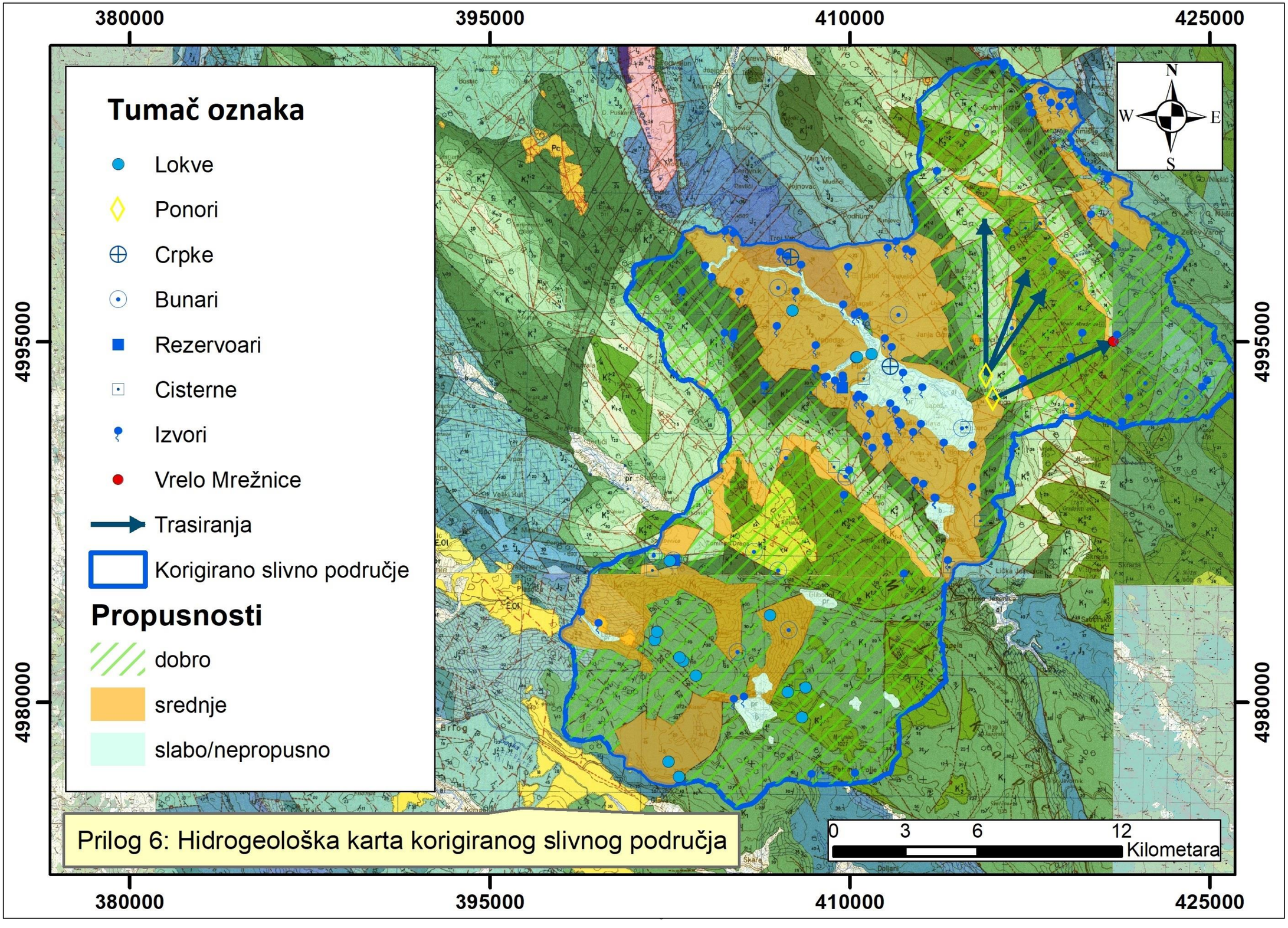
425000




Prilog 4: Lokacija vrtača na korigiranom slivnom području




Prilog 5: Karta intenziteta okršenosti korigiranog slivnog područja




Prilog 6: Hidrogeološka karta korigiranog slivnog područja