Utjecaj mora na priobalne krške vodonosnike

Herceg, Filip

Undergraduate thesis / Završni rad

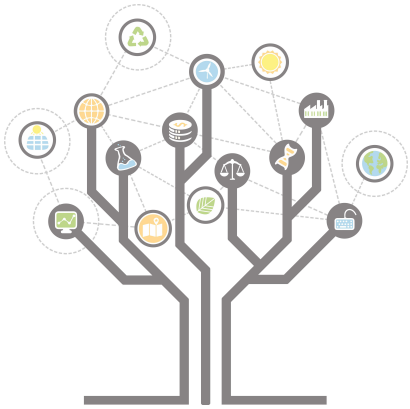
2019

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:130:632173

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-20**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

FILIP HERCEG

UTJECAJ MORA NA PRIOBALNE KRŠKE VODONOSNIKE

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

UTJECAJ MORA NA PRIOBALNE KRŠKE VODONOSNIKE

KANDIDAT:

Filip Herceg

MENTOR:

prof.dr.sc. Ranko Biondić

Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: FILIP HERCEG

Matični broj: 2582 - 2015./2016.

NASLOV ZAVRŠNOG RADA:

UTJECAJ MORA NA PRIOBALNE KRŠKE VODONOSNIKE

Rad treba sadržati: 1. Uvod
2. Krški vodonosnici u Hrvatskoj
3. Zaslanjenje priobalnih vodonosnika
4. Pregled utjecaja mora na veće krške priobalne izvore
5. Zaključak

Pristupnik je dužan predati mentoru jedan uvezen primjerak završnog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade završnog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 20.03.2019. Rok predaje: 05.09.2019.

Mentor:
Prof.dr.sc. Ranko Biondić

Predsjednik Odbora za nastavu:
Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

VARAŽDIN, 2019.

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom

UTJECAJ MORA NA PRIOBALNE KRŠKE VODONOSNIKE

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, 05.09.2019.

FILIP HERCEG
(Ime i prezime)

Herceg

(Vlastoručni potpis)

SAŽETAK

IME I PREZIME AUTORA: Filip Herceg

NASLOV RADA: Utjecaj mora na priobalne krške vodonosnike

Imati pitku vodu u današnje vrijeme veliko je bogatstvo. Republika Hrvatska ima velike količine pitke vode. U svakom dijelu zemlje postoje različiti problemi koji tu vodu mogu učiniti neprikladnom za ljudsku potrošnju. Veliko područje u Hrvatskoj zauzimaju krški tereni. Ti tereni većinom se nalaze u blizini Jadranskog mora. More, iako predstavlja izvor bogatstva u vidu ribe i ostalih morskih organizama, turizma, soli i dr., s druge strane može raditi štetu po pitanju zaslanjenja slatke pitke vode. Prodor morske vode u krške vodonosnike veliki je problem za obalno područje, pogotovo u ljetnim sušnim mjesecima. Ovaj rad prikazuje utjecaj mora na krške vodonosnike, osnovne zakone u odnosima slatke i slane vode, načine na koji se vodonosnici mogu zaslaniti. Također su, temeljem analize nekoliko krških izvora i njihovih specifičnih problema sa zaslanjenjem dani su zaključci koji ukazuju na potencijalna rješenja ovakvih problema.

KLJUČNE RIJEČI: voda, more, Hrvatska, krš, vodonosnik, izvor

SADRŽAJ:

1. Uvod 1
2. Krški vodonosnici u Hrvatskoj 3
2.1. Opći pregled krških terena u Hrvatskoj 3
2.2. Opis većih krških vodonosnika u Republici Hrvatskoj 6
3. Zaslanjenje priobalnih vodonosnika 8
3.1. Odnos slane i slatke vode 9
3.2. Utjecaj eksploatacije na zaslanjenje priobalnih krških vodonosnika 13
3.3. Utjecaj klimatskih promjena na vodonosnike 15
4. Pregled utjecaja mora na veće krške priobalne izvore 16
5. Zaključak 24
Literatura 25
Popis tablica 28

1. Uvod

Oko 72 % površine Zemlje je prekriveno vodom, a 97 % te vode otpada na slanu morsku vodu koja nije pogodna za piće. Preostalih 3 % vode je slatka vode bez koje je život neophodan. Kako bi se bolje ilustrirala količina vode na Zemlji planet se može usporediti s košarkaškom loptom. U usporedbi, voda na zemlji bila bi kao loptica za stolni tenis. Drugim riječima, na Zemlji baš i nema mnogo vode. U današnje moderno doba potreba za pitkom vodom sve je veća, te je opskrba njome u nekim područjima veliki problem. Razvojem turizma, prometa, tehnologije, poljoprivrede, pa i širenjem gradova i općina dolazi do sve veće potrebe za vodom i potrošnjom iste.

Na području Jadranske obale postojeći prirodni izvori s vremenom nisu bili više dovoljni za opskrbu pitkom vodom te su se morala tražiti alternativna rješenja. Područje Jadranske obale je u većini slučajeva izgrađeno na krškim područjima. Iz tog razloga slivovi vodotoka i glavnih izvora prolaze kroz takva područja, te se protežu paralelno uz obalu. Na mjestima uvala i graničnim područjima velikih strukturnih formi gdje je more dublje usječeno u kopno, krški vodonosnici su bočno otvoreni prema moru i tu se mogu javiti prodori slane vode duboko u prostor kopna. Ako se pomiješaju slatka i slana voda nastane bočata voda, ali nastanu i veliki problemi u vodoopskrbi.

Hrvatska obala Jadrana ima više od 1000 km obalne linije gdje priobalni krški vodonosnici dolaze u kontakt sa slanom morskom vodom. Količine dotoka slatke vode iz krškog zaleđa variraju, pa u nekim dijelovima slatka voda iz priobalnih vodonosnika stvara vrlo labilnu ravnotežu slatke i slane vode. Taj odnos se vrlo lako poremeti uslijed niskih razina podzemnih voda i precrpljivanjem vodonosnika u sušnim razdobljima kada su veće potrebe za pitkom vodom. Također odnos slane i slatke vode može se poremetiti porastom razine mora uslijed velikih plima. Situacija na otocima također je specifična iz razloga jer su krški vodonosnici ograničenih dimenzija te su obično sa svih strana otvoreni prema zaslanjenoj vodi. Taj odnos je još izraženiji jer su i količine oborina manje nego u kopnenim dijelovima obale, a i sama površina priljevnog područja je ograničena površinom otoka.

U zimskim mjesecima, problema s opskrbom vode većinom nema, dok je u ljetnim mjesecima drugačija situacija zbog većih potreba i prekomjerne eksploatacije.

Kad se poklopi više čimbenika moguć je i prekid vodoopskrbom u nekim mjestima, gradovima pa čak i regijama, što dovodi do neugodnih situacija kako za domaće ljude tako i za goste u ljetnim mjesecima.

Hrvatski, ali i stručnjaci susjednih zemalja već se godinama bave istraživanjima i sanacijama prodora mora u krške vodonosnike. U povijesti su se uglavnom pokušavala presijecati mjesta na kojima morska voda prodire prema slatkoj vodi međutim taj je koncept danas napušten. Neki znanstvenici pak dijele krške vodonosnike na anizotropne i izotropne. Prema toj teoriji vodonosnici Dinarskog područja bili bi anizotropni i prema tome bila bi dva načina na koji bi se krški vodonosnik mogao kontaminirati. Jedan od tih načina je da se vodonosnici zaslanjuju direktno kroz vrulje, odnosno podmorske izvore, a drugi, zanimljiv način je da kontaminacija dolazi unutar krške mase. Nema puno dokaza za navedeni drugi način jer je ponekad fizički nemoguće doći direktno unutar krške mase i izravnim opažanjem donositi činjenice. U ovom radu obradit će se utjecaj slane vode na slatke krške vodonosnike te posljedice istih.

2. Krški vodonosnici u Hrvatskoj

2.1. Opći pregled krških terena u Hrvatskoj

Globalno gledano, krš u svijetu zauzima oko 20% ukupne svjetske kopnene površine. Na globalnoj razini imamo nekoliko vrsta krša. U toplijim krajevima kao što su Malezija, Brazil, Nova Gvineja itd. zastupljen je takozvani tropski krš čija je specifičnost brza korozija i oblici koji su vodoravno razvijeni. U hladnijim područjima razvijen je polarni krš koji je specifičan zbog brzog raspadanja uvjetovanog snijegom i ledom. U slojevima evaporita i gipsa razvijena je posebna vrsta krša u kojem možemo naići na velike speleološke objekte, takvu vrstu krša najbliže možemo pronaći u Ukrajini. Krška područja Republike Hrvatske pripadaju tipu krša umjerenih širina koji se ističe debelim karbonatnim segmentima (do 8 kilometara). Dakako, cijeli prostor Republike Hrvatske nije pod kršem. Krš se prostire od Savudrije do rta Prevlake i do Samoborskog gorja. Dio je geološke megastrukture Dinarida koji se prostire od Slovenije preko Hrvatske i Bosne i Hercegovine do Crne Gore (MATAS, 2006).

Gotovo 50 % površine Republike Hrvatske sastavljena je od karbonatnih stijena. Te stijene prema hrvatskom znanstveniku Milanu Heraku spadaju u Dinarski krš. Granica prema nizinskoj Hrvatskoj je područje grada Karlovca, iako se i u nekim dijelovima panonskog bazena može pronaći krš. Na slici 1. se može vidjeti područje krša u Hrvatskoj.

Slika 1. Područje krša u Republici Hrvatskoj

(BIONDIĆ, R., 2019)

U tablici 1. se može vidjeti količina krša u hrvatskim županijama naspram ukupne površine istih. Iz tablice 1. možemo vidjeti da uz kontinuirana krška područja postoje i krška područja osamljenog tipa. On zahvaća 247 km^2 što je 0,41% ukupne površne države. Najbliži takav primjer u Varaždinskoj županiji prisutan je na brdu Kalnik (643 m) čiji je glavni dio izgrađen od vapnenaca i dolomita. Također, krško područje osamljenog tipa može se pronaći i na planini Ivanščica (1023 m) koja je jednim dijelom izgrađena od vapnenaca i dolomita.

Tablica 1. Raspored krša u županijama Republike Hrvatske

(MATAS, 2006)

Naziv Županije	Ukupne površine županija u km^2	Krški prostor u km^2	Izdvojeni krški prostor u km^2
Zagrebačka	3060	409	
Krapinsko-zagorska	1229		45
Sisačko-moslavačka	4468	1479	
Karlovačka	3626	2780	
Varaždinska	1262		14
Koprivničko-križevačka	1748		65
Bjelovarsko-bilogorska	2640		8
Primorsko-goranska	3588	3578	
Ličko-senjska	5353	5353	
Virovitičko-podravska	2024		12
Požeško-slavonska	1823		85
Brodsko-posavska	2030	0	0
Zadarska	3646	3646	
Osječko-baranjska	4155	0	0
Šibensko-kninska	2984	2984	
Vukovarsko-srijemska	2452	0	0
Splitsko-dalmatinska	4540	4540	
Istarska	2813	2813	
Dubrovačko-neretvanska	1781	1781	
Međimurska	729	0	0
Grad Zagreb	641		38
Ukupno	**56594**	**29363**	**267**
%	**100**	**51,90 %**	**0,47 %**

Krš je tip reljefa koji se razvija na tlu sastavljenom od topivih stijena od kojih su najčešće prisutni vapnenci ($CaCO_3$) i dolomiti ($MgCO_3$). Takva područja koja su pretežno izgrađena od karbonatnih stijena podložna su erozijskom i kemijskom djelovanju podzemnih voda. Na površini su kiša i stajaća voda izdubile i izradile mnoge oblike. Škrape, žljebovi i kamenice, udubljenja su u stijeni različitih veličina i oblika, ovisno o jačini oborina, udjelu kalcijeva karbonata u karbonatnoj stijeni, nagibu terena, raspucanosti stijene i slično. Krški tereni su tereni specifični po svojim hidrogeološkim, geomorfološkim i hidrološkim obilježjima. Povijesno gledano, sam termin krš nastao je na našim područjima. Krške forme koje su nastale dislucijskim proširenjem pukotinskih sustava vezane su uz različite vrste stijena. Neke od tih vrsta su sol, anhidrit, gips i karbonati. Na krškim terenima opći je nedostatak stalnih površinskih tokova uz postojanje krških polja, ponora i drugih specifičnih krških formi. U navedenim

područjima dolazi do čestih pojava kaverni i podzemnih kanala. Gotovo 50 % površine Republike Hrvatske se nalazi pod kršem. Granica prema nizinskoj Hrvatskoj je područje grada Karlovca, iako se i u nekim dijelovima panonskog bazena može pronaći krš. Na slici 1. se može vidjeti područje krša u Hrvatskoj.

2.2. Opis većih krških vodonosnika u Republici Hrvatskoj

Pukotinska poroznost je osnovno obilježje karbonatnih krških terena, te se iz tog razloga unutar takvih područja formiraju vodonosnici. Međutim, voda nije uvijek u malim pukotinskim prostorima. Disolucijskim radom vode sami pukotinski prostori ponekad se mogu proširiti, te tako nastaju spilje i kaverne koje mogu sadržavati vodu akumuliranu na jednom prostoru ili mogu nastati kanali većih dimenzija koji također mogu biti ispunjeni vodom. Zbog toga je područje krša veoma specifičan prostor jer krški procesi mijenjaju prvotne pukotinske sustave. Neka od tih obilježja su da je na krškim područjima nedostatak stalnih površinskih tokova uz postojanje ponora ili krških polja i ostalih specifičnih formi koje obilježavaju područje krša. Još jedna specifičnost navedenih područja je pojavljivanje velikih stalnih ili povremenih izvora. Razvoj specifičnog okoliša kao i pojava oštrih morfoloških oblika također je jedno od obilježja krških područja. Termin vodonosnik spomenut nekoliko puta u prethodnom dijelu teksta označava stijensku masu s relativno velikom propusnošću, te područje koje je spremno provoditi veću količinu vode (BIONDIĆ, B. & BIONDIĆ, R, 2014). Prema HERAK & STRINGFIELD (1972) postoji geosinklinalni tip krških vodonosnika i epikontinentalni tip krških vodonosnika.

Geosinklinalni tip se veže za prostore koji se nalaze na rubovima kontinentalnih ploča. Osnovna značajka prepoznavanja geosinklinalnog tipa su brojne bočne i vertikalne litološke promjene te zastupljenost karbonatnim stijenama. Količina karbonatnih stijena se tijekom prošlosti povećavala brojnim tektonskim i erozijskim fazama. Područje Dinarida nastalo je tijekom alpske orogeneze nakon taloženja fliša te je tada stvorena današnja slika geoloških strukturnih formi. Područje Dinarida je ispunjeno karbonatnim stijenama koje su borane, rasjedne ili tangencijalno pokretne. Takvi uvjeti temeljna su podloga stvaranju krških formi. Unutar geosinklinalog krša mogu se razlikovati dva varijateta. Prvi su razlomljena geosinklinalna područja s

izmjenom vodopropusnih i vodonepropusnih stijena. Ti vodonosnici se ne prostiru na većim dubinskim i horizontalnim područjima. Najčešće se javljaju na području Alpa, Karpata, Pirineja, Urala i drugdje. Drugi tip krša razvijen je na prostoru Dinarida, Helenida i kod planine Toros u Maloj Aziji. Naziva se ekstremni tip geosinklinalnog krša tip krša. Osnovna značajka ovog ekstremnog tipa krša je velika masa vrlo razlomljenih karbonatnih stijena, veliki planinski lanci koji se protežu kroz nekoliko regija, javljaju se krška polja na kojima voda izvire i ponire, pojavljuju se i podmorski izvori slatke vode-vrulje, i mnogo drugih krških formi koje jasno ukazuju na razvoj dubinskih krških vodonosnika. Iz priloženog se vidi da geosinklinalni tip krških vodonosnika prevladava u Hrvatskoj.

Epikontinentalni tip krša i krških vodonosnika se javlja u tektonski stabilnijim područjima. Karbonatne stijene taložene su u plitkim morima na koje su u zemljinoj prošlosti prekrile prekambrijske i alpske strukture. Ovakva područja javljaju se u pariškom karbonatnom bazenu, na Bliskom Istoku, u Libiji, Sjedinjenim Američkim Državama, Kini, Jamajci i drugdje. Vrlo česta je izmjena vodonepropusnih i vodopropusnih slojeva klastičnih stijena. Međutim, ovdje ima iznimaka gdje se usred epikontinentalnog tipa krša javi geosinkilinalni tip s razvijenim krškim poljima i ostalim specifičnim formama.

Specifičnosti krša i krških vodonosnika u Republici Hrvatskoj su da u takvim područjima možemo pronaći velike količine visoko kvalitetne vode koje su velike vrijednosti te se mogu eksploatirati i konzumirati. Tu vodu moguće je eksploatirati na koncentriranim mjestima gdje ona istječe na površinu jer na tim izvorima mogu se pojaviti velike amplitude istjecanja. Krška područja nije teško prepoznat zbog specifičnog krajolika koji ga opisuje. Podzemni tokovi na krškim područjima Hrvatske prolaze kroz nepravilne pukotinske sustave gdje se može zbog raznih oblika samih pukotina javiti velika brzina podzemnih tokova. Na krškim terenima rijetki su površinski tokovi što je također jedna od posebnosti krških terena u Republici Hrvatskoj. Međutim, postoje i neke, tzv. negativne posebnosti kao na primjer otvorenost prema vanjskim utjecajima što dovodi do utjecaja mora i može uzrokovati zaslanjenje priobalnih krških vodonosnika. Za kraj se može spomenuti i da je gotovo polovica vodoopskrbnih sustava Republike Hrvatske u kršu i krškim područjima (BIONDIĆ, B. & BIONDIĆ, R, 2014).

3. Zaslanjenje priobalnih vodonosnika

Jadranska obala Republike Hrvatske prostire se na više od 1000 km i nalazi se na području Dinarskog krša te obiluje velikom količinom otoka, otočića, rtova, hridi i drugih formi. Takvo područje savršeno je za istjecanje krških vodonosnika jadranskog sliva. Zbog takve razvedenosti obale i otvorenosti raznih geoloških struktura javlja se kontakt između slatke vode koja izlazi iz krških vodonosnika i slane morske vode. Takvi uvjeti s odmakom vremena mogu prouzročiti povišenje saliniteta u samom vodonosniku. Naravno, u zonama gdje se javlja kontakt slatke i slane vode nema oštre granice prestanka zaslanjenja već se formiraju tzv. zone miješanja slatke i slane vode. Položaji i veličine miješanja slatke i slane vode ovise o različitim čimbenicima kao što su hidraulički gradijent ili sama geološka građa vodonosnika u priobalnom području. Sustavi vode kakvi su danas poznati su nastali uglavnom tijekom najmlađeg geološkog razdoblja u kojima su se javljala ledena doba. Kod promatranja priobalnih krških vodonosnika i utjecaja mora na slatku vodu, gleda se promjena razine Jadranskog i Sredozemnog mora kroz geološku prošlost. Krajem jednog razdoblja prošlosti koje nazivamo pliocen u području Dinarida se javljaju izolirana krška jezera čija dna danas nazivamo Krbavsko i Grobničko polje. U tom vremenu dolazi do jakih erozijskih procesa i velika većina vode postupno prelazi u podzemlje. Tijekom zadnjeg glacijala razina Jadranskog mora bila je za otprilike 100 m niža od današnje razine. U tom vremenu najveći dio slatke vode bio je zamrznut a područja današnjih delti rijeka koje su se ulijevale s područja Alpskog gorja bile su kao male pustinje zbog malog protoka vode. Jaki vjetrovi koji su vladali na tim područjima stvorili su nanose koje danas vidimo na nekim otocima kao što su Susak, Unije i drugi. Nakon zatopljenja dolazi do plavljenja područja delti te povećanja volumena vode zbog povišenja temperature. Tada je more ušlo u karbonatno područje gdjegdje i do više desetaka kilometara u kopno. Problemi zaslanjivanja prisutni su gotovo duž cijele hrvatske obale Jadranskog mora, ali se većinom prate samo izvori i objekti koji su nužni za vodoopskrbu nekog područja. Zaštita priobalnih krških vodonosnika od utjecaja slane morske vode vrlo je kompleksan zadatak i zahtijeva brojna istraživanja o funkcioniranju vodonosnika i labilnoj ravnoteži slatke i slane morske vode. Problem se počeo pratiti već u dvadesetim godinama prošlog stoljeća te iz tog vremena postoji mnogo dokumenta i istraživanja o problemima te prijedlozi zahvata koji bi tada riješili ovaj problem. Prva rješenja bila su fizički otkloniti utjecaj morske vode na slatku. Danas se znanstvenici i istraživači sve više

okreću izradom i usavršavanjem sustava koji bi mogao kontrolirati slatku i slanu vodu u uvjetima kada prijeti zaslanjenje. Nekadašnja tehnička rješenja bila su temeljena na istraživanjima fizičkih vrijednosti u područjima gdje je dolazilo do kontakta slane i slatke vode. Neke od tih vrijednosti bili su neposredni geološki odnosi, promjene razina slatke i slane morske vode, sadržaj klorida u izvorskim vodama i drugi. Zahvati koji su se tada planirali bili su ugradnja injekcijske zavjese koja bi fizički spriječila kontakt slane i morske vode. Međutim to je bilo rješenje samo za pliće zone jer se tada nije razmišljalo da bi se isti problem mogao javiti i na većim dubinama. U današnje vrijeme istražuju se mnogo dublji dijelovi vodonosnika, čak i do dubine od 120 m ispod razine mora. Prate se temperaturne promjene vode, pH, promjena električne vodljivosti, sadržaj otopljenog kisika i drugi kemijski parametri koji se mogu mjeriti sondama za veće dubine. Dobar pokazatelj utjecaja morske vode na slatku vodu je kemijski element bor. Takva konstatacija može biti posebno važna ako istraživači sumnjaju na povezanost morske vode sa slatkovodnim sustavom. Primjer može biti povezanost Vranskog jezera na otoku Cresu s morem (BIONDIĆ, B. & BIONDIĆ, R., 2014).

3.1. Odnos slane i slatke vode

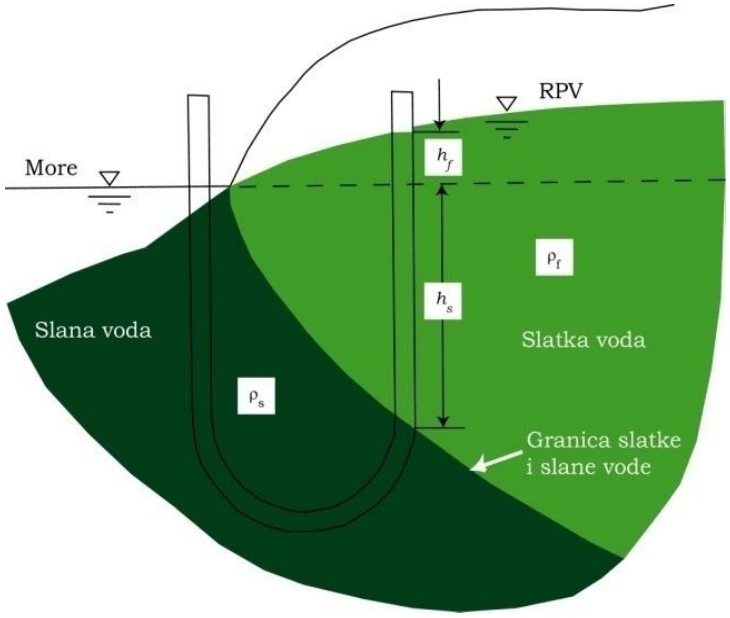
Rješenja odnosa slatke i slane vode istraživači koji su djelovali u prošlim stoljećima nastojali su numerički izraziti odnosom razlika potencijala i specifičnih težina slatke i slane morske vode. Pred kraj 19. stoljeća Ghyben i Herzberg radeći odvojeno došli su do istih zaključaka koji su kasnije sadržani u Ghyben-Herzbergovom zakonu. Navedeni zakon se temelji na odnosu razlike u gustoći slatke i slane morske vode. Slatka voda ima najveću gustoću pri 4°C te ona iznosi $\rho_{f=}$ 1000 kg/m^3, dok je gustoća slane morske vode nešto veća te iznosi $\rho_{s=}$ 1025 kg/m^3. Formula kojom se odnos slatke i slane vode opisuje glasi (BEAR & VERRUIJT, 1994):

$$h_s = \frac{\rho f}{\rho s - \rho f} h_f \equiv \delta\, h_f$$

gdje je:

- h_s debljina sloja slatke vode ispod srednje razine mora (m)
- h_f debljina sloja slatke vode iznad srednje razine mora (m)
- ρ_s gustoća slane vode (kg/m^3)
- ρ_f gustoća slatke vode (kg/m^3)
- δ odnos gustoća slatke i slane vode

Nakon uvrštenja u formulu iznad dobije se da za 1 metar nadsloja slatke vode iznad srednje razine mora postoji približno 40 metara slatke vode ispod te srednje razine. Na slici 2. se može vidjeti shematski prikaz ovih odnosa.

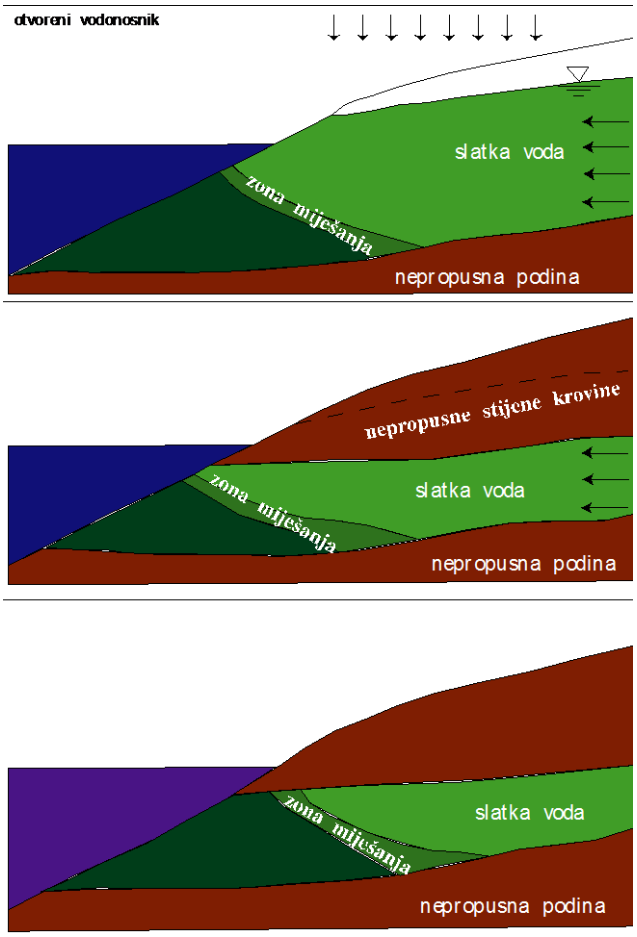


Slika 2. Odnos položaja slatke i slane vode prema Ghyben-Herzbergovom zakonu (BEAR & VERRUIJT, 1994)

Ghyben-Herzbergov zakon vrijedi samo za stacionarne uvjete tečenja s jednakim horizontalnim brzinama u zoni slatke vode. To znači da bi ekvipotencijalne linije bile približno vertikalne. Međutim Ghyben-Herzbergov zakon predočava matematički opis stanja u podzemlju. U stvarnosti se ovaj zakon može koristiti samo kao gruba aproksimacija. Razlog tome je stanje krških priobalnih vodonosnika u stvarnosti mnogo kompleksnije.

Krajem 20. stoljeća Custodio, objašnjava odnos slatke i slane vode različitostima u geološkoj građi u zonama gdje priobalni vodonosnici istječu i načinom na koji se oni prihranjuju (CUSTODIO, 1985). Postoji nekolicina objašnjenih modela. Tri osnovna modela prikazana su na slici 3. Prvi model prikazuje slučaj kada je vodonosnik otvoren koji se prihranjuje iz zaleđa i izravno iz oborina. Takvi slučaj je najčešći u krškim

područjima Republike Hrvatske odnosno u područjima Dinarida. Drugi karakterističan i čest model su zatvoreni vodonosnici sa značajnim dotocima podzemne vode iz sliva. Dok je treći model gotovo isti kao i prvi, također zatvoreni, samo ima slabije dotoke vode podzemne vode iz sliva. U svojim istraživanjima Custodio uvodi zonu miješanja i zbivanja u toj zoni imaju različite hidrološke uvjete (CUSTODIO, 1985). Kada se u prva dva navedena slučaja usporedi odnos na položaj zone miješanja, dolazi se do zaključka da su ta dva spomenuta modela slična. Razlika se vidi tek u trećem modelu. Zbivanja i položaj u zoni miješanja ovise o hidrauličkom tlaku podzemne vode iz sliva. Što je dotok vode iz zaleđa manji, zona miješanja se pomiče dublje u kopno. Također na slici 3. se prikazuju modeli s vodonepropusnim naslagama u podlozi sustava. Kada vodonepropusna podina ne postoji ili je na većim dubinama, postoji mogućnost da će slana morska voda prodrijeti dublje u kopno i zapuniti duboke dijelove krških vodonosnika. Kada se razmatra odnos slatke i slane vode, najčešće se istražuje samo ponašanje gornje granice zone miješanja, odnosno zona na kojoj se pojavljuje povećani salinitet. Miješanje slatke i slane vode i formiranje zone miješanja prouzročeno je difuzijom i hidrodinamičkom disperzijom. Dinamika vode unutar same zone miješanja čuva kompaktnost te zone, te pomoću uzgona izbacuje slanu komponentu održavajući samu ravnotežu sustava. U takvim zonama miješanja događaju se paralelna tečenja slane i slatke komponente. Debljina zone u kojoj se događa miješanje ovisi o tečenju slane komponente, o tečenju slatke komponente i o propusnosti vodonosnika.



Slika 3. Različiti modeli miješanja slatke i slane vode u priobalnim vodonosnicima (CUSTODIO, 1985)

Odnosom slane i slatke vode u vodonosnicima Dinarskog krša bavio se i GJURAŠIN (1942, 1943). On je tečenje podzemne vode prikazivao kao tečenje kroz cijevi različitih hrapavosti, a cijeli sustav pukotina matematički opisuje kao jednom jedinstvenom cijevi. GJURAŠIN (1942,1943) je funkcioniranje i općenito ponašanje priobalnih izvora u različitim hidrološkim uvjetima opisao uz zadovoljenje uvjeta:

$$0{,}025\ h_s > h_v$$

Gdje je:

- h_s dubina spoja glavne i sporedne cijevi ispod morske razine
- h_v visina izvora nad morskom razinom

Razlikuju se tri slučaja:

1. na vrulji i na priobalnom izvoru dolazi do istjecanja slatke vode

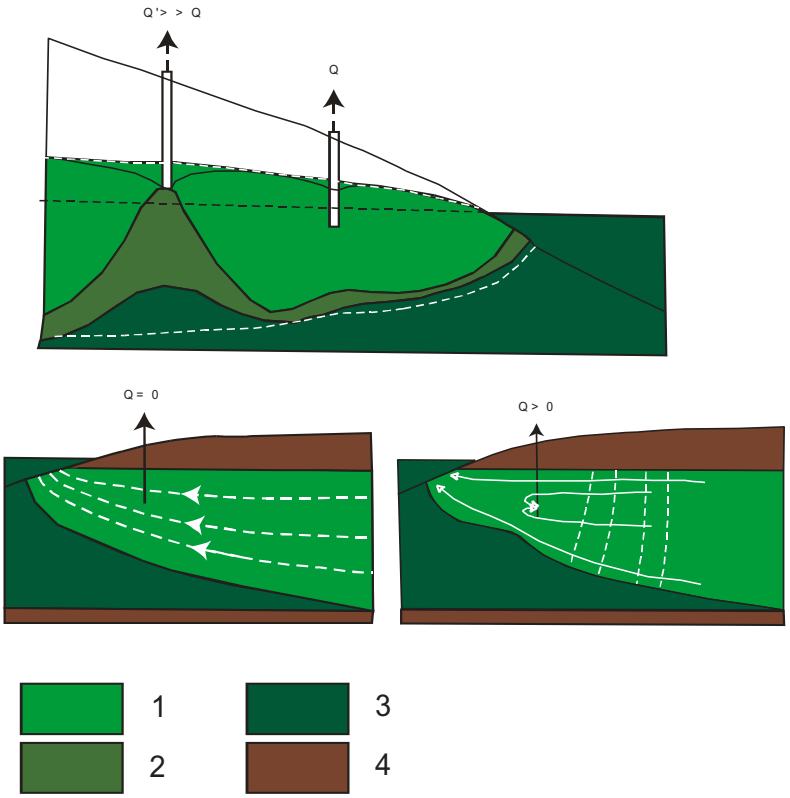
2. na priobalnom izvoru istječe slatka voda, a u dijelu potopljenome slanom vodom nema tečenja
3. slana voda ulazi u podzemlje kroz potopljeni dio, a izvor daje više ili manje zaslanjenu vodu

O hidrauličkom gradijentu koji je prisutan u zaleđu ovisi koji je od ta tri slučaja prisutan na pojedinom izvoru. Te promjene imaju za posljedicu promjenjivost uvjeta na spoju podzemnih tokova. To izravno utječe na promjenu položaja zone miješanja slane i slatke vode. Kod velikog hidrauličkog gradijenta, morska voda je u cijelosti potisnuta, te iz tog razloga na izvoru i na vrulji teče potpuno slatka voda. Sam kontakt slatke i slane vode nalazi se ispod izlaza podzemnog toka u more.

3.2. Utjecaj eksploatacije na zaslanjenje priobalnih krških vodonosnika

Današnja istraživanja priobalnih krških vodonosnika se uglavnom okreću hidrogeokemiji i proučavanju geneze priobalnih sustava jer sama hidraulika i razlike u gustoćama slane i slatke vode nisu dale odgovarajuće rezultate. Zaslanjenja se događaju daleko u zaleđu obalnog područja što nam ukazuje na stalnu prisutnost zaslanjene vode u dubljim dijelovima krških vodonosnika pri različitim hidrološkim uvjetima. Mogući su i vanjski utjecaji na samu zonu miješanja, a neki od tih utjecaja su promjena plime i oseke, količina crpljenja slatke vode i umjetno napajanje vodonosnika. Jedan od glavnih čimbenika koji dodatno utječe na stabilnost slatke i slane vode je eksploatacija podzemne vode. Same lokacije na kojima se u funkciju stavljaju crpne stanice mogu biti prirodni izvori, zone difuznog miješanja morske i slatke vode, te umjetno izgrađeni objekti za crpljenje kao što su razne vrste kaptažnih galerija, tuneli, površinske akumulacije, eksploatacijski zdenci (bušeni ili kopani) i slično. Količina koja je dopuštena za eksploataciju, teoretski gledano ne bi trebala poremetiti odnos slatke i slane vode do razmjera da bi se u samom crpljenju vode povećao salinitet. Treba napomenuti da eksploatacija podzemnih voda, a posebno preeksploatacija narušava prirodni odnos slane i slatke vode i ponekad može djelovati i na položaj zone miješanja. Na slici 4. se vidi skica konusnog podizanja slane vode zbog prekomjerne eksploatacije slatke vode. Crpljenje prouzrokuje konusno podizanje slane vode i granice miješanja

prema crpnome objektu većih ili manjih razmjera ovisno o vertikalnoj propusnosti stijena, dubini zdenaca i dotoku podzemne vode iz sliva kojem crpilište pripada.



Slika 4. Skica konusnog podizanja slatke i slane vode zbog efekta precrpljivanja
1.slatka voda 2. bočata voda 3. slana voda 4. nepropusne stijene
(BIONDIĆ, R., 2001)

Sušno razdoblje još više utječe na samu eksploataciju, te takvi uvjeti potiču konusno uzdizanje zone miješanja i postupan porast zaslanjenja na preeksploatiranim objektima. U navedenim uvjetima rezultati dobiveni hidrogeokemijskim istraživanjima upotpunjuju objašnjenja mehanizma zaslanjenja, čak i omogućuju prognoze što je iznimno važno i može pridonijeti lakšim upravljanjem sustava.

Kemijski sastav podzemne vode rezultat je interakcije vode s krutim tvarima i plinovima tijekom hidrološkog ciklusa. Koncentracija i vrsta iona u podzemnim vodama varira u odnosu na fizičke i kemijske procese kojima je ta voda bila izložena. Svaki kemijski pokazatelj koji je mjerljiv, a može biti povezan s nekim procesom, npr. povećanje temperature, može se uzeti kao prirodan traser koji omogućuje praćenje odnosa slatke i slane vode. Prirodni traseri za razliku od umjetnih koji se moraju

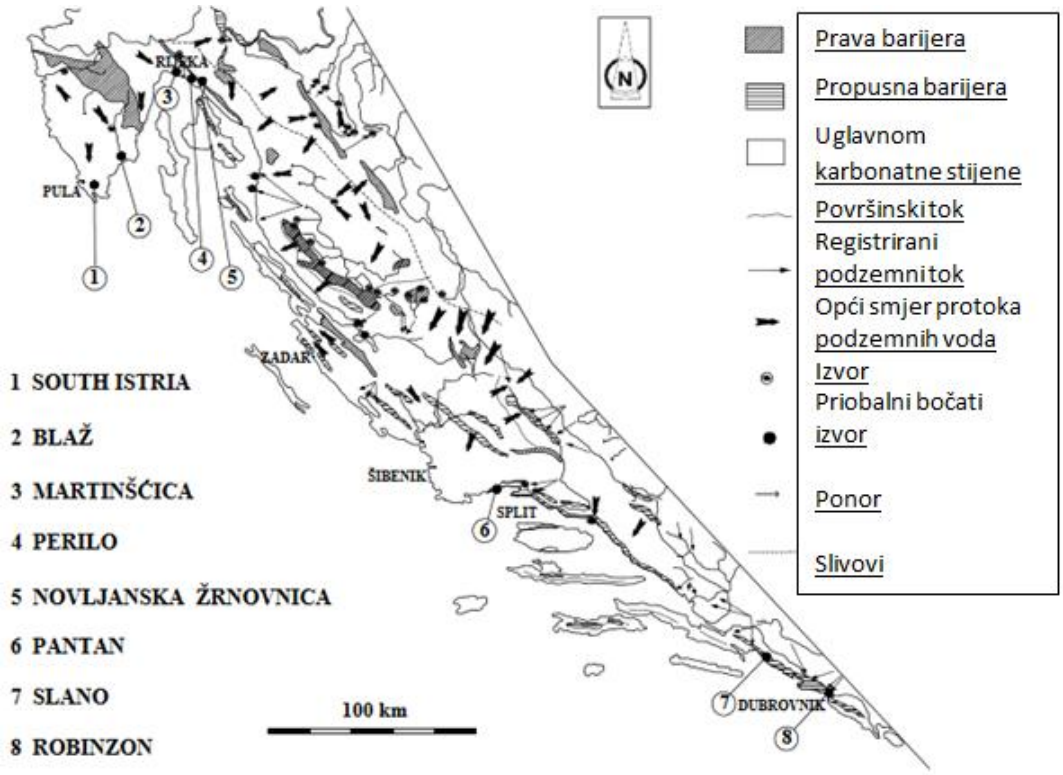
direktno ubaciti u podzemni tok vode, imaju prednost da su dio podzemne vode, posebno na područjima eksploatacijskih objekata za vodoopskrbu. Umjetni traseri imaju svoje nedostatke ako je riječ o velikim i kompleksnim krškim slivovima. U priobalnim krškim područjima zasigurno jedan od najvažnijih trasera je ion klora koji izravno pokazuje položaj zone gdje dolazi do miješanja slatke i slane vode. Kao prirodni traseri uglavnom se koriste elementi koji su karakteristični za morsku vodu koji već u vrlo niskim koncentracijama upućuju na približavanje zone gdje se miješaju slatka i slana morska voda (BIONDIĆ, B. & BIONDIĆ, R., 2014).

3.3. Utjecaj klimatskih promjena na vodonosnike

Klimatske promjene mogu imati određeni utjecaj na vodonosnike. Kao što je već spomenuto, u priobalnim i otočnim krškim sustavima najveću opasnost koja prijeti vodonosnicima i utjecaj na kakvoću vode čini podzemni prodor mora u vodonosnik. Klimatske promjene, prvenstveno nedostatak oborina, može utjecati na smanjen dotok slatke vode u podzemne tokove, samim time prodor slane morske vode povećat će se i doći će do zaslanjivanja. Zbog toga opasnost od nepovoljnog utjecaja smanjenja oborina ili porasta temperature zraka u priobalnim krškim područjima veće je nego u kontinentalnim područjima. Potrebno je pratiti vremenske prilike i provoditi istraživanja u svrhu praćenja potencijalnih problema sa zaslanjivanjem. Današnjim spoznajama i tehnologijom moguće je obaviti dodatna istraživanja klimatskih promjena kroz gotovo cijeli holocen. Na taj način bit će omogućeno zaključiti kakve su bile klimatske promjene tijekom geološke prošlosti, te može li se čovjek okriviti kao začetnik klimatskih promjena ili su one samo dio dugotrajnijih klimatskih varijacija. U svakom slučaju nagli prestanak ili povećanje oborina u krškim područjima može imati utjecaj na količinu vode u vodonosniku. Smanjenje oborina znači i usporavanje hidrološkog ciklusa te obnavljanja vodonosnika. Zbog navedenih čimbenika dolazi do zaslanjenja priobalnih krških vodonosnika, što nakon toga stvara lanac ostalih problema (TERZIĆ, 2019).

4. Pregled utjecaja mora na veće krške priobalne izvore

Hrvatska obala Jadranskog mora obiluje velikim brojem stalnih ili povremenih bočatih i podzemnih izvora slatke vode. Ti slatkovodni izvori mogu se pojaviti na različitim nadmorskim visinama, pa ih tako pronalazimo u razini mora neposredno ispod ili iznad razine mora, a mogu se pojaviti i na visinama preko 15 metara te su smješteni u Dinarskom karbonatnom krškom masivu. Specifičnost hrvatske obale je velika razvedenost i velik broj otoka. Za razliku od norveškog tipa obale gdje prevladavaju fjordovi, razvedenost hrvatske obale obiluje raznim uvalama, zavalama, hridima, pukotinama i drugim krškim oblicima od čega je većina same obale građena. To pogoduje intruziji slane morske vode u krške vodonosnike i dovodi do problema u sušnim ljetnim mjesecima. Krš kao specifična vrsta terena na ovom području datira iz vremena daleke geološke povijesti. Prije otprilike dvadeset tisuća godina razina mora bila je oko sto metara niža. U tim, tadašnjim uvjetima nastaje veliki broj trajnih ili privremenih izvora. U današnje vrijeme u ljetnom periodu godine kada je potreba za pitkom vodom velika, smanjuje se razina podzemne vode u vodonosnicima. Izvori koji se koriste tada se mogu privremeno zaslaniti i ostaviti cijela područja bez pitke vode. Veoma je bitno poznavati mehanizam prodora morske vode u slatkovodne izvore na ovakvim krškim područjima. Na svakom izvoru do miješanja slatke i slane vode dolazi na različit način. Zbog toga je potrebno provesti istraživanja i analize svakog pojedinog izvora, te nakon rezultata odrediti metodu kojom će se pokušati smanjiti prodor morske vode i miješanje sa slatkom vodom. Ulaz morske vode u priobalne krške vodonosnike prisutan je duž cijele mediteranske obale i drugih obalnih krških područja u svijetu. U nastavku pregledat će se nekoliko hrvatskih priobalnih izvora i utjecaj morske vode na njih. Na slici 5. se vidi geografski položaj navedenih izvora.



Slika 5. Lokacije nekih krških izvora u Republici Hrvatskoj

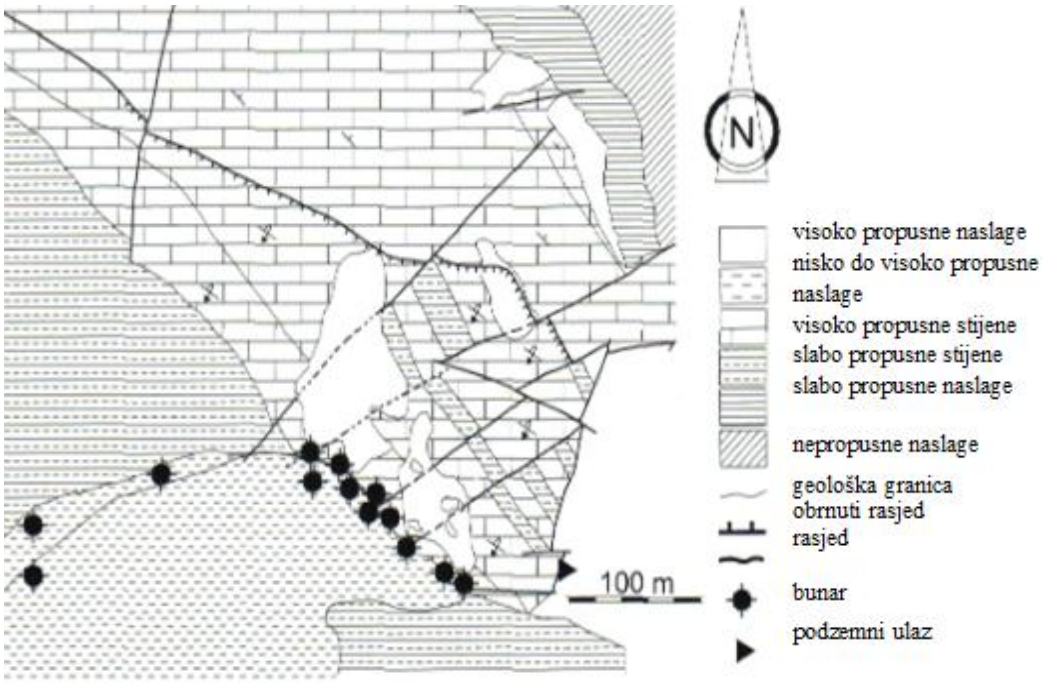
(HERAK et al., 1969)

Južni dio Istarskog poluotoka sastoji se od niza karbonatnih naslaga. Najčešća vrsta stijene na tom području je vapnenac koji se pojavljuje u kombinacijama s dolomitnim slojevima breča i lapora. Hidrogeologija ovog područja može se opisati kao otvoreno obalno područje s puno malih izvora koji mogu biti povremeni i koji mogu imati protok od 24 litre po sekundi. Nekoliko većih izvora koji su stalni i stabilni, te koji imaju veći protok vode zaduženi su za vodoopskrbu grada Pule. Većina tih izvora nalazi se uz samu obalu Jadranskog mora, a na tom području razina vode rijetko kada prelazi 3 metra. Tijekom ljetnih mjeseci i većim priljevom ljudi, sušom i većom potrebom za vodoopskrbom, dolazi do prekomjerne eksploatacije te se visina podzemne vode smanjuje. Posljedica toga je prodor slane morske vode te zaslanjivanje samih izvora i vodonosnika. Ono što još doprinosi prekomjernoj eksploataciji podzemne vode su i privatne crpke koje nisu prijavljene, a služe za navodnjavanje vrtova i livada sa svrhom uštede novca (BONACCI & ROJE-BONACCI, 1997).

Izvor Blaž je smješten uz obalu Raškog zaljeva i najveći je vodonosnik na tom području. Izvor Blaž ima dvadesetak stalnih i povremenih izvora na području koji se

prostiru na nekih 500 m^2 površine. Prosječni protok vode na ovom području je od 1,6 m^3/s do maksimalnih 2,6 m^3/s. Zbog prodora morske vode i visoke koncentracije klorida u ljetnom razdoblju voda iz ovog područja često nije za konzumaciju. Kao i kod izvora u južnoj Istri, u ljetnim mjesecima dolazi do prekomjerne eksploatacije vode. Iz tog razloga dolazi do direktnog prodora morske vode u vodonosnik i vodovodne kanale koji su povezani s morem. Ulaz morske vode kod izvora Blaž mogao bi se spriječiti blokadom krških tokova kroz koje najveća količina morske vode ulazi (BONACCI & ROJE-BONACCI, 1997).

Iz izvora Martinšćica eksploatira se voda koja opskrbljuje grad Rijeku. Grad Rijeka je jedan od većih gradova Republike Hrvatske kako površinski tako i u vidu broja stanovnika, a ujedno je i velika morska luka te je iz tog razloga potreba za vodoopskrbom velika. Sustav vodoopskrbe se sastoji od nekoliko zdenaca prikazanih na slici 6. Tijekom ljetnih mjeseci nekoliko tih zdenaca nije u funkciji zbog zaslanjivanja. Pomoću piezometra je moguće vidjeti da granica između morske vode i slatke vode ovisi o promjenama razine podzemne vode i lokalnim geološkim uvjetima. Ovo područje obiluje dolomitnim stijenama koje su nepropusne, te bočata voda koja se nalazi u dubljim slojevima nema utjecaj na slatku vodu koja služi za vodoopskrbu jer teče kroz sloj vapnenca koji se nalazi unutar samog dolomita. Ako se rezerve slatke vode pravilno kontroliraju i ne eksploatiraju prekomjerno, moguća je neometana eksploatacija samog izvora (BONACCI & GABRIĆ, 2007).



Slika 6. Hidrogeološka karta izvora u zoni Martinšćica

(COST Action 621, 2005)

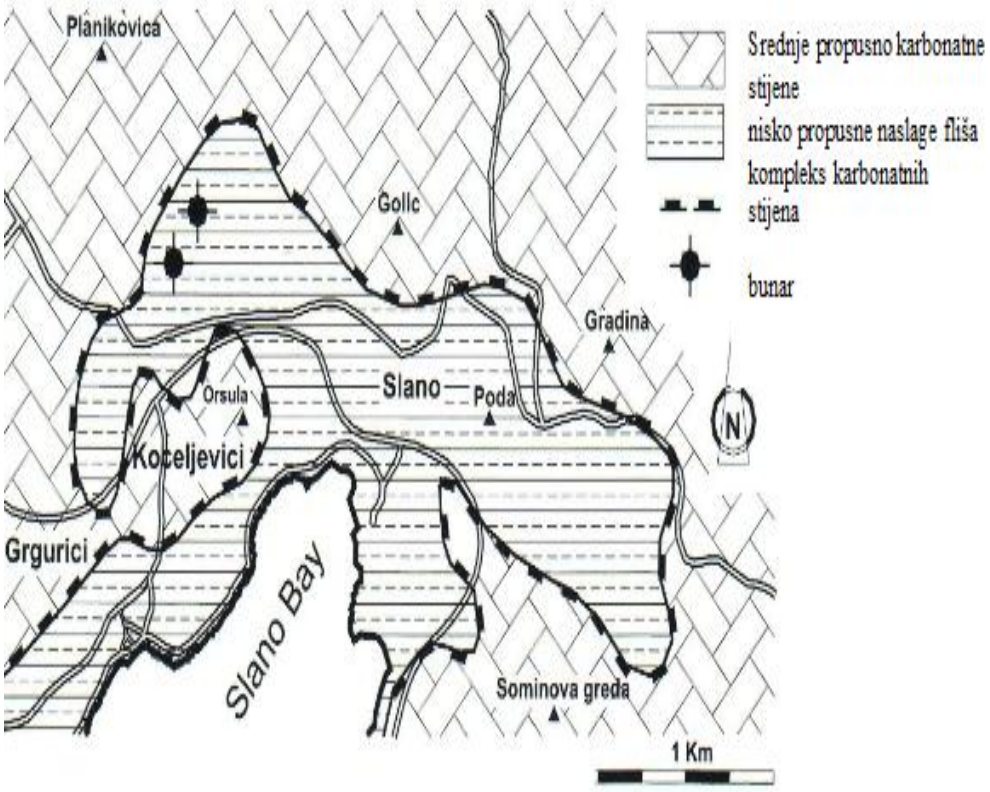
Krški izvor Perilo se nalazi u gradu Bakru, a dio je riječkog vodoopskrbnog sustava. U sušnim ljetnim mjesecima izvor može imati protok od 240 L/s. Samo crpilište i mehaničko postrojenje smješteno je u unutrašnjosti krškog vodonosnika. U jeku turističke sezone mogu se javiti duži periodi bez padalina te tada uslijed prekomjerne eksploatacije, razina vode u vodonosniku može pasti te dolazi do prodora slane morske vode u taj priobalni vodonosnik. Ipak, unutar nepropusnih flišnih slojeva se nalazi sloj propusnog vapnenca koji nam kao jedno od rješenja nameće konstrukciju injekcijske zavjese koja bi spriječila prodor morske vode u vodonosnik. Pravilnom i kontroliranom eksploatacijom slatke vode te kontroliranjem razine podzemnih voda za sada se uspijeva spriječiti zaslanjenje bez poduzimanja većih i skupljih mjera. (BONACCI & GABRIĆ, 2007)

Novljanska Žrnovnica smještena je uz sjeverni dio hrvatske obale Jadranskog mora. Izvor je zahvaćen za potrebe Novljansko-Crikveničke Rivijere i ljeti i zimi, ali je ljeti potreba za pitkom vodom i tri do četiri puta veća nego zimi zbog dolaska velikog broja turista. Sliv ovog izvora izgrađen je od vapnenačkih stijena vrlo velike vodopropusnosti. Vapnenačke breče su slabije propusne od dobro vodopropusnih karbonatnih stijena koje izgrađuju ovaj krški vodonosnik te stvaraju određenu hidrogeološku barijeru na samoj točki izviranja. I na ovom izvoru prisutan je prodor

morske vode koji rezultira zaslanjenjem te dovodi do problema u vodoopskrbi. Kako bi se smanjio prodor morske vode na ovom izvoru izgrađena je injekcijska zavjesa. Primarna svrha spomenute zavjese je da se spriječi kontakt morske i slatke vode u plitkim područjima. Praćenje rezultata provedenih u dubokim bušotinama pokazalo je da je zona miješanja između slatke i morske vode na dubini od 90 m do 110 m ispod razine mora. U tim rezultatima vidljivo je da svrha ove injekcijske zavjese nije potpuna te da u ekstremno sušnim godinama može ipak doći do zaslanjivanja vodonosnika (BIONDIĆ, B. et al., 2005).

U blizini grada Trogira nalazi se krški izvor Pantan. Područje ovog izvora je izgrađeno od visoko propusnih vapnenačkih stijena. Sam izvor nalazi se na dodiru vapnenačkih i flišnih slojeva na nadmorskoj visini od 2 metra. Ispust vode u zimskim mjesecima doseže i do 10 m^3/s, a u ljetnim mjesecima smanjuje se na količinu između 1,5 i 2 m^3/s (BONACCI, 1995) . Tijekom zimskih mjeseci salinitet je nizak, a tijekom ljetnih mjeseci može se naglo povećati. Koncentracija klorida na ovom području varira između 50 i 10000 mg/L (BONACCI, 1995) .U blizini ovog izvora nalaze se još dva privremena krška izvora, izvor Slanac i izvor Arbanija. Izvor Slanac je smješten na 20 metara nadmorske visine. Na ovom području provedena su brojna istraživanja o zaštiti prodora morske vode, međutim sam mehanizam prodora morske vode još nije potpuno otkriven, te zasad nisu poduzeti nikakvi zaštitni zahvati (MIJATOVIĆ, 1984; FRITZ, 1994; BONACCI, 1995).

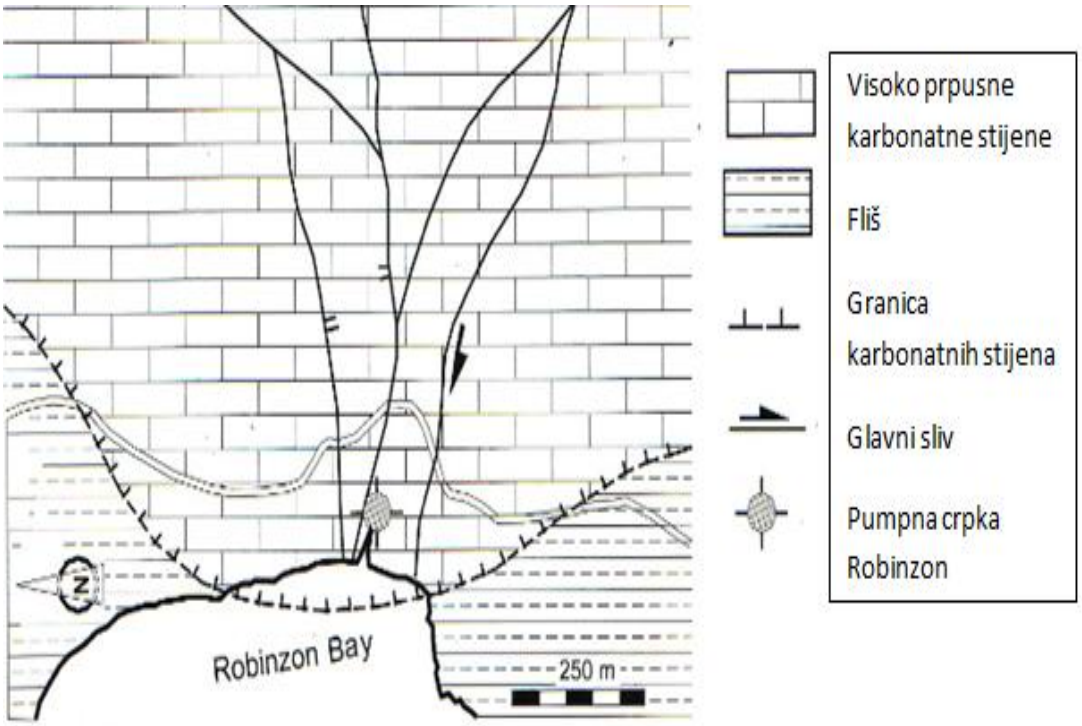
Slični problem kao i u prethodnim krškim izvorima javlja se i gradu Slanom koji leži na krškom vodonosniku. Voda se eksploatira iz dva zdenca koja se nalaze u neposrednom zaleđu grada. Koncentracija klorida u vodi na vodocrpilištu Slano raste tijekom sušnog ljetnog razdoblja. Prodor morske vode javlja se i nakon prvih intenzivnijih oborina u jesensko doba. Ovaj fenomen može se objasniti turbulencijama u zoni miješanja slatke i slane morske vode, jer se nakon relativno kratkog vremena situacija stabilizira, a koncentracija klorida brzo opada. Rješenje koje se ovdje primijenilo je kontrolirano pumpanje vode sinkronizirano s uvjetima koji prevladavaju u području podzemnih voda. Na slici 7. možemo vidjeti hidrogeološku kartu područja Slano (COST Action 621, 2005).



Slika 7. Hidrogeološka karta područja Slano

(COST Action 621, 2005)

Izvor Robinzon (Duboka Ljuta) je smješten na južnom dijelu Jadranskog mora kod Dubrovnika. Sam izvor smješten je 70 metara od obale mora. Maksimalni i minimalni kapacitet izvora je od 2 m^3/s do 165 L/s (BONACCI & GABRIĆ, 2007). Izvor Robinzon nalazi se na tektonskom kontaktu između vrlo propusnih karbonatnih stijena i nepropusnih flišnih naslaga. Spomenuti izvor koristi se za vodoopskrbu Dubrovačkog područja. Uslijed eksploatacije slatke vode iz izvora, morska voda može imati veliki utjecaj na sam izvor. Zahvat koji je predložen je taj da bi se apsorbirala svježa voda iz krškog vodonosnika dalje od zone intruzije morske vode. Nakon brojnih provedenih istraživanja, najbolje rješenje za sanaciju pokazalo se u vidu izgradnje injekcijske zavjese kao i kod nekih ranije spomenutih izvora, međutim ovaj zahvat je tek u planu. Na slici 8. se može vidjeti hidrogeološka karta izvora Robinzon.



Slika 8. Hidrogeologija izvora Robinzon

(COST Action 621, 2005)

Pregled ovih nekoliko priobalnih izvora pokazuje da se oni često pojavljuju u kontaktnoj zoni između vapnenačkih i flišnih slojeva. Vodonosnici u kojima se navedeni izvori nalaze smješteni su u krškom masivu koji se sastoji od vapnenaca s povremenim pojavljivanjem dolomitnih i flišnih slojeva, breča i lapora. Geološki, morfološki i hidrogeološki uvjeti uzrokuju nestabilnu ravnotežu između morske i slatke vode u različitim hidrološkim situacijama. To je jedan od glavnih razloga zašto svaki pojedini opisani izvor ima drugačije i specifične uvjete prodora morske vode u vodonosnike. Kod nekih izvora (Blaž, Pantan) javlja se izravna veza između mora i izvora kroz nepoznate krške vodove. Uzduž hrvatske obale Jadranskog mora, javljaju se tzv. krške izvorišne zone koje obiluju s mnogo usko raspoređenih i funkcionalnih izvora. Međutim, ove izvore treba konstantno pratiti i analizirati s ciljem povećanja pouzdanosti njihove vodoopskrbe. Potrebno je napomenuti da za bilo koji od prikazanih primjera nisu dobivene potpuno uspješne zaštitne mjere od prodora morske vode u krške izvore obalnih vodonosnika i krških izvora. To znači da sam mehanizam prodora morske vode nije potpuno objašnjen. U nekim slučajevima (Blaž, Perilo, Novljanska Žrnovnica, Robinzon) postoje u određenoj mjeri, jasni hidrogeološki uvjeti koji dovode do mogućnosti izgradnje djelotvorne invazivne mjere kao što je npr. izgradnja

injekcijske zavjese. Samo je na području Novaljske Žrnovnice izgrađena djelom uspješna injekcijska zavjesa koja u kombinaciji sa strogim i kontroliranim crpljenjem vode predstavlja uspješnu zaštitu krškog izvora. Na drugim spomenutim izvorima ovakav zahvat još nije odrađen. Najučinkovitija mjera za crpljenje slatke vode u krškom masivu je daleko od zone zaslanjenja (Južna Istra, Martinšćica, Perilo i Slano). U takvom slučaju, crpljenje vode mora biti pažljivo kontrolirano kako bi se održala ravnoteža između slatke i slane vode. Jedan od bitnijih preduvjeta je detaljno poznavanje hidrauličkih i hidrogeoloških značajki koje upravljaju prodiranjem morske vode u krške vodonosnike. Glavni problem u svemu navedenome može biti prekomjerna eksploatacija slatke vode. U slučaju da se razvije poljoprivreda na ovom području, doći će do veće potrebe za vodom i potencijalne opasnosti za vodonosnike. U slučaju da se slatka voda prekomjerno iskorištava, kontaktna zona između mora i slatke vode bit će premještena dublje u krški masiv, a to će rezultirati novim krškim onečišćenjem podzemnih voda.

5. Zaključak

Republika Hrvatska spada u države koje imaju veliku površinu krških terena. Također, Hrvatska eksploatira veliki udio pitke vode iz obalnih krških vodonosnika. Međutim, osobito u ljetnim vrućim mjesecima, prodor morske vode u slatki krški vodonosnik stvara probleme i čini pitku vodu neprikladnom za opskrbu. Za daljnji razvoj obalnih područja, razvoj turizma, poljoprivrede i drugih djelatnosti vrlo je važno zaštititi priobalne krške vodonosnike od prodora slane morske vode. Isto tako važno je pronaći nove izvore koji mogu potencijalno biti korisni za opskrbu vodom. Kontinuiranim praćenjem i proučavanjem geoloških, morfoloških, hidroloških i hidrogeoloških odnosa i korištenjem različitih parametara bit će moguće postaviti detaljnije hipoteze o načinu upada slane morske vode u vodonosnik.

Općenito, zaštita krških izvora i vodonosnika od prodora slane morske vode vrlo je složena, zahvati koji bi se trebali izraditi u svrhu zaštite istih mogu biti vrlo skupi, a uspjeh može biti neizvjestan. Ipak, često se koristi rješenje koje opisuje zahvaćanje vode iz krških vodonosnika kontroliranim presretanjem, tj. znanstvenici pokušavaju kontrolirati ravnotežu podzemne pitke vode i slane morske vode. U Hrvatskoj se, ukoliko je to moguće izbjegava izgradnja injekcijskih zavjesa jer to može biti skupa tehnička mjera i učinkovitost iste se ne može stopostotno garantirati. Također, ovakvi zahvati ponekad mogu biti nemogući zbog dubine sojeva na kojima se događa miješanje te je nemoguće odraditi određeni zahvat.

Univerzalno rješenje za zaštitu priobalnih krških vodonosnika još uvijek ne postoji. Hidrološko i hidrogeološko funkcioniranje svakog pojedinog izvora je jedinstveno. Učinkovito iskorištavanje i zaštita obalnih krških vodonosnika otvorenih za prodor u morsku vodu složen je zadatak koji zahtijeva visoku razinu znanja o funkcioniranju vodonosnika, te nestabilnoj ravnoteži slatke i slane morske vode. Bolje poznavanje funkcioniranja vodonosnika i izvora rezultiralo bi boljim rješenjima za zaštitu istih. Poboljšano upravljanje priobalnim krškim vodonosnicima, koje je temeljeno na složenijem poznavanju dinamike slatkovodne i slane morske vode u osjetljivijim dijelovima samih vodonosnika trebalo bi rezultirati smanjenjem utjecajem mora na slatku vodu, te povećanjem raspoloživih količina pitke vode. Ipak, protiv prirode, čovjek ponekad jednostavno ne može.

Literatura

BEAR, J. & VERRUIJT, A. (1994): Modeling groundwater flow and pollution. Theory and applications of transport in porous media.- Reidel Publishing Company, pp 414, Dordrecht, The Netherlands.

BIONDIĆ, B., BIONDIĆ, R. & KAPELJ, S. (2005): The sea water influence on karstic aquifers in Croatia.- In: Groundwater Management of Coastal Karstic Aquifers. Final report, COST Action 621 (ed. by L. Tulipano), 303–311. Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg.

BIONDIĆ, B. & BIONDIĆ, R. (2014): Hidrogeologija Dinarskog krša u Hrvatskoj.- Sveučilišni udžbenik, Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Varaždin, 341 str.

BIONDIĆ, R. (2001): Gospodarenje podzemnim vodama i zaštita priobalnih krških vodonosnika na primjeru izvorišta sjevernog dijela Hrvatskog primorja.- Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 88 str.

BIONDIĆ, R. (2019): Nastavni materijali iz kolegija Hidrogeologija.- Dostupno na: https://moodle.srce.hr/2018-2019/course/view.php?id=30210 [3.7.2019.]

BONACCI, O. (1995): Brackish karst spring Pantan (Croatia).- Acta Carsologica. XXIV/95, p. 98-107. Slovenska akademija znanosti in umetnosti, Ljubljana, Slovenija.

BONACCI, O. & ROJE-BONACCI, T. (1997): Sea water intrusion in coastal karst springs: example of the Blaž Spring (Croatia).- Hydrological Sciences Journal, 42:1,89-100.

BONACCI, O. & GABRIĆ, I. (2007): Investigations of the brackish karst springs on the Croatian Adriatic Sea coast.- Fakultet Inženjerstva i arhitekture, Sveučilište u Splitu, Hrvatska, 11 str.

COST Action 621 (2005): Groundwater management of coastal karstic aquifers. EUR 21366 EN, Final report. Directorate-General Science, Research and Development, Brussels, Belgium.

CUSTODIO, E. (1985): Developments in water science, Groundwater economics, Barcelona, Španjolska, Elsevier, 617str.

FRITZ, F. (1994): On the appearance of a brackish spring 30 m above sea level near Trogir (southern Croatia).- Geologia Croatica, 47(2), 215–220.

GJURAŠIN, K. (1942): Prilog hidrografiji primorskog krša, Tehnički vjesnik 59, Zagreb.

GJURAŠIN, K. (1943): Prilog hidrografiji primorskog krša, Tehnički vjesnik 60, Zagreb.

HERAK, M. & STRINGFIELD, V.T. (1972): Karst - Important karst regions of Northern Hemisphere.- Elsevier, Amsterdam, XV, 551p.

HERAK, M., BAHUN, S. & MAGDALENIĆ, A. (1969): Pozitivni i negativni utjecaji na razvoj krša u Hrvatskoj.- Krš Jugoslavije, 45–71.

MATAS, M. (2006): Raširenost krša u Hrvatskoj.- Internetska stranica. Dostupno na: http://www.geografija.hr/hrvatska/rasirenost-krsa-u-hrvatskoj/ [3.7.2019.]

MIJATOVIĆ, B. F. (1984): Problems of sea water intrusion into aquifers of the coastal Dinaric Karst.- In: Hydrogeology of the Dinaric Karst (ed. by G. Castany, E. Groba Castany, E. Groba & E. Romijn), 115–142. International Contributions to Hydrogeology, AIH 4, Hannover, Germany.

TERZIĆ, J, (2019): Klimatske promjene i utjecaj na vodoopskrbu, Internetska stranica, Dostupno na: http://www.hgi-cgs.hr/CC-WaterS.htm [3.7.2019.]

Popis slika

Slika 1. Područje krša u Republici Hrvatskoj 4
Slika 2. Odnos položaja slatke i slane vode prema Ghyben-Herzbergovom zakonu 10
Slika 3. Različiti modeli miješanja slatke i slane vode u priobalnim vodonosnicima 12
Slika 4. Skica konusnog podizanja slatke i slane vode zbog efekta precrpljivanja 14
Slika 5. Lokacije nekih krških izvora u Republici Hrvatskoj 17
Slika 6. Hidrogeološka karta izvora u zoni Martinšćica 19
Slika 7. Hidrogeološka karta područja Slano 21
Slika 8. Hidrogeologija izvora Robinzon 22

Popis tablica

Tablica 1. Raspored krša u županijama Republike Hrvatske 5