# Dinamika zone miješanja slane i slatke vode na vodocrpilištu Boljkovac kod Zadra

**Radovan, Ana-Maria**

**Master's thesis / Diplomski rad**

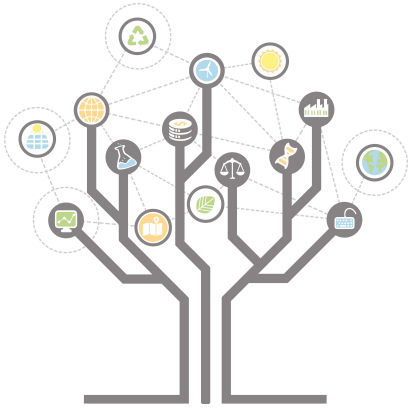
**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:208318

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-03-29**



*Repository / Repozitorij:*

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ANA-MARIA RADOVAN

# DINAMIKA ZONE MIJEŠANJA SLANE I SLATKE VODE NA VODOCRPILIŠTU BOLJKOVAC KOD ZADRA

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2021.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva

za 15. 07. 2021. u 9 sati

Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred ispitnim povjerenstvom u Varaždinu

Varaždin, 01.07.2021.

Predsjednik
ispitnog povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Sanja Kovač

Članovi povjerenstva

1) Prof. dr. sc. Ranko Biondić
2) Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Meaški
3) Doc. dr. sc. Jelena Loborec

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ANA-MARIA RADOVAN

# DINAMIKA ZONE MIJEŠANJA SLANE I SLATKE VODE NA VODOCRPILIŠTU BOLJKOVAC KOD ZADRA

DIPLOMSKI RAD

KANDIDAT:

Ana-Maria Radovan

Ana-Maria Radovan

MENTOR:

prof. dr. sc. Ranko Biondić

VARAŽDIN, 2021.

Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet

# ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnica: ANA-MARIA RADOVAN

Matični broj: 264 - 2019./2020.

Smjer: UPRAVLJANJE VODAMA

## NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

DINAMIKA ZONE MIJEŠANJA SLANE I SLATKE VODE NA VODOCRPILIŠTU BOLJKOVAC KOD ZADRA

Rad treba sadržati: 1. Uvod
2. Zaslanjenje krških priobalnih vodonosnika
3. Tijelo podzemne vode Bokanjac - Poličnik
4. Monitoring podzemnih voda
5. Zaključak

Pristupnica je dužna predati mentoru jedan uvezen primjerak diplomskog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade diplomskog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 10.03.2021.

Rok predaje: 01.07.2021.

Mentor:

Prof.dr.sc. Ranko Biondić

REPUBLIKA HRVATSKA - GEOTEHNIČKI FAKULTET - SVEUČILIŠTE U ZAGREBU - VARAŽDIN

Predsjednik Odbora za nastavu:

Izv.prof.dr.sc. Sanja Kovač

STUDIJ INŽENJERSTVA OKOLIŠA

# IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

Dinamika zone miješanja slane i slatke vode na vodocrpilištu Boljkovac kod Zadra

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom prof. dr. sc. Ranka Biondića.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 21.6.2021.

ANA-MARIA RADOVAN

Ana-Maria Radovan

(Vlastoručni potpis)

# IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI DIPLOMSKOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

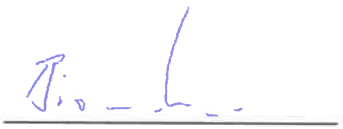
Dinamika zone miješanja slane i slatke vode na vodocrpilištu Boljkovac kod Zadra

pregledan anti-plagijat programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog diplomskog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20 %, kao i da pojedinačni postotak sličnosti diplomskog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5 %.

U Varaždinu, 21.6.2021.

prof. dr. sc. RANKO BIONDIĆ

(Mentor)



(Vlastoručni potpis)

SAŽETAK

IME I PREZIME AUTORA: ANA-MARIA RADOVAN

NASLOV RADA: DINAMIKA ZONE MIJEŠANJA SLANE I SLATKE VODE NA VODOCRPILIŠTU BOLJKOVAC KOD ZADRA

Na primjeru vodocrpilišta Boljkovac koje pripada tijelu podzemne vode Bokanjac-Poličnik prikazana je statistička obrada podataka koji ukazuju na zaslanjenje vodonosnika i dinamiku zone miješanja slane i slatke vode. Podaci su dobiveni operativnim monitoringom te uključuju vrijednosti razina podzemne vode, električne vodljivosti i temperature koji su mjereni na vodocrpilištu Boljkovac te u piezometarskoj bušotini BOLJ-1. Dodatni podaci koji su uključeni u obradu su koncentracije klorida i sulfata, količina oborina te vrijednosti protoka i vodostaja. Pomoću grafički prikazanih međuodnosa navedenih parametara vidljivo je da do zaslanjenja na vodocrpilištu Boljkovac dolazi nakon značajnih oborina koja slijede nakon ljetnih sušnih razdoblja, odnosno zaslanjenje je posljedica prirodnih procesa.

KLJUČNE RIJEČI:

Tijelo podzemne vode Bokanjac-Poličnik, vodocrpilište Boljkovac, zaslanjenje vodonosnika, zona slane i slatke vode

ABSTRACT

NAME AND SURNAME of the AUTHOR: ANA-MARIA RADOVAN

TITLE: DYNAMICS OF THE SALT AND FRESH WATER TRANSITION ZONE AT THE BOLJKOVAC WATER SUPPLY SITE NEAR ZADAR

Taking into account the example of the Boljkovac water supply, which belongs to the groundwater body Bokanjac-Poličnik, the statistical processinf of dana point to the salinization of the aquifers and the dynamics of the salt and fresh water mixing zone. The data are obtained by operational monitoring and include the values of the levels of groundwater, electrical conductivity, and temperature measured at Boljkovac water supply and in the piezometer BOLJ-1. Additional information include chloride and sulphate concetrations, rainfall, flow values and water levels. With help of a graph which displays the relationship between these parameters, it is evident that the salinization of the Boljkovac water supply happens after a significant rainfall, which is preceded by dry summer period, i.e. salinization is a result of natural processes.

KEYWORDS:

Groundwater body Bokanjac-Poličnik, Boljkovac water supply, aquifer salinization, salt and fresh water mixing zone

# SADRŽAJ

1. UVOD ..... 1
2. ZASLANJENJE KRŠKIH PRIOBALNIH VODONOSNIKA ..... 3
2.1. Osnovne zakonitosti miješanja slane i slatke vode ..... 4
2.2. Utjecaj prekomjernog crpljenja na zaslanjenje priobalnih vodonosnika .. 13
2.3. Zaslanjenje u TPV Bokanjac-Poličnik ..... 15
3. TIJELO PODZEMNE VODE BOKANJAC – POLIČNIK ..... 16
3.1. Geološki opis ..... 17
3.2. Hidrogeološki opis ..... 19
3.3. Hidrološki i klimatološki opis ..... 23
3.4. Prikaz vodocrpilišta ..... 24
4. MONITORING PODZEMNIH VODA ..... 28
4.1. Operativni monitoring na TPV Bokanjac-Poličnik ..... 30
4.2. Rezultati i analiza monitoringa na TPV Bokanjac-Poličnik ..... 32
5. ZAKLJUČAK ..... 48
6. LITERATURA ..... 49
POPIS SLIKA ..... 51
POPIS TABLICA ..... 54

# 1. UVOD

Svrha ovog rada je sintetizirati do sada stečena znanja iz područja geologije, hidrogeologije i hidrogeokemije te pomoću statističke obrade analizirati podatke dobivene operativnim monitoringom podzemnih voda. Takve analize su jednostavne te se danas sve više koriste prilikom proučavanja utjecaja morske vode na priobalne krške vodonosnike. Kao područje istraživanja odabrano je vodocrpilište Boljkovac.

Voda predstavlja osnovu života, odnosno voda je neophodna za život ljudi, životinja i biljaka te za gospodarstvo. Svakim danom sve je veći pritisak na vodne resurse zbog brojnih načina njene upotrebe u raznim sektorima, zbog sve veće agrikulturne djelatnosti, turizma, prometa i korištenja energije. U vodu mogu dospijeti različita onečišćenja koja ugrožavaju ekosustav i ljudsko zdravlje pri čemu su onečišćenja najčešće posljedica antropogenih djelatnosti. Ugrožavanjem vode utječe se na njezin kemijski sastav, odnosno na kvalitetu vode, a moguće je utjecati i na samu količinu vode. Kako je voda „opće dobro i ograničen resurs potrebno ju je zaštiti i upotrebljavati na održiv način“ (Okvirna direktiva o vodama (2000/60/EC)).

Prema Svjetskoj zdravstvenoj organizaciji (engl. *World Health Organization*) 2017. godine je tek 71% globalne populacije imalo pristup čistoj i sigurnoj pitkoj vodi. Pretpostavlja se da će do 2025. godine polovica stanovništva živjeti u područjima u kojima će vladati nestašica vode (www.who.int). S ciljem zaštite vodnih resursa uspostavljeni su brojni pravni okviri, npr. Okvirna direktiva o vodama (2000/60/EC) i Direktiva o podzemnim vodama (2006/118/EC). Nadalje, zaštita podzemnih voda u Republici Hrvatskoj dio je upravljanja vodama koje je propisano Zakonom o vodama (NN 66/19), Strategijom upravljanja vodama (NN 91/08) i Planom upravljanja vodnim područjima (NN 66/16).

Prema Zakonu o vodama (NN 66/19) područje Republike Hrvatske dijeli se na dva vodna područja: vodno područje rijeke Dunav koje karakteriziraju stijene međuzrnske poroznosti te jadransko vodno područje koje karakteriziraju stijene pukotinske i pukotinsko-kavernozne poroznosti. Ovaj diplomski rad osvrće se na jadransko vodno područje, a specifičan reljef koji se prostire tim područjem je krš. Samo vodno područje prostire se duž Jadranske obale i karakteriziraju ga krški priobalni vodonosnici čija je

specifičnost velika količina kvalitetne podzemne pitke vode, ali i utjecaj mora na vodonosnike, odnosno intruzija mora duboko u zaleđe i zaslanjenje podzemne pitke vode. Zaslanjenje može biti pojava koja se javlja u potpuno prirodnim uvjetima, ali većinom je posljedica antropogenih aktivnosti koje se odnose na nekontrolirano i prekomjerno crpljenje podzemne vode. Takvim crpljenjem se remeti labilna dinamička ravnoteža slatke i slane vode u priobalnom vodonosniku te može uzrokovati intruziju morske vode i podizanje zone miješanja slane i slatke vode prema samom crpnom objektu. Prekomjerna eksploatacija podzemne vode odgovor je na povećanu potražnju za vodom do koje dolazi zbog socio-ekonomskog razvitka stanovništva.

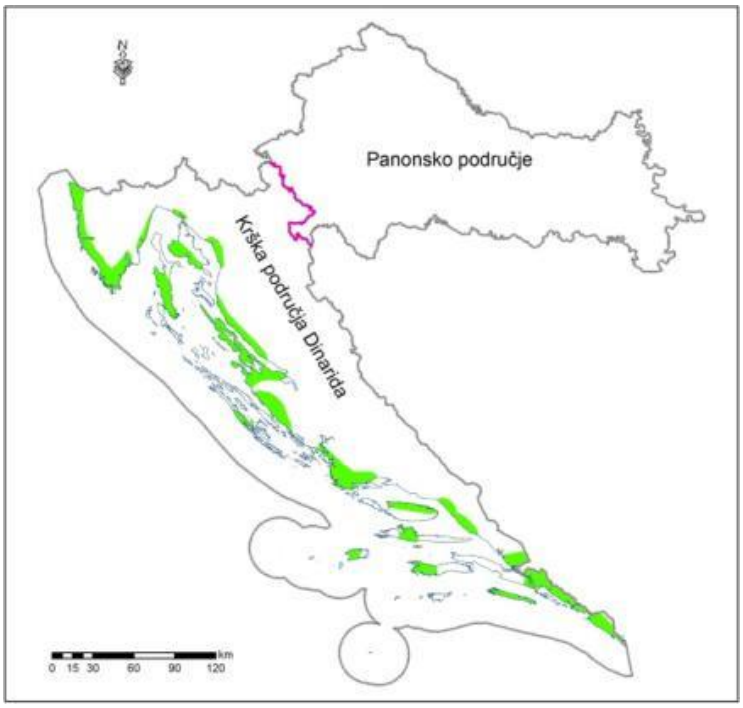
Primjer krškog priobalnog vodonosnika u kojem se povremeno pojavljuje problem zaslanjenja je tijelo podzemne vode (u daljnjem tekstu TPV) Bokanjac-Poličnik koje se nalazi kod Zadra. Prema Planu upravljanja vodnim područjima 2016.-2021. (NN 82/13) TPV Bokanjac-Poličnik je proglašeno „u lošem stanju“ te „pod rizikom“ zbog zaslanjenja na crpilištima Bokanjac, Jezerce, Boljkovac i Golubinka. Kako bi se pravilno upravljalo vodnim resursima, prema Okvirnoj direktivi o vodama (2000/60/EC) potrebno je uspostaviti odgovarajući monitoring. Operativni monitoring na TPV Bokanjac-Poličnik je uspostavljen 9. prosinca 2017. godine postavljanjem automatskih mjerača razine podzemne vode, temperature i električne vodljivosti u vodne objekte pomoću kojih se nastoji objasniti utjecaj morske vode na vodonosnik. Na vodocrpilištu Boljkovac do zaslanjenja dolazi u prirodnim uvjetima, odnosno nakon ljetnih i sušnih razdoblja nagle i veće količine oborina uzrokuju povišenje vrijednosti električne vodljivosti, klorida i sulfata jer dolazi do narušavanja labilne dinamičke ravnoteže između slane i slatke vode (Biondić, R. et al., 2019).

Cilj ovog rada je prikazati i objasniti problematiku zaslanjenja na dijelu TPV Bokanjac-Poličnik, u zoni vodocrpilišta Boljkovac. Na njemu se, u sklopu operativnog monitoringa podzemnih voda, mjeri i analizira razina podzemne vode, temperatura i električna vodljivost. Pomoću navedenih parametara te još dodatnih parametara (kloridi, sulfati, oborine, vodostaj, protok) izrađena je statistička analiza te su grafički prikazani odnosi parametara na temelju kojih su izvedeni zaključci o zaslanjenju vodonosnika i zoni miješanja slane i slatke vode.

# 2. ZASLANJENJE KRŠKIH PRIOBALNIH VODONOSNIKA

Pojam *krš* označava „specifičan reljef topljivih stijena s posebnom (pretežito podzemnom) cirkulacijom vode (vapnenac, dolomit, gips)“ (www.enciklopedija.hr). Razvoj krških procesa posljedica je geološke strukturne forme, rasjeda i pukotinskih sustava gdje do izražaja dolazi interakcija stijena i voda čime se rasjedi i pukotine šire, a kroz njih se odvija dinamika vode. U Hrvatskoj su krška područja vezana uz geološke strukture Dinarida gdje prevladavaju karbonatne stijene. Na tom području su, razvojem krških procesa, nastali krški vodonosnici koji su od velikog značaja zbog dobre kvalitete vode i upotrebe u vodoopskrbi. Bitno je naglasiti da „krški vodonosnici imaju status strateških rezervi pitke vode“ (Biondić, B. i Biondić, R., 2014).

Glavni morfološki i hidrogeološki razvoj priobalnih krških vodonosnika dogodio se u geološkoj prošlosti pod utjecajem različitih klimatskih uvjeta. Za vrijeme kvartara, tijekom zadnjeg ledenog doba (Würm), razina mora je bila za oko 100 m niža nego danas te je kao takva predstavljala osnovu erozije za krško područje. Također, na toj razini su se pojavljivali izvori pitke vode. Zatim je uslijedilo zatopljenje te su zbog povišenja temperatura i topljenja ledenog pokrivača nastale velike količine vode što je dovelo do povišenja razine mora. Kako je rasla razina mora tako je i baza okršavanja pratila taj proces stvarajući krške kanale i pukotinske sustave. Kao posljedica rasta razine mora, već razvijeni krški izvori počeli su istjecati pod morem, a pojavili su se i novi i više pozicionirani priobalni izvori. Morska voda je putem kanala i pukotina ušla u okršeno karbonatno podzemlje, na udaljenosti veće od čak i više desetaka kilometara, a zbog specifično teže morske vode, sustavi slatke vode su uzdignuti. Novonastali priobalni krški sustavi su složeni i često jako okršeni ispod sadašnje razine mora. Krajnji rezultat svih navedenih procesa je utjecaj morske vode na vodonosnike, odnosno intruzija slane vode u vodonosnike koji služe za vodoopskrbu, a samo zaslanjenje pitke vode, koje je različitih razmjera, primjećuje se diljem hrvatskog priobalnog područja (Slika 1.) (Biondić, B. i Biondić, R., 2014, COST 621, 2005).




**Slika 1. Prikaz priobalnih vodonosnika koji se nalaze pod utjecajem morske vode (Biondić, B. i Biondić, R., 2014)**

Problematikom zaslanjenja bavili su se brojni znanstvenici i inženjeri koji su sudjelovali u COST Akciji 621: „Upravljanje podzemnim vodama priobalnih krških vodonosnika“ te su proučavali zakone koji se odnose na ravnotežu slanih i slatkih voda. U ovom projektu su sudjelovali stručnjaci iz različitih zemalja (Portugal, Španjolska, Francuska, Mađarska, Slovenija, Hrvatska, Turska, Grčka, Malta, Izrael) koji su predstavili različita pilot područja u kojima se susreće zaslanjenje priobalnih vodonosnika te su nastojali objasniti ulogu prekomjerne eksploatacije u određivanju zaslanjenja i drugih vezanih problematika u krškim vodonosnicima koje ugrožavaju vitalne resurse podzemnih voda. U sklopu projekta razrađene su nove metodologije, objašnjeni su mehanizmi zaslanjenja, metode su testirane na različitim pilot projektima, a sam cilj je bio uspostaviti instrumente pomoću kojih se omogućuje održivo upravljanje podzemnim vodama (COST 621, 2005).

## 2.1. Osnovne zakonitosti miješanja slane i slatke vode

Procesi miješanja slane i slatke vode su složeni zbog heterogenosti krških sustava i poteškoća u određivanju trodimenzionalne krške mreže te zbog poteškoća u određivanju prostornih distribucija hidrogeoloških parametara (koeficijent hidrauličke provodljivosti, transmisivnost, koeficijent uskladištenja). Zbog navedenih poteškoća razvoj zaslanjenja

može biti nepravilan, a zbog prisutnosti krških kanala, do zaslanjenja može doći u kratkom vremenskom periodu. Prijelazna zona, odnosno zona miješanja slane i slatke vode, nastaje zbog nestabilne ravnoteže koja se vrlo lako može poremetiti, primjerice eksploatacijom podzemne vode. Stoga je bitno proučavati i razumjeti hidrodinamičke procese koji kontroliraju položaj i opseg zone miješanja. Ovisno o otvorenosti geoloških struktura prema moru te hidrološkim prilikama, morska voda može ući u vodonosnik te dolazi do stvaranja klina slane vode u vodonosniku pri čemu nastaje zona kontakta između slane i slatke vode. Zona kontakta može se modelirati putem dva pristupa (COST 621, 2005):

1. pristup kao tekućinama koje se ne miješaju gdje postoji oštra granica između dvije tekućine različitih gustoća,
2. pristup kao tekućinama koje se miješaju s zonom miješanja između dvije tekućine uglavnom zbog efekta disperzije.

Ukoliko se proučava pristup kao tekućinama koje se ne miješaju već postoji oštra granica, pojednostavljuje se matematička formulacija. Prvi korak prema istraživanju prodora morske vode predstavlja načelo koje su Ghyben i Herzberg razvili odvojeno krajem devetnaestog stoljeća s ciljem definiranja granice između slane i slatke vode. U ovom slučaju se pretpostavlja da je vodonosnik izotropan i homogen, nestišljiv, ograničen na slatkovodnu zonu, tok je dvodimenzionalan, uspostavljeni su uvjeti stacionarnog tečenja, Dupuitova pretpostavka da nema vertikalnog hidrauličkog gradijenta je valjana (ekvipotencijalne linije su približno vertikalne), a sustav slane vode je u hidrostatskoj ravnoteži. Osnovna formula temelji se na ravnoteži visine dva stupca tekućina različitih gustoća. Unutar otvorenog vodonosnika za vrijeme hidrostatske ravnoteže, položaj granice između slane i slatke vode je povezan s nadmorskom visinom vodnog lica. Na toj granici, jednakost tlakova u dvije tekućine je definirana sljedećom Gyhben-Herzbergovom formulom za dubinu $h_s$ granice miješanja ispod razine mora:

$$h_s = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f \tag{1}$$

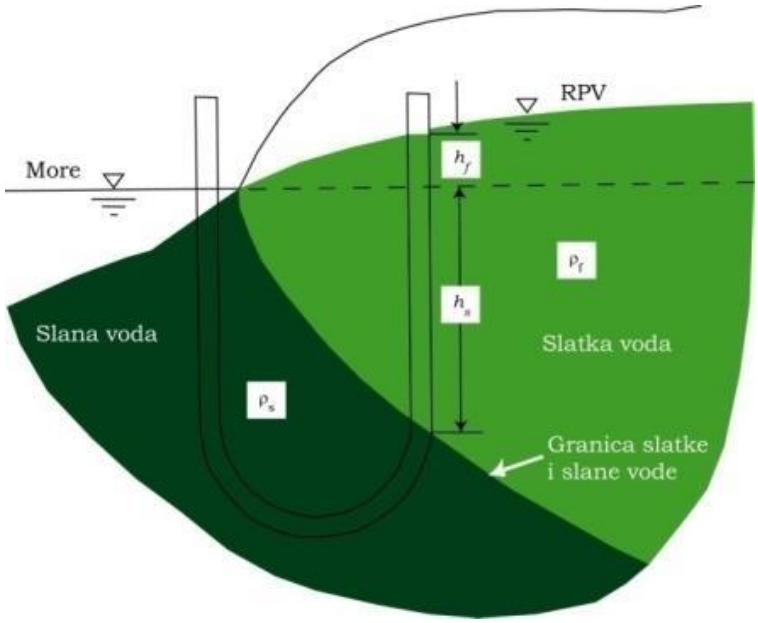
gdje su:

$\rho_f$ – gustoća slatke vode,

$\rho_s$ – gustoća slane vode,

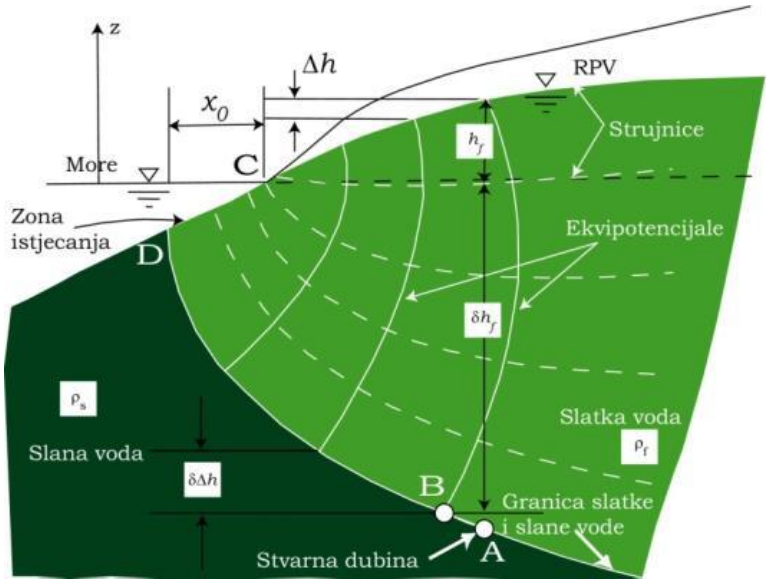
$h_f$ – visina slatke vode iznad razine mora.

Ukoliko se prihvate prosječne vrijednosti $\rho_f = 1000\ kg/m^3$ i $\rho_s = 1025\ kg/m^3$, dobiva se $h_s = 40\ h_f$, odnosno, za 1 m nadsloja slatke vode iznad srednje razine mora postoji približno 40 m slatke vode ispod te razine (Slika 2.) (Biondić, B. i Biondić, R., 2014, COST 621, 2005).




**Slika 2. Gyhben-Herzbergov princip – odnos položaja slane i slatke vode (prema BEAR & VERRUIJT, 1994)**

Stanje u prirodi je kompleksnije nego što je to definirano Gyhben-Herzbergovim zakonom; ekvipotencijalne linije nisu vertikalne pa se taj zakon može koristiti samo kao gruba aproksimacija. Ujedno je i stvarna dubina do zone miješanja veća od proračunatih 40 m (Slika 3.) (Biondić, B. i Biondić, R., 2014). Nadalje, hidrostatska ravnoteža koju su Gyhben i Herzberg pretpostavili ne podrazumijeva tok te je takva pretpostavka nevažeća na točkama blizu mjesta otpuštanja vodonosnika u more jer podrazumijeva nultu dubinu slatke vode na sjecištu vodonosnika s morem, što je fizički nemoguće. Zapravo, sjecište mora biti linija, a ne točka. Linija otpuštanja smatra se ili vertikalnom ili horizontalnom kako bi se pojednostavila matematička analiza. U hidrodinamičkom pristupu moraju se u obzir uzeti kretanje i otpuštanje slatke vode u more (COST 621, 2005).




**Slika 3. Prikaz stvarnog tečenja vode u priobalnoj zoni: A – stvarna dubina od površine do zone miješanja, B – dubina od površine do zone miješanja prema Ghyben-Herzbergovom zakonu (prema BEAR & VERRUIJT, 1994)**

Hubbert (1940.) i Muskat (1937.) su prvi razmotrili dinamičku ravnotežu između slane i slake vode. Hubber je definirao $h_f$ i $h_s$ za obje tekućine te izveo sljedeću jednadžbu koja se odnosi na granicu i vrijedi za stacionarno stanje slane vode ili obje tekućine (COST 621, 2005):

$$z = \frac{\rho_f h_f - \rho_s h_s}{\rho_s - \rho_f} \tag{2}$$

Razvijena su i mnoga druga analitička rješenja za modeliranje oštre granice između slane i slatke podzemne vode u poroznim priobalnim vodonosnicima.

S druge strane, pristup kao tekućinama koje se miješaju, umjesto idealne oštre granice podrazumijeva zonu miješanja slane i slatke vode koja nastaje zbog hidrodinamičke ravnoteže. Problem je matematički mnogo kompleksniji i zahtijeva rješavanje složenog toka podzemnih voda i prijenosa otopljenih tvari kako bi se dobila simulacija raspršene zone miješanja. S niskim vrijednostima koeficijenata raspršenja, zona miješanja je uska, a konture koncentracija migriraju uzvodno u blizinu baze vodonosnika koja se nalazi na mjestu „virtualne“ oštre granice. To omogućuje primjenu analitičkih rješenja za nemješljive modele. Reilly i Goodmann (1897.) su sugerirali da bi pretpostavka oštre granice mogla biti prihvatljiva ako je debljina zone miješanja manja od 1/3 debljine

slatkovodne zone. Uz specifične granične uvjete i geometriju, numeričke metode su obavezne kako bi se riješile jednadžbe (COST 621, 2005).

Cooper (1959.) je prvi unaprijedio hipotezu da slana voda u dinamičkim uvjetima nije statička te je dao argumente na temelju opažanja u različitim terenskim istraživanjima za postojanje zone miješanja i uz to povezane neprestane cirkulacije slane vode.

Henry (1964.) je pokušao kvantitativno utvrditi učinke miješanja i gustoće ovisno o prodiranju slane vode u vodonosnik. Definirao je idealizirani matematički model zatvorenog vodonosnika. Pristup miješanja dviju tekućina zahtjeva rješavanje višestrukih jednadžbi (jednadžba bilance vode i jednadžba bilance otopljenih tvari) koje su:

$$\rho S_{0p} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial c}\frac{\partial c}{\partial t} = -\nabla \cdot \rho \, \boldsymbol{q} \tag{3}$$

$$\frac{\partial (nc)}{\partial t} = \nabla \cdot n\boldsymbol{D_h} \cdot \nabla c - \nabla \cdot \boldsymbol{q}c \tag{4}$$

Gdje su:

$\rho$ – gustoća fluida,

$S_{0p}$ – specifično uskladištenje,

$p$ – tlak fluida,

$t$ – vrijeme,

$c$ – koncentracija (u masi otopljene tvari po jedinici volumena vode),

$\boldsymbol{q}$ – specifično otpuštanje,

$n$ – porozitet,

$\boldsymbol{D_h}$ – tenzor hidrodinamičke disperzije.

Navedena jednadžba dopunjava se sa:

- Jednadžbom gibanja koja povezuje $q$ (volumen vode koja teče po jedinici površine u jedinici vremena) s $k$ tenzorom specifične propusnosti (ovisi samo o geometrijskim svojstvima krutog matriksa):

$$q = -\frac{k}{\mu} \cdot (\nabla p + \rho g \nabla z) \tag{5}$$

  Gdje su:

  $\mu$ - dinamička viskoznost,

  g - gravitacijsko ubrzanje.

- Jednadžbom koja povezuje gustoću i koncentraciju:

$$\rho = \rho_0 + a(c - c_0) \tag{6}$$

Gdje su $\rho_0$, a i $c_0$ konstante.

- Jednadžbom hidrodinamičke disperzije:

$$D_{h,ij} = \alpha_T |V| \delta_{ij} + \frac{(\alpha_L - \alpha_T) V_i V_j}{|V|} + D_{ij}^* \quad (7)$$

Gdje su:

$\alpha_T$ – longitudinalna disperzivnost,

$\alpha_L$ – transverzalna disperzivnost,

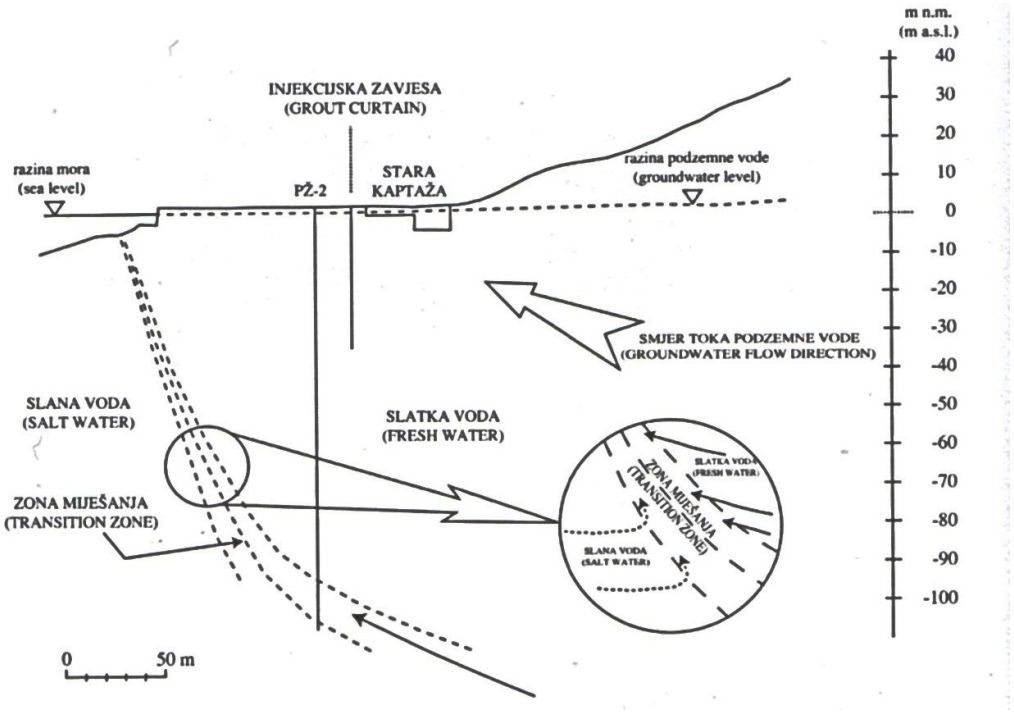
V – prosječno linearno ubrzanje, jednako q/n,

$D_{ij}^*$ - molekulska difuzija.

Obično se u problemu intruzije slane vode zanemaruju varijacije ρ zbog promjene tlaka i μ zbog promjene tlaka i koncentracije. Specifično uskladištenje $S_{0p}$ je definirano kao volumen vode koja je otpuštena iz jediničnog volumena vodonosnika po jedinici pada tlaka i povezano je s α i β, odnosno sa stlačivosti vode i vodonosnika:

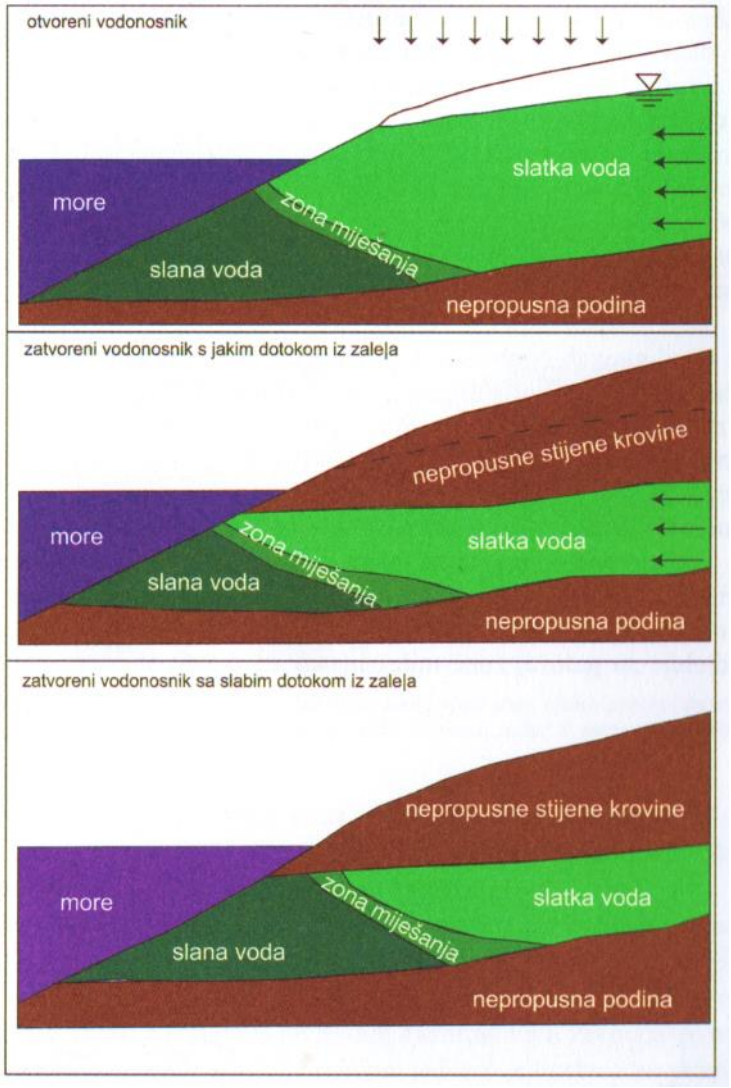
$$S_{0p} = \alpha(1-n)+n\beta \quad (8)$$

Prilikom proučavanja odnosa miješanja slane i slatke vode, najčešće se istražuje gornja granica zone miješanja, tj. zona na kojoj se pojavljuje povišenje saliniteta. Formiranje zone miješanja slane i slatke vode uzrokovano je hidrodinamičkim raspršenjem koje je zbroj dva istovremena fenomena: mehaničko raspršenje i molekularna difuzija. Za mehaničku disperziju iskustvo pokazuje da kako se tok odvija otopljena tvar (sol u ovom slučaju) ima tendenciju širiti se postupno zauzimajući sve veći volumen vodonosnika, izvan volumena koji se očekuje ako se u obzir uzme samo prosječni Darcy-ev tok. Do širenja dolazi zbog odstupanja od prosječne brzine. Zapravo, oblik međusobno povezanih pora uzrokuje mikroskopsko pojednostavljenje fluktuacija u prostoru s obzirom na smjer toka, dok se širenje javlja i u uzdužnim i poprečnim smjerovima. Dodatni fenomen prijenosa mase je molekularna difuzija do koje dolazi zbog nastojanja otopljenih tvari da izjednače koncentracije. To stvara dodatni tok otopljenih čestica koje se kreću iz područja više koncentracije u područje niže koncentracije (COST 621, 2005). Nadalje, dinamika vode čuva kompaktnost zone te uzgonski izbacuje slanu komponentu i čuva ravnotežu sustava. Debljina zone miješanja ovisi o tečenju slane i slatke komponente i propusnosti vodonosnika, a u samoj zoni događa se tečenje i slane i slatke komponente (Slika 4.).




**Slika 4. Shematski prikaz tečenja u priobalnom vodonosniku (Biondić, B. i Biondić R., 2014)**

Na veličinu i položaj zone miješanja, između ostalog, utječu hidraulički gradijent i geološka građa. Uz način prihranjivanja, Custodio (1985.) je odnos slane i slatke vode prikazao pomoću tri modela: model s otvorenim vodonosnikom i prihranjivanjem iz zaleđa i oborina, model s zatvorenim vodonosnikom s dotocima podzemne vode sa sliva, model s zatvorenim vodonosnikom bez značajnih dotoka podzemne vode sa sliva (Slika 5.). Iz slike se može vidjeti da su prva dva modela u odnosu na položaj zone slična. Tek je na trećem modelu vidljiva razlika. Na položaj i promjene u zoni utječe hidraulički tlak podzemne vode koja dolazi sa sliva. Zona miješanja slane i slatke vode se pomiče dublje u kopno ukoliko su dotoci vode manji. Također, ukoliko je vodonepropusna podloga na većim dubinama ili je uopće nema, slana vode može prodrijeti dublje u kopno te tim putem zapuniti dublje dijelove vodonosnika ispod slatkovodne leće. Od navedena tri modela, u krškim priobalnim vodonosnicima Hrvatske, prvi model je najčešći slučaj (Biondić, B. i Biondić, R., 2014).




**Slika 5. Prikaz različitih modela miješanja slane i slatke vode (Biondić, B. i Biondić, R., 2014; modificirano prema Custodio, 1985)**

Tok podzemne vode može se prikazati kao tok kroz cijevi određene hrapavosti, odnosno cijeli pukotinski sustav se može matematički opisati pomoću jedne jednostavne cijevi. Prema Gjurašinu (1942., 1943.) ponašanje priobalnih krških izvora može se opisati uz zadovoljavanje uvjeta: 0,025 $h_s > h_v$, pri čemu je $h_s$ dubina spoja glavne i sporedne cijevi ispod morske razine, a $h_v$ visina izvora nad razinom mora. Potrebno je odrediti veličinu hidrauličkog gradijenta koji ima utjecaj na promjenu kuta ω, vrijednosti piezometarske razine h te na količinu istjecanja Q. Promjena navedenih parametara mijenja uvjete na spoju podzemnih tokova u točki D što utječe na promjenu položaja zone miješanja slane i slatke vode. Moguća su tri slučaja (Biondić, B. i Biondić, R., 2014):

(I) U prvom slučaju postoji velik gradijent te određena piezometarska razina h. Morska voda je potisnuta te dolazi do istjecanja slatke vode na vrulji i na priobalnom izvoru.

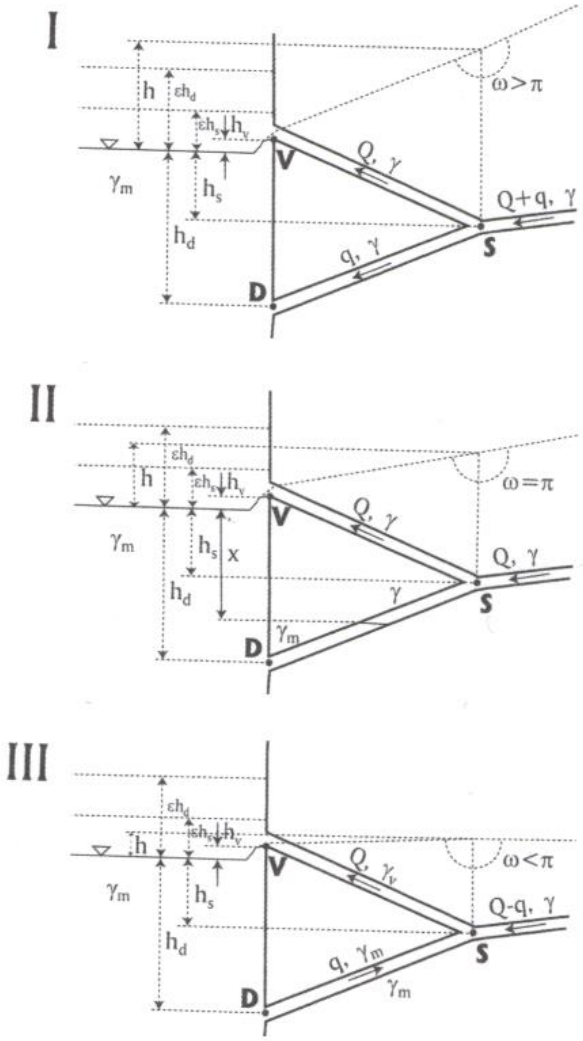
Kontakt slane i slatke vode se nalazi ispod dubine $h_d$. Uvjet za ispunjenje prvog slučaja $h > \varepsilon h_d$ gdje je:

$$\varepsilon = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \approx 0{,}025$$

Kut ω je veći od 180 °.

(II) U drugom slučaju dolazi do smanjenja piezometarske razine h na vrijednost između $\varepsilon h_s$ i $\varepsilon h_d$. Dolazi do smanjenja izdašnosti izvora, dok kut ω poprima sljedeću vrijednost ω = 180 ° te dio krškog kanala postaje zaslanjen i u njemu nema tečenja, dok se istjecanje događa na priobalnom izvoru.

(II) U trećem slučaju dolazi do daljnjeg sniženja piezometarske razine h na visinu $\varepsilon h_d > \varepsilon h_s > h$. Kut ω je manji od 180 °. Zaslanjena voda ulazi u glavni kanal i na glavnom izvoru istječe bočata voda.



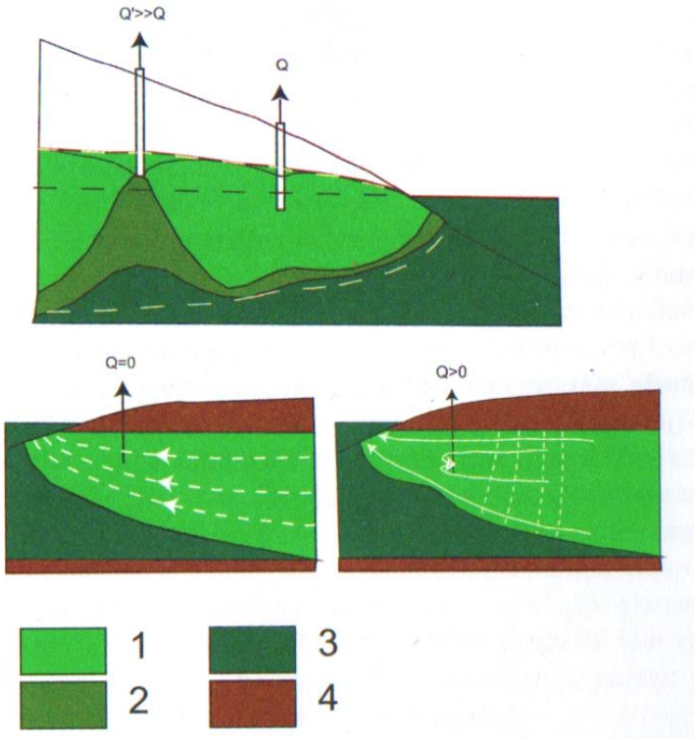

**Slika 6. Shematski prikaz tečenja vode na priobalnom izvoru (prema GJURAŠIN, 1943)**

Proučavanje hidraulike te razlike u gustoćama slane i slatke vode ne daje odgovarajuće rezultate zbog čega se istraživanja vezana uz zaslanjenje priobalnih vodonosnika sve više usmjeruju na hidrogeokemiju i proučavanje geneze priobalnih krških sustava. Kemijski sastav podzemne vode je posljedica međudjelovanja vode, krutih tvari i plinova. Ovisno o fizikalnim i kemijskim procesima, variraju vrsta i koncentracija iona u podzemnim vodama. Kemijski i fizikalni pokazatelji koji su mjerljivi u vodi te se mogu povezati s nekim od procesa, smatraju se prirodnim traserom. Najznačajniji primjer prirodnog trasera je kloridni ion $Cl^-$. Prirodni traseri mogu već pri niskim koncentracijama ukazati na položaj zone miješanja slane i slatke vode (Biondić, B. i Biondić, R., 2014).

Danas se problematici zaslanjenja pristupa s organiziranjem stalne mreže motrenja pri čemu se prikupljaju i analiziraju podaci dobiveni mjerenjima pomoću automatskih mjerača po dubini vodonosnika. Parametri koji se mjere su električna vodljivost, temperatura i razina podzemne vode. Ovim putem se dobiva velik broj podataka koji se obrađuju statističkim metodama.

## 2.2. Utjecaj prekomjernog crpljenja na zaslanjenje priobalnih vodonosnika

Vanjski čimbenici koji utječu na intruziju slane vode u vodonosnik su količina crpljena, promjena plime i oseke te umjetno napajanje vodonosnika. Nadalje, zbog strukturnih, klimatskih i ljudskih čimbenika, krški obalni vodonosnici danas trpe posljedice visoke eksploatacije koja je odgovor na kontinuirano povećanje potražnje za vodom. Iz navedenih razloga dolazi do poremećaja prirodne i nestabilne ravnoteže između slane i slatke vode te do zaslanjenja podzemne pitke vode. Značajna posljedica crpljenja prekomjernih količina vode je konusno podizanje zone miješanja prema objektu (Slika 7.). Podizanje ovisi o vertikalnoj i horizontalnoj propusnosti, dotoku podzemne vode i dubini zdenca te može biti različitih razmjera. Međutim, ukoliko se kontrolirano crpi dozvoljene količine crpljenja, ne bi trebalo doći do povećanja saliniteta podzemne vode (Biondić, R. et al., 2019; COST 621, 2005).




**Slika 7. Shematski prikaz konusnog podizanja slane vode zbog prekomjernog crpljena podzemne vode u priobalnim vodonosnicima, 1 – slatka voda, 2- zaslanjena voda, 3 – slana (morska) voda, 4 – nepropusne naslage (Biondić, B. i Biondić, R., 2014)**

Jedna od mogućnosti sprečavanja intruzije je izgradnja podzemne brane, odnosno injekcijske zavjese. Također, bitno je crpiti vodu na dovoljnoj udaljenosti od mora. Crpljenje uvijek snižava razinu podzemne vode i povećava zonu miješanja slane i slatke vode. Što se tiče injekcijskih zavjesa, one najčešće ne postižu odgovarajuću zaštitu jer nisu izgrađene do potrebnih dubina (često su izgrađene na dubinama do 60 m, a intruzija morske vode se zbiva i na većim dubinama, preko 100 m) (Biondić, B. i Biondić, R., 2014, COST 621, 2005).

Osim prekomjerne eksploatacije, do intruzije slane vode dolazi tijekom ljetnog sušnog razdoblja i nakon intenzivnih jesenskih oborina koje uzrokuju razbijanje ravnoteže slane i slatke vode. Također, uzrok zaslanjenja mogu biti: prisutnost „stare“ morske vode, ispiranje evaporitnih naslaga, evapotranspiracija u aridnim područjima, „morski sprej“ koji u obliku aerosola zaslanjuje oborine te prisutnost termalnih i mineralnih voda (COST 621, 2005).

## 2.3. Zaslanjenje u TPV Bokanjac-Poličnik

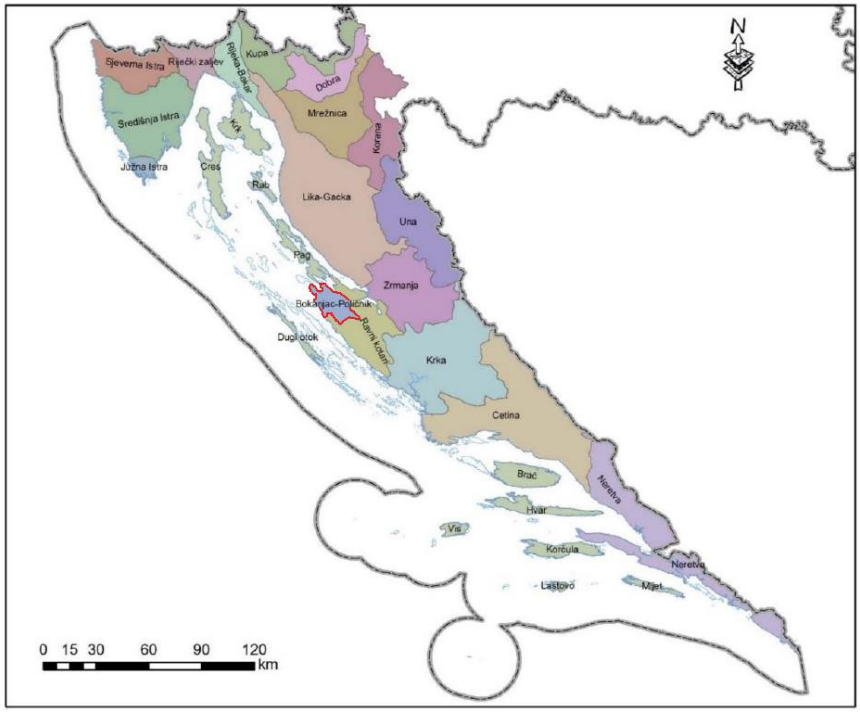
TPV Bokanjac-Poličnik je primjer krškog priobalnog vodonosnika u kojem su prisutni brz prolazak vode kroz nesaturiranu zonu, velika brzina tokova i otvorenost utjecaju prema moru. Uslijed sve veće potražnje za vodom, a posljedično tome i zahvaćanja sve većih količina vode (prekomjerno crpljenje) dolazi do poremećaja u ravnoteži slane i slatke vode, odnosno do zaslanjenja vodonosnika. Međutim, do porasta saliniteta u podzemnim vodama dolazi i u prirodnim uvjetima. Do nestabilnosti između slane i slatke vode može doći uslijed smanjenog napajanja vodonosnika koje se uočava tijekom ljetnih sušnih mjeseci zbog manjka oborina. Poremećaji su primijećeni i nakon jakih oborina kada podzemni tokovi poprimaju veće brzine i dolazi do stvaranja turbulencije u kontaktnoj zoni slane i slatke vode. Tim putem dolazi do „proširenja“ zone miješanja slane i slatke vode na plitku i tanku slatkovodnu zonu vodonosnika što rezultira povišenim koncentracijama klorida. Pri većim razinama podzemnih voda primijećeno je povećanje koncentracije klorida, a moguće objašnjenje obuhvaća ispiranje dubljih i jače zaslanjenih krških sifona. Problem zaslanjenja uočen je na nekoliko vodocrpilišta koja su uključena u javnu vodoopskrbu te se zbog toga ciljano i kontinuirano prate promjene u salinitetu (Biondić, R. et al., 2019, Terzić i Lukač Reberski, 2013).

# 3. TIJELO PODZEMNE VODE BOKANJAC – POLIČNIK

Prema Planu upravljanja vodnim područjima 2016.-2021. (NN 82/13) prostor Republike Hrvatske podijeljen je na dva vodna područja: vodno područje rijeke Dunav i jadransko vodno područje. U jadranskom vodnom području izdvojeno je 18 tijela podzemnih voda pri čemu je „osnovni kriterij bila prirodna povezanost nepromjenjivih i promjenjivih elemenata bilance voda u određenom prostoru, vodeći računa o povezanosti podzemnih i površinskih voda u krškim terenima, gdje vode u više navrata unutar istog tijela izviru i ponovno poniru u krško podzemlje“ (Plan upravljanja vodnim područjima (NN 66/16)). Elementi koji utječu na delineaciju su „geološka građa, poroznost, geokemijski sastav, hidrogeološke karakteristike, geomorfološke pojave, smjerovi i brzine toka podzemnih voda, izdašnost zdenaca, napajanje, odnos s površinskim tokovima, položaj unutar riječnih slivova te zahtjev Okvirne direktive o vodama (2000/60/EC) da se označe sva tijela podzemnih voda koja se koriste ili bi se u budućnosti mogla koristiti za zahvaćanje vode namijenjene ljudskoj potrošnji, a koje osiguravaju u prosjeku više od 10 $m^3$/dan“ (Biondić, R. et al., 2016).

TPV Bokanjac-Poličnik nalazi se u sjeverozapadnom dijelu Ravnih kotara, odnosno zauzima zaravnjeni dio područja od Ninskog i Ljubačkog zaljeva pa sve do Gornjeg i Donjeg Zemunika. Također, obuhvaća i obalno područje uvale Ljubac preko Nina do Zadra. Sveukupna površina iznosi 302 $km^2$, dok se nadmorske visine kreću do oko 120 m n.m. U njemu prevladava srednja prirodna ranjivosti (s 64,3 %), a obnovljive zalihe podzemnih voda iznose 72 $\cdot 10^6$ $m^3$/god (Plan upravljanja vodnim područjima (NN 66/16), 2016). S morfološkog pogleda to je blago valovit teren koji je nastao kao posljedica prostiranja boranih geoloških struktura dinarskog smjera pružanja, odnosno smjera sjeverozapad – jugoistok.

Uzdignuti dijelovi terena izgrađeni su većim dijelom od karbonatnih stijena, dok u uzdužnim dolinama prevladavaju klastične naslage. U jednoj od takvih dolina, u zaleđu Zadra, smjestilo se Bokanjačko blato (Slika 8.) (Biondić, R. et al., 2019).




**Slika 8. Grupirane cjeline podzemne vode u krškom dijelu Hrvatske s označenim TPV Bokanjac-Poličnik (Biondić, R. et al., 2016)**

## 3.1. Geološki opis

TPV Bokanjac-Poličnik je nastalo u karbonatnim stijenama Jadranske karbonatne platforme s ljuskavom strukturom u kojoj dolazi do izmjene vodopropusnih karbonatnih stijena i vodonepropusnih klastita. Jezgre antiklinalnih dijelova su izgrađene od vapnenaca gornjokredne starosti, dok su sinklinalni dijelovi izgrađeni od fliša paleogenske starosti. Što se tiče pokrovnih naslaga, bitnu hidrogeološku funkciju imaju jezerski sedimenti na području Bokanjačkog blata. Nadalje, crvenica i eolski sedimenti imaju značajno prostiranje, prekrivaju veliko područje i doprinose poljoprivredi (Biondić, R. et al., 2019).

Najstarije dolomitno vapnenačke naslage cenomana ($K_2^1$) nalaze se u jezgrama antiklinala gdje prevladavaju dolomiti dok učestalost vapnenca raste prema mlađim slojevima. Ove naslage karakterizira dobra uslojenost te debljina od oko 550 m. Zatim slijede vapnenci bogati rudistnom faunom turonske starosti ($K_2^2$) koji se nalaze u jezgrama antiklinalnih struktura. Promjenom fizikalno-kemijskih uvjeta u sedimentacijskoj sredini došlo je do lateralnih i vertikalnih izmjena naslaga kompaktnog vapnenaca s naslagama dolomita. Ukupna debljina ovih naslaga je oko 470 m. Naslage vapnenaca senonske starosti ($K_2^3$) su najmlađi dio krednih naslaga. To su dobro uslojeni

rudistni vapnenci čija se debljina slojeva kreće između 20 i 120 cm, a mjestimično je moguća pojava pločastih vapnenaca. Ukupna debljina iznosi 370 m (Majcen et al., 1969).

Na rudistne vapnence taloženi su tanko uslojeni vapnenci, odnosno Liburnijske naslage ($P_c$,$E_1$) koje spadaju u skupinu najstarijih naslaga paleogenske starosti. Ove naslage prelaze kontinuirano u foraminiferske vapnence. To su smeđi, žučkasti i crvenkasti gusti vapnenci. Debljina naslaga je oko 20 m. Nakon Liburnijskih naslaga, transgresivno su taloženi foraminiferski vapnenci ($E_{1,2}$) koji se sačinjeni od miliolidnih, alveolinskih i numulitnih vapnenaca i njihovog kontinuiranog prijelaza u klastite srednjeg eocena. Ukupna debljina naslaga iznosi do 330 m. Zatim slijede fliške naslage ($E_{2,3}$) srednjeg i gornjeg eocena koje se sastoje od lapora i pješčenjaka koji se izmjenjuju te konglomerata u mlađim dijelovima. Rasprostranjeni su područjem Ravnih kotara te tvore sinklinalne dijelove boranih struktura. Kao posljedica trošenja materijala od ovih naslaga su uglavnom izgrađeni niži dijelovi reljefa koji su prekriveni kvartarnim naslaga čime je otežana njihova vidljivost na površini terena. Ukupna debljina iznosi oko 900 m. Na prijelazu iz gornjeg eocena u oligocen, kao posljedica erozijskih procesa i stvaranja ogromnih masa materijala trošenja, došlo je do taloženja Prominskih naslaga koje podrazumijevaju konglomerate, lapore, vapnenačke breče i dr. Također, to je vrijeme izuzetne tektonske aktivnosti čime su posljedično izduženi bazeni taloženje preselili u Ravne kotare koji su središnji dio Dinarida (Majcen et al., 1969).

Razdoblje kvartara obilježeno je intenzivnim površinskim erozijskim procesima, okršavanje velike mase karbonatnih stijena, pronosom materijala prema depresijama i, najbitnije, stvaranjem mreže površinskih i podzemnih tokova koja je aktualna i danas. U okolici Nina taloženi su pijesci ($Q_1^3$) koji imaju obilježja karakteristična sedimentu tipa lesa ili prapora. Debljina naslaga je oko 12 m (Majcen et al., 1969).

Kroz cijelo područje CPV Bokanjac-Poličnik rasprostranjene su naslage crvenice (ts) koje su male debljine. Moguće je pronaći i jezerske i barske sedimente (j), odnosno sivu muljevitu ilovinu koja je mjestimično prekrivena crnim masnim humusom. Deluvijalne naslage (d) su nastale trošenjem površinskog dijela podinskih naslaga. One su sačinjene od kršja i ulomaka vapnenaca, trunja klastita pomiješanih s crvenicom i humusom. Naslage su taložene blizu mjesta trošenja te su male debljine, tek do nekoliko metara. S druge strane, taložene su i aluvijalne naslage (al) koje predstavljaju nanos potočnih voda (npr. Miljašić jaruga). Naslage nastaju trošenjem primarnih stijena i klastičnih naslaga te pretaloženjem kvartarnih naslaga deluvija i crvenice (Majcen et al., 1969).

Tektonika Ravnih kotara u širem području Bokanjačkog blata podrazumijeva niz bora dinarskog smjera prostiranja s karbonatnim stijenama u antiklinalnom dijelu i flišom u sinklinalnim dijelovima bora. Nadalje, Bokanjačko blato je smješteno u krajnjem sjeverozapadnom dijelu geološke strukture Ravnih kotara u blizini izrazite strukturno-tektonske promjene koju čini planinski lanac Velebit koji je djelomično navučen preko boranih struktura Ravnih kotara. Relativno jednostavne borane forme prate dijagonalni rasjedi na sjeveroistočnim rubovima boranih struktura koji imaju važnu funkciju u stvaranju barijera kretanju podzemne vode (Biondić, R. et al., 2019).

Vodonepropusne stijene ili imaju hidrogeološku funkciju barijere kretanju podzemne vode ili usmjeravaju podzemne vode paralelno prostiranju strukturnih formi. Opisane strukture su bočno otvorene prema moru i to je problem. Bokanjačko blato je depresija formirana u sin-formi, otvorenoj prema unutrašnjosti Ravnih kotara i tu je glavna koncentracija podzemnih dotoka u istočnom dijelu Ravnih kotara. Velik problem je upliv morske vode u ljetnim sušnim razdobljima. Danas znamo da se radi o stalnom prisustvu morske vode u vodonosnicima (fosilno more). Kod slabijeg dotoka slatke vode i povećane eksploatacije, granica miješanja se diže u pliće dijelove vodonosnika i direktno utječe na crpilišta pitke vode zbog čega je važno definirati prirodne optimalne količine crpljenja (Biondić, R. et al., 2019; Terzić i Lukač Reberski, 2013).

## 3.2. Hidrogeološki opis

Prema literaturi, „hidrogeološke karakteristike krških područja ovise o litološkom sastavu stijena, načinu nastanka krškog sustava, stupnju deformacija stijena, prividnim brzinama podzemnih tokova, položaju izvora i ponora, stanju stijena u istražnim bušotinama i eksploatacijskim objektima te drugim elementima koje istraživač smatra važnim za identifikaciju hidrogeoloških odnosa“ (Biondić, R. et al., 2019).

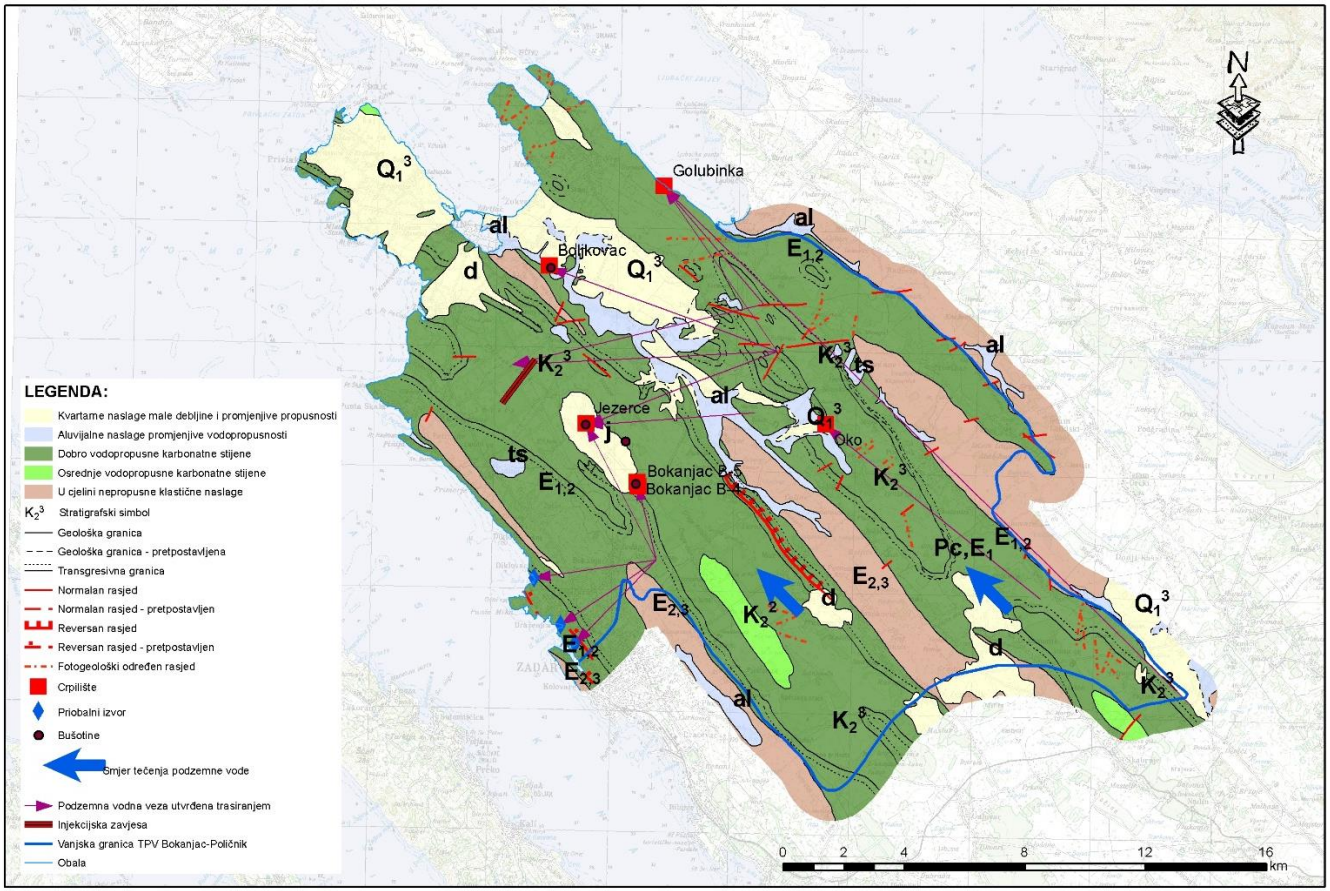
Podzemni tokovi se javljaju u vodopropusnim karbonatnim stijenama koje su okršene puno dublje od trenutne razine mora. Takvo okršavanje posljedica je razine mora koja je bila aktualna za vrijeme kvartara. Podzemni tokovi usmjeri su od Škabrnja i Zemunika Donjeg prema Ninskom i Ljubačkom zaljevu gdje se nalaze krški izvori Golubinka i Boljkovac iz kojih se voda kaptira za vodoopskrbu. Na području Bokanjačkog blata smješteni su ostali značajni izvori i zdenci. Kako svakog dana raste potreba za pitkom vodom, crpljenje se odvija i iz objekata koji se nalaze pod utjecajem mora iako su udaljeni od mora desetak kilometara. Pojava zaslanjenja na crpilištima ukazuje na postojanje slane

vode ispod slatkovodnog sustava u dubokom krškom podzemlju te dizanje zone miješanja slane i slatke vode u uvjetima slabljenja pritisaka slatke vode (Biondić, R. et al., 2019).

Na području CPV Bokanjac-Poličnik izdvojene su četiri grupe stijena:

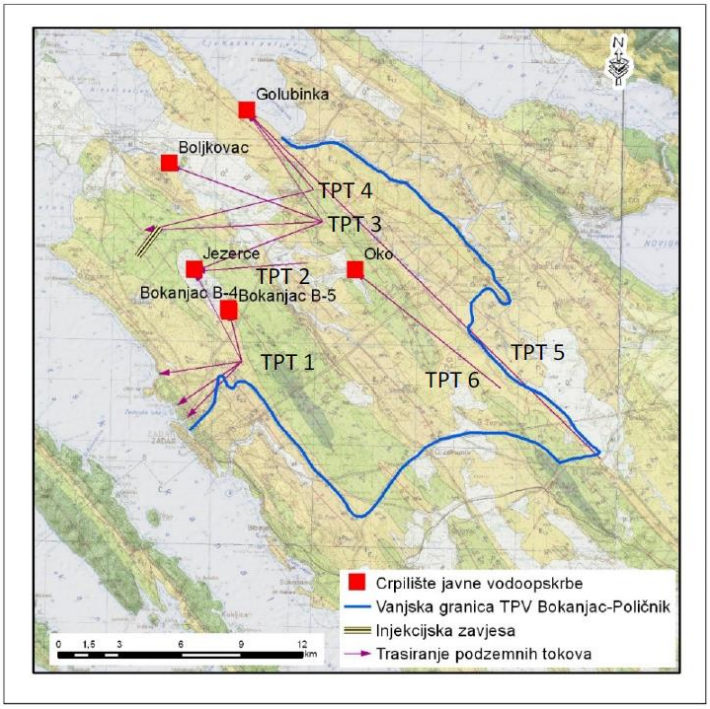
1. dobro vodopropusne okršene karbonatne stijene u kojima prevladavaju vapnenci,
2. srednje vodopropusne okršene karbonatne stijene u kojima se izmjenjuju dolomiti i vapnenci,
3. u cjelini vodonepropusne stijene koje se sastoje od fliša (paleogenski klastiti),
4. naslage promjenjive vodopropusnosti relativno male debljine (kvartarne naslage).

Velik dio područja TPV Bokanjac-Poličnik zauzimaju dobro vodopropusne karbonatne stijene koje su uglavnom izgrađene od vapnenaca te su sekundarne, odnosno pukotinske poroznosti. Na tom području nalaze se zone glavnih dreniranja podzemne vode duž tektonski oštećenih zona gdje su vapnenci jače deformirani i okršeni. U dobro vodopropusne karbonatne stijene spadaju vapnenačke stijene gornjokredne i paleogenske starosti koje su označene tamnozelenom bojom na hidrogeološkoj karti (Slika 9.). Nadalje, u srednje vodopropusne okršene karbonatne stijene spadaju dolomiti koji su slabije okršeni od vapnenaca i čije su pukotine ispunjene glinom i dolomitnim pijeskom. Dolomiti su također sekundarne poroznosti i zajedno su s vapnencima obuhvaćeni tektonskim deformacijama. Dolomiti su na hidrogeološkoj karti označeni svjetlije zelenom bojom. Zatim slijede vodonepropusne klastične stijene, odnosno paleogenski klastiti ili fliš, koji čine barijeru tečenju podzemne vode. Na hidrogeološkoj karti, fliš je označen smeđom bojom. U skupinu naslaga promjenjive vodopropusnosti, čija je debljina relativno mala, spada kompleks naslaga kvartarne starosti. U ovom slučaju se radi o nevezanim ili poluvezanim klastičnim sedimentima, odnosno o pijescima ($Q_1^3$), crvenici (ts), jezerski i barskim sedimentima (j), deluvijalnim sedimentima (d), aluvijalnim sedimentima (al). Navedeni sedimenti imaju međuzrnsku propusnost koja varira između njih, no u krškim područjima nemaju značajnu akumulaciju vode (Biondić, R. et al., 2019).




**Slika 9. Pregledna hidrogeološka karta TPV Bokanjac-Poličnik (modificirano prema: Biondić, R. et al., 2019)**

Na temelju izvedenih trasiranja podzemnih tokova zaključeno je da se podzemne vode kreću paralelno ili subparalelno geoloških struktura, odnosno u smjeru jugoistok-sjeverozapad u dva odvojena ogranka (Slika 10.). Prvi ogranak se nalazi sa sjeveroistočne strane fliške barijere koja se pruža od Smokovića prema sjeverozapadu. Veći dio podzemnih voda u ovom ogranku prihranjuje priobalni izvor Golubinku i vodocrpilište Boljkovac. Nakon zone gdje isklinjava fliška barijera, podzemna voda se kreće okomito na prostiranje struktura prema vodocrpilištu Jezerce. Drugi ogranak se drenira prema Bokanjačkom blatu, zatim prema Boljkovcu i krajnjem sjeverozapadnom dijelu strukture gdje se podzemna voda difuzno infiltrira u more kod Zatona i Nina (Biondić, R. et al., 2019). U zoni oko izvora Oko minimalne razine podzemne vode iznose oko 50 m n. m., kod Boljkovca oko 10-11 m n. m. te kod Golubinke oko 1 m n. m., što znači da postoji gradijent i strujanje iz središnjeg dijela prema obali (Terzić i Lukač Reberski, 2013).




**Slika 10. Prikaz provedenih trasiranja i podzemnih tokova u CPV Bokanjac-Poličnik (Biondić, R. et al., 2019)**

Kako bi se omogućila poljoprivredna djelatnost, na području često plavljenog Bokanjačkog blata izgrađen je tunel koji odvodi vodu prema Miljašić jaruzi te su izgrađeni sustavi kanala za navodnjavanje i odvodnjavanje. Izgradnjom navedenih hidrotehničkih građevina promijenjeni su prirodni uvjeti dinamike površinske i podzemne vode, odnosno promijenjeni su uvjeti prihranjivanja podzemnih voda.

Čest problem izvorišta u slivu je prodor morske vode u unutrašnjost, zbog čega se Golubinka i Boljkovac zaslanjuju što je posljedica prirodnog klina prodora mora te konusnog uzdizanja zbog crpljenja. Kako bi se smanjio utjecaj zaslanjenja izgrađena je injekcijska zavjesa nizvodno od Bokanjačkog blata čija dubina doseže do oko 40 m. Iskustva su pokazala da je to preplitak zahvat zbog moguće dinamike podzemnih voda i prodora mora u krško podzemlje na većim dubinama (Biondić, R. et al., 2019).

### 3.3. Hidrološki i klimatološki opis

Formiranje i rasprostiranje hidrografske mreže površinskih vodotoka je uvjetovano geološkom građom. Glavni površinski vodotok koji drenira značajan dio Ravnih kotara je Miljašić jaruga čija se slivna površina prostire na području površine 127,6 $km^2$ (Biondić, R. et al., 2019), a čini ga niska i blago valovita zaravan koja je od istočnog ruba sliva na području Zemunika blago nagnuta prema sjeverozapadu gdje se nalazi ušće u Ninski zaljev. Miljašić jaruga započinje tok na oko 88 m n.m. te u more utječe nakon 25 km toka. Pritoke su kraći bujični tokovi Menjača i Briševačka jaruga, a njezin najznačajniji pritok je Bokanjačko blato s kojim je umjetno povezana tunelom. U donjem dijelu toka, neposredno uz Miljašić jaruga se nalazi izvor Boljkovac koji je dio vodoopskrbnog sustava.

Procjena pojavnosti voda u njenom koritu i pritokama radi se zbog određivanja pojavnosti velikih voda te zaštite od štetnog djelovanja velikih voda. U sklopu projekta „Bokanjačko blato, Odvodnja-Regulacija Miljašić jaruge“ (Biondić, R. et al., 2019) nakon koje je izgrađen spojni tunel između Bokanjačkog blata i Miljašić jaruge (1962. godine) određeni su maksimalni protoci pomoću empirijskih metoda prof. Srebrenovića te oni iznose $Q_{20}$ = 45,2 $m^3s^{-1}$, $Q_{50}$ = 54,3 $m^3s^{-1}$ te $Q_{100}$ = 59,6 $m^3s^{-1}$ dok je maksimalna katastrofalna voda procijenjena na 95 $m^3s^{-1}$ (Biondić, R. et al., 2019). Bitno je spomenuti katastrofalni događaj u rujnu 2017. godine kada su pale količine oborina bile dva puta veće od ukupne mjesečne količine najkišovitijeg mjeseca veljače, čija je posljedica bila katastrofalna poplava u kojoj je vršni protok imao vrijednost od 130 $m^3s^{-1}$. Navedena vrijednost vršnog protoka ima povratni period od 1000 i više godina (Oskoruš et al., 2017).

Klima na području sliva Bokanjac-Poličnik je određena geografskom širinom, Jadranskim morem i planinskim lancem Velebitom te u manjoj mjeri zaleđem Ravnih kotara i otoka Zadarskog arhipelaga. Geografska širina određuje godišnju količinu sunca i zračenja te određuje cirkulaciju atmosfere koja utječe na vrijeme i klimu. U ljetnim

mjesecima do značaja dolazi utjecaj suptropske zone. Lokalni klimatski uvjeti su određeni na temelju podataka za vremensko razdoblje od 1961. do 1990.

Temperatura zraka uglavnom ovisi o duljini i intenzitetu sunčeva zračenja, a tek dijelom ovisi o sastavu kopnene površine (npr. vrsta tla, vegetacija) i topografiji. Godišnji ciklus mjesečnih prosjeka temperatura zraka ima morske karakteristike gdje su jeseni toplije od proljeća za 2,5 °C. Prosječna temperatura zraka zimi iznosi 7,4 °C, a ljeti 22,5 °C (Gajić-Čapka et al., 2010).

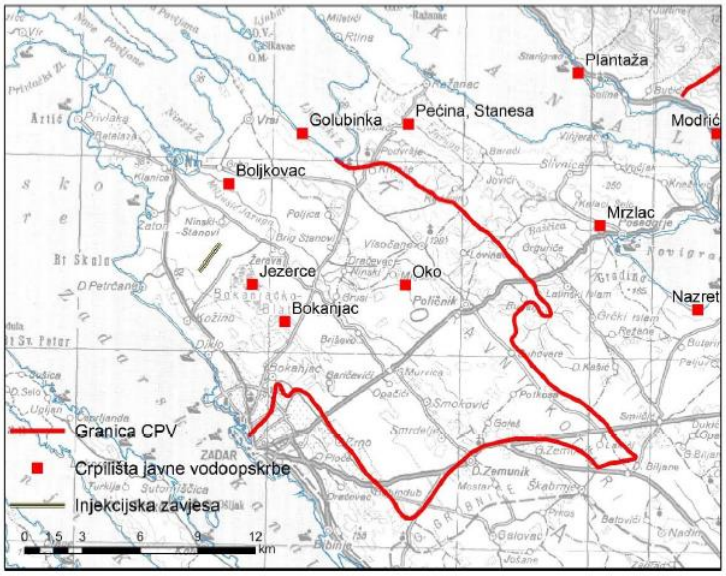
Oborine uglavnom ovise o cirkulaciji zraka te sadržaju vlage. Slivno područje Bokanjac-Poličnik ima pomorski tip godišnjeg ciklusa s najmanjom količinom oborina koja se javlja tijekom toplog razdoblja u godini, odnosno u razdoblju od travnja do rujna. Minimalna količina oborina javlja se u srpnju (35 mm) (Gajić-Čapka et al., 2010).

Kao posljedicu globalnog zatopljenja i efekta staklenika, istraživači predviđaju povećanje temperature od 1,4 do 5,8 °C u razdoblju od 1990.-2100. Klimatski modeli temeljeni na tim procjenama i sadašnje povećanje razine mora upućuju na to da bi razina mora trebala porasti za 9 do 88 cm u sljedećih 100 godina (COST 621, 2005). Također, povišenje temperature zraka ljeti uzrokovat će povećanje evapotranspiracije zbog čega se zajedno s manjim tendencijama oborinama očekuje smanjenje oborina u ljetnim mjesecima. U hladnom dijelu godine moguće je smanjivanje otjecanja te prihranjivanja vodonosnika. Također, za vrijeme sušnog razdoblja Miljašić jaruga presušuje. Takvo hidrološko i klimatološko stanje kao posljedicu nosi zaslanjenje, odnosno povećava se mogućnost prodora „klina“ slane vode u krške vodonosnike (Gajić-Čapka et al., 2010).

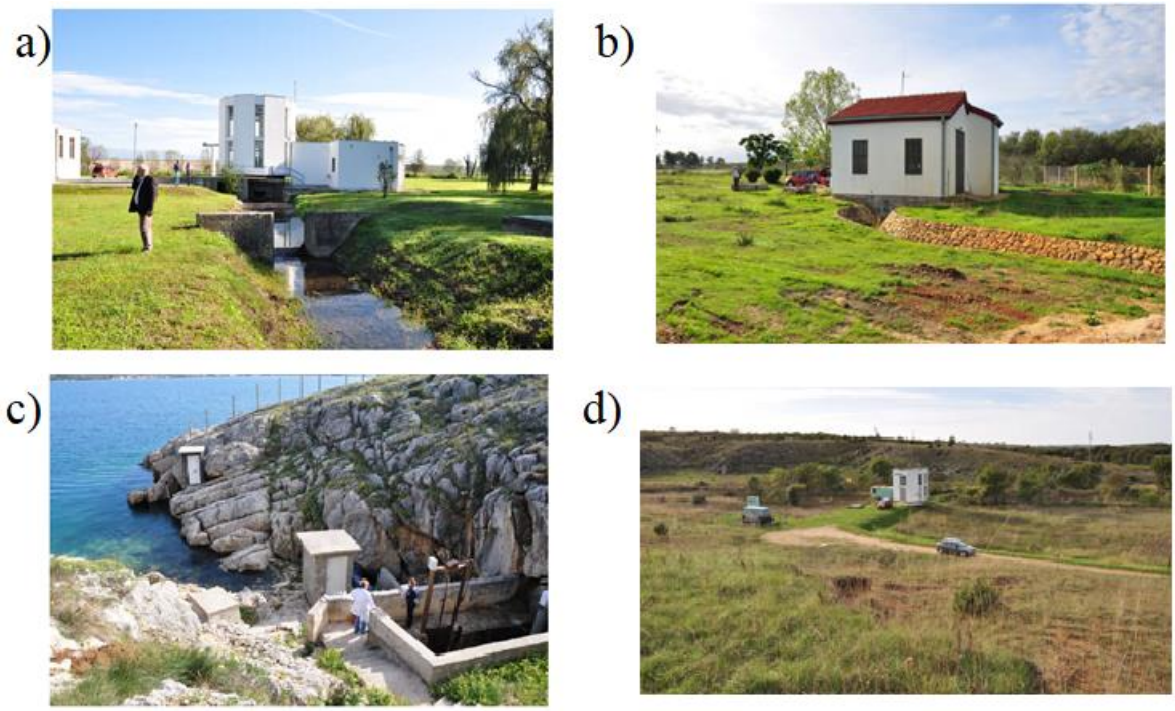
## 3.4. Prikaz vodocrpilišta

U sklopu zadarskog Vodovoda d.o.o. zahvaćanje vode vrši se s dva slivna područja i s nekoliko lokalnih vodozahvata (www.vodovod-zadar.hr):

- slivno područje rijeke Zrmanje: vode se zahvaćaju u desnom zaobalju rijeke iz Velebitskih izvora Čavlinovac, Dorinovac i Sekulića vrelo i zatvorenim kolektorom se dovode do crpne postaje Dolac; za vrijeme sušnijeg dijela godine koristi se površinski zahvat Berberov buk,
- slivno područje Bokanjac-Poličnik: vode se zahvaćaju iz kopanih bunara Bunari 4 i 5, Jezerce, Boljkovac i iz izvora Golubinka (Slika 11., Slika 12.),
- lokalni vodozahvati u Starigradu i Žmanu na Dugom otoku.




**Slika 11. Prikaz vodocrpilišta na području TPV Bokanjac-Poličnik (Biondić, R. et al., 2016)**




**Slika 12. a) kopani zdenac (na istoimenoj estaveli) Jezerce, b) kopani zdenac Oko, c) kaptirani izvor Golubinka, d) kopani zdenac Boljkovac (Terzić i Lukač Reberski, 2013)**

U sklopu Vodovoda Zadar nalaze se i otoci (npr. Ist, Veli Iž, Molat, Zapuntel, Brgulje, Silba i Premuda) koji se vodom opskrbljuju na dva načina (Program zaštite okoliša grada Zadra, 2016):

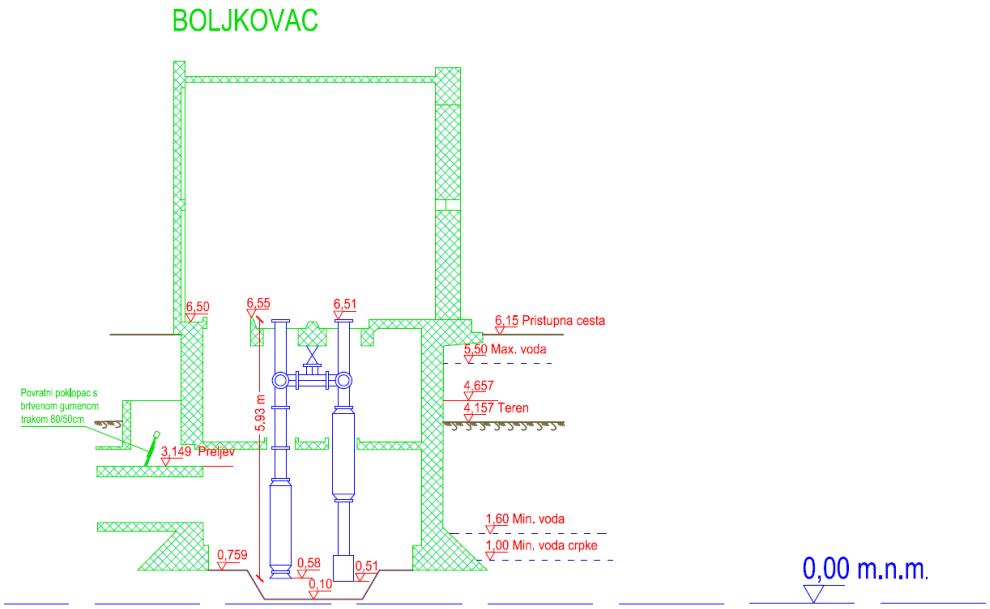
- u obliku kišnice pri čemu zbog loše i nedovoljne sanacije i održavanja mjesnih cisterni na otocima ta voda uglavnom nije dobre kvalitete, odnosno nije ispravna za piće, te
- dopremanjem vode vodonosnicima pri čemu su objekti održavani od strane komunalnog društva, a vodoopskrba se odvija u maksimalno kontroliranim uvjetima.

Od navedenih crpilišta probleme s povišenim koncentracijama klorida imaju Golubinka i Boljkovac. Na Jezercu se ta problematika pojavljuje povremeno, dok je problem zaslanjenja kog B-4 i B-5 moguć tek kod prekomjernih količina crpljenja (Biondić, R. et al., 2019).

Vodocrpilište Boljkovac je izgrađeno 1972. godine na istoimenom izvoru koji se nalazi uz donji tok Miljašić jaruge. Zdenac se nalazi na 3,25 m n.m. te je udaljen 2500 m od mora, dubine je oko 6 m, instalirani kapacitet crpke iznosi 100 L/s pri čemu je minimalna izdašnost oko 40 L/s, trenutno instalirana snaga je 130 kW, postoje dvije aktivne crpke (Slika 13.) (Terzić i Lukač Reberski, 2013):

1. LITOSTROJ tip 2 VO 25-VII, postavljena 1972., 56 L/s, H crpke je 91 m, 68 kW
2. CROATIA PUMPE tip 4,8 BO 19-2009, postavljena 2004., 40 L/s, 65 m, 44 kW.

Iako je kapacitet crpki 100 l/s, on se smanjuje tek na nekoliko desetaka zbog prodora morske vode. Zdenac je udaljen od mora oko 2500 m, no s početkom ljetnih razdoblja na njemu se pojavljuju povišene koncentracije klorida.




**Slika 13. Presjek vodocrpilišta Boljkovac s osnovnim tehničkim značajkama (Terzić i Lukač Reberski, 2013)**

# 4. MONITORING PODZEMNIH VODA

Prema Okvirnoj direktivi o vodama (2000/60/EC) „voda nije komercijalni proizvod, već je nasljeđe koje treba čuvati, zaštiti i shodno tome postupati“. Svakim danom sve je veći pritisak na vodne resurse, a sama Okvirna direktiva o vodama ima cilj očuvanja, zaštite i poboljšanja kakvoće okoliša, s naglaskom na racionalno korištenje prirodnih resursa, posebice vodnih resursa. Prema Članku 4. potrebno je ostvariti dobro kvalitativno i kvantitativno stanje i površinskih i podzemnih voda te održavati dobro stanje voda čime se doprinosi kvaliteti života budućih naraštaja. Međutim, unatoč svim naporima koji se ulažu još uvijek dolazi do ispuštanja različitih onečišćujućih tvari u okoliš koje mijenjaju kvalitetu voda. Kako bi se pravovremeno uočile promjene u statusu površinskih i podzemnih voda, potrebno je uspostaviti program praćenja stanja svih voda. Takvim programom moguće je dobiti jasan i sveobuhvatan pregled stanja voda u svim vodnim područjima. Kod površinskih voda potrebno je pratiti volumen i razinu, odnosno protok te ekološko i kemijsko stanje i ekološki potencijal. S druge strane, praćenje stanja podzemnih voda obuhvaća praćenje kvalitativnog i kvantitativnog, odnosno kemijskog i količinskog stanja voda. Praćenje navedenih stanja mora se provoditi sukladno zahtjevima Dodatka V Okvirne direktive o vodama.

Kako bi se olakšalo shvaćanje Okvirne direktive o vodama izrađeni su CIS vodiči (engl. ***C****ommon* ***I****mplementation* ***S****trategy*). Vodiči koji se odnose na monitoring te monitoring podzemnih voda su: CIS vodič br. 7 koji nosi naziv „Monitoring u skladu s Okvirnom direktivom o vodama“ te CIS vodič br. 15 koji nosi naziv „Praćenje podzemnih voda“. Navedeni vodiči nadopunjuju Okvirnu direktivu o vodama s praktičnim uputama i tehničkim specifikacijama za monitoring podzemnih voda. Vodičima je obuhvaćeno praćenje kakvoće i količine podzemnih voda zbog procjene stanja i trendova koji služe za karakterizaciju tijela podzemnih voda te za zaštitu područja koja imaju namjenu zahvaćanja pitke vode. Programi monitoringa podzemnih voda pružaju informacije o tome jesu li ispunjeni svi bitni ciljevi zaštitite okoliša koji su predviđeni člankom 4. Okvirne direktive o vodama, odnosno je li postignut dobar status voda. Neki od bitnih ciljeva podrazumijevaju procjenu količinskog stanja, kemijskog stanja podzemnih voda te značajnih dugoročnih trendova i trendova koji su rezultat antropogenog utjecaja. Motrenje voda se ostvaruje uspostavom mreže motrenja, odnosno program monitoringa se odvija kroz mrežu praćenja količinskog stanja, mrežu nadzornog monitoringa i mrežu operativnog monitoringa (CIS 15, 2007).

Mreža praćenja količinskog stanja obuhvaća praćenje podataka o nivoima, protocima izvora te baznom toku u rijekama. S druge strane, monitoring kemijskog stanja dijeli se na nadzorni i operativni. Mreža nadzornog praćenja, prema Direktivi o podzemnim vodama (2006/116/EC), obuhvaća mjerenje koncentracija otopljenog kisika, nitrata, amonijaka, pH, električne vodljivosti i indikatora provodljivosti onečišćivača te mjerenje aktivnih tvari u pesticidima, arsena, kadmija, olova, amonija, žive, sulfata, klorida, ortofosfata, trikloretana i tetrakloretena. Podaci o monitoringu, analizi i dopuštenim koncentracijama navedenih parametra definirani su Pravilnikom o parametrima sukladnosti i metodama analize vode za ljudsku potrošnju (NN 125/2017). Podaci dobiveni monitoringom se mogu koristiti za dopunu i ocjenu procjene rizika, za procjenu trenda onečišćivača te kao informacija za utvrđivanje i izradu operativnog monitoringa (CIS 15, 2007).

Nadzornim monitoringom se izdvajaju tijela podzemnih voda koja su pod rizikom od onih koje nisu pri čemu monitoring mora biti postavljen tako da omogućuje kvalitetnu procjenu trenda prirodnih pokazatelja te pokazatelja potencijalnog onečišćenja. Ukoliko se nadzornim monitoringom izdvoji tijelo podzemnih voda koje je pod rizikom, uspostavlja se operativni monitoring kojim se određuje status te prisutnost značajnih i uzlaznih trendova u koncentraciji indikatora onečišćujućih tvari. Operativni monitoring se može provoditi u kraćem i dužem vremenskom razdoblju, odnosno on završava kada se uspostavi prijašnje „dobro“ kemijsko stanje kada ponovno dolazi do uspostave nadzornog monitoringa (ODV, 2000).

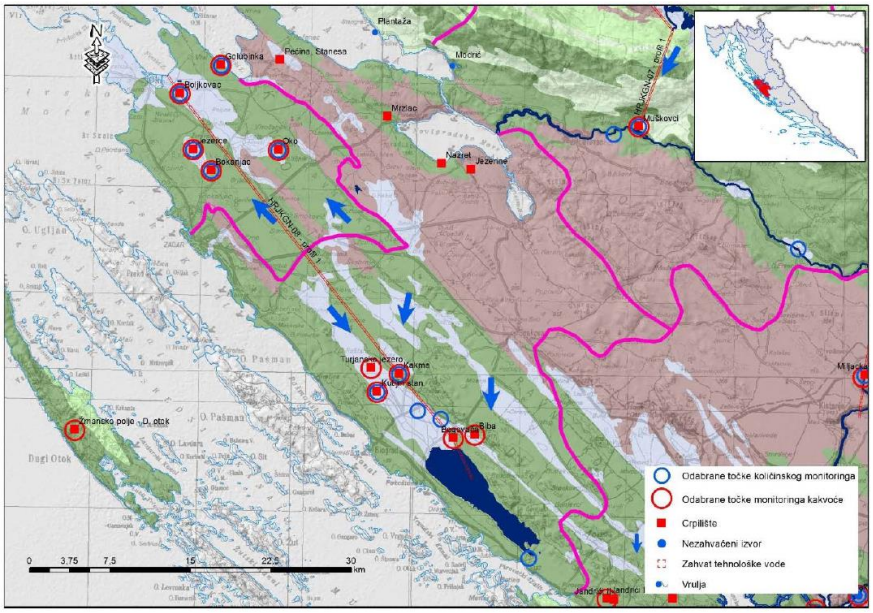
Ukratko, nadzorni monitoring se provodi kako bi se utvrdile dugoročne promjene u kvaliteti podzemne vode, dok se operativnim monitoringom utvrđuju promjene kvalitete podzemnih voda zbog provođenja mjera na području za koje je utvrđeno „loše stanje“. Također, moguće je provesti i istraživački monitoring ukoliko nisu poznati razlozi pogoršavanja stanja podzemnih voda.

U Republici Hrvatskoj se na temelju Zakona o vodama (NN 66/19), od strane Hrvatskih voda, izrađuje Plan upravljanja vodnim područjima koji obuhvaća upravljanje stanjem voda te upravljanje rizicima od poplava. Upravljanje stanjem voda sastoji se od pregleda stanja voda, pregleda sustava praćenja stanja voda te programa mjera za upravljanje kakvoćom voda na vodnim područjima. Odnosno, za izradu Plana upravljanja vodnim područjima potrebno je, između ostalog, utvrditi stanja tijela podzemnih voda koja su određena na nacionalnoj razini i na kojima je uspostavljen nadzorni monitoring.

Na jadranskom vodnom području je izdvojeno 18 TPV te je na njima izrađena procjena stanja i rizika (Biondić, R. et al., 2016). Od 18 TPV, dva tijela su izdvojena i nalaze se u „lošem stanju“ te u kategoriji „u riziku“, a to su TPV Bokanjac-Poličnik i TPV Južna Istra. TPV Bokanjac-Poličnik izdvojeno je zbog povremenih problema sa zaslanjenjem (Plan upravljanja vodnim područjima (NN 66/16)).

## 4.1. Operativni monitoring na TPV Bokanjac-Poličnik

Prema Planu upravljanja vodnim područjem (NN 66/16) za TPV Bokanjac-Poličnik utvrđeno je „loše količinsko stanje“ zbog prekomjernog crpljenja podzemne vode te „loše kemijsko stanje“ zbog intruzije slane vode u vodonosnik. Također, TPV Bokanjac-Poličnik spada u kategoriju „pod rizikom“. Za procjenu stanja korišteni su podaci monitoringa sirove vode na crpilištima Jezerce, Bokanjac – zdenac 4, Boljkovac i Golubinka. Kako je nadzornim monitoringom obuhvaćeno samo izvorište Jezerce i to samo za monitoring površinskih voda, prema (Biondić, R. et al., 2016) predložene su postaje Bokanjac, izvorište Jezerce, Oko, Golubinka i Boljkovac (Slika 14.). Preporučeno je provoditi monitoring najmanje četiri puta godišnje. Također, potrebno je, najmanje jedanput za vrijeme planskog intervala, izraditi analize sirove vode sukladno Pravilniku o parametrima sukladnosti i metodama analize vode za ljudsku potrošnju (NN 125/17). Sve podatke je potrebno uključiti u bazu podataka kvalitete podzemnih voda te ukoliko se uoči prekoračenje maksimalne dopuštene koncentracije (u daljnjem tekstu MDK) potrebno je organizirati, odnosno postaju uključiti, u nadzorni i/ili operativni monitoring. Nadalje, operativni monitoring na TPV Bokanjac-Poličnik se proveo izvođenjem dodatnih bušotina, postavljanjem automatskih mjerača po dubini vodonosnika, uspostavom dodatnog monitoringa površinskih voda te pomoću hidroloških i hidrogeoloških analiza dobivenih podataka (Biondić, R. et al., 2019).




**Slika 14. Prikaz odabranih točaka monitoringa kakvoće i količine podzemnih voda (Biondić, R. et al., 2016)**

U svrhu uspostave odgovarajućeg monitoringa, u neposrednoj blizini vodocrpilišta Boljkovac (Slika 15.), izvedena je nova piezometarska bušotina BOLJ-1 čija dubina iznosi 65,6 m. U bušotinu su postavljeni automatski mjerači za mjerenje razine podzemne vode, električne vodljivosti i temperature po dubini vodonosnika na svakih desetak metara dubine. Mjerači očitavaju podatke svakih 10 minuta te su postavljeni na dubinama 20 m, 30 m, 40 m, 50 m i 60 m ispod srednje razine mora. Na zdencu vodocrpilišta Boljkovac automatski mjerač je postavljen 08. prosinca 2017. dok su mjerači u piezometar BOLJ-1 postavljeni 20. veljače 2018. (Biondić, R. et al., 2019).

U sklopu izrade piezometarske bušotine, ali i samog istraživanja, 20. veljače 2018. godine u bušotini BOLJ-1 je izmjerena električna vodljivost (CND) i temperatura podzemne vode (T) na svakih 5 metara. Električna vodljivost je do dubine 35 m iznosila oko 0,875 mS/cm, dok je na većoj dubini iznosila oko 2,4 mS/cm. Navedena razlika u vrijednostima električne vodljivosti upućuje na postojanje zone miješanja slatke i slane vode (Biondić, R. et al., 2019).




**Slika 15. Položaj zdenca na crpilištu Boljkovac i nove piezometarske bušotine BOLJ-1 (Biondić, R. et al., 2019)**

## 4.2. Rezultati i analiza monitoringa na TPV Bokanjac-Poličnik

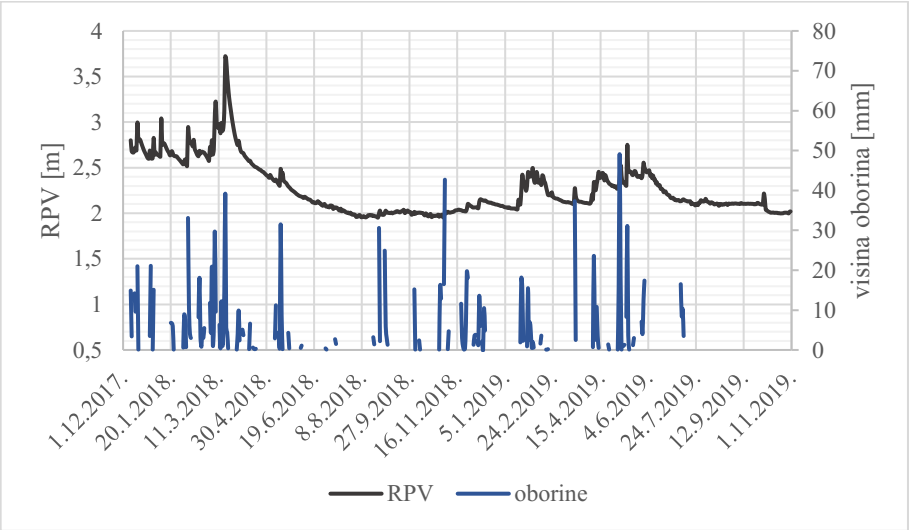
Podaci koji su korišteni za analizu zaslanjenja na vodocrpilištu Boljkovac jesu temperatura [°C], električna vodljivost [mS/cm], razina podzemne vode [m] na samom vodocrpilištu te u piezometru BOLJ-1, protok [$m^3/s$] i vodostaj [cm] koji su zabilježeni na hidrološkoj postaji Boljkovac, koja se nalazi na vodotoku Miljašić Jaruga, visina oborina [mm] izmjerena na hidrološkoj postaji Zadar te koncentracije klorida i sulfata [mg/L]. Podaci o protoku i vodostaju dobiveni su od Državnog hidrometeorološkog zavoda, dok su podaci o količinama crpljenja, razinama vode u vodocrpilištu te o koncentracijama klorida i sulfata u zdencima dobiveni od strane Vodovoda Zadar. Rezultati dobiveni monitoringom odnose se na vremensko razdoblje od 9. prosinca 2017. do 31. listopada 2019. godine. Tablica 1. prikazuje prosječne vrijednosti, minimalne i maksimalne vrijednosti, dok se u daljnjem tekstu nalaze objašnjenja grafičkih usporedbi parametara kojima je moguće definirati zaslanjenje.

**Tablica 1. Prosječne, minimalne i maksimalne vrijednosti parametara korištenih za analizu**

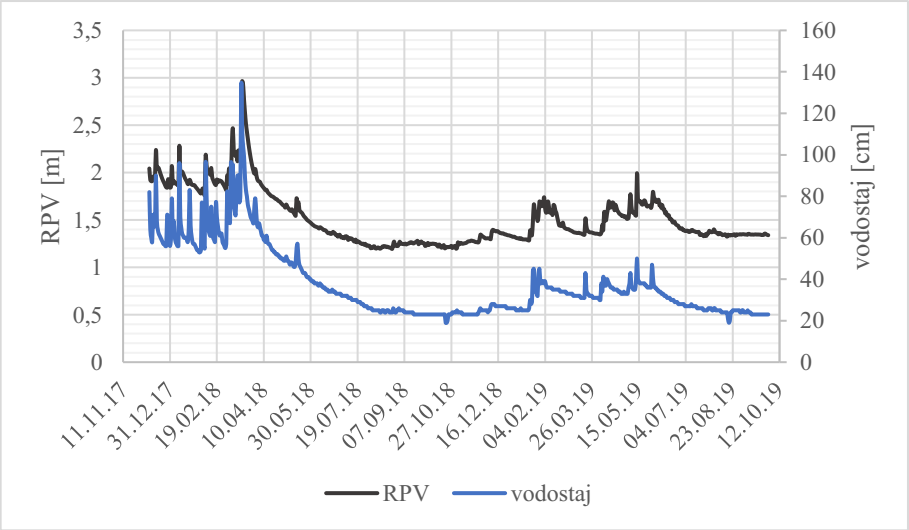
| **vodocrpilište Boljkovac** | | | |
|---|---|---|---|
| | prosječna vrijednost | minimum | maksimum |
| razina podzemne vode [m] | 2,26 | 1,95 | 3,72 |
| temperatura [°C] | 15,11 | 14,86 | 15,56 |
| električna vodljivost [mS/cm] | 1,92 | 0,95 | 5,27 |
| količina crpljenja [L/s] | 3,85 | 0,00 | 47,00 |
| kloridi [mg/L] | 381,00 | 36,60 | 1780,00 |
| sulfati [mg/L] | 89,78 | 64,42 | 162,24 |
| | | | |
| **piezometarska bušotina BOLJ-1** | | | |
| CND 20 [mS/cm] | 0,86 | 0,67 | 0,93 |
| CND 30 [mS/cm] | 1,00 | 0,85 | 2,69 |
| CND 40 [mS/cm] | 1,01 | 0,87 | 4,33 |
| CND 50 [mS/cm] | 1,57 | 0,89 | 6,15 |
| CND 60 [mS/cm] | 2,41 | 1,99 | 7,67 |
| | | | |
| T 20 [°C] | 15,15 | 14,44 | 15,52 |
| T30 [°C] | 15,15 | 14,55 | 15,35 |
| T 40 [°C] | 15,01 | 14,73 | 15,21 |
| T 50 [°C] | 15,04 | 14,84 | 15,24 |
| T 60 [°C] | 14,98 | 14,95 | 15,03 |
| | | | |
| RPV [m] | 2,27 | 1,97 | 4,31 |
| | | | |
| **hidrološka postaja Boljkovac** | | | |
| vodostaj [cm] | 37,80 | 19,00 | 134,00 |
| protok [$m^3/s$] | 1,22 | 0,01 | 27,70 |
| | | | |
| **meteorološka postaja Zadar** | | | |
| dnevne količine oborina [mm] | 7,53 | 0,10 | 49,10 |

Kako se oborine često javljaju nakon dugotrajnih sušnih razdoblja, one imaju značajan utjecaj na zaslanjenje vodonosnika. Slika 16. prikazuje odnos razina podzemne vode i visine palih oborina iz kojeg se može vidjeti da porastom količine oborina raste i razina podzemne vode. S druge strane, za vrijeme sušnih razdoblja koja se događaju za vrijeme ljetnih mjeseci, razina podzemne vode pada. Međutim, vodocrpilište Boljkovac u ispitivanom vremenskom periodu nije presušilo. U neposrednoj blizini vodocrpilišta nalazi se vodotok Miljašić Jaruga te hidrološka postaja Boljkovac na kojoj se bilježi vodostaj. Razina podzemne vode na vodocrpilištu prati promjene vodostaja, odnosno raste i pada sukladno vodostaju (Slika 17.). Iz grafova se dodatno može zaključiti da je

hidrološka godina 2017./2018. povoljnija usporedno s 2018./2019., odnosno zabilježene su veće količine oborina.




**Slika 16. Grafički prikaz odnosa razine podzemne vode i količina oborina na vodocrpilištu Boljkovac**

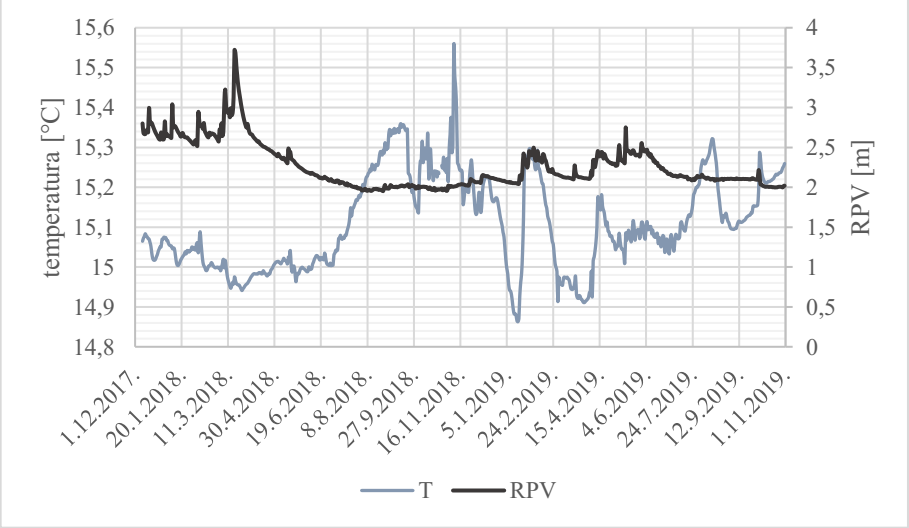



**Slika 17. Grafički prikaz odnosa razine podzemne vode na vodocrpilištu Boljkovac i vodostaja na hidrološkoj postaji Boljkovac na vodotoku Miljašić Jaruga**

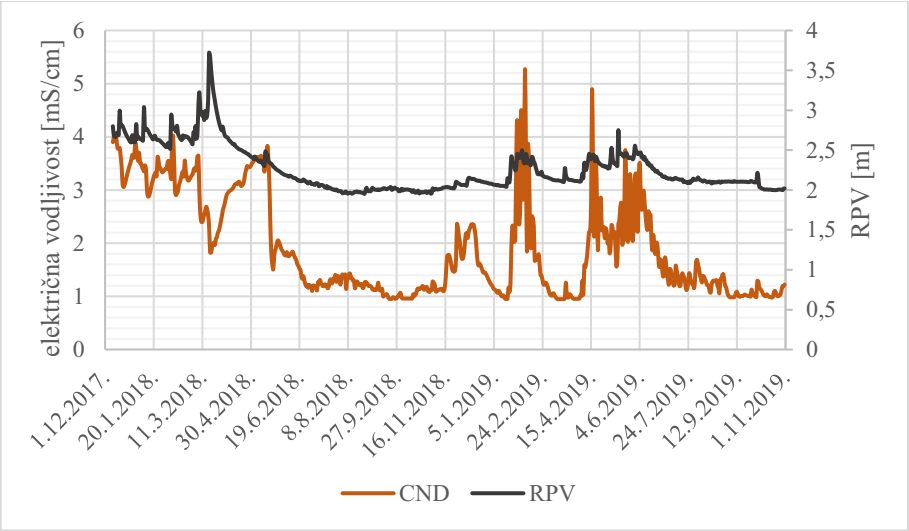
Automatski mjerač koji je postavljen na vodocrpilištu mjeri razinu podzemne vode, temperaturu te električnu vodljivost čiji su odnosi prikazani na slikama 18., 19. i 20. Prosječna vrijednost električne vodljivosti kreće se oko 1,92 mS/cm, a do izražaja dolaze dvije maksimalne vrijednosti: 5,27 mS/cm koja je izmjerena 6. veljače 2019. te 4,89 mS/cm koja je izmjerena 16. travnja 2019. godine. U prvoj polovici 2018. godine,

vrijednosti su se kretale u rasponu 1,8 - 4,02 mS/cm, nakon čega je uslijedilo sušno razdoblje kada je zabilježena minimalna vrijednost od 0,947 mS/cm, odnosno za vrijeme sušnog razdoblja vrijednosti se kreću oko 1 mS/cm. Krajem sušnog razdoblja i pojavom jakih oborina električna vodljivost je porasla na 2,52 mS/cm. Nakon već spomenutih maksimalnih vrijednosti u veljači i travnju 2019., vrijednosti električne vodljivosti se u sušnom razdoblju opet smanjuju na 1 mS/cm. Također, uočavaju se manje vrijednosti električne vodljivosti u hidrološkoj godini 2017./2018. usporedno s 2018./2019. što je posljedica povoljnije hidrološke godine, odnosno većih količina oborina u hidrološkoj godini 2017./2018.

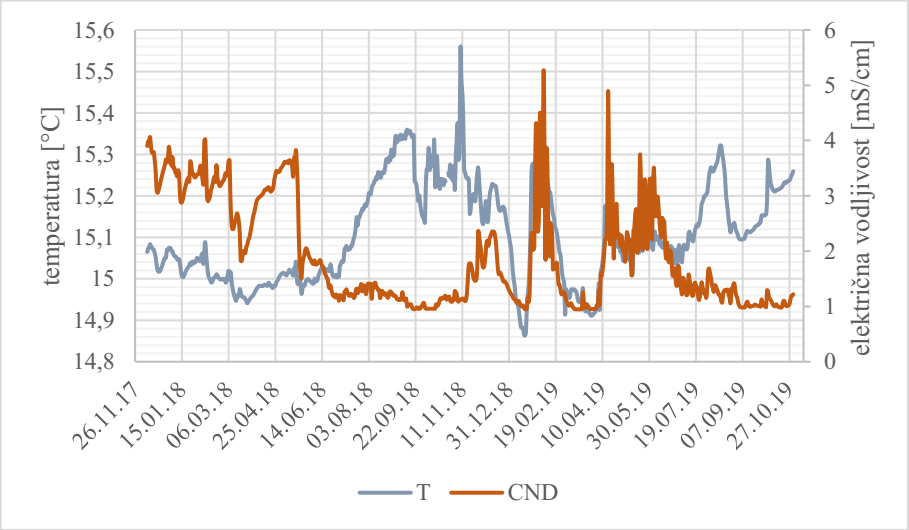
Što se tiče razine podzemne vode, ona se kretala između 1,95 i 3,72 m pri čemu su niže razine zabilježene tijekom ljetnih sušnih razdoblja. Povišene razine podzemne vode zabilježene se u istom razdoblju kao i povišene vrijednosti električne vodljivosti koje ukazuju na pojavu zaslanjenja. Može se reći da je u ljetnom sušnom razdoblju, kada su zabilježene niže vrijednosti razine podzemne vode i električne vodljivosti, sustav najstabilniji te se nalazi u slatkovodnim uvjetima.




**Slika 18. Grafički prikaz odnosa razine podzemne vode i temperature na vodocrpilištu Boljkovac**

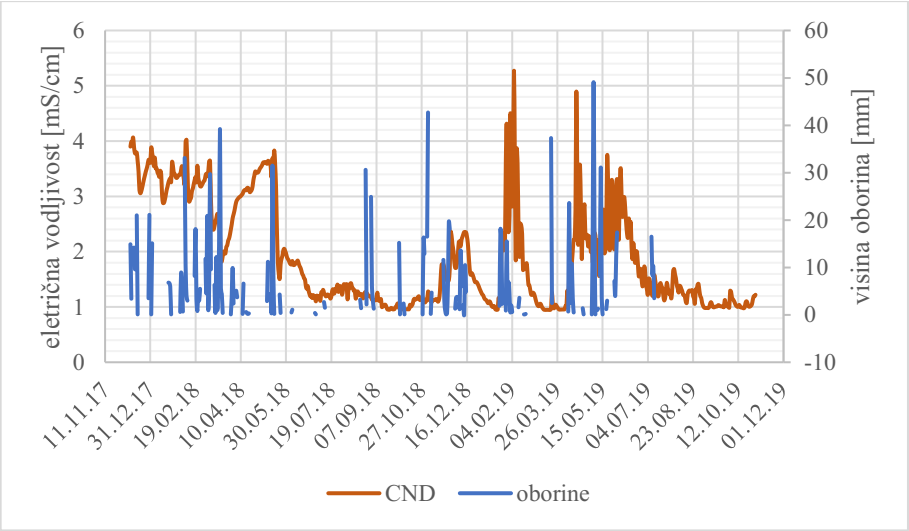



**Slika 19. Grafički prikaz odnosa razine podzemne vode i električne vodljivosti na vodocrpilištu Boljkovac**

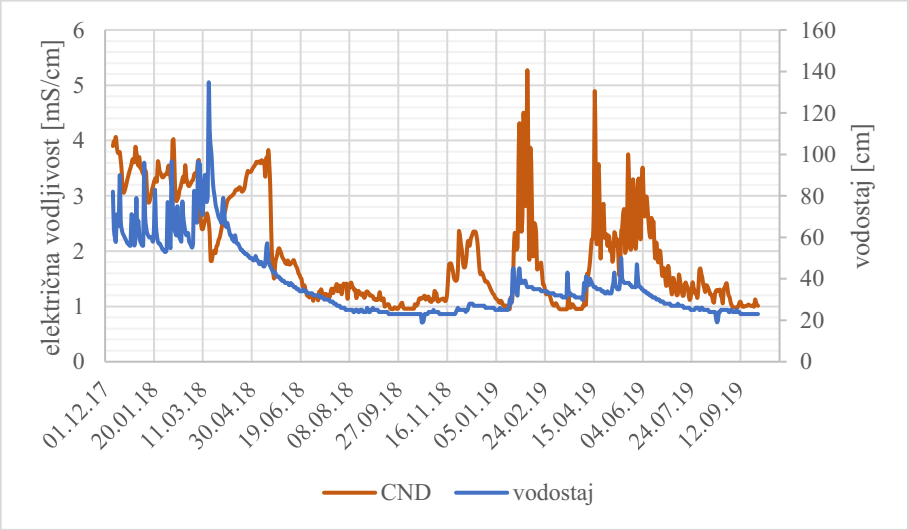



**Slika 20. Grafički prikaz električne vodljivosti i temperature na vodocrpilištu Boljkovac**

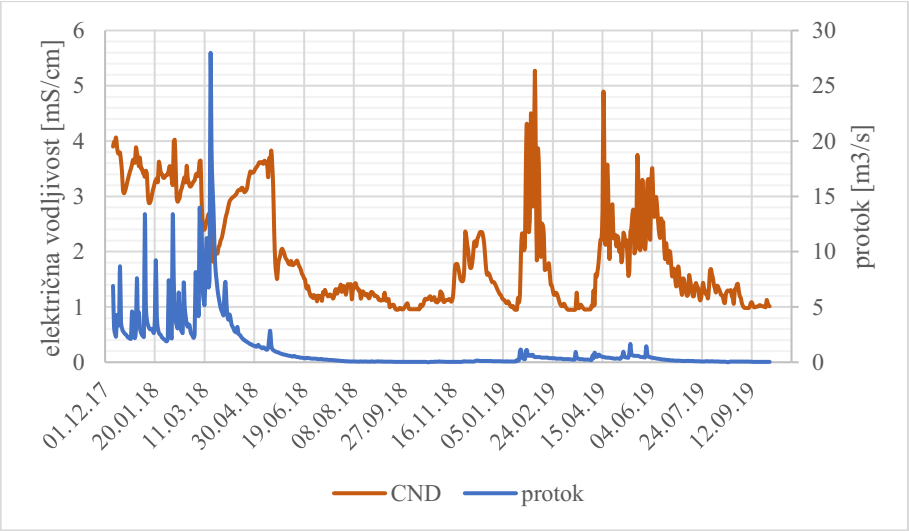
Poveznica se može pronaći i između električne vodljivosti usporedno s oborinama (Slika 21.), vodostajem (Slika 22.) i protokom (Slika 23.). Uočava se da veća količina oborina uzrokuje povećanje vrijednosti električne vodljivosti te da se sukladno promjenama oborina i protoka mijenjaju vrijednosti električne vodljivosti. Povećane količine oborina uzrokuju veći dotok sa sliva kojim se ispiru dublji i jače zaslanjeni krški sifoni. Oborine dodatno uzrokuju hidraulički potiskivanje zaslanjene vode i ujedno podizanje zone miješanja slane i slatke vode (Biondić, R. et al., 2019.).




**Slika 21. Grafički prikaz odnosa električne vodljivosti na vodocrpilištu Boljkovac i oborina izmjerenih na hidrološkoj postaji Zadar**



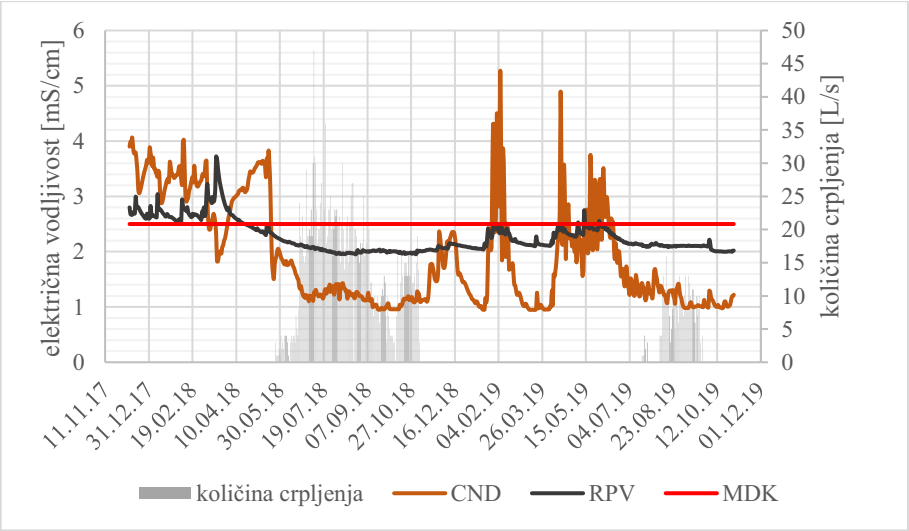

**Slika 22. Grafički prikaz odnosa električne vodljivosti na vodocrpilištu Boljkovac i vodostaja na hidrološkoj postoji Boljkovac na vodotoku Miljašić Jaruga**




**Slika 23. Grafički prikaz odnosa električne vodljivosti na vodocrpilištu Boljkovac i protoka na hidrološkoj postoji Boljkovac na vodotoku Miljašić Jaruga**

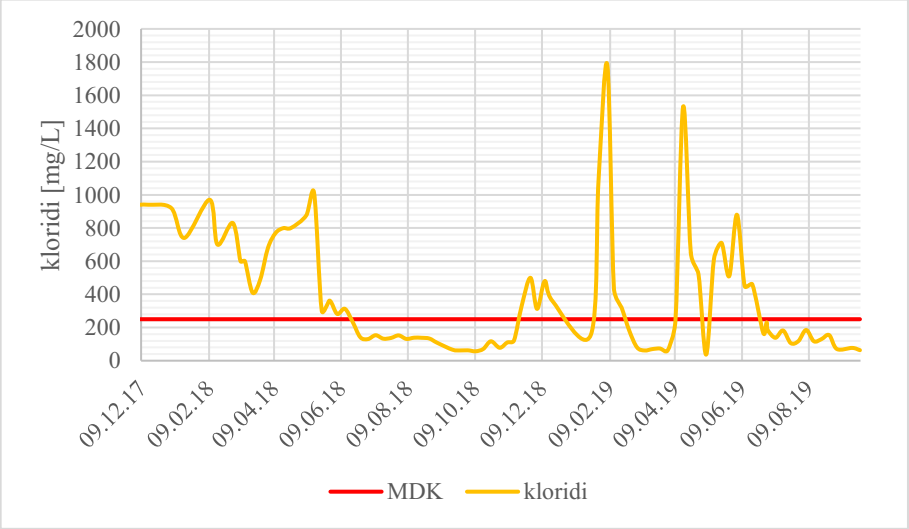
Bitan utjecaj na zaslanjenje ima antropogeni faktor crpljenja, odnosno precrpljivanje podzemne vode. Vodocrpilište Boljkovac nije bilo aktivno kroz cijelo razdoblje operativnog monitoringa već je crpljeno u dva perioda, a to su od 6. lipnja 2018. do 4. studenog 2018. te od 28. lipnja 2019. pa sve do 31. kolovoza 2019. godine. U 2018. godini je u lipnju bilo crpljeno oko 5 L/s, a u srpnju se ta količina povećala na oko 20 L/s. U 2019. godini bilo je crpljeno s oko 15 L/s. Mogući razlog smanjenog crpljenja je remont crpke (Biondić, R. et al., 2019). Prema grafičkom prikazu (Slika 24.) može se vidjeti da su se crpljenja odvijala u ljetnim razdobljima kada je vodonosnik bio u stabilnim i slatkovodnim uvjetima. Navedena tvrdnja ukazuje na to da do povećanja vrijednosti električne vodljivosti zapravo dolazi u prirodnim uvjetima te da iste nisu rezultat prekomjernog crpljenja.

Prema Pravilniku o parametrima sukladnosti, metodama analize, monitoringu i planovima sigurnosti vode za ljudsku potrošnju te načinu vođenja registra pravnih osoba koje obavljaju djelatnost javne vodoopskrbe (NN 125/2017), MDK električne vodljivosti iznosi 2,5 mS/cm pri temperaturi od 20°C. Navedena MDK je prekoračena u više navrata osim u ljetnim sušnim razdobljima. Također, ukoliko vrijednosti električne vodljivosti prelaze 1 mS/cm, kaže se da se vodonosnik nalazi pod utjecajem zaslanjenja (Biondić, R. et al., 2019).

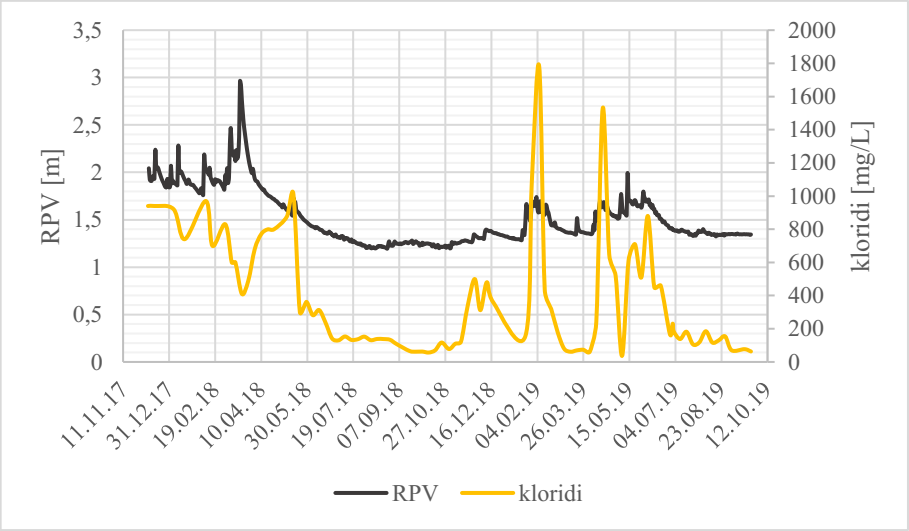



**Slika 24. Grafički prikaz odnosa razine podzemne vode, količine crpljenja, električne vodljivosti i maksimalne dopuštene koncentracije električne vodljivosti na vodocrpilištu Boljkovac**

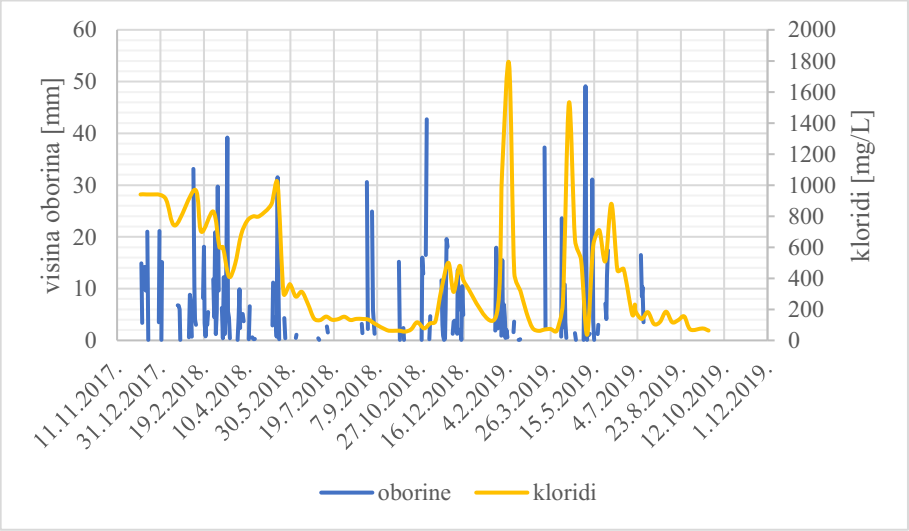
Sljedeći pokazatelj zaslanjenja su kloridi čija MDK u vodi za piće iznosi 250 mg/L pri 20 °C (Slika 25.). Koncentracija klorida za vrijeme operativnog monitoringa kretala se od 36,6 do 1780 mg/L. Maksimalna vrijednost koncentracije klorida zabilježena je 6. veljače 2019. što je dva dana nakon zabilježene maksimalne vrijednosti električne vodljivosti. Prekoračenje MDK klorida zabilježeno je gotovo kroz cijelo razdoblje operativnog monitoringa osim tijekom ljetnih sušnih razdoblja kada se odvijalo crpljenje (Slika 29.). Kao i kod električne vodljivosti, do povećanja koncentracije klorida dolazi nakon pojave značajnih oborina koje su prisutne nakon dugih sušnih razdoblja (Slika 26., Slika 27., Slika 28.).



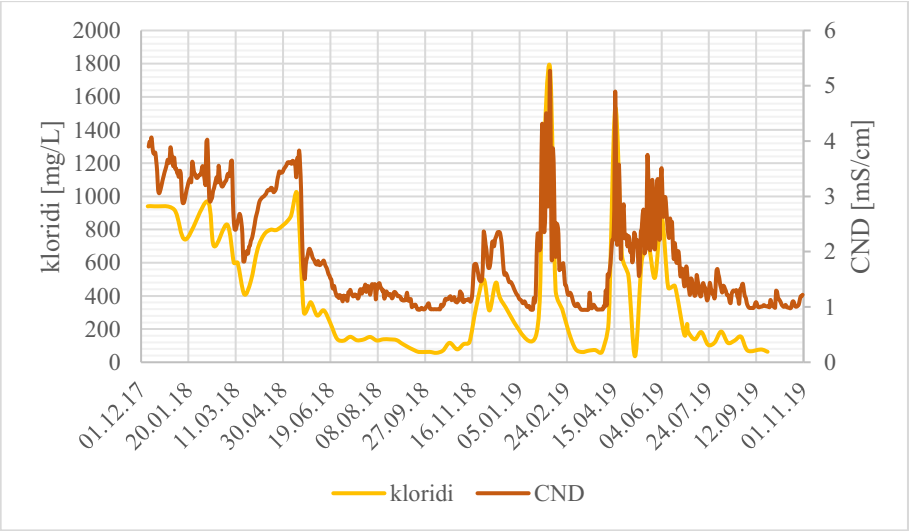

**Slika 25. Grafički prikaz promjena koncentracije klorida s označenom maksimalnom dopuštenom vrijednosti na vodocrpilištu Boljkovac**



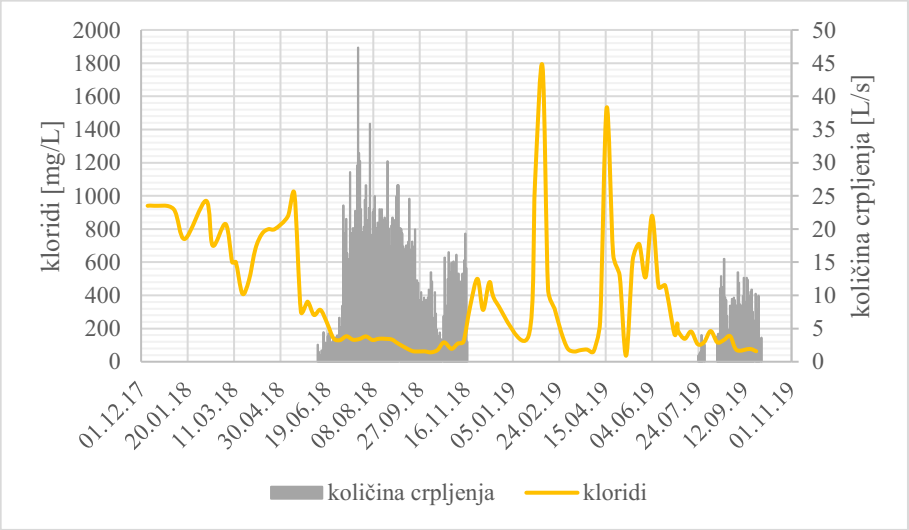

**Slika 26. Grafički prikaz odnosa razine podzemne vode i klorida na vodocrpilištu Boljkovac**




**Slika 27. Grafički prikaz odnosa koncentracije klorida i visine oborina na vodocrpilištu Boljkovac**

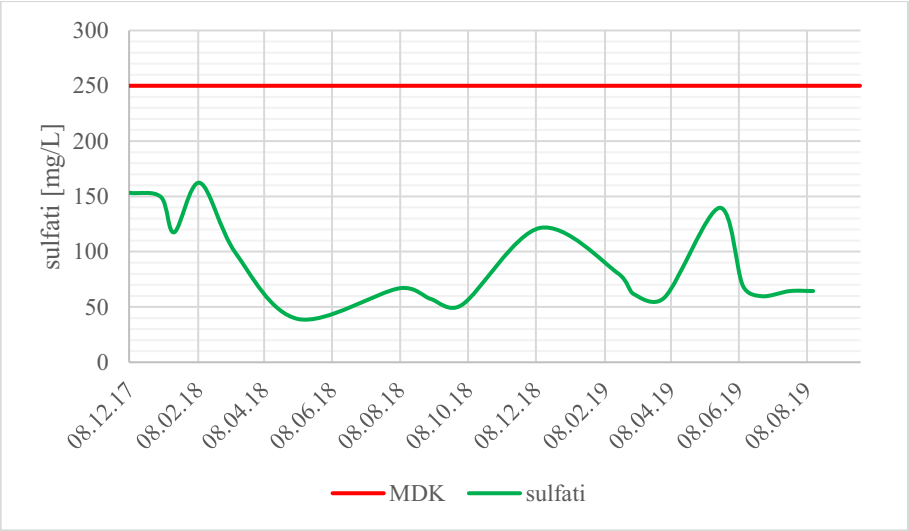



**Slika 28. Grafički prikaz odnosa koncentracije klorida i električne vodljivosti na vodocrpilištu Boljkovac**

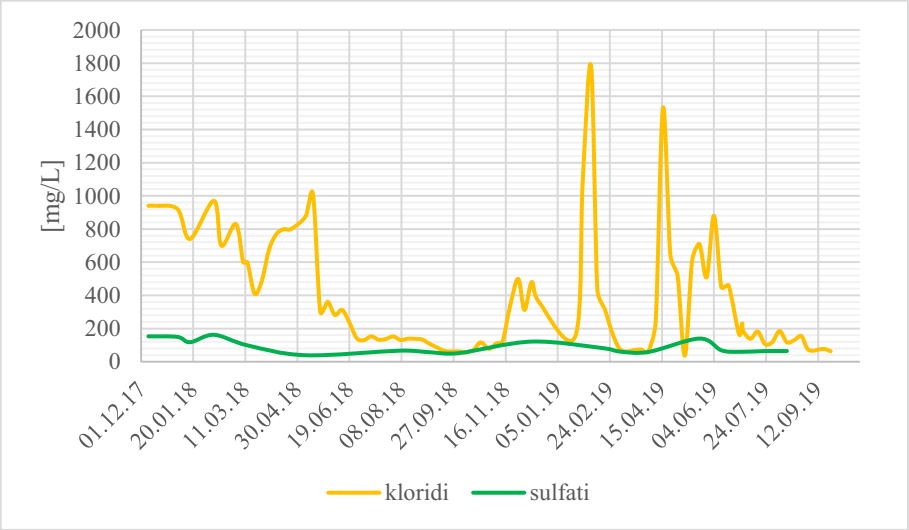



**Slika 29. Grafički prikaz odnosa količine crpljenja i koncentracije klorida na vodocrpilištu Boljkovac**

Sljedeći indikator zaslanjenja podzemnih pitkih voda su sulfati čija dopuštena MDK iznosi 250 mg/L (NN 125/2017). Za vrijeme operativnog monitoringa koncentracije sulfata nisu prelazile MDK, a maksimalna zabilježena koncentracija sulfata iznosi 162,24 mg/L i zabilježena je 9. veljače 2018. godine (Slika 30.). Iako koncentracija sulfata nije značajno povišena, mogu se uočiti manja povećanja koja su sukladna povećanjima koncentracije klorida (Slika 31.). Bitno je napomenuti da koncentracije klorida i sulfata veće od 150 mg/L upućuju na utjecaj zaslanjenja vodonosnika (Biondić, R. et al., 2019).




**Slika 30. Grafički prikaz promjene koncentracije sulfata s označenom maksimalnom dopuštenom vrijednosti na vodocrpilištu Boljkovac**



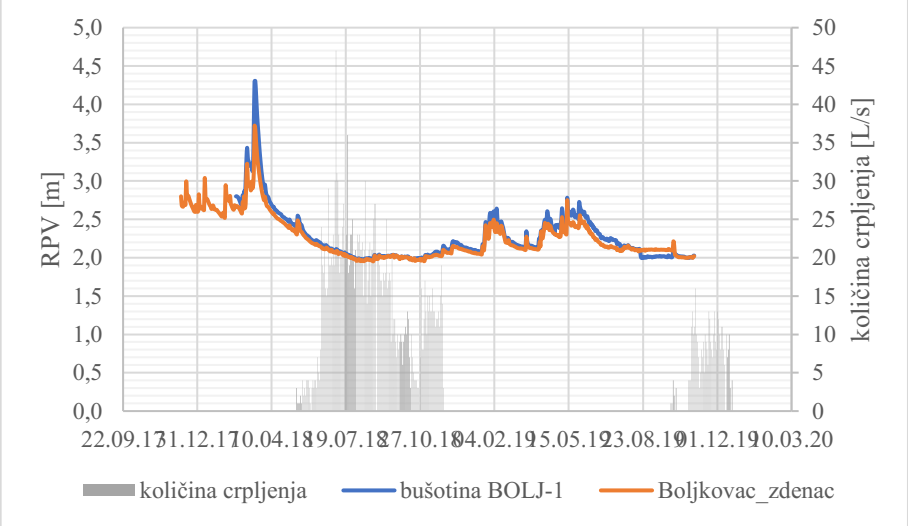

**Slika 31. Grafički prikaz odnosa koncentracija klorida i sulfata na vodocrpilištu Boljkovac**

Daljnji opis odnosi se na piezometarsku bušotinu BOLJ-1. Razina podzemne vode slična je razini podzemne vode na samom crpilištu. Međutim, na bušotini su izraženiji maksimumi (Slika 32.). Značajan utjecaj crpljenja na razine podzemne vode nije uočen vjerojatno zbog ne toliko značajnih količina crpljenja.

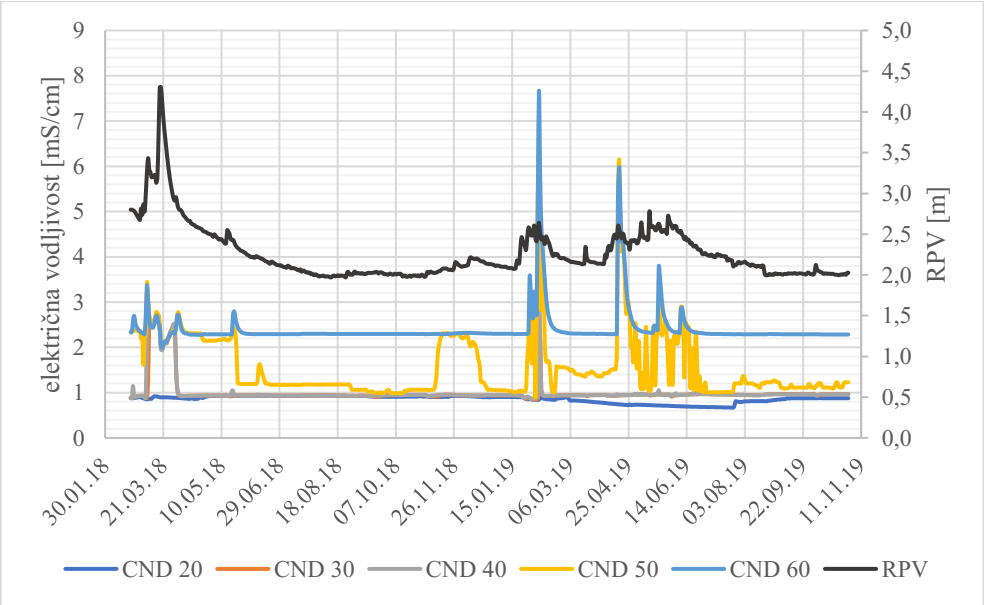
U bušotinu su postavljeni automatski mjerači na dubine od 20, 30, 40, 50 i 60 metara ispod srednje razine mora. Do dubine od 40 metara električne vodljivosti su otprilike ujednačene, posebice na dubinama od 30 i 40 metara koje se razlikuju u jačini maksimuma (Slika 33., Slika 34.). Do dubine od 40 m, vrijednosti električne vodljivosti

najčešće ne prelaze MDK. Na dubini od 50 m se pojavljuju veće vrijednosti električne vodljivosti koje pri većim razinama podzemne vode prelaze MDK. Najviše vrijednosti električne vodljivosti nalaze se na dubini od 60 m na kojoj je zabilježena maksimalna vrijednost od 7,669 mS/cm (7. veljače 2019.) (Slika 35.).

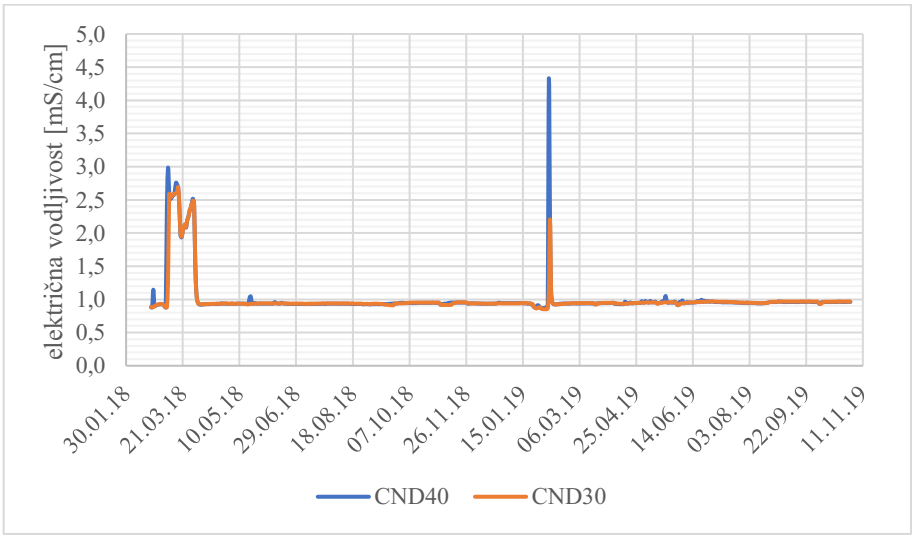
Temperatura podzemne vode u plićim zonama ima puno veće varijacije nego u dubljim zonama. Nešto više temperature zabilježene su tijekom ljetnih sušnih razdoblja (oko 15,5 °C), dok su minimalne vrijednosti zabilježene tijekom kišnih razdoblja (oko 14,5 °C na dubini od 20 m). U najdubljem dijelu bušotine na 60 m, temperatura podzemne vode iznosi oko 15 °C te je gotovo konstanta za vrijeme promatranog razdoblja (Slika 36.).



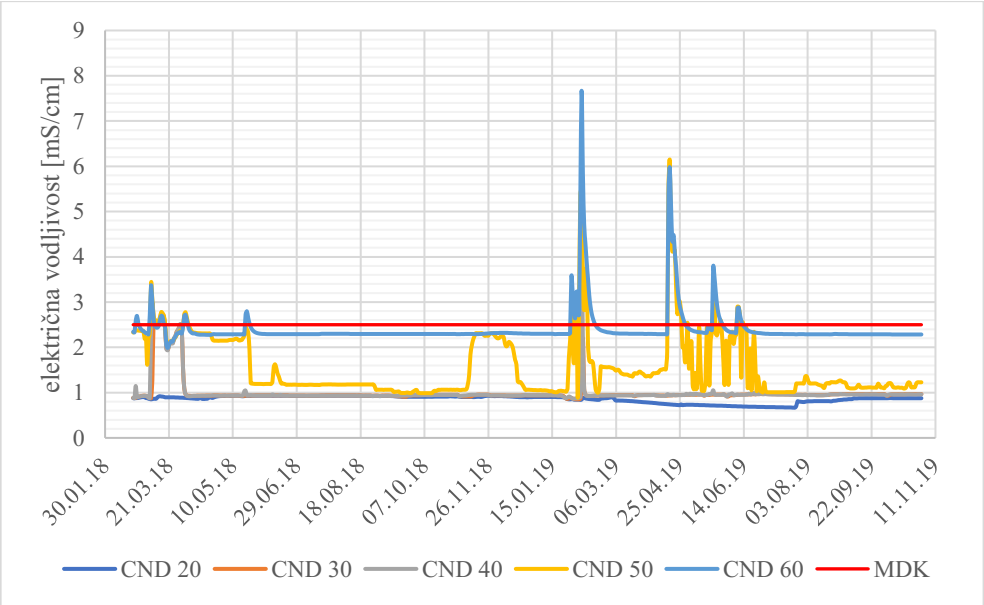

**Slika 32. Grafički prikaz odnosa količina crpljenja i razina podzemnih voda na vodocrpilištu Boljkovac i u piezometarskoj bušotini BOLJ-1**



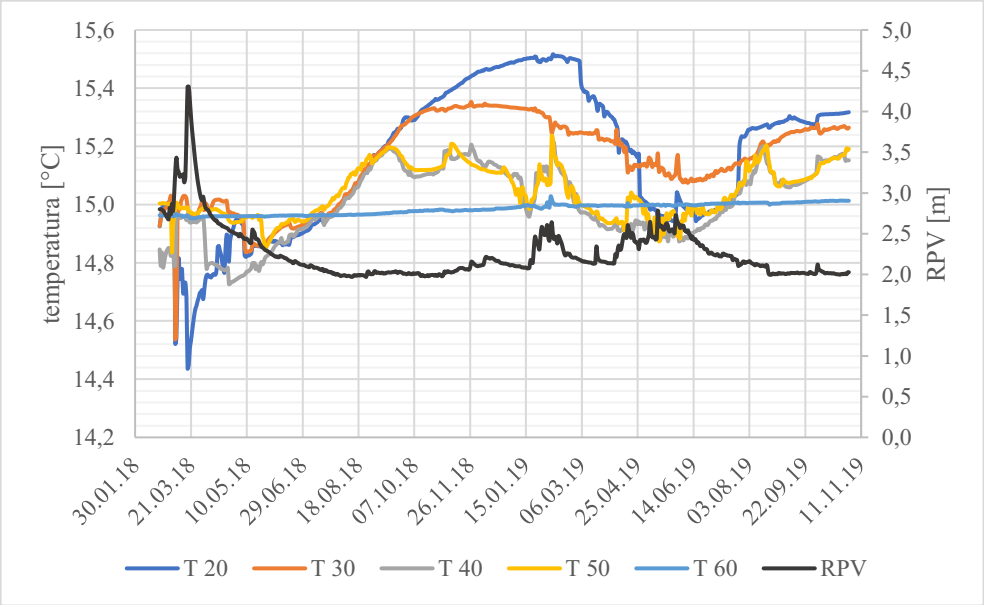

**Slika 33. Grafički prikaz promjena električne vodljivosti i razine podzemne vode na različitim dubinama duž piezometarske bušotine BOLJ-1**




**Slika 34. Grafički prikaz odnosa električne vodljivosti na dubinama od 30 i 40 metara u piezometarskoj bušotini BOLJ-1**




**Slika 35. Grafički prikaz promjena električne vodljivosti na različitim dubinama duž piezometarske bušotine BOLJ-1 s označenom maksimalnom dopuštenom koncentracijom**




**Slika 36. Grafički prikaz promjena temperature i razine podzemne vode na različitim dubinama duž piezometarske bušotine BOLJ-1**

Iz prikazanih međuodnosa različitih parametara (razina podzemne vode, temperatura, električna vodljivost, kloridi, sulfati, oborine, vodostaj protok) može se zaključiti da se vodocrpilište Boljkovac nalazi pod utjecajem mora iako je od njega udaljeno desetak kilometara. Problematika zaslanjenja na priobalnim vodonosnicima posljedica je sve većih pritisaka na priobalnim područjima uslijed sve intenzivnijeg korištenja vodnih

resursa (posebice u ljetnim razdobljima zbog turizma), navodnjavanja, korištenja tehnoloških voda, ali i zbog klimatskih promjena koje se svakim danom mogu sve jasnije zapažati.

Međutim, zaslanjenje može biti prouzrokovano prirodnim procesima što se upravo i događa na vodocrpilištu Boljkovac. Parametri koji direktno ukazuju na pojavu zaslanjenja su električna vodljivost, kloridi i sulfati koji se mogu jednostavno i jeftino mjeriti. Vrijednosti navedenih parametara rastu nakon dugotrajnih sušnih razdoblja nakon kojih slijede nagle oborine u većim količinama. Takve oborine ispiru zaslanjene krške sifone, potiskuju zaslanjenu morsku vodu prema crpilištu koje je mjesto manjeg hidrauličkog otpora te izdižu zonu miješanja slane i slatke vode. Prema vrijednostima električne vodljivosti mjerene u piezometarskoj bušotini BOLJ-1 može se zaključiti da se zona miješanja slane i slatke vode nalazi na dubini većoj od 40 metara. Također, prema vrijednostima električne vodljivosti (veće od 1 mS/cm) te klorida i sulfata (veće od 150 mg/L) može se zaključiti da se vodonosnik nalazi pod utjecajem zaslanjenja.

Kako značajan utjecaj na zaslanjenje vodonosnika imaju oborine, bitno je spomenuti klimatske promjene te njihov utjecaj. Klimatske promjene se očituju u povišenju temperature zraka što kao posljedicu vodi povišenje razine mora te smanjenje količine oborina. Nadalje, smanjenje količine oborina utječe na smanjenje otjecanja iz sliva, a smanjeno otjecanje ugrožava krške vodonosnike. Također, povećanjem srednjih godišnjih temperatura zraka, povećavaju se gubici na evapotranspiraciji čime se smanjuju efektivne oborine, površinska otjecanja i količina infiltriranih voda u podzemlje. Smanjenje dotoka i porast razine mora povećavaju otvorenost krških kanala i vodonosnika prema moru te postoji mogućnost za još lakšom intruzijom morske vode i zaslanjenja s većim posljedicama.

Kako bi se ublažile posljedice potrebno je smanjiti rizik od potencijalnog zaslanjenja. Najbitniji korak u zaštiti podzemnih voda je uspostava odgovarajućeg monitoringa kojim se može na vrijeme uočiti promjene u kvalitativnog i kvantitativnom statusu voda. Dobar primjer uspostave pravilnog monitoringa je TPV Bokanjac-Poličnik. Podatke dobivene monitoringom potrebno je učestalo ažurirati te ukoliko dođe do naglih promjena trendova, potrebno je pravovremeno reagirati. Obzirom da se podzemne vode iz krških vodonosnika koriste za vodoopskrbu, bitno je crpiti odgovarajućim količinama koje ne mogu štetno utjecati na količinski status, a samim time i kvalitativni, odnosno na podizanje zone miješanja slane i slatke vode te zaslanjenje vodonosnika. Pravilna eksploatacija podzemne vode uključuje „uvođenje kvalitetnog sustava crpljenja, smanjenje dubina na

kojima se nalaze crpke, povećanje rezervoara za vodu, smanjenje gubitaka u vodoopskrbnom sustavu, prekid crpke ukoliko se crpni objekt nađe pod iznenadnim utjecajem zaslanjenja“ i slično (Biondić, R. et al., 2019). Kako bi se vodni resursi koristili na ispravan način potrebno je educirati stanovništvo s naglaskom na važnost voda i vodnih resursa. Međutim, najbitnije je uspostaviti odgovarajuću vodnu politiku integriranog upravljanja vodnim resursima i poštivati osnovna načela zaštite voda koja obuhvaćaju štedljivo i racionalno korištenje te sprečavane njihovog onečišćenja.

# 5. ZAKLJUČAK

U ovom je radu izrađena statistička obrada vrijednosti parametara razine podzemne vode, temperature, električne vodljivosti, koncentracija klorida i sulfata, oborina, vodostaja i protoka koji su mjereni na teritoriju TPV Bokanjac-Poličnik. Usporedbom grafičkih prikaza podataka donesen je zaključak o intruziji morske vode u vodonosnik, odnosno o zoni miješanja slane i slatke vode na vodocrpilištu Boljkovac. Vremensko razdoblje provedenog monitoringa je od 9. prosinca 2017. do 31. listopada 2019. godine.

Zaslanjenje priobalnih krških vodonosnika najčešće je posljedica nekontroliranog crpljenja podzemnih voda čime se narušava nestabilna dinamička ravnoteža između slane i slatke vode. Međutim, na vodocrpilištu Boljkovac crpljenje nema značajan utjecaj na narušavanje ravnoteže, već se radi o prirodnom putu prolaska morske vode i zaslanjenja vodocrpilišta.

Najznačajniji parametri pomoću kojih se određuje zaslanjenje su električna vodljivost te koncentracije klorida i sulfata. Maksimalna dopuštena koncentracija električne vodljivosti u podzemnim vodama iznosi 2,5 mS/cm, dok za koncentracije klorida i sulfata iznosi 250 mg/L. Međutim, ukoliko se u podzemnim vodama radi o vrijednostima el. vodljivosti većim od 1 mS/cm i koncentracijama klorida i sulfata većim od 150 mg/L može se reći da je vodonosnik pod utjecajem zaslanjenja.

Analizom podataka dobivenih operativnim monitoringom za vodocrpilište Boljkovac uočeno je da su vrijednosti električne vodljivosti i klorida tijekom ljetnih sušnih razdoblja ispod dopuštenih vrijednosti, no nakon prvih naglih i obilnih kiša vrijednosti rastu i prelaze MDK zbog čega je nemoguće takvu vodu crpiti za vodoopskrbu. Dakle na utjecaj zaslanjenja na vodocrpilištu Boljkovac velik utjecaj imaju oborine koje padaju nakon sušnih razdoblja jer ispiru jače i dublje zaslanjenje krške sifone te time utječu na ravnotežu između slane i slatke vode. Odnosno nakon jačih dotoka vode sa slivnog područja dolazi do istiskivanja morske vode koja se nalazi u dubljim i udaljenijim dijelovima vodonosnika te do izdizanja zone miješanja prema crpnom objektu.

# 6. LITERATURA


Bear, J., Verruijt, A. (1994): Modeling Groundwater Flow and Pollution (Theory and Applications of Transport in Porous Media), *Springer*, SAD.

Biondić, R., Rubinić, J., Biondić, B., Meaški, H., Radišić, M. (2016): *Definiranje trendova i ocjena stanja podzemnih voda na području krša u Hrvatskoj*, Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu i Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci.

Biondić, R., Rubinić, J., Meaški, H., Biondić, B., Radišić, M. (2019): *Definiranje kriterija za utvrđivanje stanja tijela podzemne vode kod pojave zaslanjenja*, Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Varaždin.

*CIS 7: Monitoring u skladu s Okvirnom direktivom o vodama* (2003). Dostupno na: https://www.voda.hr/hr/okvirna-direktiva-o-vodama. Datum pristupa: 1.3.2021.

*CIS 15: Praćenje podzemnih voda* (2007): Dostupno na: https://www.voda.hr/hr/okvirna-direktiva-o-vodama. Datum pristupa: 1.3.2021.

Cooper, H. H. (1959): *A hypothesis concerning the dynamic balance of freshwater and saltwater in coastal aquifer*, Journal of Gheophysical Research, 64:461-467.

Custodio, E. (1983*): Relaciones agua dulce-agua salada en las regions costeras. In Custodio and Llamas (Eds.)*, Hidrologia Subterranea, Ediciones Omega, Barcelona, 1313-1389.

*Direktiva o podzemnim vodama* (2006/118/EC). Dostupno na: https://www.voda.hr/hr/okvirna-direktiva-o-vodama. Datum pristupa: 1.3.2021.

European cooperation in the field of scinetific and technical research (2005): *COST Action 621: Groundwater management of coastal aquifers*, Luxembourg.

Gajić-Čapka, M., Güttler, I., Branković, Č. (2010): *Contribution to CC-WaterS project: a study of climate and climate change for three test beds in Croatia,* Department for climatological research and applied climatology, Meteorological and hydrological service, Zagreb.

Gjurašin, K. (1942): *Prilog hidrografiji krša*, Tehnički vjesnik 59, br. 4-6, 107-112.

Gjurašin, K. (1943): *Prilog hidrografiji krša*, Tehnički vjesnik 60, br. 1-2, 1-17.

Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje Leksikografskog zavoda Miroslav Krleža (2021): *krš. D*ostupno na: http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=34221. Datum pristupa: 8.4.2021.

Henry, H. R. (1964): *Effects on dispersion on salt encroachment in coastal aqufiers. In Sea water in coastal aqufiers*, U.S.G.S., Water supply pap. 1613-C:70-84.

Hubbert, M. K. (1940): *The theory of groundwater motion*, The Journal of Geology, 48:785-944.

Majcen, Ž., Korolija, B., Sokač, B., Nikler, L. (1969): List Osnovne geološke karte M1:100.000 – list Zadar – Tumač i List karte.

Muskat, M. (1937): *The flow of homogeneous fluids through porous media*, McGraw-Hill, New York, 763.

*Okvirna direktiva o vodama* (2000/60/EC). Dostupno na: https://www.voda.hr/hr/okvirna-direktiva-o-vodama. Datum pristupa: 1.3.2021.

Oskoruš, D., Berbić, J., Macek, K., Lončar, T. (2017): *Ekstremne rujanske poplave u Zadru i Ninu*, Hrvatska vodoprivreda 221/25, 25-34.

*Plan upravljanja vodnim područjima 2016.-2021.* (2016). Narodne novine. Broj 66. (6.7.2016)

*Pravilnik o parametrima sukladnosti, metodama analize, monitoringu i planovima sigurnosti vode za ljudsku potrošnju te načinu vođenja registra pravnih osoba koje obavljaju djelatnost javne vodoopskrbe.* (2017.). Narodne novine. Broj 125. (14.12.2017.)

*Program zaštite okoliša grada Zadra.* (2016) Zagreb: OIKON - Institut za primijenjenu ekologiju.

Reilly, T. E., Goodman, A. S. (1987): *Analysis of saltwater upconing beneath a pumping well, Journal of Hydrology*, 89:69-204.

Terzić, J., Lukač Reberski, J. (2013): *Hidrogeološki elaborat zona sanitarne zaštite crpilišta zadarskog vodovoda (Zdenci B-4 i B-5, Jezerce, Oko, Boljkovac i Golubinka) u sklopu hidrogeološkog sustava Bokanjac-Poličnik*, Zagreb, HGI-CGS.

*Vodoopskrbni sustav zadarskog Vodovoda | Vodovod d.o.o. Zadar* (2020). Dostupno na: https://www.vodovod-zadar.hr/voda/kvaliteta-vode/vodoopskrbni-sustav-zadarskog-vodovoda. Datum pristupa: 1.4.2021.

WHO. (14.6.2019.). *Drinking water*. Dostupno na: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water. Datum pristupa: 28.4.2021.

# POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz priobalnih vodonosnika koji se nalaze pod utjecajem morske vode (Biondić, B. i Biondić, R., 2014) ..... 4

Slika 2. Gyhben-Herzbergov princip – odnos položaja slane i slatke vode (prema BEAR & VERRUIJT, 1994) ..... 6

Slika 3. Prikaz stvarnog tečenja vode u priobalnoj zoni: A – stvarna dubina od površine do zone miješanja, B – dubina od površine do zone miješanja prema Ghyben-Herzbergovom zakonu (prema BEAR & VERRUIJT, 1994) ..... 7

Slika 4. Shematski prikaz tečenja u priobalnom vodonosniku (Biondić, B. i Biondić R., 2014) ..... 10

Slika 5. Prikaz različitih modela miješanja slane i slatke vode (Biondić, B. i Biondić, R., 2014; modificirano prema Custodio, 1985) ..... 11

Slika 6. Shematski prikaz tečenja vode na priobalnom izvoru (prema GJURAŠIN, 1943) ..... 12

Slika 7. Shematski prikaz konusnog podizanja slane vode zbog prekomjernog crpljena podzemne vode u priobalnim vodonosnicima, 1 – slatka voda, 2- zaslanjena voda, 3 – slana (morska) voda, 4 – nepropusne naslage (Biondić, B. i Biondić, R., 2014) ..... 14

Slika 8. Grupirane cjeline podzemne vode u krškom dijelu Hrvatske s označenim CPV Bokanjac-Poličnik (Biondić, R. et al., 2016) ..... 17

Slika 9. Pregledna hidrogeološka karta TPV Bokanjac-Poličnik, M1:50.000 (izradili: Biondić, R., Biondić, B. i Meaški, H., 2019) ..... 21

Slika 10. Prikaz provedenih trasiranja i podzemnih tokova u CPV Bokanjac-Poličnik (Biondić, R. et al., 2019) ..... 22

Slika 11. Prikaz vodocrpilišta na području TPV Bokanjac-Poličnik (Biondić, R. et al., 2016) ..... 25

Slika 12. a) kopani zdenac (na istoimenoj estaveli) Jezerce, b) kopani zdenac Oko, c) kaptirani izvor Golubinka, d) kopani zdenac Boljkovac (Terzić i Lukač Reberski, 2013) ..... 25

Slika 13. Presjek vodocrpilišta Boljkovac s osnovnim tehničkim značajkama (Terzić i Lukač Reberski, 2013) ..... 27

Slika 14. Prikaz odabranih točaka monitoringa kakvoće i količine podzemnih voda (Biondić, R. et al., 2016) ..... 31

Slika 15. Položaj zdenca na crpilištu Boljkovac i nove piezometarske bušotine BOLJ-1 (Biondić, R. et al., 2019)..... 32
Slika 16. Grafički prikaz odnosa razine podzemne vode i količina oborina na vodocrpilištu Boljkovac..... 34
Slika 17. Grafički prikaz odnosa razine podzemne vode na vodocrpilištu Boljkovac i vodostaja na hidrološkoj postaji Boljkovac na vodotoku Miljašić Jaruga..... 34
Slika 18. Grafički prikaz odnosa razine podzemne vode i temperature na vodocrpilištu Boljkovac..... 35
Slika 19. Grafički prikaz odnosa razine podzemne vode i električne vodljivosti na vodocrpilištu Boljkovac..... 36
Slika 20. Grafički prikaz električne vodljivosti i temperature na vodocrpilištu Boljkovac..... 36
Slika 21. Grafički prikaz odnosa električne vodljivosti na vodocrpilištu Boljkovac i oborina izmjerenih na hidrološkoj postaji Zadar..... 37
Slika 22. Grafički prikaz odnosa električne vodljivosti na vodocrpilištu Boljkovac i vodostaja na hidrološkoj postoji Boljkovac na vodotoku Miljašić Jaruga..... 37
Slika 23. Grafički prikaz odnosa električne vodljivosti na vodocrpilištu Boljkovac i protoka na hidrološkoj postoji Boljkovac na vodotoku Miljašić Jaruga..... 38
Slika 24. Grafički prikaz odnosa razine podzemne vode, količine crpljenja, električne vodljivosti i maksimalne dopuštene koncentracije električne vodljivosti na vodocrpilištu Boljkovac..... 39
Slika 25. Grafički prikaz promjena koncentracije klorida s označenom maksimalnom dopuštenom vrijednosti na vodocrpilištu Boljkovac..... 39
Slika 26. Grafički prikaz odnosa razine podzemne vode i klorida na vodocrpilištu Boljkovac..... 40
Slika 27. Grafički prikaz odnosa koncentracije klorida i visine oborina na vodocrpilištu Boljkovac..... 40
Slika 28. Grafički prikaz odnosa koncentracije klorida i električne vodljivosti na vodocrpilištu Boljkovac..... 41
Slika 29. Grafički prikaz odnosa količine crpljenja i koncentracije klorida na vodocrpilištu Boljkovac..... 41
Slika 30. Grafički prikaz promjene koncentracije sulfata s označenom maksimalnom dopuštenom vrijednosti na vodocrpilištu Boljkovac..... 42

Slika 31. Grafički prikaz odnosa koncentracija klorida i sulfata na vodocrpilištu Boljkovac ..... 42
Slika 32. Grafički prikaz odnosa količina crpljenja i razina podzemnih voda na vodocrpilištu Boljkovac i u piezometarskoj bušotini BOLJ-1 ..... 43
Slika 33. Grafički prikaz promjena električne vodljivosti i razine podzemne vode na različitim dubinama duž piezometarske bušotine BOLJ-1 ..... 44
Slika 34. Grafički prikaz odnosa električne vodljivosti na dubinama od 30 i 40 metara u piezometarskoj bušotini BOLJ-1 ..... 44
Slika 35. Grafički prikaz promjena električne vodljivosti na različitim dubinama duž piezometarske bušotine BOLJ-1 s označenom maksimalnom dopuštenom koncentracijom ..... 45
Slika 36. Grafički prikaz promjena temperature i razine podzemne vode na različitim dubinama duž piezometarske bušotine BOLJ-1 ..... 45

# POPIS TABLICA

Tablica 1. Prosječne, minimalne i maksimalne vrijednosti parametara korištenih za analizu ..... 33