

Analiza dinamike kolebanja podzemnih voda na širem području Grobničkog polja

Vukasović, Ana

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka / Sveučilište u Rijeci**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:194:252777>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-18**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Physics - PHYRI Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
FAKULTET ZA FIZIKU

Ana Vukasović

Analiza dinamike kolebanja podzemnih
voda na širem području Grobničkog
polja

Diplomski rad

Rijeka, 2023.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
FAKULTET ZA FIZIKU

Diplomski studij Fizika

Smjer Fizika i znanost o okolišu

Ana Vukasović

Analiza dinamike kolebanja podzemnih voda na širem području Grobničkog polja

Diplomski rad

Mentorica: doc. dr. sc. Maja Oštrić

Komentorica: doc. dr. sc. Diana Mance

Rijeka, 2023.

Sažetak

Složena građa krških prostora pogoduje formiranju kompleksnih hidrogeoloških mreža s vrlo razvijenim podzemnim tečenjima. U ovom radu promatrano je tijelo podzemne vode Rijeka-Bakar koje se prostire od planinskih predjela Gorskog kotara do priobalja. Izdvojene su klimatske, geološke i hidrogeološke karakteristike prostora te su opisani sli-vovi izvora grada Rijeke i Bakarskog zaljeva. Posebno je izdvojeno područje Grobničkog polja na kojem se ova dva podsliva razdvajaju, a za koje su postojali podaci višegodišnjeg praćenja koje se provodi u svrhu obrane od poplava i zaštite voda. Odabrane su lokacije Kikovica i Ponikve za koje postoje podaci mjerenje razina podzemnih i površinskih voda od 2017. do 2023. godine. Korištenjem programa Excel i R napravljena je usporedba ra-zina podzemnih i površinskih voda na svakoj od lokacija te su podzemne vode uspoređene međusobno. Osim višegodišnjih perioda, izdvojena su i jednomjesečna sušna razdoblja i razdoblja visokih voda. Analiza podataka potvrdila je rezultate dosadašnjih istraživanja: punjenjem podzemnih vodonosnika dolazi do izlijevanja vode na površinu i stvaranja po-vremenih plavnih područja na obje lokacije. Regresijskom analizom utvrđena je izvrsna povezanost razina podzemnih i površinskih voda u uvjetima potpune saturacije podzemlja, $R=0,94$ ($p<0,001$) na lokaciji Kikovica i $R=0,97$ ($p<0,001$) na lokaciji Ponikve. Potvrđeno je i slijevanje vode s područja Kikovice (oko 300 m n. m.) prema Ponikvama (oko 100 m n. m.) gdje se voda dulje zadržava, odnosno prostiranje drenažne zone od Grobničkog polja prema Bakarskom zaljevu.

Sadržaj

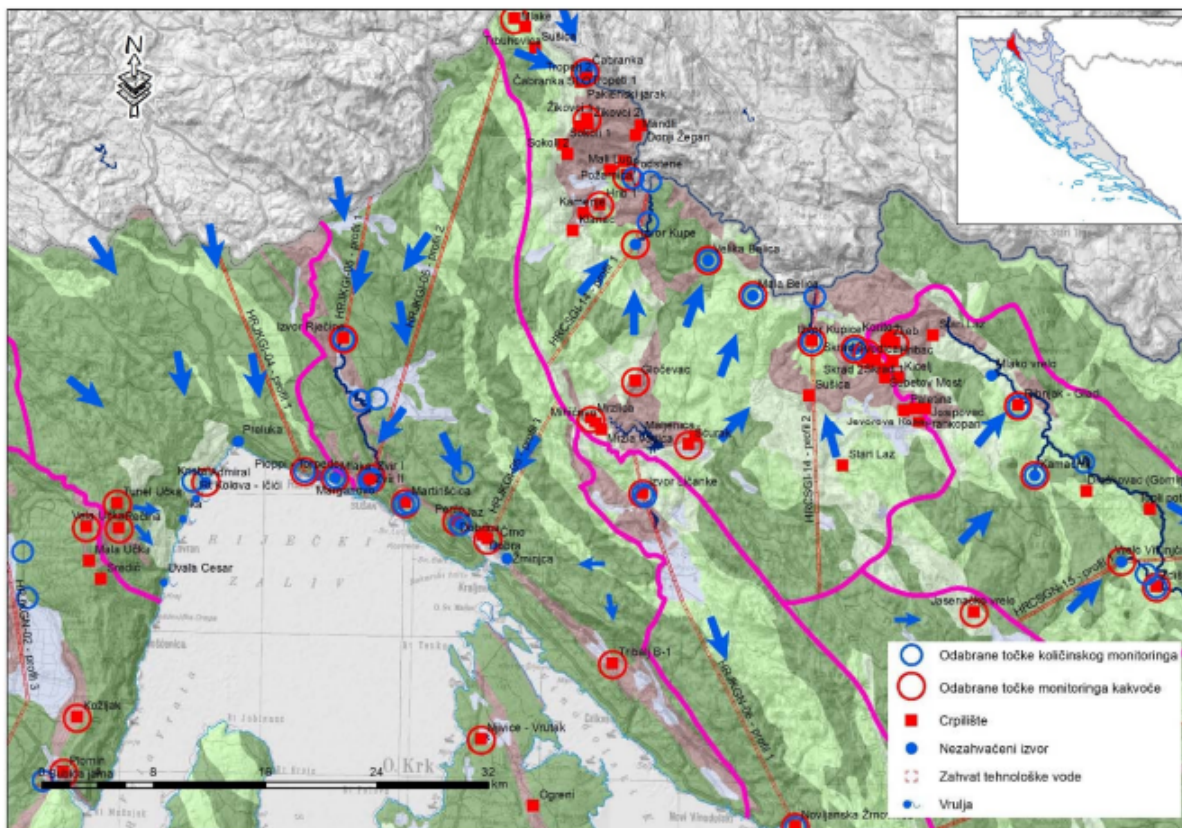
1	UVOD.....	1
2	PODRUČJE ISTRAŽIVANJA	1
2.1	Klima.....	3
2.2	Hidrogeologija.....	5
2.2.1	Sliv izvora u gradu Rijeci	8
2.2.2	Sliv izvora u Bakarskom zaljevu	9
3	PODACI.....	11
4	METODOLOGIJA.....	13
5	REZULTATI I DISKUSIJA.....	16
5.1	Usporedba razina podzemne vode DB1 i površinske vode Kikovica	20
5.2	Usporedba razina podzemne vode Ponikve i površinske vode Mali Lug .	29
5.3	Usporedba razina podzemne vode DB1 i Ponikve.....	38
6	ZAKLJUČAK	48
	POPIS SLIKA	53
	POPIS TABLICA	53

1 UVOD

Sve hrvatske rijeke pripadaju jednom od dvaju slivova, jadranskom ili crnomorskom. Jadranski sliv u potpunosti se nalazi na krškom dijelu Dinarida. U građi Dinarida prevladavaju karbonatne stijene što je, uz izloženost tog prostora velikoj količini oborina, omogućilo stvaranje kompleksne hidrogeološke mreže i bogatih podzemnih vodonosnika. Dinamika dominantnih podzemnih i slabije razvijenih površinskih tokova ovisi o hidrogeološkim prilikama zbog čega je površinu sliva teško točno odrediti. Važnu ulogu ima i odnos propusnih i nepropusnih naslaga na čijem se kontaktu formiraju krški izvori. U takve izvore ubrajaju se oni u gradu Rijeci i Bakarskom zaljevu prema kojima se slijeva voda s Grobničkog polja i okolnog planinskog prostora. Cijelo to područje predstavlja tijelo podzemne vode (TPV) Rijeka-Bakar [1]. U ovom diplomskom radu analizirani su podaci podzemnih i površinskih voda na lokaciji Kikovica na jugoistoku Grobničkog polja i lokaciji Ponikve, južnije od Grobničkog polja, u zaleđu bakarskih izvora. Visinska razlika lokacija iznosi oko 200 m, a podaci su mjereni od 2017. godine do danas. Prethodnim istraživanjima dokazano je da se istjecanje na povremenim izvorima uz rub Grobničkog polja javlja samo u vrijeme visokih razina podzemnih voda kada je podzemlje saturirano [2]. Utvrđeno je i da se podzemlje najprije počinje prazniti na području oko Grobničkog polja, a tek zatim na području Ponikava [3]. Dakle, drenažna zona se prostire od Grobničkog polja preko Ponikava do Bakarskog zaljeva. Cilj rada bio je analizom dobivenih podataka provjeriti rezultate dosadašnjih istraživanja. Za bolje razumijevanje podataka i rezultata, u radu su opisane opće klimatske, geološke i hidrogeološke karakteristike te slivovi izvorišta grada Rijeke i Bakarskog zaljeva. Napravljena je usporedba razina površinskih i podzemnih voda za svaku od dviju lokacija, ali i odnos podzemnih voda međusobno.

2 PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

TPV Rijeka-Bakar obuhvaća slivove izvora u gradu Rijeci i Bakarskom zaljevu. Ta cjelina zahvaća kompleksnu hidrogeološku mrežu koja se nalazi na području najvećeg prihranjivanja u planinskom području Gorskog kotara, a prostire se od razine mora do vrha Snježnik (1506 m n. m.) (slika 2.1) [1].



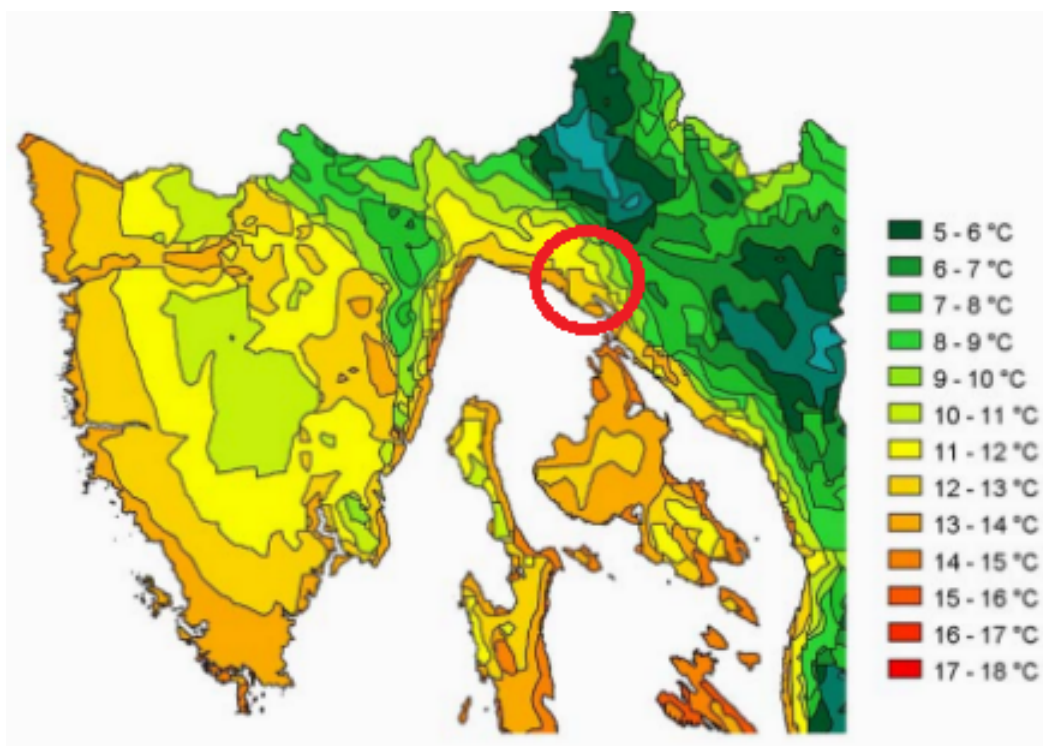
Slika 2.1: Područje istraživanja [1].

Prihranjivanje izvora iz planinskih područja dokazano je trasiranjem na području slovenskog Snežnika kada je utvrđena povezanost s bušotinama na zapadnom dijelu Grobničkog polja, izvorom Zvir i izvorom Rječine [4]. Većina površine TPV Rijeka-Bakar smještena je na Grobničkom polju (300 m n. m.) prema kojem otječe voda iz okolnog planinskog područja i gdje se razdvajaju slivovi izvorišta grada Rijeke i Bakarskog zaljeva [1]. Trasiranjem je utvrđeno da razvodnica slivova izvorišta grada Rijeke i Bakarskog zaljeva prolazi središtem Grobničkog polja te da zapadni dio Grobničkog polja pripada slivu izvora grada Rijeke, a istočni dio slivu bakarskih izvora [4]. Voda koja se iz okolnog planinskog područja slijeva na Grobničko polje uglavnom dalje otječe podzemnim putovima. Rjeđa je pojava površinskih tokova od kojih se najviše ističe rijeka Rječina. Na Grobničkom polju postoje samo povremena plavna područja koja nastaju za vrijeme visokih voda, u izrazito kišnim periodima, ali je istražnim bušotinama dokazana prisutnost aktivne podzemne vode i tijekom sušnih razdoblja. Podzemne vode s područja Grobničkog polja imale su značajan utjecaj pri formiranju jakih krških izvora u gradu Rijeci i Bakarskom

zaljevu, a njihova povezanost dokazana je brojnim trasiranjima. Podzemne vode Grobničkog polja prihranjuju izvore Zvir (minimalna izdašnost 600 l/s), kaptažni zahvat Zvir II (500 l/s), Marganovo (200 l/s), Martinšćica (400 l/s) i brojne druge izvore na području grada Rijeke. Dio podzemne vode na Grobničkom polju otječe prema Bakarskom zaljevu gdje izvire na kontaktu vodopropusnih i vodonepropusnih stijena. Zonu izviranja ovog dijela cjeline podzemne vode čine kaptažni izvori Jaz – Perilo (minimalne izdašnosti 240 l/s), Dobra (30 l/s), Dobrica (110 l/s) te niz drugih stalnih i povremenih izvora [1].

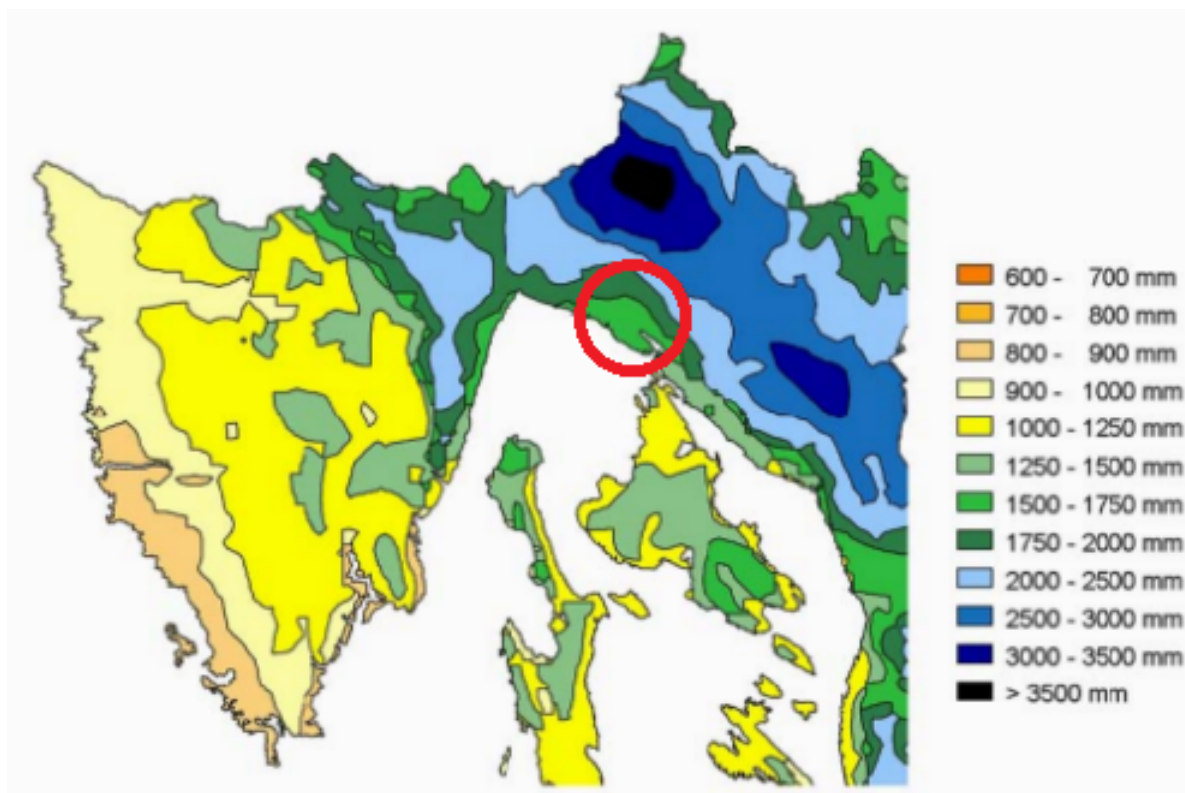
2.1 Klima

TPV Rijeka-Bakar prostire se od priobalja do najviših vrhova Gorskog kotara pa se promjenom nadmorske visine mijenjaju i klimatska obilježja. U priobalnom prostoru prevladava umjereno topla vlažna klima koja se porastom nadmorske visine postupno mijenja prema snježno šumskoj klimi sa svježim ljetom, zastupljenoj na prostoru sjeverno od izvora Rječine i Grobničkog polja. Porast nadmorske visine podrazumijeva i pad srednje godišnje temperature zraka te porast količine oborina [5]. Srednja godišnja temperatura na području grada Rijeke iznosi 13-14 °C, na području izvora Rječine i Grobničkog polja 9-11 °C, a u najvišim planinskim područjima srednja godišnja temperatura zraka naglo pada na oko 3 °C [6]. Na slici 2.2 prikazan je raspored srednjih godišnjih temperatura na području Gorskog kotara i Istre.



Slika 2.2: Prikaz srednjih godišnjih temperatura na području Gorskog kotara i Istre [4] (prema DHMZ 2002.). Crvenim krugom označeno je područje istraživanja.

Oborine su presudan čimbenik za formiranje podzemnih i površinskih tokova. Zbog sudara toplije klime priobalnog područja i hladnije kontinentalne klime, ali i orografske razvedenosti, područje TPV Rijeka-Bakar predstavlja prostor s najviše oborina u Hrvatskoj. Prosječna količina oborina kreće se od 1500 mm u priobalnom području do preko 3500 mm [5] na najvišim planinskim vrhovima koji predstavljaju prepreku zračnim masama, uzrokujući njihovo dizanje te kondenzaciju i stvaranje oborina. Količina oborina je prilično ravnomjerno raspoređena tijekom godine, s nešto većom količinom tijekom hladnijeg dijela godine. Povremeno je moguća i neravnomjerna raspodjela oborina zbog klimatskih utjecaja, odnosno zračnih strujanja [5]. Raspored srednjih godišnjih količina oborina na području Gorskog kotara i Istre prikazan je na slici 2.3.



Slika 2.3: Prikaz srednjih godišnjih količina oborina na području Gorskog kotara i Istre [4] (prema DHMZ, 2002.). Crvenim krugom označeno je područje istraživanja.

Količina i vrijeme zadržavanje snježnih oborina na području Gorskog kotara imaju izuzetnu važnost za prihranjivanje krških vodotoka i izvora. Vršna područja Gorskog kotara prekrivena su snijegom više od 100 dana u godini [6]. Duže zadržavanje snijega omogućava postupno infiltriranje vode u podzemlje što produljuje vrijeme saturacije i ima ključan utjecaj na hidrološke uvjete.

2.2 Hidrogeologija

Područje TPV Rijeka-Bakar nalazi se na dodiru dviju makrotektonskih jedinica, Adrijatika i Dinarika, zbog čega je geološka građa tog prostora izuzetno složena i ima ključnu ulogu u oblikovanju kompleksne hidrogeološke mreže [1]. U geološkom sastavu prevladavaju karbonatne naslage, konkretno dobro propusni vapnenci i slabije propusni dolomiti te njihove izmjene koje se pojavljuju u obliku breča i klastičnih naslaga. Najdominantnija vodonepropusna struktura

sastoji se od fliša [4]. Granica Adrijatika i Dinarika je planarni diskontinuitet na kojem u kontakt dolaze propusni vapnenci karakteristični za Dinarik i nepropusne naslage fliša. Kontaktno područje proteže se od Ilirske Bistrice u Sloveniji, preko vrha Obruč na „Grobničkim Alpama“ do sjeverozapada Grbničkog polja i povezuje se s pojavom velikog broja izvora među kojima su i najveći izvori grada Rijeke i Bakarskog zaljeva. Izvori na većim nadmorskim visinama duž kontaktne strukture su povremeni, a priobalni izvori predstavljaju zone stalnog istjecanja [4]. TPV Rijeka-Bakar razgranato se prostire s planinskih područja Gorskog kotara duž krila karbonatne antiklinale prema flišnoj sinklinali koja se prostire uskim područjem Bakarskog zaljeva, zaleđem izvora Martinščica i Zvir, dolinom korita Rječine, preko Studene, Klane do Ilirske Bistrice. Flišna sinklinala ima ulogu hidrogeološke barijere [4]. Grobničko polje nastalo je na sjecištu vertikalnih diskontinuiteta antiklinale pri čemu je posebno izražen rasjed na sjeverozapadu polja. Brojni poprečni i dijagonalni rasjedi imaju ključnu ulogu u stvaranju glavnih drenažnih smjerova podzemne vode prema izvoristima ispod vodonepropusnih flišnih naslaga [4].

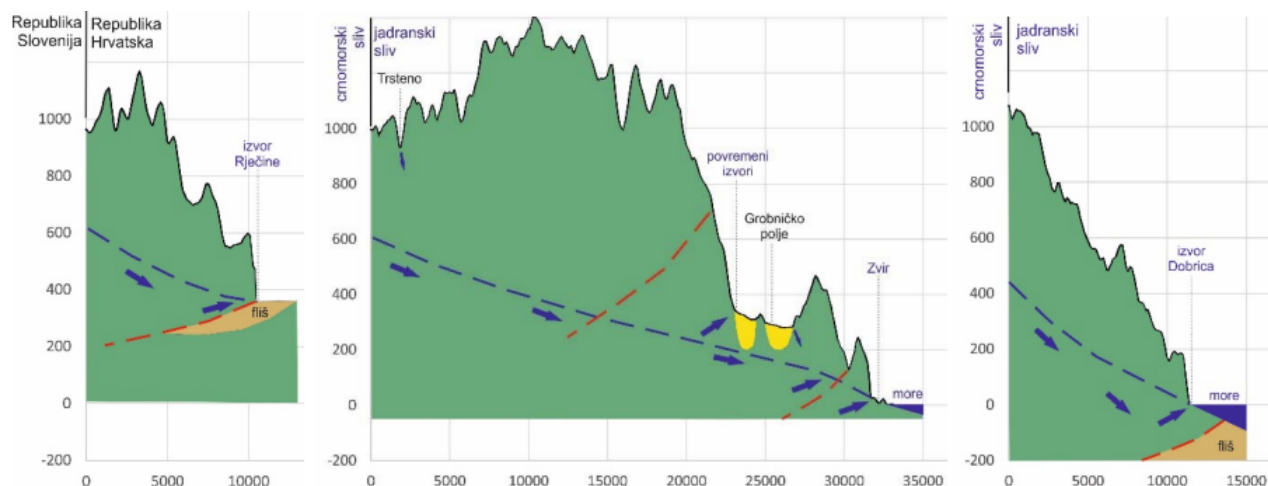
S obzirom na hidrogeološka svojstva, na području istraživanja razlikuju se dobro propusne, slabo propusne i nepropusne karbonatne stijene te tanji slojevi promjenjive propusnosti [4]. Najzastupljenije su dobro propusne karbonatne stijene nastale taloženjem mladih slojeva na starije koje čine glavne krške vodonosnike. Za ovakve stijene karakteristične su pukotine nastale mehaničkim ili tektonskim djelovanjem na postojeće stijene. U sastavu prevladavaju vapnenci koje karakterizira visoka propusnost. Infiltracija oborina uzrokuje kemijsko trošenje vapnenačkih pukotina pa njihova veličina varira od nekoliko milimetara do špiljskih sustava, a najoštećeniji slojevi postaju glavni smjerovi otjecanja. Vodu dodatno usmjeravaju barijere uglavnom izgrađene od slabo propusnih dolomitnih stijena sekundarne poroznosti [4].

Dolomitne stijene i dolomitizirani vapnenci predstavljaju slabo propusne karbonatne stijene čija je uloga stvaranje hidrogeološke barijere i usmjeravanje toka vode. Za razliku od vapnenaca, dolomitne stijene nisu toliko podložne kemijskom trošenju uzrokovanom djelovanjem vode pa se u tim slojevima rijetko mogu naći veliki morfološki oblici poput špilja i jama. Fizičkim trošenjem nastaje dolomitni pijesak koji popunjavanjem pora smanjuje propusnost stijena i ograničava kretanje podzemnih voda [4, 7].

Potpuno nepropustan sloj izgrađen je od klastičnih naslaga i fliša nastalih sedimentacijom

osnovnih nepropusnih struktura različitog granulometrijskog sastava. Veliki udio sastava čine glinovite komponente i pješčenjaci. Poroznost je primarna i sekundarna, a pukotine se vremenom zapunjavaju finim glinenim komponentama. Prisutnost gline uzrokuje plastičnost sloja zbog čega se pod utjecajem tektonskih sila više deformira. Utjecaj naslaga fliša ovisit će o njihovoj debljini, tektonskim i erozijskim procesima [8]. Na području TPV Rijeka-Bakar ovakav nepropusni sloj predstavlja viseću barijeru ispod koje teče podzemna voda i ima značajnu ulogu u formiranju smjerova otjecanja. Uloga viseće barijere fliša potvrđena je trasiranjem ponora u koritu Rječine kojim je utvrđena podzemna veza s izvorom Zvir. U slivu izvorišta Bakarskog zaljeva nepropusni sloj nalazi se na dnu vodonosnika i onemogućava dublje prodiranje podzemne vode [4].

Slojevi promjenjive propusnosti geološki su najmlađi i najčešće se pojavljuju kao nevezane naslage primarne poroznosti. Općenito, takve naslage sadrže komponente različite zaobljenosti i dimenzija, ali na području sliva riječkog izvorišta prevladavaju male frakcije sa značajnim udjelom šljunka, pijeska i gline. Debljina im je relativno mala i ne postoji mogućnost zadržavanja vode, odnosno stvaranja vodonosnika. Na tim područjima vodotoci se javljaju samo povremeno, tijekom kišnih razdoblja [4]. Na slici 2.4 prikazani su modeli kretanja podzemne vode za izvor Rječine, Zvir i Dobrice. Na višim nadmorskim visina javljaju se povremeni izvori (npr. izvor Rječine) i plavna područja kakvih ima na Grobičkom polju. Zonu stalnog izviranja predstavljaju krški izvori u probalju.



Slika 2.4: Model kretanja podzemne vode: povremeni izvor (lijevo), područje povremenog plavljenja (sredina), stalni izvor (desno) [1].

TPV Rijeka-Bakar prihranjuje se s planinskog područja Gorskog kotara i slovenskog Snežnika odakle se voda slijeva prema Grobničkom polju, a zatim dalje prema izvorima u gradu Rijeci i Bakarskom zaljevu. Temeljno hidrogeološko obilježje koje je oblikovalo TPV Rijeka-Bakar je propusnost odnosno nepropusnost slojeva. Upravo duž kontakta tih dviju cjelina postoje brojna mjesta izviranja podzemne vode s Grobničkog polja: izvor Rječine, Zvir, Martinšćica, Dobra, Dobrica i drugi.

2.2.1 Sliv izvora u gradu Rijeci

Sliv izvora grada Rijeke zauzima površinu od oko 465 km² te je najveći i najbogatiji sliv Hrvatskog primorja [4]. Slivu pripadaju izvori Zvir, Zvir 2, Marganovo i Martinšćica koji predstavljaju zone stalnog izviranja, te povremeni izvor rijeke Rječine koja se ističe najvećim površinskim vodotokom.

Izvor Rječine najviša je točka istjecanja podzemnih voda tog područja, s kotom od 325 m n. m. [4] pa tijekom ljetnih mjeseci zbog izostanka oborina u prosjeku presušuje na tri mjeseca. Bujičnog je karaktera s izraženim oscilacijama u protoku tijekom godine. Izdašnost izvora Rječine iznosi oko 60 000 l/s, a po nekim izvorima čak i do 110 000 l/s [4]. Teče flišnom dolinom te nakon 18,63 km [9] deltom utječe u more u centru grada Rijeke. Sliv Rječine i dotoci, koje uglavnom čine krški izvori, zauzimaju površinu od 53,8 km² [9]. Prostor cijelog sliva na-

lazi na slabo naseljenom području bez većih objekata i industrijske aktivnosti, a djelomično i na području Nacionalnog parka Risnjak što osigurava visoku kvalitetu vode. Najveći pritoci Rječine su Sušica s pritocima Lužac, Zala i Borovišćica, Zahumčica, Golubinka i Ričnica koji su također bujičnog karaktera i većinu godine suhi. Sušica se prihranjuje sa sjeverozapadnog dijela Grobničkog polja te utječe u gornji tok Rječine, u blizini sela Lukeži i akumulacije Valići. Korito Rječine nizvodno od brane Valići pripada srednjem i donjem toku Rječine.

Zahumčica, Golubinka i Ričnica nalaze se na južnom dijelu Grobničkog polja i predstavljaju područje povremenog izviranja s ponorom blizu Podhuma. Plavno područje zauzima oko 4 km² [9] i upućuje na znatno veću površinu podzemnog dijela sliva. U nižem dijelu Grobničkog polja, na području Kikovice, bujične vode prihvaćaju se šljunčarom. Tu se nalazi lokacija mjerenja vodostaja površinske vode Kikovica i podzemne vode, bušotina DB1.

Najniže zone izviranja podzemnih voda su stalni izvori Zvir, Zvir 2, Marganovo i Martinšćica. Izvor Zvir, izdašnosti do 20 000 l/s [4], koristi se za vodoopskrbu u periodu kada Rječina presuši što ga čini najvažnijim izvorom vodoopskrbne mreže. Karakteristične su velike oscilacije u izdašnosti, ali za razliku od izvora Rječine, Zvir je stalan izvor koji ne presušuje. U blizini izvora Zvir, nalazi se kaptažni izvor Zvir 2 ukupne izdašnosi oko 600 l/s [4]. Izveden je kao rezerva vodoopskrbe tijekom izuzetno sušnih perioda te je, iz tog razloga, upotrijebljen 2003. godine. Zdenac Marganovo minimalne izdašnosti 200 l/s [9] predstavlja potencijalni izvor vodoopskrbe te postoje planovi o njegovom povezivanju sa Zvirom 2. Izvorište Martinšćica još je jedno područje stalnog izviranja koje je također postalo zanimljivo zbog mogućeg češćeg presušivanja izvora Rječine. Izvorište uključuje 10 zdenaca na priobalnom području zbog čega tijekom izrazito sušnih perioda dolazi do njihova zaslanjenja. Trenutno se s tog izvorišta koristi oko 300 l/s [4], ali su u planu rekonstrukcijski radovi kojima bi se povećali vodoopskrbni kapaciteti.

2.2.2 Sliv izvora u Bakarskom zaljevu

Većina sliva izvora Bakarskog zaljeva prostire se Gorskim kotarom i jugoistočnim dijelom Grobničkog polja, a zauzima površinu od oko 250 m² [4]. Uključuje priobalne kaptažne izvore Perilo, Dobra i Dobrica. Povezanost navedenih izvora s podzemnim vodama Grobničkog polja potvrđena je brojnim trasiranjima. Budući da se izvori Bakarskog zaljeva nalaze na malim nadmorskim

visinama, tijekom sušnih ljetnih mjeseci često dolazi do njihova zaslanjenja. Osim toga, izvor Perilo izložen je onečišćenju zbog guste naseljenosti na području Škrljeva i industrijske zone Kukuljanovo. Minimalne izdašnosti izvorišta Bakarskog zaljeva iznose: Perilo 200 l/s, Dobra 60 l/s i Dobrica 110 l/s [4]. Na izvorima Dobra i Dobrica tijekom sušnih perioda ponekad dolazi do zaslanjenja, ali rjeđe nego na izvoru Perilo. Djelovanjem tektonskih sila i erozije u zaleđu Bakarskog zaljeva, u naselju Ponikve, formirana je vrtača gdje je izvedeno prvo trasiranje u Hrvatskoj. Dno vrtače dijeli se na Mali i Veli Lug. Za vrijeme kiše Mali i Veliki Lug plave, a tijekom obilnih oborina spajaju se u privremeno jezero [9, 10]. Slika 2.5 prikazuje područje Ponikve tijekom visokih voda i u sušnom periodu.



Slika 2.5: Područje Ponikve tijekom visokih voda (gore) i sušnog perioda (dolje) [11].

3 PODACI

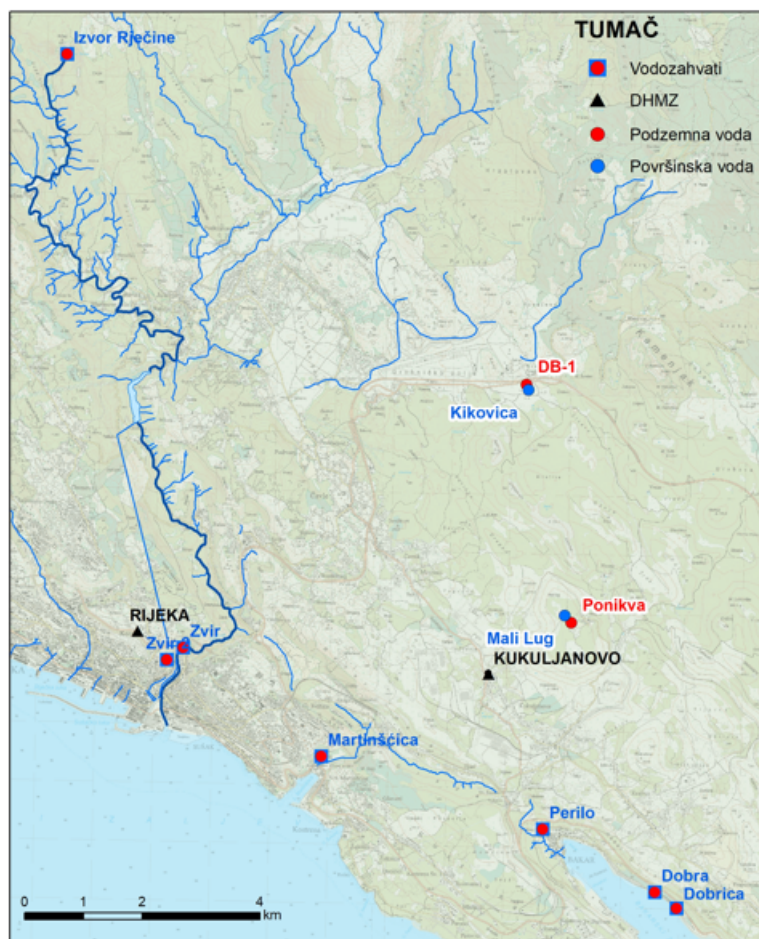
U radu se koriste podaci o razinama podzemnih i površinskih voda dobiveni od Hrvatskih voda te podaci o količini oborina dobiveni od Državnog hidrometeorološkog zavoda. Na dvije lokacije (Kikovica i Ponikve) izvedene su bušotine za praćenje razina podzemnih voda, a u neposrednoj blizini svake bušotine prati se i vodostaj površinskih voda. Šljunčara Kikovica nalazi se na samom rubu Grobičkog polja, a vrtača Ponikve smještena je južnije, prema izvorima u Bakarskom zaljevu. Razine podzemnih voda izražene su u apsolutnim vrijednostima (u jedinici m n. m.), to jest u odnosu na kotu ušća. Razine površinskih voda izražene su u relativnim vrijednostima, računate od površine, a dane su u centimetrima za Kikovicu i u metrima za Mali Lug. Za vodostaje su dobivene satne i/ili srednje dnevne vrijednosti.

Podaci o srednjoj dnevnoj količini oborina u milimetrima dobiveni su od Državnog hidrometeorološkog zavoda. Količina oborina mjerena je na dvije lokacije: na glavnoj, automatskoj postaji Rijeka i na klimatološkoj postaji Kukuljanovo. Postaja Kukuljanovo nalazi se 1,5 km zapadnije od lokacije Ponikve, odnosno puno je bliže području istraživanja, nego postaja Rijeka (3.1).

U tablici 1 navedene su nadmorske visine i koordinate lokacija u HTRS96 zapisu te dubine na koje su postavljeni uređaji za kontinuirano praćenje razine podzemne vode (tzv. diveri).

Tablica 1: Lokacije prikupljanja podataka.

	lokacija	geografska dužina	geografska širina	kota	dubina divera
podzemne vode	DB1	345391	5028153	303 m n. m.	99,8 m
	Ponikve	346157	5024096	114 m n. m.	101 m
površinske vode	Kikovica	345429	5028064	300 m n. m.	
	Mali Lug	346106	5024171	101.54 m n. m.	
količina oborina	Kukuljanovo	344742	5023225	313 m n. m.	
	Rijeka	338772	5023955	120 m n. m.	



Slika 3.1: Lokacije prikupljanja podataka.

U tablici 2 prikazani su periodi za koje su dobiveni podaci. Svaka godina podijeljena je na tri dijela, na periode od 4 mjeseca. Bijelom bojom označeni su periodi za koje nema podataka, svijetlo siva boja predstavlja djelomične podatke, a tamno siva potpune podatke.

Tablica 2: Pregled postojećih podataka.

	lokacija/godina	2016.	2017.	2018.	2019.	2020.	2021.	2022.	2023.
podzemne vode	DB1								
	Ponikve								
površinske vode	Kikovica								
	Mali Lug								
količina oborina	Kukuljanovo								
	Rijeka								

Za mjerenje vodostaja korištene su dvije vrste divera, Diver 10m i Diver 100m. Diver 10m koristi se za mjerenje vodostaja površinskih voda, a Diver 100m za mjerenje vodostaja podzemnih voda. Na svakoj od lokacija (Kikovica i Ponikve) korišten je po jedan Baro-Diver

kojim se mjeri atmosferski tlak, a koristi se za kompenzaciju podataka [12].

Podaci o srednjim dnevnim razinama podzemnih i površinskih voda dobiveni su u datoteci oblika .xlsx, poredani kronološki s pripadnim datumima od početka do kraja perioda mjerenja. U datoteci su navedene razine podzemnih voda ispod kojih diver ne može mjeriti vodostaj zbog dubine na koju je postavljen. Ispod te granice je "suho", a odgovara razlici nadmorske visine lokacije i dubine bušotine. Na lokaciji bušotine DB1 tijekom perioda mjerenja koristili su se različiti diveri za mjerenje tlaka kojima su se kompenzirali podaci o visini vodostaja. Iz tog razloga, granica ispod koje je "suho" u bušotini DB1 iznosi 203,5; 203,8 ili 203,3 m n. m. Analizom podataka može se odrediti koja od navedenih vrijednosti je granica "suhog" u nekom periodu jer će se taj broj ponavljati nekoliko dana. U bušotini Ponikve "suho" je ispod 13,12 m n. m. Dodatna provjera suhih perioda može se napraviti i grafičkim prikazom razina podzemnih vode tijekom vremena. Suhi periodi će na grafu biti prikazani vodoravnom linijom minimalne vrijednosti. Za površinske vode, presušivanja su očita jer iznose 0 m odnosno 0 cm.

Podaci o količini oborina također su dobiveni u .xlsx datoteci, ali u obliku tablice s danima i mjesecima za svaku godinu. Bilo ih je potrebno presložiti u vremenski niz s odgovarajućim datumima počevši od 11. siječnja 2016. (kada počinje vremenski niz podataka dobivenih s divera u bušotini DB1).

4 METODOLOGIJA

Osnovna obrada podataka podrazumijeva određivanje temeljnih statističkih veličina: aritmetičke sredine, standardne devijacije, varijance, raspona, minimalne i maksimalne vrijednosti. Aritmetička sredina $\bar{x}$ jedna je od mjera centralne tendencije, a računa se formulom:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (4.1)$$

gdje su x_i članovi niza, a N broj članova niza. Standardna devijacija, varijanca i raspon predstavljaju mjere odstupanja, raspršenosti oko srednje vrijednosti. Varijanca s^2 je prosječno kvadratno odstupanje od prosjeka, odnosno aritmetička sredina zbroja kvadriranih odstupanja:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1} \quad (4.2)$$

Odstupanje podataka od srednje vrijednosti intuitivnije je izražavati standardnom devijacijom s koja je definirana kao drugi korijen varijance:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (4.3)$$

Raspon je razlika najveće i najmanje vrijednosti u nizu podataka. Pojedine ekstremne vrijednosti mogu znatno povećati raspon.

Osim određivanja osnovnih statističkih veličina, napravljeni su grafovi ovisnosti razina podzemnih voda, površinskih voda i količina oborina tijekom vremena. Zbog lakše usporedbe neki su podaci prikazani skupnim grafovima. Za periode kada su diveri bilježili vodostaje (iznad granice "suhog"), odnosno površinske vode nisu presušile, određena je funkcija prilagodbe te je napravljena korelacijska analiza. Za to je bilo potrebno iz podataka o razinama podzemnih voda izbrisati vrijednosti kada je "suho", a za površinske vode vrijednosti vodostaja 0 m, odnosno 0 cm. Korelacijskom analizom ispitujemo stupanj povezanosti dviju varijabli određivanjem koeficijenta determinacije. Koeficijent determinacije R^2 govori koliko dobar model je korištena funkcija prilagodbe. Kada je povezanost varijabli linearna, opisana jednadžbom $y=a \cdot x+b$, moguće je odrediti koeficijent korelacije R . U tablici 3 prikazana je ocjena korelacijskih veza [13]:

Tablica 3: Ocjena korelacijskih veza.

R^2	$ R $	opis
1	1	odnos varijabli je potpuno definiran linearnom funkcijom
0,99-0,57	0,99-0,76	vrlo dobra do izvrsna povezanost
0,56-0,26	0,75-0,51	umjerena do dobra povezanost
0,25-0,07	0,50-0,26	slaba povezanost
0,06-0,00	0,25-0,00	nema povezanosti

Za koeficijent korelacije bitno je ispitati statističku značajnost za što je korišten program R 4.1.3 [14]. Za odabir testa potrebno je znati raspodjeljuju li se podaci normalno. Normalnost raspodjele podatka može se vizualno ispitati izradom histograma, no pouzdanije je korištenje statističkih testova koji testiraju značajnost razlike teorijske i empirijske raspodjele. Histogram podataka koji se raspodjeljuju normalno imat će zvonolik oblik sa središtem oko aritmetičke sredine. Statistička značajnost koeficijenta korelacije određuje se Pearsonovim testom za normalne raspodjele, odnosno Spearmanovim testom za podatke koji se ne raspodjeljuju normalno. Rezultati testiranja interpretirani su na razini značajnosti od 5%.

Povezanost dvaju vremenskih nizova koji su međusobno pomaknuti za vremenski period k određuje se kroskorelacijom. Neka članovi jednog niza budu $x(t)$, članovi drugog niza $y(t+k)$ i $t=1, 2, \dots, N$. Izraz kojim se računaju kroskorelacijski koeficijent glasi:

$$r(k) = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (x(t) - \bar{x}) * (y(t+k) - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{t=1}^{N-k} (x(t) - \bar{x})^2 * \sum_{t=1}^{N-k} (y(t+k) - \bar{y})^2}} \quad (4.4)$$

U programu funkcija *ccf* [15] računa kroskorelacijski koeficijent za različite vremenske pomake $|k|=0, 1, \dots, N-1$. Pomak je pozitivan ako se $x(t)$ ostvaruje prije $y(t+k)$, a negativan ako se $y(t+k)$ ostvaruje prije $x(t)$ [16]. Naredbom *print(ccf)* dobiva se graf kroskorelacijskih koeficijenata u ovisnosti o vremenskim pomacima iz čega je najlakše vidjeti kada je povezanost između podataka najbolja. Na grafu je istaknuta i granica gdje koeficijent kroskorelacije počinje biti statistički značajan (plava iscrtkana linija).

5 REZULTATI I DISKUSIJA

U tablici 4 prikazani su osnovni statistički parametri za razine podzemnih i površinskih voda, a u tablici 5 za količine oborina:

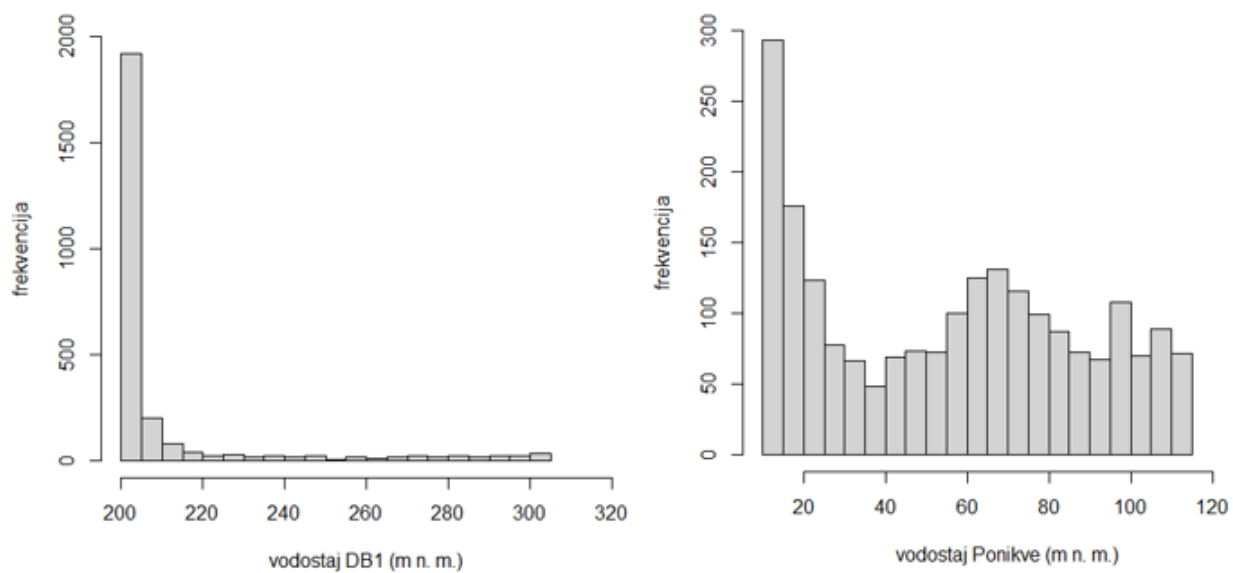
Tablica 4: Osnovne statističke veličine razina podzemnih i površinskih voda.

	podzemne vode		površinske vode	
	DB1 (m n. m.)	Ponikve (m n. m.)	Kikovica (cm)	Mali Lug (m)
aritmetička sredina	211,70	55,99	10	1,51
standardna devijacija	21,78	32,10	37	3,32
medijan	203,52	58,67	0	0,00
minimum	202,96	13,06	0	0,00
maksimum	304,30	113,70	399	13,50
raspon	101,61	100,64	399	13,50

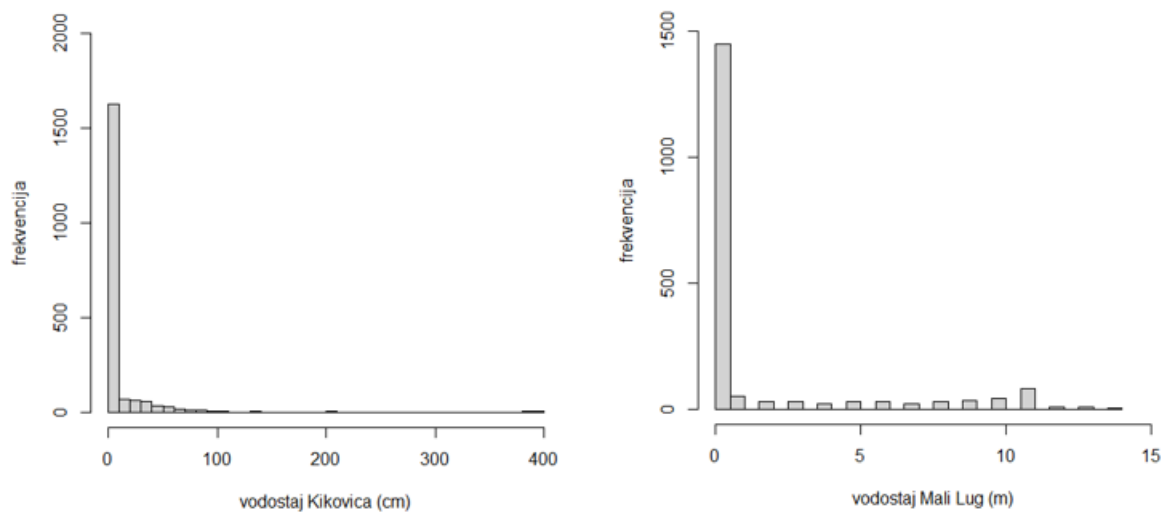
Tablica 5: Osnovne statističke veličine količina oborina.

	Kukuljanovo (mm)	Rijeka (mm)
medijan	0,00	0,00
minimum	0,00	0,00
maksimum	206,00	287,50
raspon	206,00	287,50
ukupno	12 070,70	11 796,00

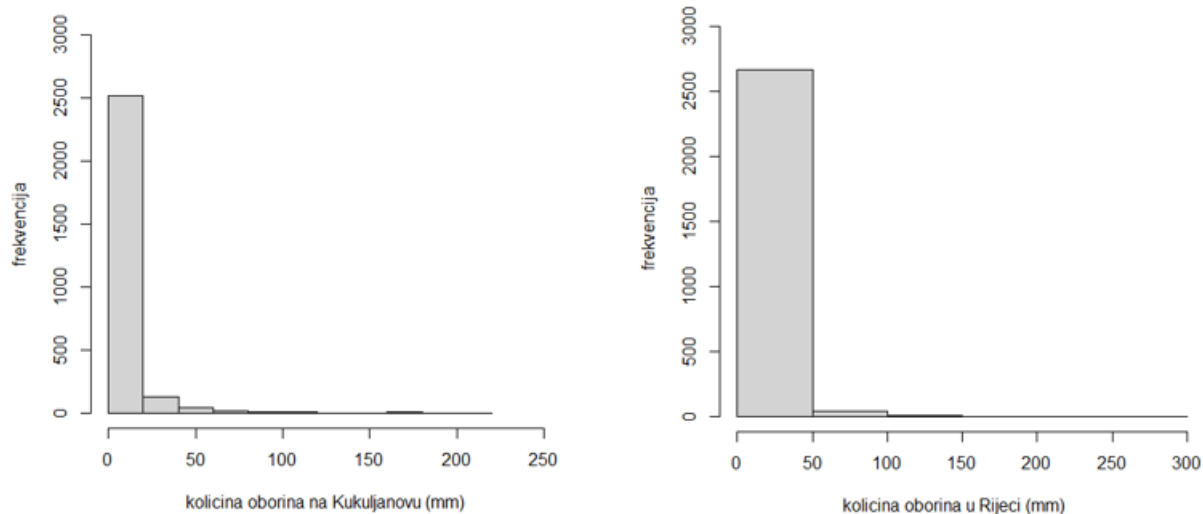
Osim određivanja glavnih statističkih veličina, napravljeni su i histogrami kako bi se lakše vidjela raspodjela podataka (slike 5.1, 5.2, 5.3).



Slika 5.1: Histogram razina podzemnih voda.



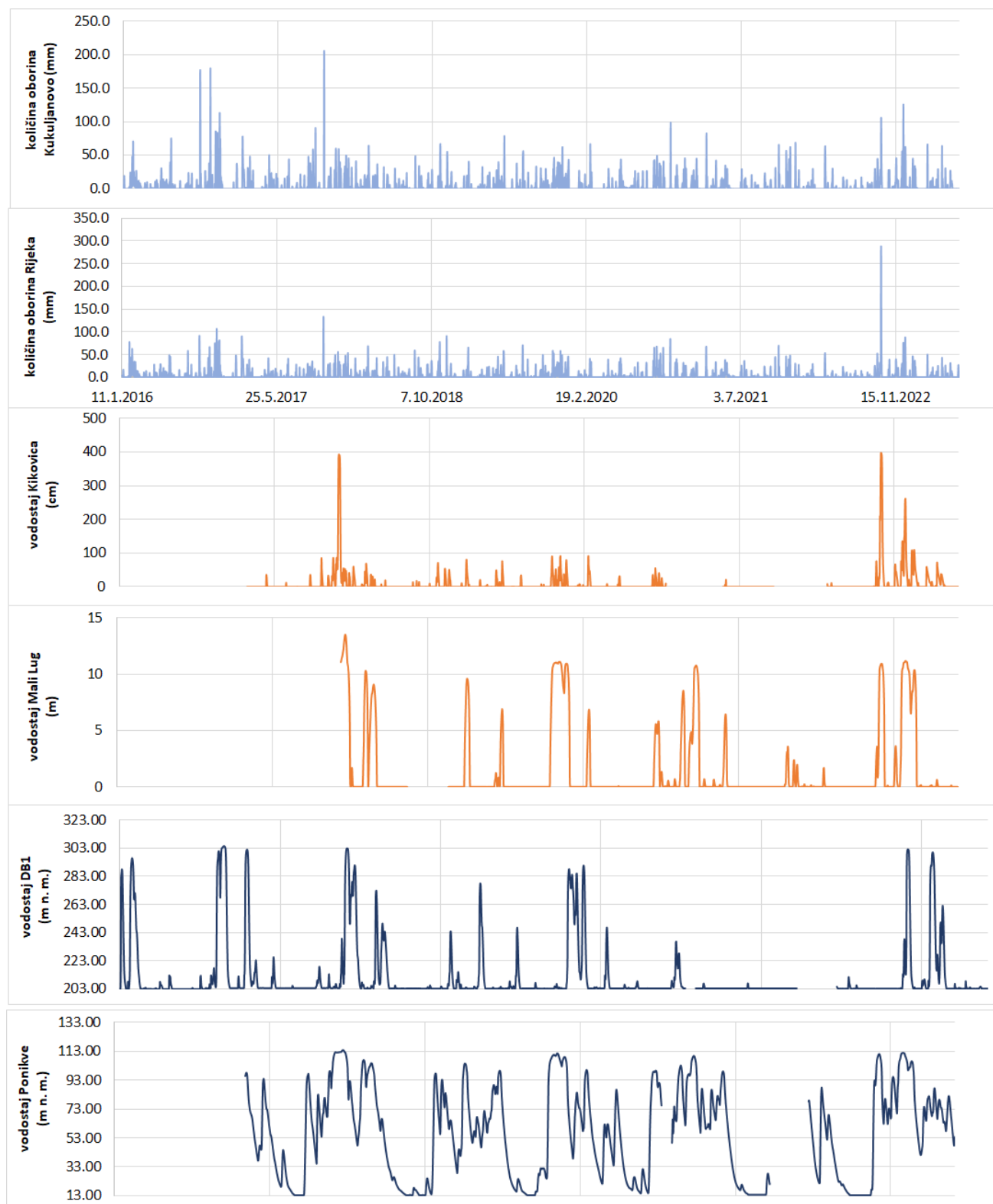
Slika 5.2: Histogram vodostaja površinskih voda.



Slika 5.3: Histogram količina oborina.

Na histogramima površinskih voda i količine oborina se vidi da su najčešće mjerene minimalne vrijednosti. Veliki broj minimuma količina oborina i vodostaja površinskih voda objašnjava zašto je medijan jednak nuli. Na lokaciji Ponikve podzemne vode nemaju toliko izražene isključivo minimume. Može se pretpostaviti da bi i histogram za razinu podzemnih voda DB1 bio sličniji tome kada bi mogao mjeriti na većim dubinama.

Na slici 5.4 prikazani su vremenski nizovi svih podataka u periodu koji odgovara najdužem vremenskom nizu vodostaja.



Slika 5.4: Vremenski niz podzemnih voda, površinskih voda i količina oborina.

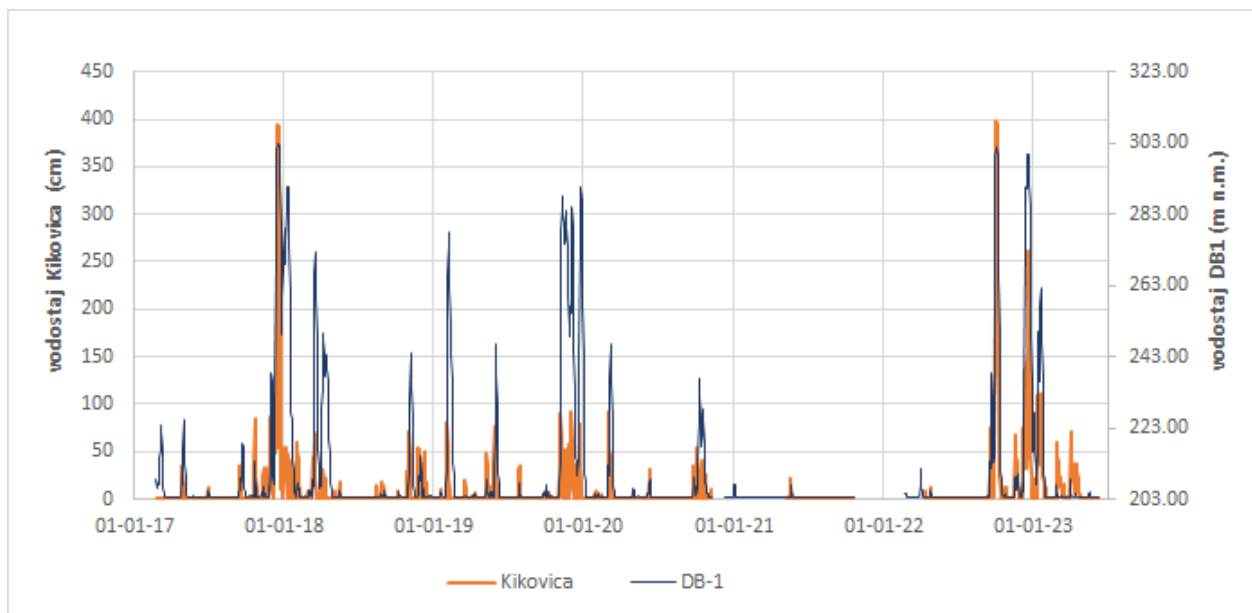
Može se primijetiti određena podudarnost hoda vodostaja DB1 i Kikovica te Ponikve i Mali Lug što je i očekivano jer pojava površinskih voda ovisi o razini podzemnih voda. Tek kada je podzemlje saturirano, doći će do plavljenja na površini.

Grafički prikazi količina oborina vrlo su slični te je vidljiva nešto veća količina oborina na Kukuljanovu. Sušni periodi i periodi u kojima ima vode uglavnom se podudaraju. Treba uzeti u obzir da je kota bušotine DB1 303 m n. m., a diver je postavljen na 99,8 m dubine što znači da ravni dijelovi na grafičkom prikazu nisu nužno sušni periodi, nego i vodostaji ispod 203 m n. m. koje diver ne može bilježiti. Na lokaciji Ponikve kota bušotine i dubina divera razlikuju se za 13,5 m pa je moguće dobiti više podataka.

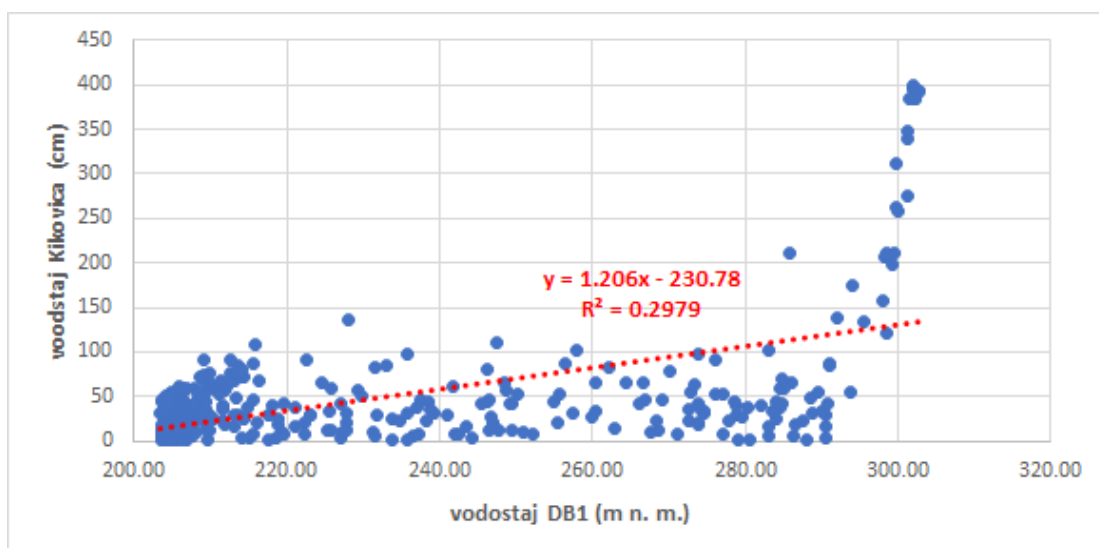
Radi lakše i točnije analize podataka posebno je napravljena usporedba podzemnih i površinskih vodama na dvije lokacije (Kikovica i Ponikve) te podzemnih voda međusobno. Provedena je i usporedba razina površinskih i podzemnih voda s količinom oborina s mjernih postaja na Kukuljanovu i u Rijeci. Za sve skupne grafove i usporedbu podataka odabran je period u kojem su dostupni podaci za sve promatrane parametre.

5.1 Usporedba razina podzemne vode DB1 i površinske vode Kikovica

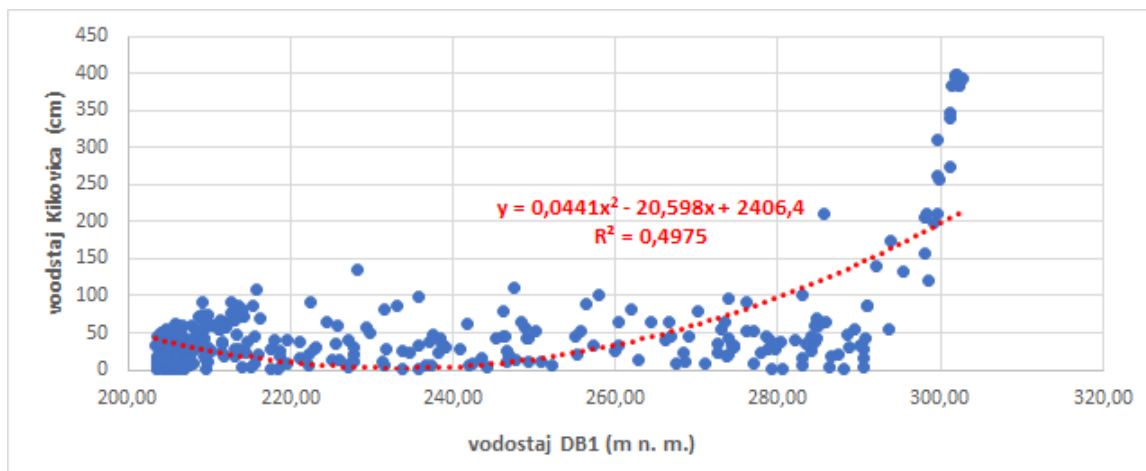
Vremenski nizovi razina podzemne vode DB1 i površinske vode Kikovica prikazani su skupnim grafom (slika 5.5), a zatim su ispitivane funkcije prilagodbe s pripadajućim koeficijentima determinacije R^2 (slike 5.6 i 5.7):



Slika 5.5: Vremenski niz razine podzemne vode DB1 i površinske vode Kikovica tijekom perioda 25. 2. 2017. - 10. 6. 2023. godine.

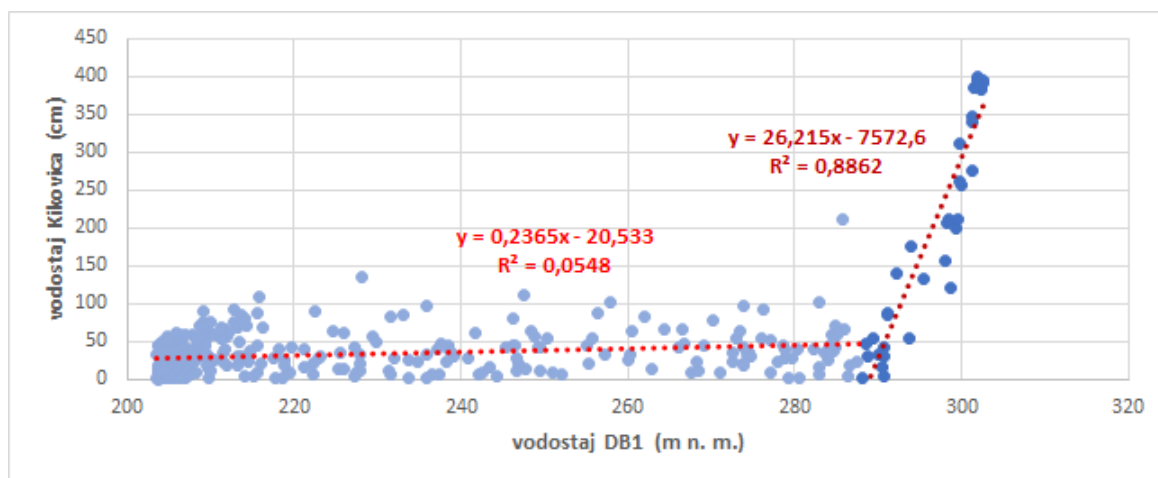


Slika 5.6: Linearna funkcija prilagodbe razine podzemne vode DB1 i površinske vode Kikovica.



Slika 5.7: Kvadratna funkcija prilagodbe razine podzemne vode DB1 i površinske vode Kikovica.

Na slici 5.6 prikazana je linearna funkcija prilagodbe. Može se zaključiti da postoji umjerena linearna povezanost podataka, a Spearmanovim testom je utvrđeno da je i statistički značajna ($p=2,2 \cdot 10^{-16}$). Kvadratna funkcija $y=0,0441x^2-20,598x+2406,4$ predstavlja bolji model opisa podataka ($R^2=0,4975$). S grafa na slici 5.7 se vidi da vodostaj površinske vode Kikovica počinje primjetno rasti kada vodostaj podzemne vode premaši približno 290 m n. m. Za parove podataka čija je razina podzemne vode veća, odnosno manja, od 290 m n. m. zasebno su ispitane linearne ovisnosti (slika 5.8):

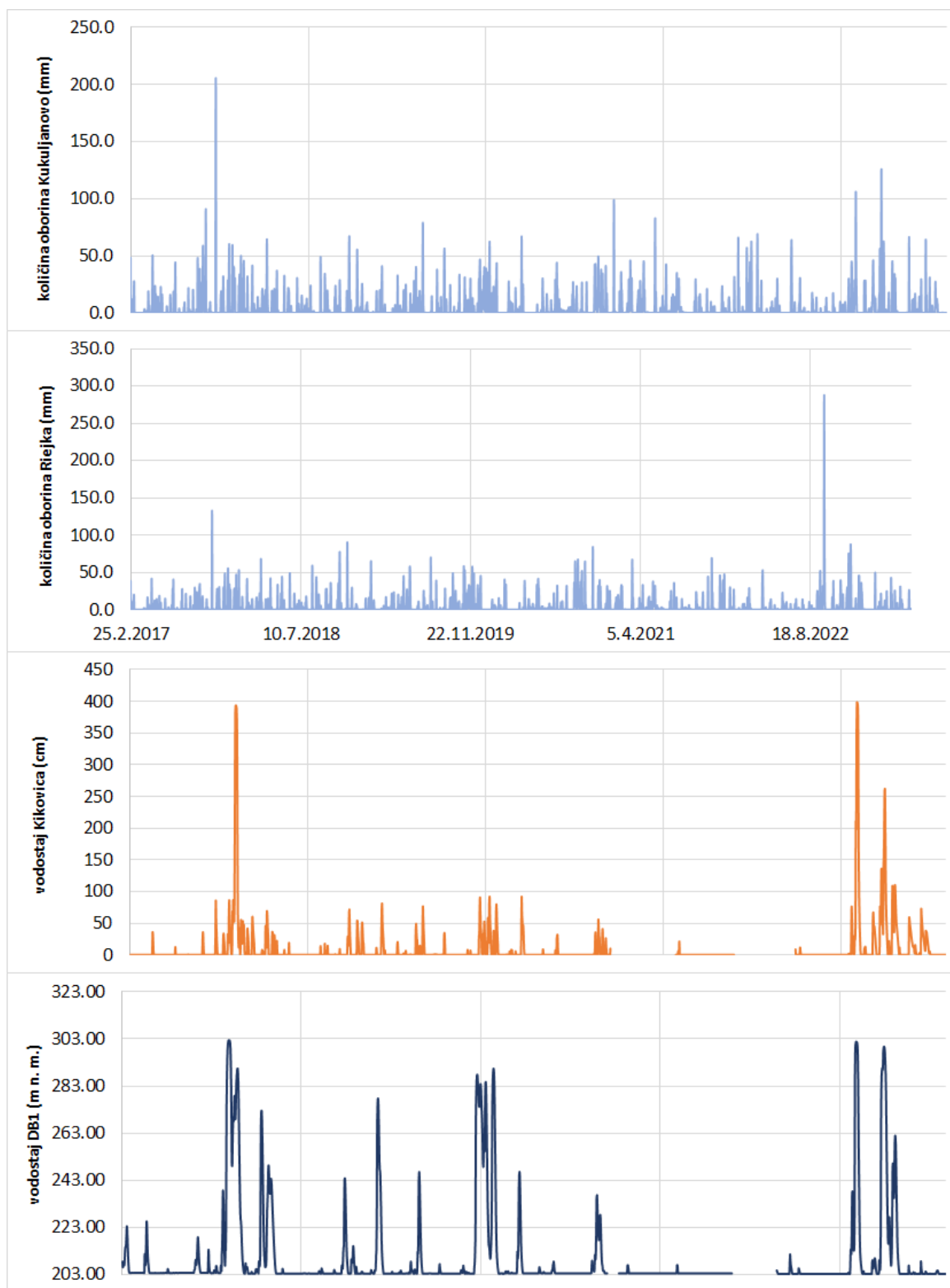


Slika 5.8: Linearna korelacija podzemne vode DB1 i površinske vode Kikovica razdvojenih na slučajevne razine podzemne vode ispod i iznad 290 m n. m.

Parovi podataka čija je vrijednost vodostaja podzemne vode veća od 290 m n. m. povezani su linearnom funkcijom $y=26,215x-7572,6$. Koeficijent korelacije je statistički značajan i iznosi $R=0,94$ ($p=2,2\cdot 10^{-16}$) što znači da su razine podzemne i površinske vode, u tom slučaju, izvrsno povezane. Između parova podataka čija je razina podzemne vode manja od 290 m n. m. nema povezanosti ($R=0,23$, $p=3,124\cdot 10^{-9}$). Koeficijent korelacije je statistički značajan, ali je dovoljno mali da se može zanemariti.

Sušni periodi i periodi visokih voda podzemne vode DB1 i površinske vode Kikovica većinom se poklapaju tijekom cijelog perioda promatranja iako vrijednosti razine podzemne vode imaju znatno veći raspona od vodostaja površinske vode.

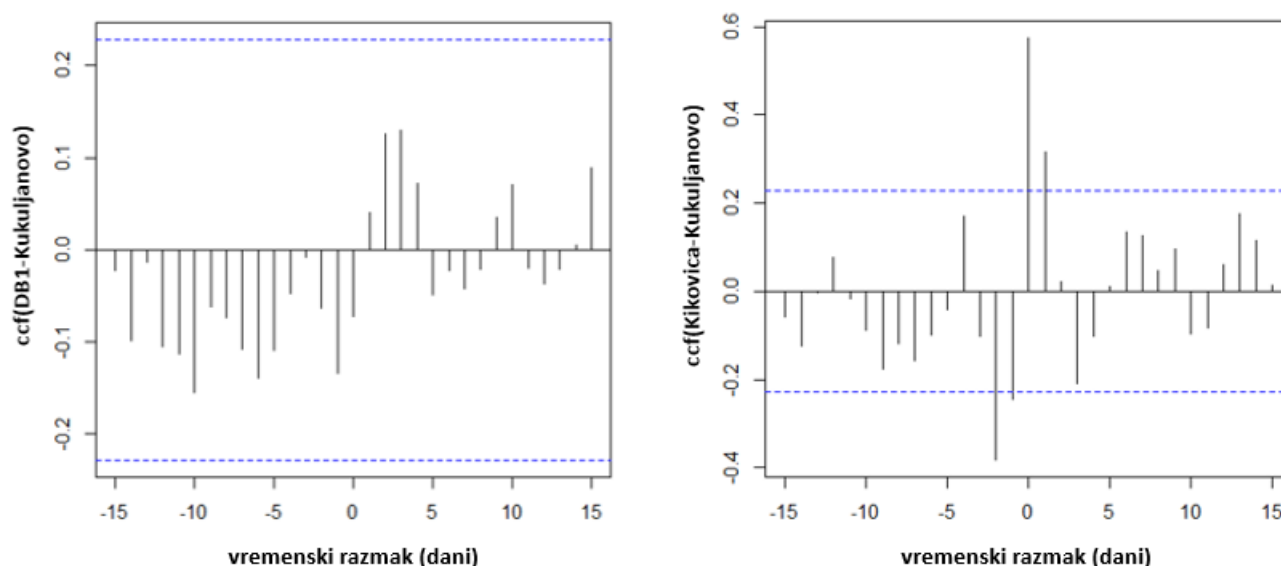
Razina podzemne i površinske vode može se usporediti i s količinom oborina na mjernim postajama Kukuljanovo i Rijeka (slika 5.9):



Slika 5.9: Vremenski niz podzemne i površinske vode u usporedbi s količinom oborina na mjernim postajama Kukuljanovo i Rijeka tijekom perioda 25. 2. 2017. - 10. 6. 2023. godine.

Visoki vodostaji podzemne vode DB1 i površinske vode Kikovica poklapaju se s velikim količinama oborina. No, na pojedinim dijelovima grafa vidljivo je da ipak postoje izuzeci (slika 5.9). Početkom 2020. godine manja količina oborina podudara se s višom razinom podzemne vode DB1, a početkom 2021. godine veća količina oborina rezultira nižom razinom. Moguće objašnjenje takve pojave su dugotrajnije oborine početkom 2020. godine koje su uzrokovale porast vodostaja, a nesvakidašnji pljuskovi početkom 2021. godine nisu utjecali na vodostaj. Bitno je uzeti u obzir i da će razina podzemne vode sporije rasti ako je podzemlje već saturirano.

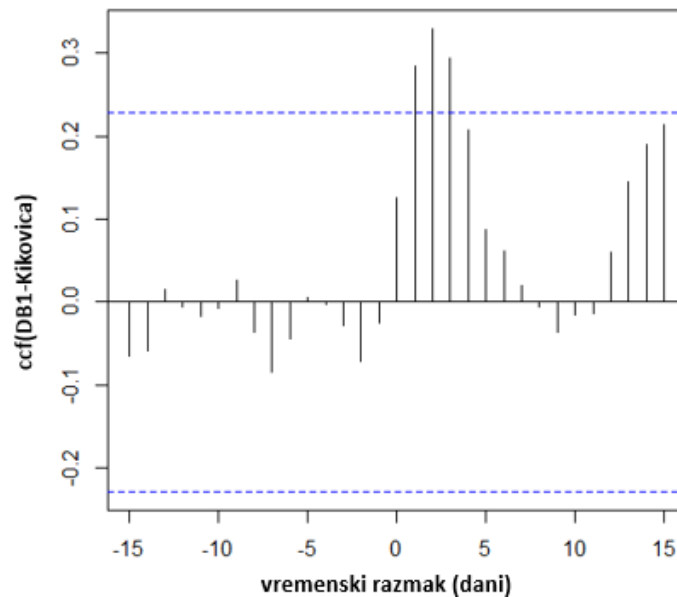
Za jednostavniju usporedbu podataka napravljena je analiza po godinama i mjesecima. U radu su korišteni reprezentativni grafički prikazi za pojedine periode i zamijećenja odstupanja. Na slici 5.10 prikazane su rezultati kroskorelacije za 2018. godinu:



Slika 5.10: Kroskorelacija podzemne vode DB1 (lijevo) i površinske vode Kikovica (desno) s količinom oborina na Kukuljanovu 2018. godine. Plave isprekidane linije označavaju granice statističke značajnosti.

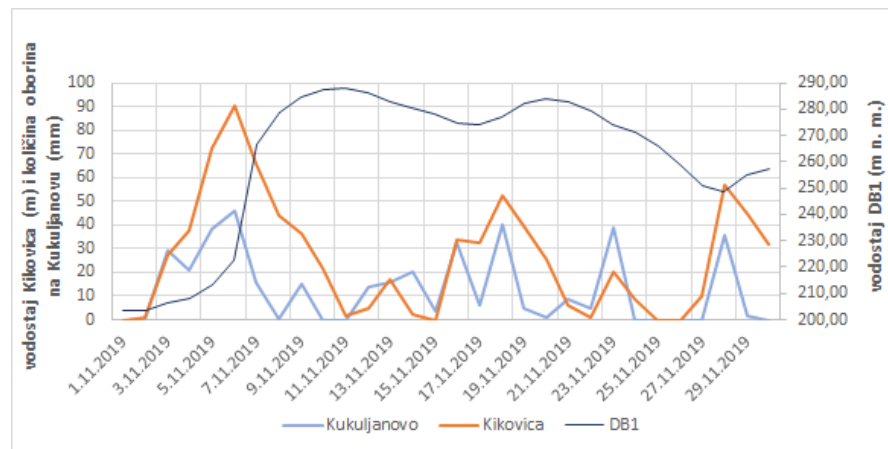
Koeficijent korelacije između podzemne vode DB1 i količine oborina na Kukuljanovu za sve vremenske razmake poprima vrijednost manju od 0,2 što znači da nema povezanosti. Povezanost vodostaja površinske vode Kikovica i količine oborina je statistički značajna i umjerena do dobra ($R=0,57$) kada nema vremenskog razmaka što potvrđuje prethodnu tvrdnju da površinska

voda prije reagira na kišu. Između vodostaja podzemne i površinske vode povezanost je slaba ($R=0,33$), ali statistički značajna kada je vremenski razmak 2 dana (slika 5.11).

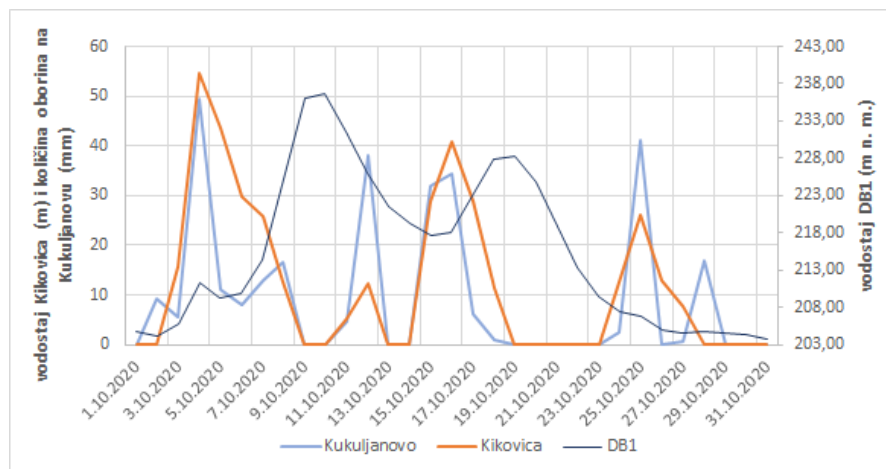


Slika 5.11: Kroskorelacija podzemne vode DB1 i površinske vode Kikovica 2018. godine. Plave isprekidane linije označavaju granice statističke značajnosti.

Iako je tijekom 2018. godine količina oborina bila relativno ravnomjerno raspoređena tijekom godine, općenito je period od rujna do prosinca najkišniji u godini, a ljetni mjeseci predstavljaju sušni period. Na slikama 5.12-5.15 prikazan je mjesečni hod vodostaja:

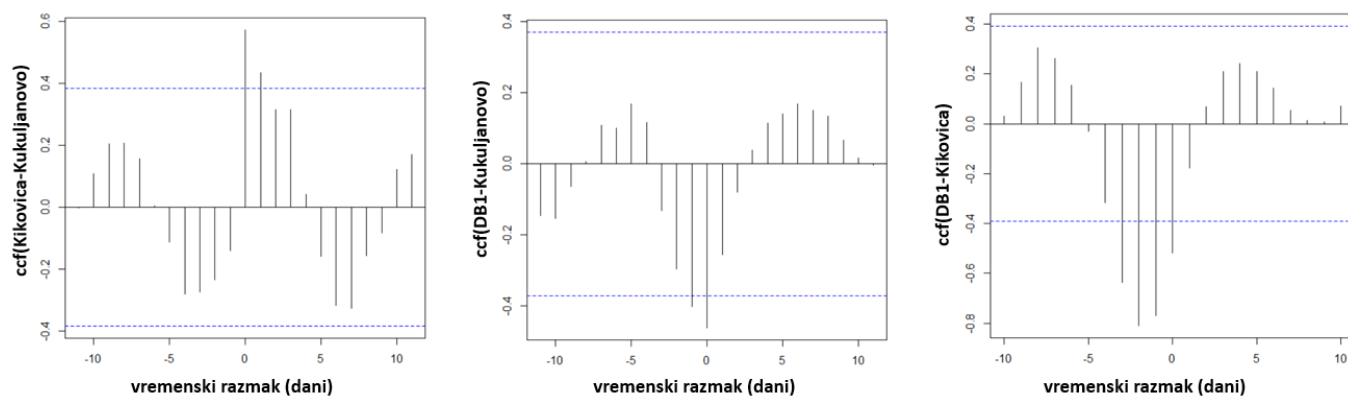


Slika 5.12: Usporedba količine oborina na Kukuljanovu, hoda vodostaja podzemne vode DB1 i površinske vode Kikovica u studenom 2019. godine.



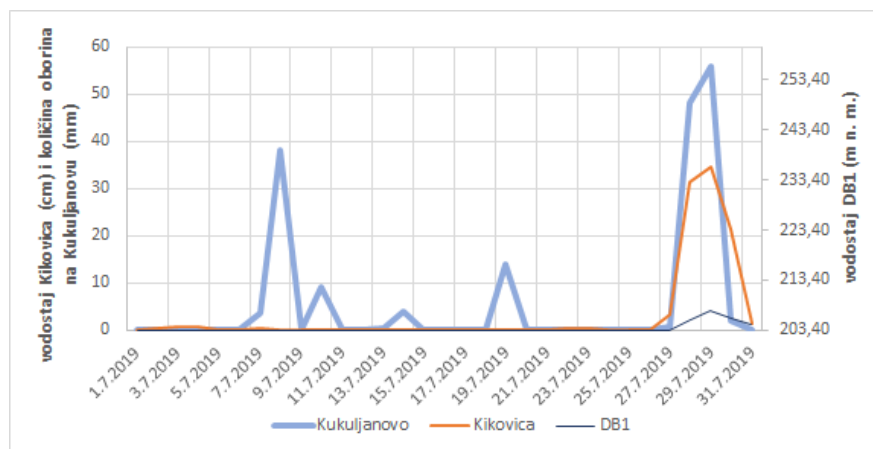
Slika 5.13: Usporedba količine oborina na Kukuljanovu, hoda vodostaja podzemne vode DB1 i površinske vode Kikovica u listopadu 2020. godine.

Na slikama 5.12 i 5.13 prikazani su mjesečni hodovi vodostaja tijekom zimskih mjeseci. Vodostaj površinske vode počinje rasti s prvim danom kiše ili s jednim danom zakašnjenja. Vodostaj podzemne vode postiže maksimum otprilike 5 dana nakon površinske vode. Nastavi li se kišno razdoblje, razmak maksimuma smanjuje se na oko 2 dana. Ovakvi međuodnosi mogu se potvrditi i kroskorelacijom (5.14). Količina oborina bolje je povezana s vodostajem površinske vode ($R=0,57$), nego razinom podzemne vode ($R=-0,47$). Vodostaj površinske i razina podzemne vode vrlo su dobro povezani ($R=0,81$) kada je vremenski razmak 2 dana.

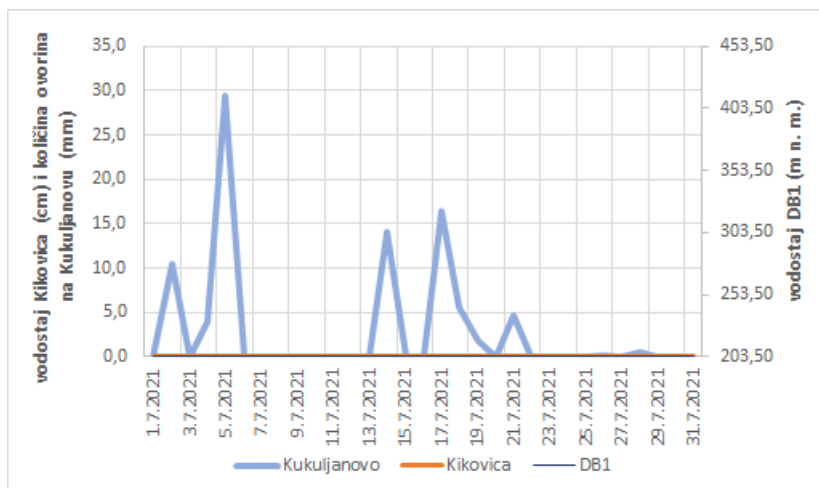


Slika 5.14: Kroskorelacija podzemne vode DB1, površinske vode Kikovica i količine oborina na Kukuljanovu u studenom 2019. godine. Plave isprekidane linije označavaju granice statističke značajnosti.

Slike 5.15 i 5.16 prikazuju mjesečni hod vodostaja ljeti:



Slika 5.15: Usporedba količine oborina na Kukuljanovu, hoda vodostaja podzemne vode DB1 i površinske vode Kikovica u srpnju 2019. godine.

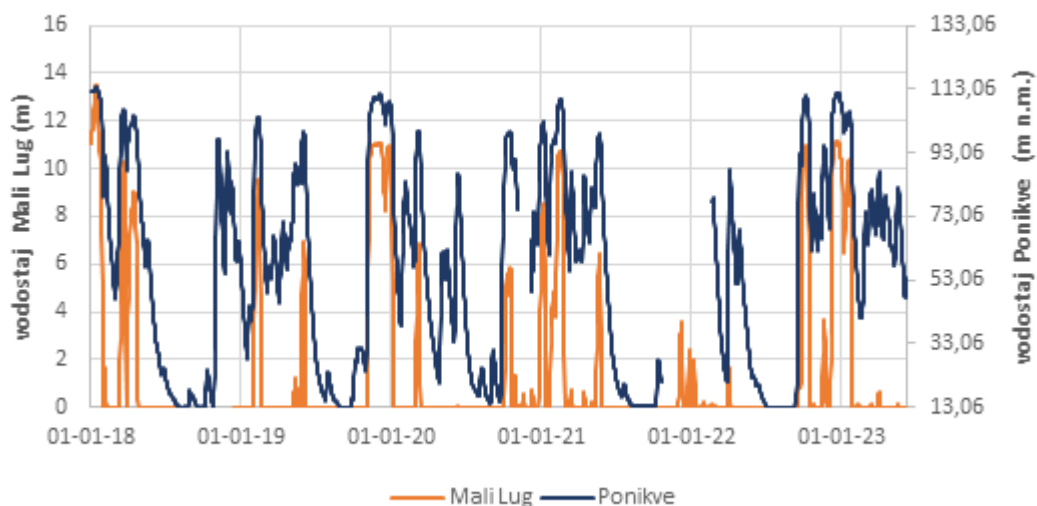


Slika 5.16: Usporedba količine oborina na Kukuljanovu, hoda vodostaja podzemne vode DB1 i površinske vode Kikovica u srpnju 2021. godine.

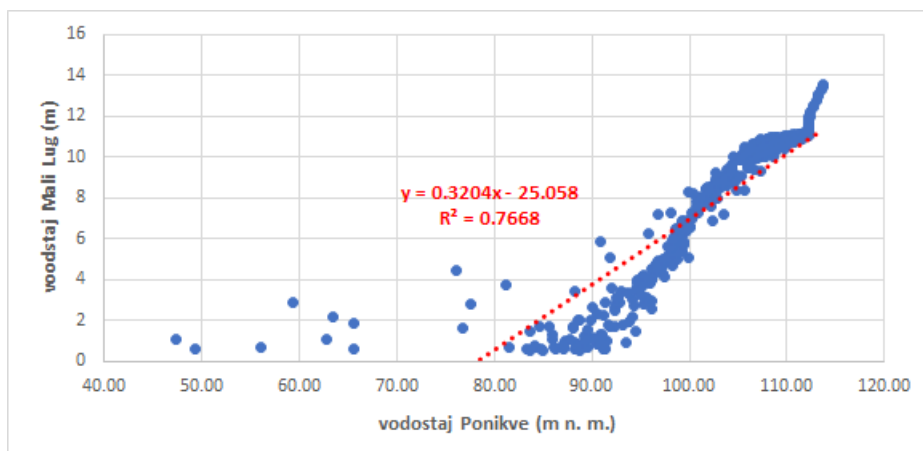
Tijekom srpnja 2019. godine palo je 175.5 mm, a prethodili su svibanj s 272 mm i lipanj s 16,3 mm. Može se pretpostaviti da podzemlje nije bilo potpuno isušeno i da su srpanjske kiše bile dovoljne da vodostaji narastu. Vodostaji gotovo istovremeno postižu maksimalne vrijednosti, moguće zbog veće količine oborina u kratkom periodu - tijekom dva dana krajem srpnja palo je više od 100 mm kiše (slika 5.15). U srpnju 2021. palo je 87 mm kiše, a i prethodnih mjeseci bilo je manje oborina nego u istom periodu 2019. godine pa ni jedan vodostaj nije narastao. Za ljetne mjeseci nije bilo moguće odrediti kroskorelacijski koeficijent zbog premalog broja parova podataka. Razina podzemne vode je tijekom ljeta na oko 203,5 m n. m. što je maksimalna dubina do koje je diver mogao mjeriti. Stvarna razina podzemne vode vjerojatno je bila niža, ali ti podaci nisu bili dostupni pa nisu mogli biti korišteni za kroskorelaciju.

5.2 Usporedba razina podzemne vode Ponikve i površinske vode Mali Lug

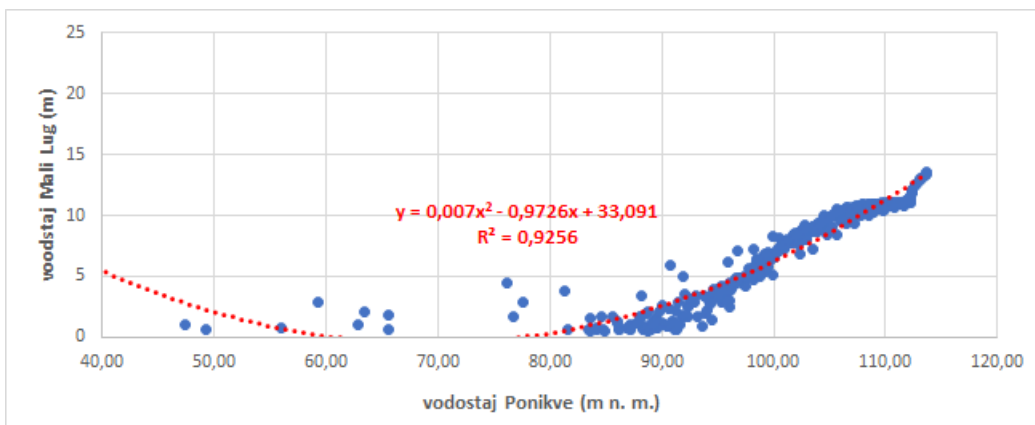
Na slici 5.17 prikazan je vremenski niz vodostaja na lokaciji Ponikve, a zatim je određena linija prilagodbe i koeficijent determinacije R^2 (slike 5.18 i 5.19):



Slika 5.17: Vremenski niz razine podzemne vode Ponikve i površinske vode Mali Lug tijekom perioda 1. 1. 2018. - 10. 6. 2023. godine.

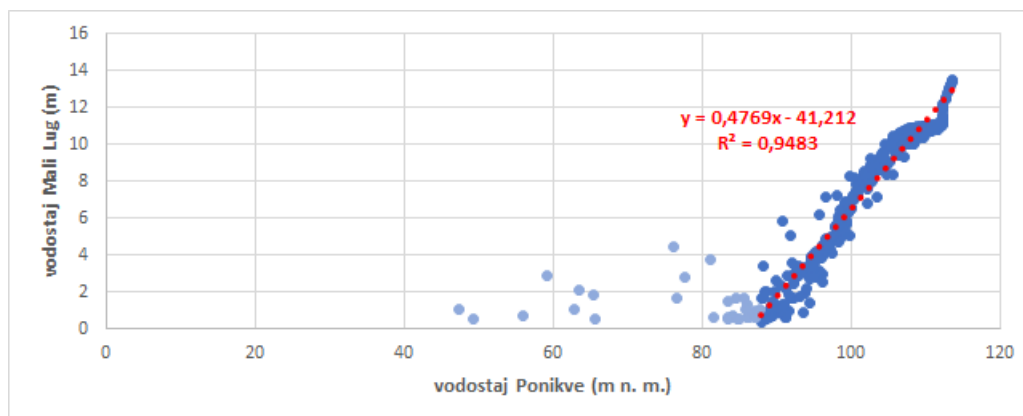


Slika 5.18: Linearna funkcija prilagodbe vodostaja podzemne vode Ponikve i površinske vode Mali Lug.



Slika 5.19: Kvadratna funkcija prilagodbe vodostaja podzemne vode Ponikve i površinske vode Mali Lug.

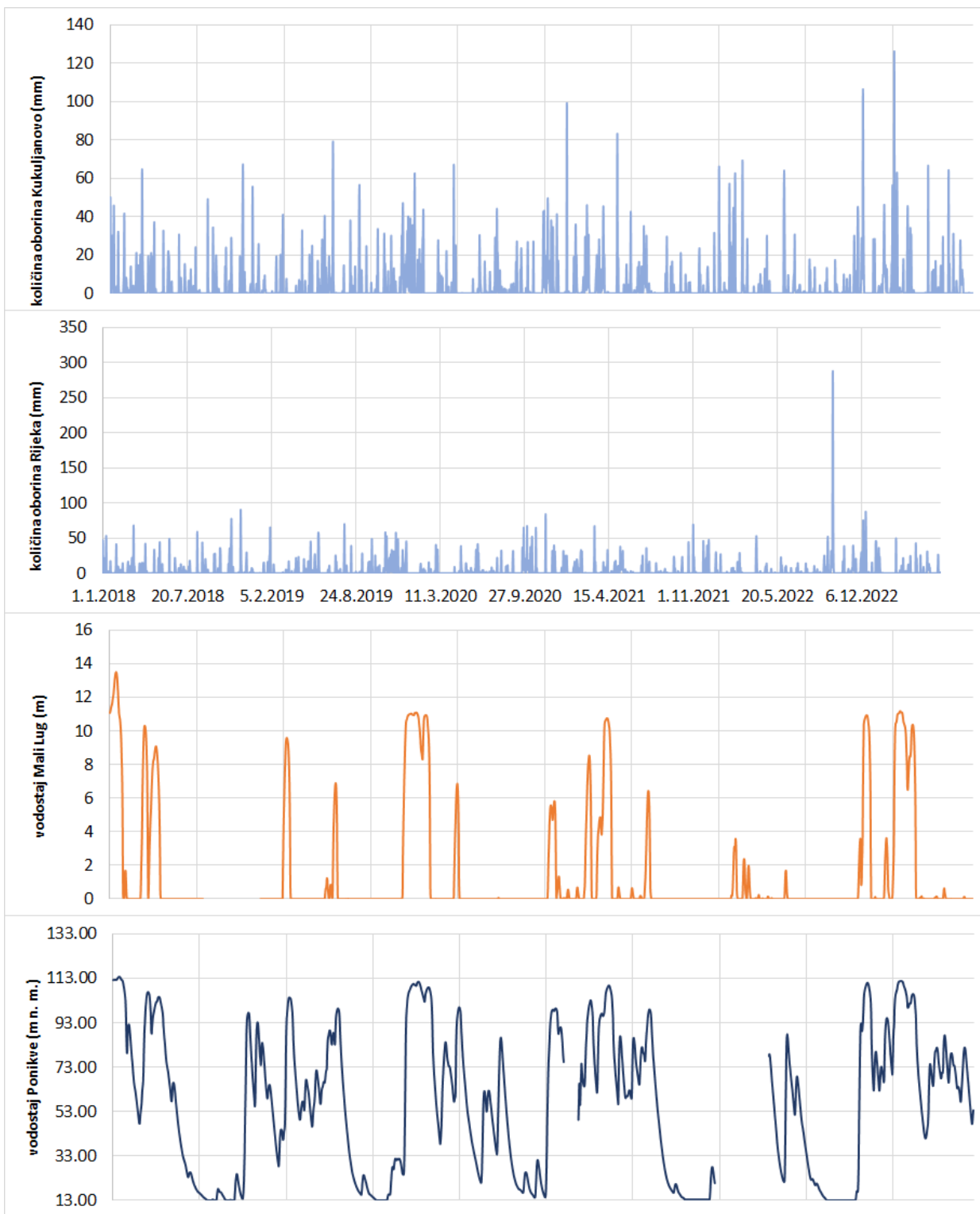
Linearna funkcija je vrlo dobar model za opis podataka, a koeficijent korelacije je statistički značajan ($R=0,88$, $p=2,2 \cdot 10^{-16}$). Odnos razina podzemne vode Ponikve i površinske vode Mali Lug najbolje opisuje kvadratna funkcija $y=0,007x^2-0,9726x+33,091$ s koeficijentom determinacije $R^2=0,9256$. Napravljena je i linearna prilagodba za parove podataka kojima je vrijednost vodostaja podzemne vode veća od 88 m n. m. (slika 5.20):



Slika 5.20: Linearna korelacija podzemne vode Ponikve i površinske vode Mali Lug.

Slično kao kod ovisnosti vodostaja podzemne vode DB1 i površinske vode Kikovica, i u ovom slučaju je povezanost razina podzemne i površinske izvrsna nakon što podzemna vode dosegne određenu visinu vodostaja. Za parove podataka kojima je vrijednost podzemne vode iznad 88 m n. m. koeficijent korelacije iznosi $R=0,97$ i statistički je značajan ($p=2,2 \cdot 10^{-16}$).

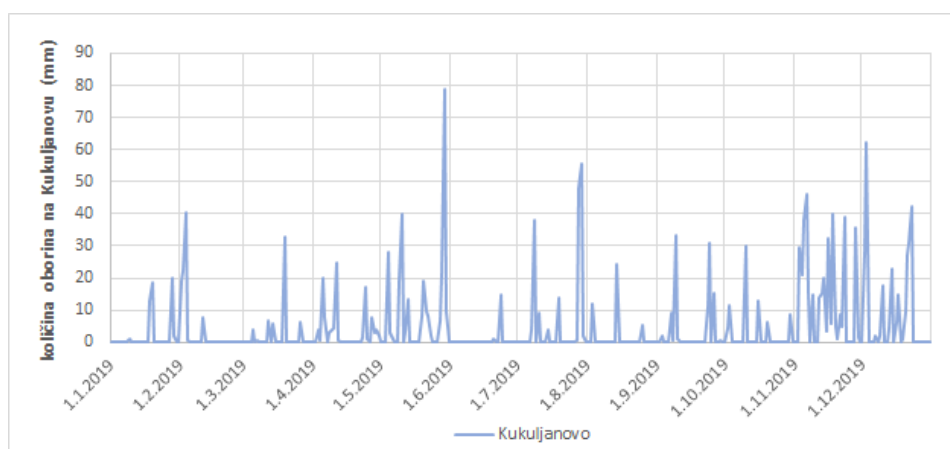
Tijekom većine promatranog perioda može se uočiti podudaranje maksimalnih vrijednosti vodostaja i sušnih perioda podzemne i površinske vode. Postoje i neka neslaganja: oko 1. siječnja 2019. godine razina podzemne vode bila je visoka, a depresija Mali Lug je presušila. Razina podzemne vode Ponikve ima veći raspon i sporije opada. Slika 5.21 prikazuje usporedbu razina podzemne i površinske vode s količinom oborina:



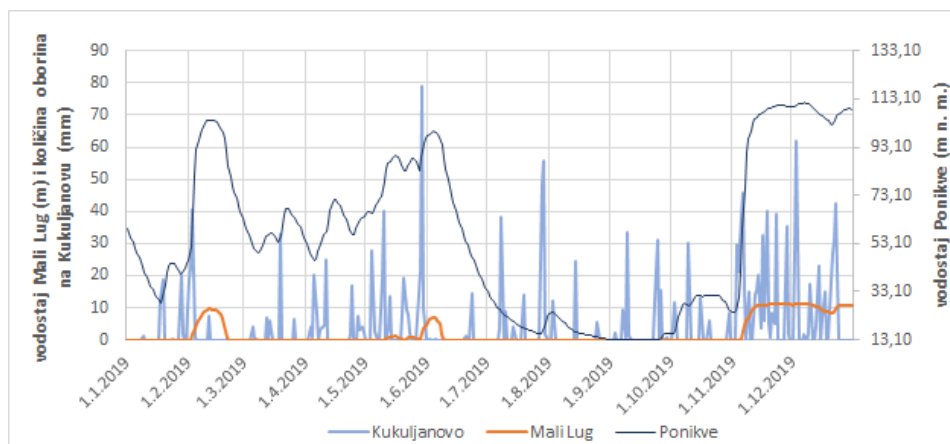
Slika 5.21: Vremenski niz podzemne i površinske vode u usporedbi s količinom oborina na mjernim postajama Kukuljanovo i Rijeka tijekom perioda 1. 1. 2018. - 10. 6. 2023. godine.

Kišni periodi podudaraju se s visokim vodostajima i na ovoj lokaciji. Postoje i neka odstupanja: u drugoj polovini 2018. godine kada količina oborina poprima jedan maksimum, vodostaj podzemne vode je vrlo nizak, a depresija Mali Lug je presušila. Početkom 2021. godine je otprilike ista količina oborina uzrokovala porast vodostaja podzemne i površinske vode. Moguće objašnjenje je dugotrajnost oborina krajem 2020. i početkom 2021. godine koje su napunile podzemlje pa se površina poplavlila.

Slike 5.22 i 5.23 prikazuju vremenski niz količine oborina na Kukuljanovu i usporedbu s hodom vodostaja podzemne vode Ponikve i površinske vode Mali Lug:



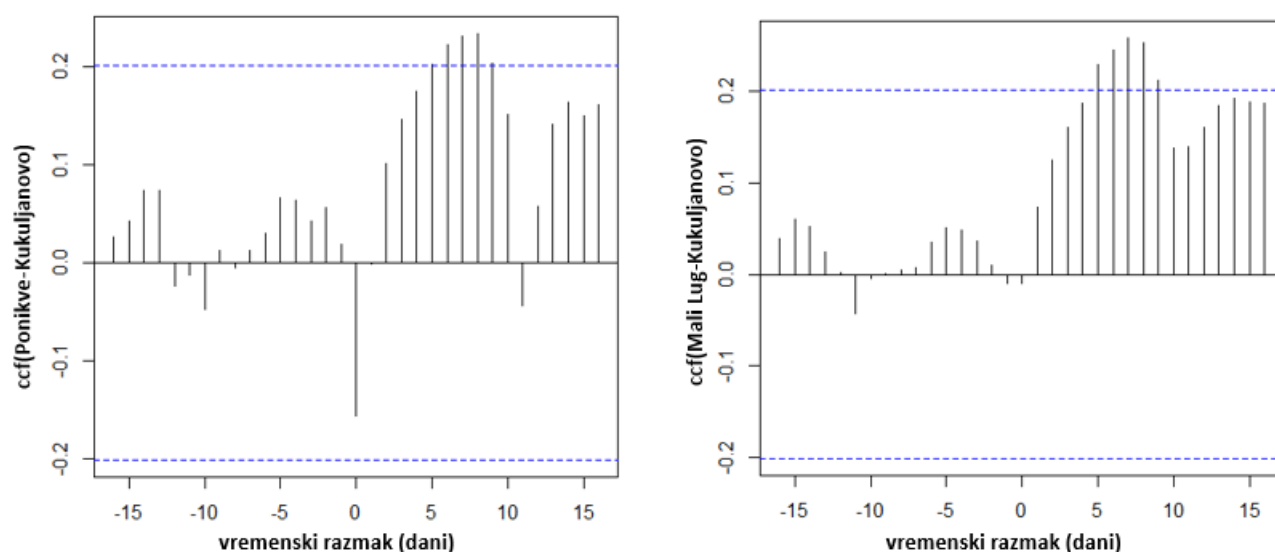
Slika 5.22: Vremenski niz količine oborina na Kukuljanovu 2019. godine.



Slika 5.23: Usporedba količine oborina na Kukuljanovu, hoda vodostaja podzemne vode Ponikve i površinske vode Mali Lug 2019. godine.

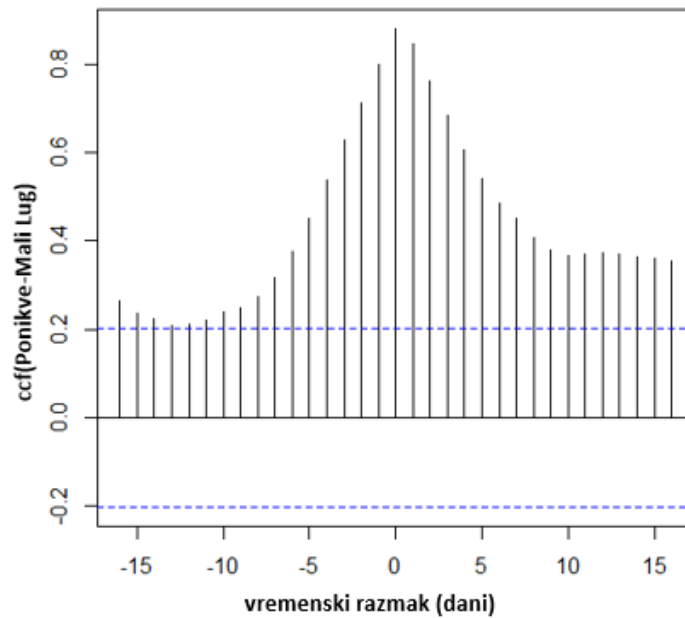
Na ovoj lokaciji diver može mjeriti gotovo sve razine podzemne vode pa je samo u kratkom periodu na minimalnim vrijednostima (za razliku od DB1). Vodostaj površinske vode Mali Lug ističe se samo kada podzemna voda dosegne maksimum - Mali Lug plavi samo kada je podzemlje potpuno saturirano. Vodostaj podzemne vode počinje padati početkom lipnja i potpuno presuši u kolovozu ili rujnu, ovisno o količini oborina u tom periodu.

Kroskorelacijom je utvrđeno da između površinske odnosno podzemne vode i količine oborina nema povezanosti ($R \leq 0,25$) iako je koeficijent kroskorelacije statistički značajan (slika 5.24):



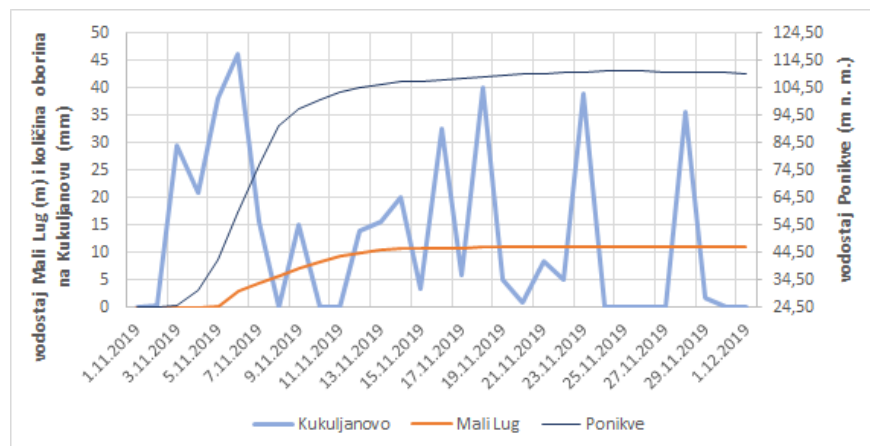
Slika 5.24: Kroskorelacija podzemne vode Ponikve (lijevo) i površinske vode Mali Lug (desno) s količinom oborina na Kukuljanovu 2019. godine. Plave isprekidane linije označavaju granice statističke značajnosti.

Povezanost vodostaja podzemne i površinske vode je vrlo dobra do izvrsna ($R=0,89$, statistički značajan) kada nema vremenskog razmaka između porasta vodostaja. S povećanjem vremenskog razmaka povezanost se smanjuje (slika 5.25):



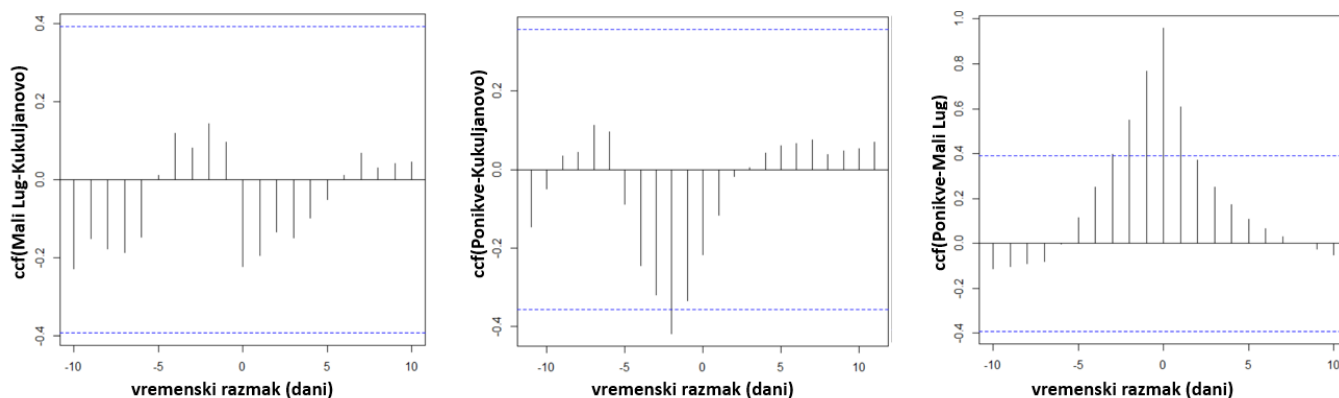
Slika 5.25: Kroskorelacija podzemne vode Ponikve i površinske vode Mali Lug 2019. godine. Plave isprekidane linije označavaju granice statističke značajnosti.

Slika 5.26 prikazuje mjesečni hod vodostaja tijekom kišnog razdoblja (studeni 2019. godine):



Slika 5.26: Usporedba količine oborina na Kukuljanovu, hoda vodostaja podzemne vode Ponikve i površinske vode Mali Lug u studenom 2019. godine.

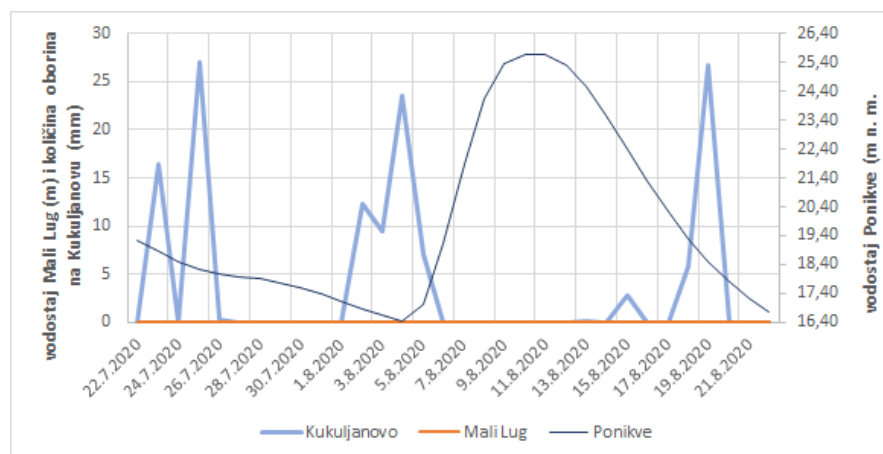
Na slici 5.26 se vidi da vodostaj površinske vode počinje rasti nekoliko dana nakon podzemne vode, odnosno kada se Ponikve "napune" dolazi do plavljenja u depresiji Mali Lug. Isto se može zaključiti i određivanjem kroskorelacijskih koeficijenata.



Slika 5.27: Kroskorelacija podzemne vode Ponikve, površinske vode Mali Lug i količine oborina na Kukuljanovu u studenom 2019. godine. Plave isprekidane linije označavaju granice statističke značajnosti.

Količina oborina s vodostajem površinske vode nije povezana ($R \leq 0,22$), a s razinom podzemne vode povezana je slabo ($R = -0,42$) s vremenskim razmakom od 2 dana. Na ovoj lokaciji, povezanost površinske i podzemne vode je bolja nego na lokaciji Kikovica. Kada nema vremenskog pomaka, koeficijent kroskorelacije iznosi $R = 0,96$ što upućuje na izvrsnu povezanost podzemne vode Ponikve i površinske vode Mali Lug.

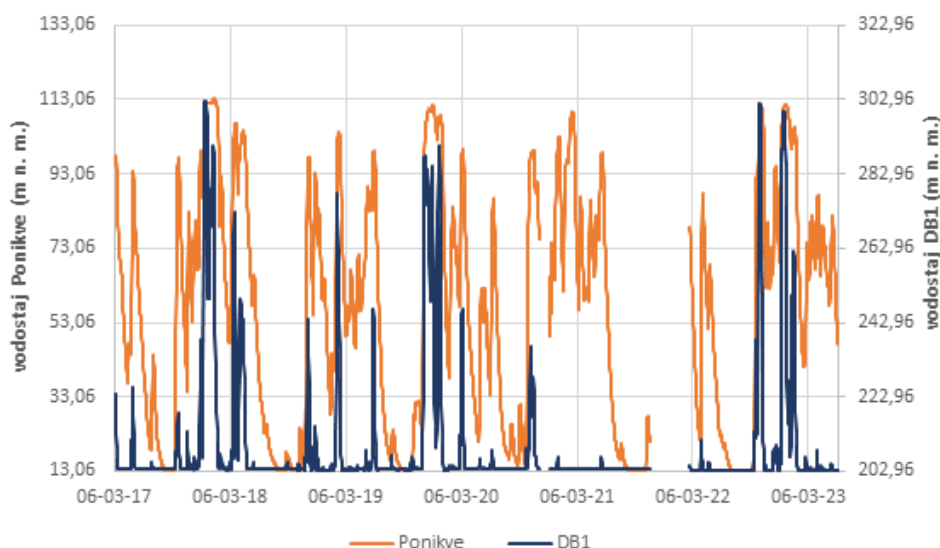
Ljeti oba vodostaja presušuju, ali razina podzemne vode može porasti i nakon male količine oborina (5.28). Početkom kolovoza 2020. godine palo je 50 mm kiše u periodu od 4 dana nakon čega je razina podzemne vode porasla 9 m. Za određivanje kroskorelacijskog koeficijenta nije bilo dovoljno podataka.



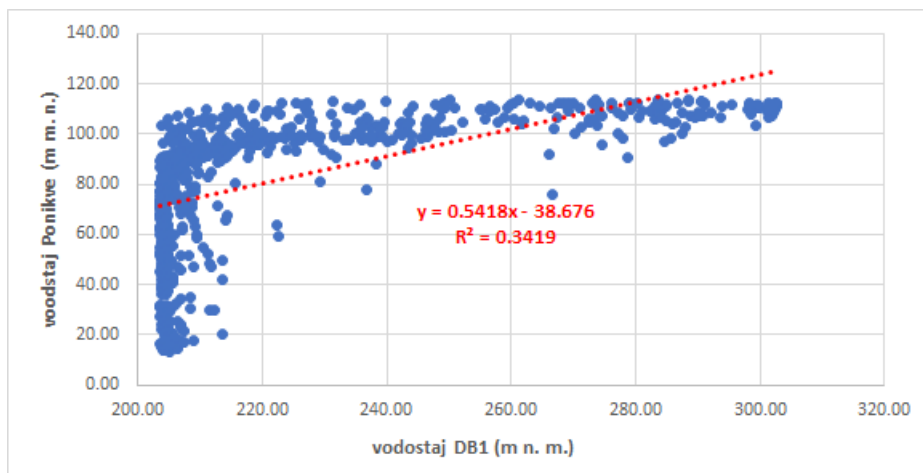
Slika 5.28: Usporedba količine oborina na Kukuljanovu, hoda razine podzemne vode Ponikve i površinske vode Mali Lug u srpnju i kolovozu 2020. godine.

5.3 Usporedba razina podzemne vode DB1 i Ponikve

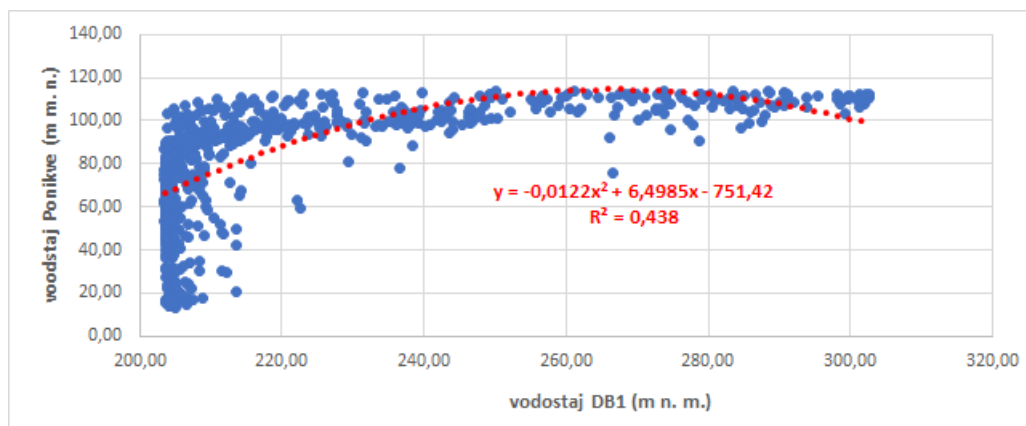
Osim usporedbe podzemnih i površinskih voda napravljena je i usporedba podzemnih voda međusobno. Grafički su prikazani vremenski nizovi te je određen trend i koeficijent determinacije R^2 (slike 5.29, 5.30 i 5.31):



Slika 5.29: Vremenski niz razine podzemnih voda DB1 i Ponikve tijekom perioda 6. 3. 2017. - 10. 6. 2023. godine.



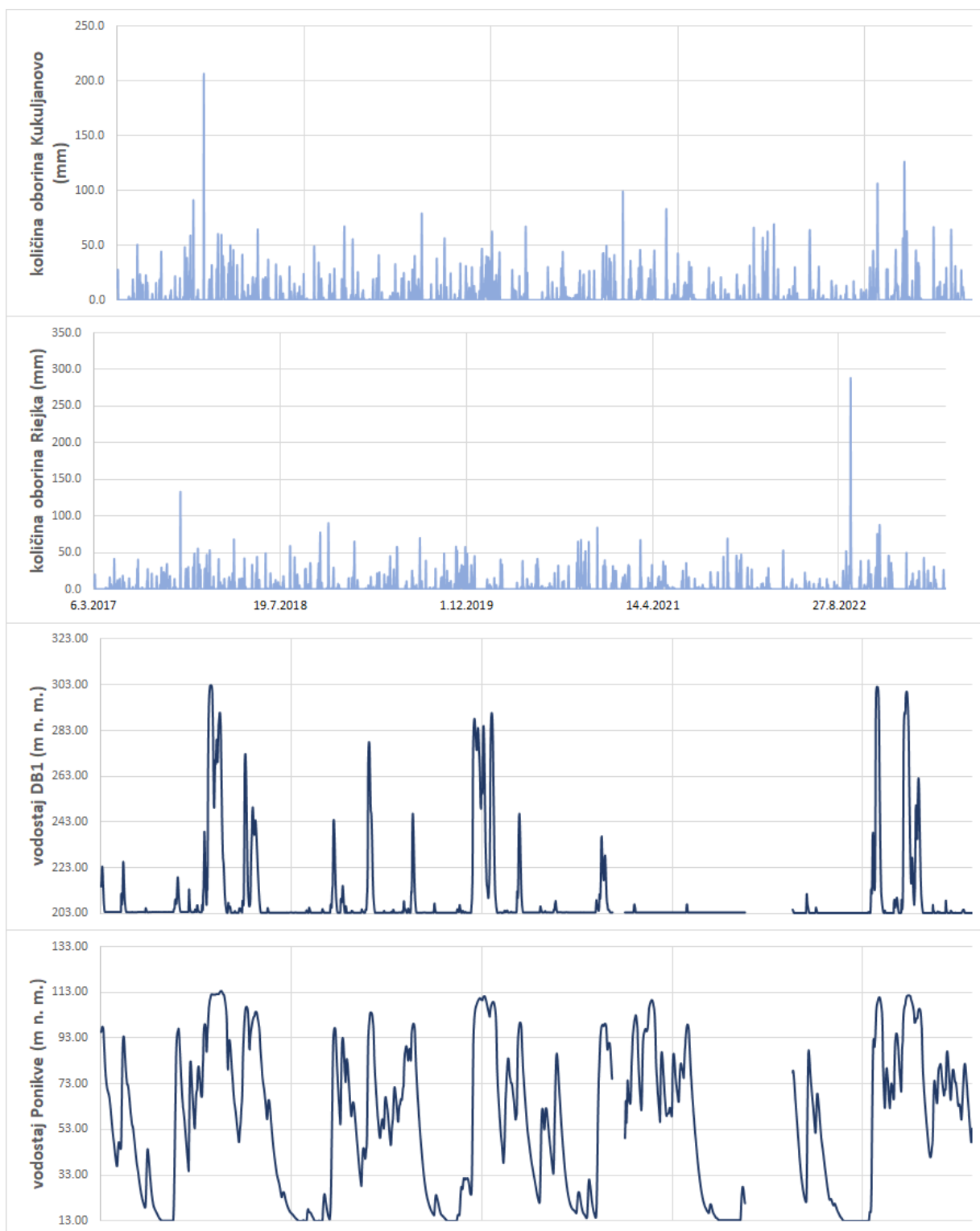
Slika 5.30: Linearna funkcija prilagodbe razina podzemnih voda DB1 i Ponikve.



Slika 5.31: Kvadratna funkcija prilagodbe razina podzemnih voda DB1 i Ponikve.

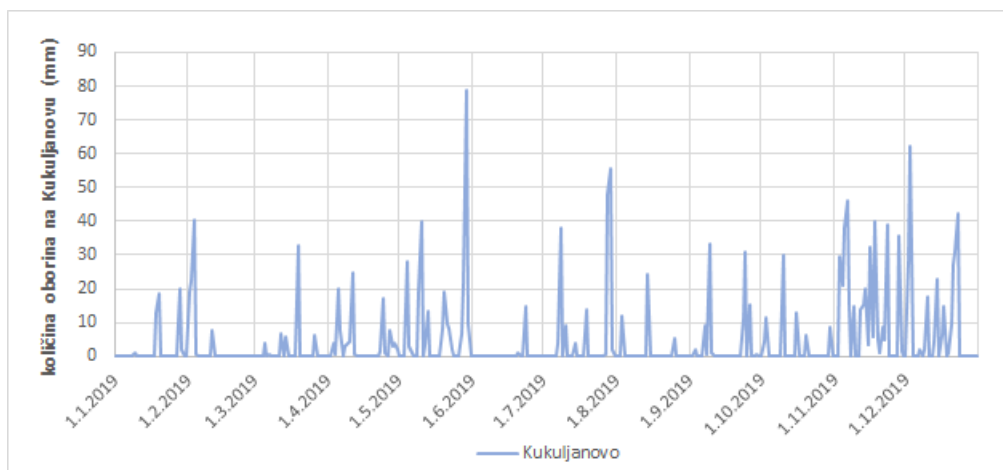
Ekstremne vrijednosti razina podzemnih voda DB1 i Ponikve se uglavnom podudaraju. Sušne periode teže je usporediti jer je bušotina DB1 preplitka, odnosno sve vrijednosti ispod 203 m n. m. na grafu su prikazane ravnom linijom iako to ne znači da je došlo do presušivanja. Primjer takvog neslaganja može se primijetiti u periodu od kraja 2020. godine do polovine 2022. godine. Razina podzemne vode Ponikve jako oscilira oko maksimalnih vrijednosti, a DB1 je na minimumu. Može se pretpostaviti da DB1 nije presušila nego je razina podzemne vode u tom periodu bila ispod 203 m n. m., ali diver to nije mogao izmjeriti. Sa slike 5.30 vidi se da razina podzemne vode Ponikve prestaje rasti nakon što desegne oko 118 m n. m., a razina DB1 nastavlja rasti. Budući da se podzemna voda DB1 nalazi na višoj nadmorskoj

visini može se pretpostaviti da se slijeva prema Ponikvama. Ponikve su depresija pa tek kada razina podzemne vode premaši kotu (114 m n. m.) počinje rasti razina podzemne vode DB1. Najbolji model opisa podataka je kvadratna funkcija $y = -0,0122x^2 + 6,4985x - 751,42$ ($R^2 = 0,438$). Slika 5.32 prikazuje usporedbu razina podzemnih voda s količinom oborina:

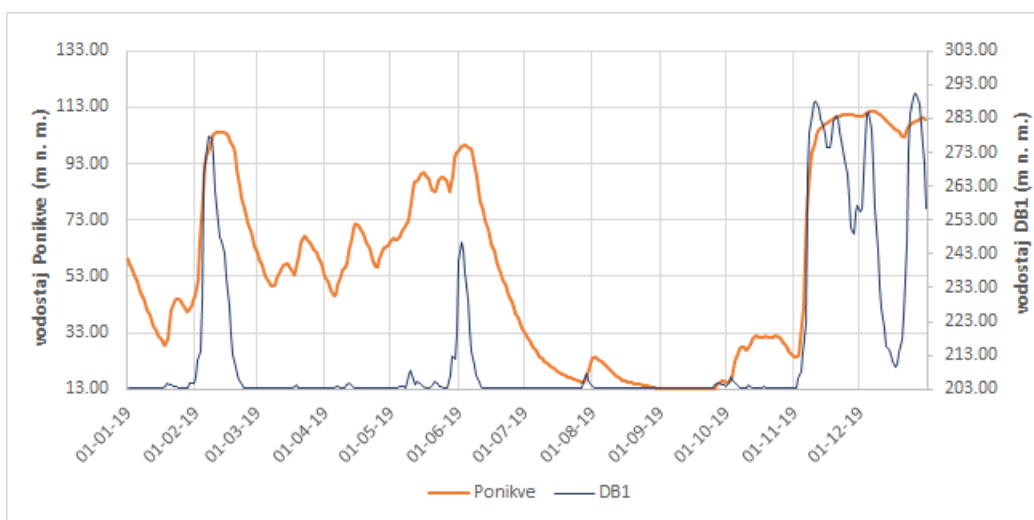


Slika 5.32: Vremenski niz podzemne i površinske vode u usporedbi s količinom oborina na mjernim postajama Kukuljanovo i Rijeka tijekom perioda 6. 3. 2017. - 10. 6. 2023. godine.

Slike 5.33 i 5.34 prikazuju vremenski niz količine oborina na Kukuljanovu i usporedbu s hodom razina podzemnih voda 2019. godine:



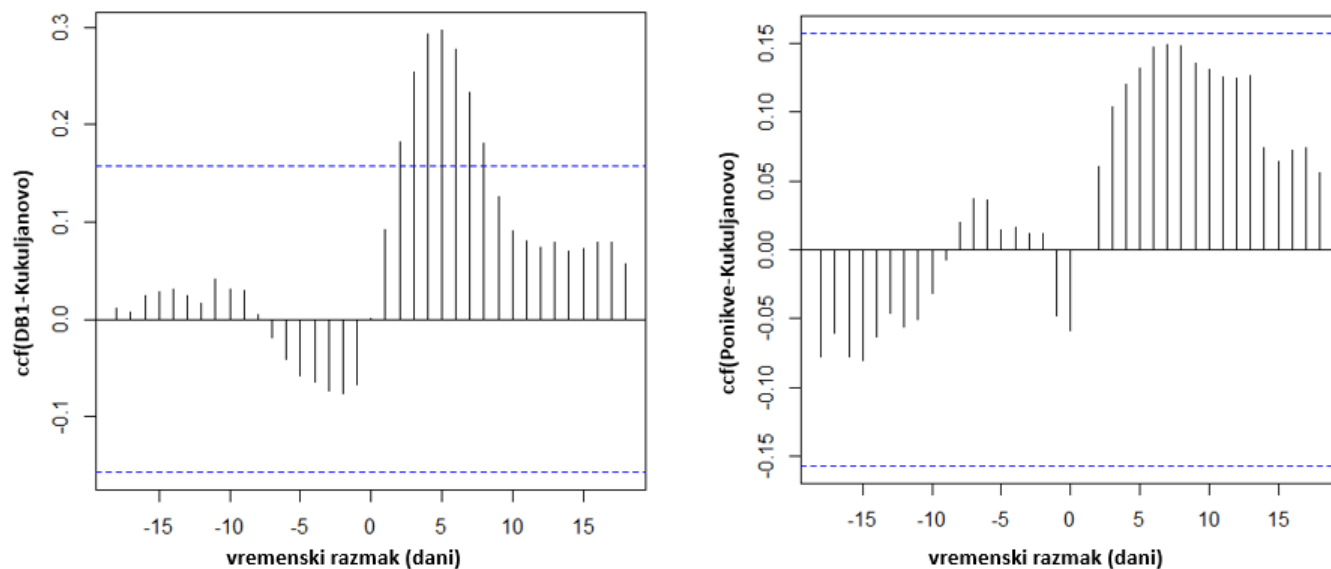
Slika 5.33: Vremenski niz količine oborina na Kukuljanovu 2019. godine.



Slika 5.34: Usporedba količine oborina i hoda razina podzemnih voda DB1 i Ponikve 2019. godine.

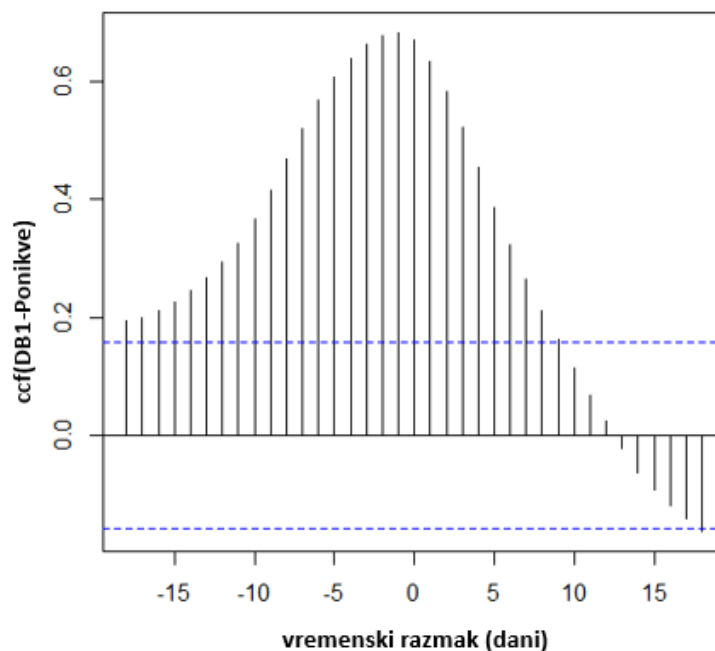
Na slici 5.34 vidi se da se ekstremne vrijednosti razina podzemnih voda podudaraju što podupire tvrdnju da većina minimalnih vrijednosti DB1 na grafu predstavlja razine vode ispod 203 m n. m., a ne presušivanje. Budući da se Ponikve nalaze na nižoj nadmorskoj visini, može se pretpostaviti da se dio podzemne vode s lokacije Kikovica slijeva prema Ponikvama i tako pridonosi rastu razine podzemne vode.

Podzemna voda DB1 pokazuje slabu povezanost s količinom oborina na Kukuljanovu sa zakašnjenjem od 4 dana. Općenito nema povezanosti kao ni između podzemne vode Ponikve i količine oborina na Kukuljanovu (slika 5.35):



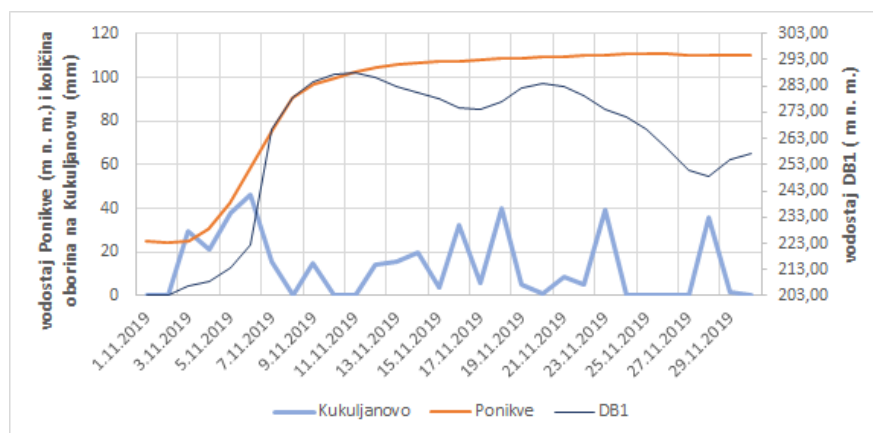
Slika 5.35: Kroskorelacija podzemne vode DB1 (lijevo) i Ponikve (desno) s količinom oborina na Kukuljanovu 2019. godine. Plave isprekidane linije označavaju granice statističke značajnosti.

Razine podzemnih voda međusobno su najbolje povezane 1 do 2 dana nakon što poraste razina podzemne vode Ponikve (slika 5.36) što podupire tvrdnju da se voda prvo slijeva u Ponikve i tek kada je niži horizont saturiran, područje rasti vodostaj na većoj nadmorskoj visini.

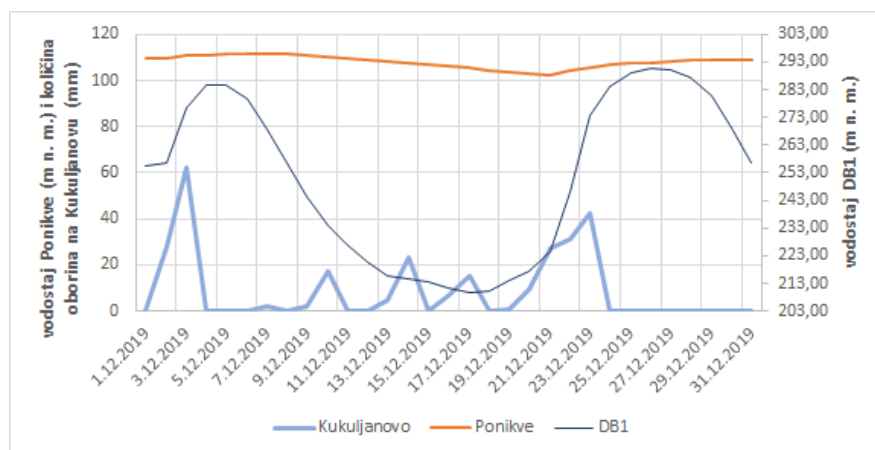


Slika 5.36: Kroskorelacija podzemne vode DB1 i Ponikve 2019. godine. Plave isprekidane linije označavaju granice statističke značajnosti.

Odnos razina podzemnih voda tijekom kišnog perioda prikazan je na slikama 5.37 i 5.38:

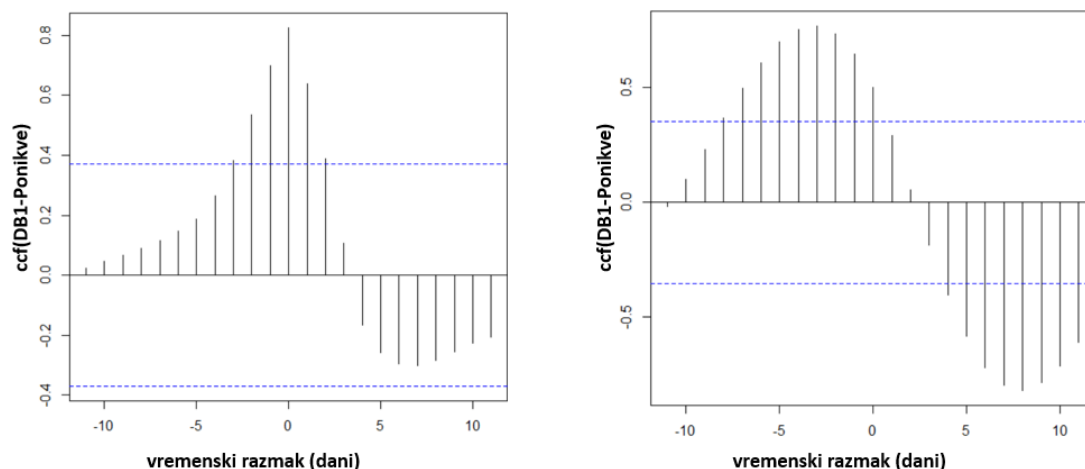


Slika 5.37: Usporedba količine oborina i hoda razina podzemnih voda DB1 i Ponikve u studenom 2019. godine.



Slika 5.38: Usporedba količine oborina i hoda razina podzemnih voda DB1 i Ponikve u prosincu 2019. godine.

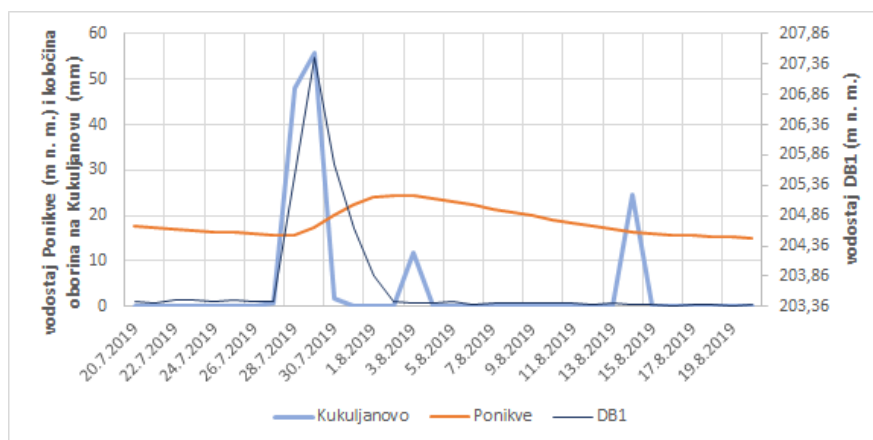
Razine podzemnih voda počinju rasti manje više istovremeno, ali podzemna voda DB1 više reagira na kišu. Smanjenjem količine oborina razina podzemne vode DB1 pada, a na lokaciji Ponikve ostaje konstantna. Ponikve u studenom i prosincu imaju razinu podzemne vode jednaku koti bušotine (oko 114 m n. m.), odnosno tijekom kišnog perioda podzemlje na manjoj nadmorskoj visini potpuno je saturirano. Razina podzemne vode na većoj nadmorskoj visini će oscilirati ovisno o količini oborina. Prethodno su određeni koeficijenti kroskorelacije količina oborina i podzemnih voda za studeni 2019. godine (slika 5.14 i slika 5.27). Na lokaciji Kikovica on iznosi $R=-0,47$, a na lokaciji Ponikve je malo manji, $R=-0,42$. Na slici 5.39 prikazana je kroskorelacija razina podzemnih voda DB1 i Ponikve tijekom studenog i prosinca 2019. godine:



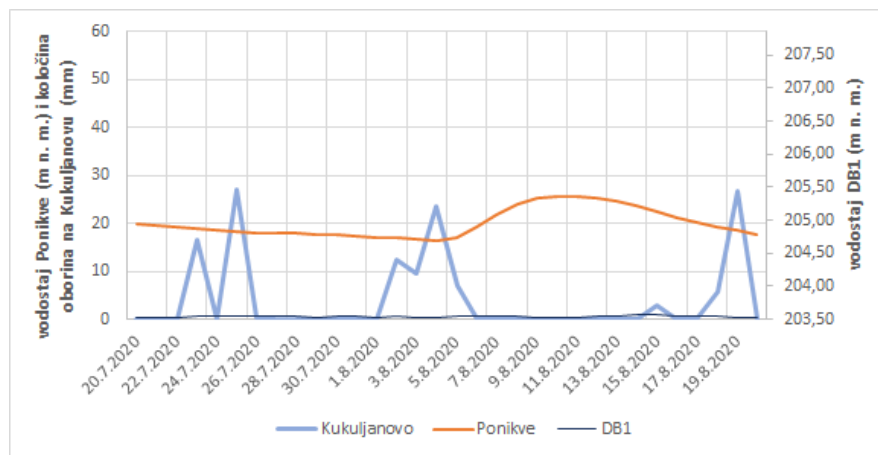
Slika 5.39: Usporedba količine oborina i hoda razina podzemnih voda DB1 i Ponikve u studenom (lijevo) i prosincu (desno) 2019. godine.

U studenom, kada istovremeno počinju rasti oba vodostaja, povezanost je vrlo dobra ($R=0,83$). Tijekom prosinca, kada je podzemlje saturirano i razina podzemne vode se sporije mijenja, povezanost je i dalje vrlo dobra ($R=0,81$), ali postoji vremenski razmak od nekoliko dana.

Slike 5.40 i 5.41 prikazuju odnos razina podzemnih voda ljeti. Za određivanje kroskorelacijskog koeficijenta nije bilo dovoljno podataka.



Slika 5.40: Usporedba količine oborina i hoda razina podzemnih voda DB1 i Ponikve u srpnju i kolovozu 2019. godine.



Slika 5.41: Usporedba količine oborina i hoda razina podzemnih voda DB1 i Ponikve u srpnju i kolovozu 2020. godine.

Na oba grafa može se primijetiti da je razina podzemne vode Ponikve na minimalnim vrijednostima, odnosno na granici do koje diver može mjeriti (13,5 m n. m.). Također se vidi da veća količina oborina uzrokuje porast razine podzemne vode DB1, a s malim zakašnjenjem počinju se puniti i Ponikve 5.40. Tijekom ljeta 2020. manja količina oborina izazvala porast razine podzemne vode samo na lokaciji Ponikve 5.41. Ovakvo ponašanje potvrđuje da se podzemna voda s DB1 slijeva prema Ponikvama.

6 ZAKLJUČAK

Prostor Grobničkog polja i Bakarskog zaljeva po pojavnosti svojih voda predstavlja vrlo važno područje. Pojave tečenja, odnosno istjecanja i zadržavanja podzemnih voda na površini terena na širem području Grobničkog polja, traju relativno kratko. Zbog važnosti šireg područja Grobničkog polja u funkcioniranju TPV Rijeka-Bakar uspostavljeno je praćenje razina podzemnih i površinskih voda. U okviru ovog diplomskog rada, zbog istjecanja podzemne vode na povremenim izvorima u uvjetima potpune saturacije podzemlja, odabrane su dvije lokacije: Kikovica i Ponikve. Analizirani su podaci razina podzemnih voda, površinskih voda i količina oborina te su dobiveni očekivani rezultati. Na obje lokacije dolazi do plavljenja kada je podzemlje potpuno saturirano. Tijekom cijelog analiziranog perioda može se uočiti sličnost između hoda razina površinske i podzemne vode na svakoj od lokacija, a sličnost postoji i s količinom oborina. Količina oborina uglavnom je najveća u periodu od rujna do prosinca, a ljeti one u pravilu izostaju, odnosno to je sušni period godine. Za promatrane godine, površinske i podzemne vode imaju maksimalne vrijednosti upravo tijekom zimskih mjeseci, a minimalne ljeti.

Usporedbom površinske i podzemne vode na obje lokacije utvrđena je statistički značajna korelacijska povezanost ($R=0,94$, $p<0,001$ na lokaciji Kikovica i $R=0,97$, $p<0,001$ na lokaciji Ponikve) i primjetan porast vodostaja površinske vode kada je razina podzemne vode oko 290 m n. m. na Kikovici, odnosno oko 90 m n. m. u Ponikvama. Te razine podzemnih voda odgovaraju nadmorskim visinama bušotina što potvrđuje da vodostaji površinskih voda rastu kada se podzemlje „napuni“. Korelacija je, očekivano, malo bolja na lokaciji Ponikve koja se nalazi na manjoj nadmorskoj visini gdje se voda s površine brže infiltrira u podzemlje. Na Kikovici je primijećeno da razina podzemne vode „kasni“ za vodostajem površinske vode. Ta lokacija nalazi se na većoj nadmorskoj visini pa je potrebno nekoliko dana da se podzemlje „napuni“. Reakcija vodostaja površinskih i razina podzemnih voda ovisi o stupnju saturacije podzemlja i nije jednoznačna, odnosno jednaka količina oborina neće uvijek imati isti utjecaj na vodostaje. Nakon dugog sušnog perioda potrebna je veća količina oborina da vodostaji primjetno porastu. Ako je podzemlje već djelomično saturirano zbog prethodnih kišnih perioda, razine podzemnih voda i vodostaji će reagirati i na manje količine novih oborina.

Usporedbom razina podzemnih voda potvrđeno je da podzemna voda na višoj nadmor-

skoj visini (Kikovica) počinje brže rasti kada je podzemlje na nižem horizontu (Ponikve) putpuno saturirano. Iako u nekim slučajevima Kikovica prva reagira na oborina, ta voda se prvo slijeva prema Ponikvama i puni ih, a tek nakon toga i razina podzemne vode Kikovica počinje rasti i ima dugotrajnije maksimalne vrijednosti. Time je potvrđeno da se drenažna zona prostire od Grobničkog polja prema Bakarskom zaljevu. Uz analizu podataka napravljenu u sklopu ovog rada, a koja se odnosi samo na podatke s lokacija Kikovica i Ponikve, potrebno je analizirati sva mjerenja površinskih i podzemnih voda provedenih u periodu od 2017. godine do danas. Tako provedenim istraživanjima upotpunit će se dosadašnja saznanja o pojavnosti voda na promatranom prostoru te će biti moguće dati zaključke vezane za potrebu redefiniranja zona sanitarne zaštite kao i zaštite od poplava.

Popis slika

2.1	Područje istraživanja [1].....	2
2.2	Prikaz srednjih godišnjih temperatura na području Gorskog kotara i Istre [4] (prema DHMZ 2002.). Crvenim krugom označeno je područje istraživanja.	4
2.3	Prikaz srednjih godišnjih količina oborina na području Gorskog kotara i Istre [4] (prema DHMZ, 2002.). Crvenim krugom označeno je područje istraživanja.	5
2.4	Model kretanja podzemne vode: povremeni izvor (lijevo), područje povremenog plavljenja (sredina), stalni izvor (desno) [1].....	8
2.5	Područje Ponikve tijekom visokih voda (gore) i sušnog perioda (dolje) [11].....	10
3.1	Lokacije prikupljanja podataka.	12
5.1	Histogram razina podzemnih voda.....	17
5.2	Histogram vodostaja površinskih voda.	17
5.3	Histogram količina oborina.	18
5.4	Vremenski niz podzemnih voda, površinskih voda i količina oborina.	19
5.5	Vremenski niz razine podzemne vode DB1 i površinske vode Kikovica tijekom perioda 25. 2. 2017. - 10. 6. 2023. godine.	21
5.6	Linearna funkcija prilagodbe razine podzemne vode DB1 i površinske vode Kikovica.	21
5.7	Kvadratna funkcija prilagodbe razine podzemne vode DB1 i površinske vode Kikovica.	22
5.8	Linearna korelacija podzemne vode DB1 i površinske vode Kikovica razdvojenih na slučajeve razine podzemne vode ispod i iznad 290 m n. m.....	22
5.9	Vremenski niz podzemne i površinske vode u usporedbi s količinom oborina na mjernim postajama Kukuljanovo i Rijeka tijekom perioda 25. 2. 2017. - 10. 6. 2023. godine.....	24
5.10	Kroskorelacija podzemne vode DB1 (lijevo) i površinske vode Kikovica (desno) s količinom oborina na Kukuljanovu 2018. godine. Plave isprekidane linije označavaju granice statističke značajnosti.	25
5.11	Kroskorelacija podzemne vode DB1 i površinske vode Kikovica 2018. godine. Plave isprekidane linije označavaju granice statističke značajnosti.....	26

5.12	Usporedba količine oborina na Kukuljanovu, hoda vodostaja podzemne vode DB1 i površinske vode Kikovica u studenom 2019. godine.	26
5.13	Usporedba količine oborina na Kukuljanovu, hoda vodostaja podzemne vode DB1 i površinske vode Kikovica u listopadu 2020. godine.	27
5.14	Kroskorelacija podzemne vode DB1, površinske vode Kikovica i količine oborina na Kukuljanovu u studenom 2019. godine. Plave isprekidane linije označavaju granice statističke značajnosti.	28
5.15	Usporedba količine oborina na Kukuljanovu, hoda vodostaja podzemne vode DB1 i površinske vode Kikovica u srpnju 2019. godine.	28
5.16	Usporedba količine oborina na Kukuljanovu, hoda vodostaja podzemne vode DB1 i površinske vode Kikovica u srpnju 2021. godine.	29
5.17	Vremenski niz razine podzemne vode Ponikve i površinske vode Mali Lug tijekom perioda 1. 1. 2018. - 10. 6. 2023. godine.	30
5.18	Linearna funkcija prilagodbe vodostaja podzemne vode Ponikve i površinske vode Mali Lug.	30
5.19	Kvadratna funkcija prilagodbe vodostaja podzemne vode Ponikve i površinske vode Mali Lug.	31
5.20	Linearna korelacija podzemne vode Ponikve i površinske vode Mali Lug.	31
5.21	Vremenski niz podzemne i površinske vode u usporedbi s količinom oborina na mjernim postajama Kukuljanovo i Rijeka tijekom perioda 1. 1. 2018. - 10. 6. 2023. godine.	33
5.22	Vremenski niz količine oborina na Kukuljanovu 2019. godine.	34
5.23	Usporedba količine oborina na Kukuljanovu, hoda vodostaja podzemne vode Ponikve i površinske vode Mali Lug 2019. godine.	34
5.24	Kroskorelacija podzemne vode Ponikve (lijevo) i površinske vode Mali Lug (desno) s količinom oborina na Kukuljanovu 2019. godine. Plave isprekidane linije označavaju granice statističke značajnosti.	35
5.25	Kroskorelacija podzemne vode Ponikve i površinske vode Mali Lug 2019. godine. Plave isprekidane linije označavaju granice statističke značajnosti.	36

5.26	Usporedba količine oborina na Kukuljanovu, hoda vodostaja podzemne vode Ponikve i površinske vode Mali Lug u studenom 2019. godine.....	36
5.27	Kroskorelacija podzemne vode Ponikve, površinske vode Mali Lug i količine oborina na Kukuljanovu u studenom 2019. godine. Plave isprekidane linije označavaju granice statističke značajnosti.	37
5.28	Usporedba količine oborina na Kukuljanovu, hoda razine podzemne vode Ponikve i površinske vode Mali Lug u srpnju i kolovozu 2020. godine.....	38
5.29	Vremenski niz razine podzemnih voda DB1 i Ponikve tijekom perioda 6. 3. 2017. - 10. 6. 2023. godine.....	38
5.30	Linearna funkcija prilagodbe razina podzemnih voda DB1 i Ponikve.....	39
5.31	Kvadratna funkcija prilagodbe razina podzemnih voda DB1 i Ponikve.....	39
5.32	Vremenski niz podzemne i površinske vode u usporedbi s količinom oborina na mjernim postajama Kukuljanovo i Rijeka tijekom perioda 6. 3. 2017. - 10. 6. 2023. godine.....	41
5.33	Vremenski niz količine oborina na Kukuljanovu 2019. godine.....	42
5.34	Usporedba količine oborina i hoda razina podzemnih voda DB1 i Ponikve 2019. godine.....	42
5.35	Kroskorelacija podzemne vode DB1 (lijevo) i Ponikve (desno) s količinom oborina na Kukuljanovu 2019. godine. Plave isprekidane linije označavaju granice statističke značajnosti.	43
5.36	Kroskorelacija podzemne vode DB1 i Ponikve 2019. godine. Plave isprekidane linije označavaju granice statističke značajnosti.	44
5.37	Usporedba količine oborina i hoda razina podzemnih voda DB1 i Ponikve u studenom 2019. godine.	44
5.38	Usporedba količine oborina i hoda razina podzemnih voda DB1 i Ponikve u prosincu 2019. godine.	45
5.39	Usporedba količine oborina i hoda razina podzemnih voda DB1 i Ponikve u studenom (lijevo) i prosincu (desno) 2019. godine.	46
5.40	Usporedba količine oborina i hoda razina podzemnih voda DB1 i Ponikve u srpnju i kolovozu 2019. godine.....	46

5.41	Usporedba količine oborina i hoda razina podzemnih voda DB1 i Ponikve u srpnju i kolovozu 2020. godine.	47
------	---	----

Popis tablica

1	Lokacije prikupljanja podataka.	11
2	Pregled postojećih podataka.	12
3	Ocjena korelacijskih veza.	14
4	Osnovne statističke veličine razina podzemnih i površinskih voda.	16
5	Osnovne statističke veličine količina oborina.	16

Literatura

- [1] R. Biondić, J. Rubinić, B. Biondić, H. Meaški i M. Radišić: *Definiranje trendova i ocjena stanja podzemnih voda na području krša u Hrvatskoj*. Tehnički izvještaj, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet i Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, 2016.
- [2] M. Oštrić, P. Prenc i J. Rubinić: *Analiza dinamike kolebanja i istjecanja podzemnih voda na prostoru Grobničkog polja i Bakarskog zaljeva*. u: zborniku radova Hidrologija u službi zaštite i korištenja voda te smanjenja poplavnih rizika – suvremeni trendovi i pristupi. Brela 18.-20.10.2018., Hrvatsko hidrološko društvo, Zagreb, 2018.
- [3] P. Prenc: *Analiza dinamike istjecanja vode na prostoru Grobničkog polja i Bakarskog zaljeva*. Magistarski rad, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, 2017.
- [4] B. Munda, M. Trutin i D. Pribeg: *Novelacija granica zaštitnih zona vodocrpilišta riječkog vodoopskrbnog sustava*. Tehnički izvještaj, Geoaqua d.o.o. - Zgareb, 2009.
- [5] M. Kuhta, Ž. Brkić i L. Kuhta: *Izvor Rječine i sjeverozapadni rub Grobničkog polja, hidrogeološki radovi - hidrokemijska i izotopna analiza*. Tehnički izvještaj, Hrvatski geološki institut, 2014.
- [6] K. Zaninović, M. Gajić-Čapka, M. Perčec Tadić i et al: *Klimatski atlas Hrvatske*. Državni hidrometeorološki zavod, 2008.
- [7] Č. Benac, J. Rubinić i N. Ožanić: *The origine and evaluation of coastal and submarinesprings in Bakar Bay*. Acta Carsologica, 32(1):157–171, 2016. <https://ojs.zrc-sazu.si/carsologica/article/view/371>.
- [8] B. Biondić, F. Dukarić, M. Kuhta i R. Biondić: *Hydrogeological exploration of the Rječina river spring in the Dinaric karst*. Geologia Croatica, 50(2):279–288, 2010. <http://www.geologia-croatica.hr/index.php/GC/article/view/GC.1997.36>.
- [9] M. Agović: *Gospodarenje vodama slivom rijeke Rječine*. Magistarski rad, Sveučilište u Rijeci, Medicinski fakultet, 2021.

- [10] M. Mihovilović, J. Rubinić i T. Mihovilović: *Monitoring i analiza dinamike podzemnih i površinskih voda Grobničkog polja*. Tehnički izvještaj, Geo-5 d.o.o., 2020.
- [11] <https://www.vecernji.hr/vijesti/u-ponikvama-postoji-sad-ga-vidis-sad-ga-ne-vidis-jezero-996771>, posjećeno 6. 9. 2023.
- [12] M. Mirtl, M. Kundid, V. Biluš i D. Grgić: *Područje Grobinštine – program provođenja istražnih radova i opažanja razine podzemne vode (2021. godine)*. Tehnički izvještaj, GE-ODATA PROJEKT d.o.o. za katastarsko geodetske poslove, 2021.
- [13] D. Mance: *Korelacija i linearna regresija*, 2022. prezentacija, preuzeto: rujan 2023.
- [14] <https://www.r-project.org/?fbclid=IwAR1BtOTOYH2BKUypdOqkak8YZfom05JYT89vSoZ-phLqTkHmAuaMoTv8EsE>, posjećeno 2023.
- [15] <https://rdocumentation.org/packages/tseries/versions/0.1-2/topics/ccf?fbclid=IwAR0gWqDW2exjGRWK66Va3mEL8U1aaPNItjCHwzzn-whpel4TaDAvG7KLuBA>, posjećeno 2023.
- [16] M. Visković: *Korelacijska i kroskorelacijska analiza protoka i oborina u slivu Jadra i Žrnovnice*. Magistarski rad, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, 2015.