

# Fenomen vrulja kao izvora slatke vode u moru

---

**Kaćan, Lucija**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:162:899316>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-22**



**Sveučilište u Zadru**  
Universitas Studiorum  
Jadertina | 1396 | 2002 |

*Repository / Repozitorij:*

[University of Zadar Institutional Repository](#)



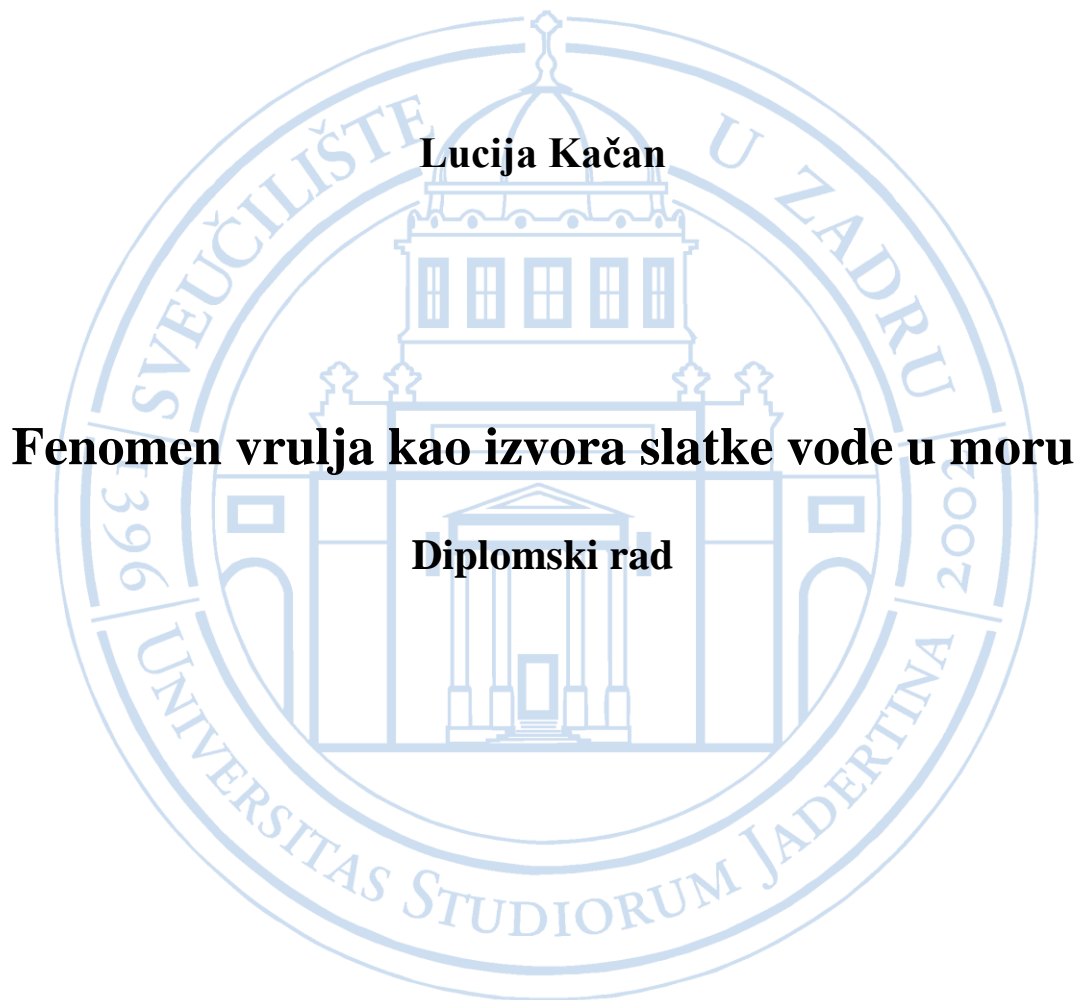
zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

Sveučilište u Zadru

Odjel za ekologiju, agronomiju i akvakulturu  
Održivo upravljanje vodenim ekosustavima



Zadar, 2021.

Sveučilište u Zadru

Odjel za ekologiju, agronomiju i akvakulturu  
Održivo upravljanje vodenim ekosustavima

Fenomen vrulja kao izvora slatke vode u moru

Diplomski rad

Student/ica:

Lucija Kačan

Mentor/ica:

Izv.prof.dr.sc. Zoran Šikić

Komentor/ica:

Dr.sc. Martina Markov

Zadar, 2021.



## Izjava o akademskoj čestitosti

Ja, **Lucija Kačan**, ovime izjavljujem da je moj **diplomski** rad pod naslovom **Fenomen vrulja kao izvora slatke vode u moru** rezultat mojeg vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na izvore i radove navedene u bilješkama i popisu literature. Ni jedan dio mojeg rada nije napisan na nedopušten način, odnosno nije prepisan iz necitiranih radova i ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem da ni jedan dio ovoga rada nije iskorišten u kojem drugom radu pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj, obrazovnoj ili inoj ustanovi.

Sadržaj mojeg rada u potpunosti odgovara sadržaju obranjenoga i nakon obrane uređenoga rada.

Zadar, 27. rujna 2021.

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. CILJEVI I SVRHA RADA .....	3
3. RAZRADA TEME.....	4
3.1. Raširenost vrulja u Svijetu.....	4
3.2. Raširenost vrulja u Hrvatskoj .....	7
3.2.1. Velebitski kanal.....	10
3.2.2. Bakarski zaljev .....	14
3.2.3. Kaštelanski zaljev.....	15
3.2.4. Podnožje planine Biokova.....	17
3.3. Hidrogeološke karakteristike vrulja.....	18
3.4. Stanišne karakteristike vrulja.....	27
3.5. Zaštita vrulja .....	41
3.6. Korištenje vrulja .....	45
4. ZAKLJUČAK .....	49
5. POPIS LITERATURE .....	51

## **Fenomen vrulja kao izvora slatke vode u moru**

Podmorski izvori slatke vode ili vrulje su krški fenomeni formirani zbog geomorfoloških procesa. Ti geomorfološki procesi odvijali su se pod utjecajem promjene razine mora. Vrulje su česta pojava duž istočne obale Jadranskog mora te su najistaknutija obilježja na mjestima gdje se planinski lanci uzdižu izravno iz mora. One predstavljaju potopljene jame ili izvore te su ishod protoka slatke vode pod tlakom u karstificiranoj obali. Postoje vrulje oblika sita te u njima slatka voda protječe s morskog dna kroz mnoge malene otvore u pijesku. Takve vrulje su slabo pristupačne za istraživanje. Također, postoje vrulje oblika jame koje su znatno veće te su pristupačnije znanstvenicima koji u njima mogu provoditi ronilačka istraživanja. Vrulje jamskog tipa mogu se u velikom broju naći na istočnoj obali Jadrana. Dobro su poznata zemljopisna, geološka i hidrološka obilježja vrulja. Međutim, malo se zna o njihovoj biologiji i bioraznolikosti. U vruljama obitava mali broj vrsta te one mogu biti podvrgnute slanom šoku. Taj slani šok nastaje kada slatka voda odjednom stiže podzemnim kanalima te salinitet u vruljama opada. Cilj ovog diplomskog rada je objediniti dostupna znanja o fenomenu vrulja. Na taj način moguće je dobiti pregledan uvid u specifičnost i izuzetnu važnost ovih podmorskih izvora slatke vode.

**Ključne riječi:** vrulja, krš, hidrogeologija, mahovnjaci

## **The phenomenon of submarine freshwater springs as a source of fresh water in the sea**

Submarine freshwater springs or vruljas are karst phenomena formed due to geomorphological processes. These geomorphological processes took place under the influence of sea level changes. Submarine freshwater springs are a common occurrence along the east coast of the Adriatic Sea and are the most prominent features in places where mountain ranges rise directly from the sea. They represent submerged pits or springs and are the result of the flow of freshwater under pressure in a karstified coast. There are sieve-type submarine freshwater springs and in them fresh water flows from the seabed through many small openings in the sand. Such submarine freshwater springs are poorly accessible for exploration. Also, there are pit-type submarine freshwater springs that are much larger and more accessible to scientists who can conduct research in them by diving. Pit-type submarine freshwater springs can be found in large numbers on the eastern coast of the Adriatic. The geographical, geological and hydrological properties of the submarine freshwater springs are well known. However, little is known about their biology and biodiversity. The submarine freshwater springs are inhabited by a small number of species and they can be subjected to salinity shock. This salinity shock occurs when suddenly fresh water reaches the underground channels and salinity in springs decreases. The aim of this thesis is to combine the available knowledge about the phenomenon of submarine freshwater springs. In this way, it is possible to get a clear insight into the specificity and exceptional importance of these underwater freshwater sources.

**Keywords:** submarine freshwater spring, karst, hidrogeology, Bryozoa

## *Zahvala*

*Zahvaljujem se svom mentoru izv.prof.dr.sc. Zoranu Šikiću i komentorici dr.sc. Martini Markov na stručnim savjetima i usmjeravanju tijekom izrade ovog diplomskog rada.*

*Svojoj obitelji na velikoj pomoći i podršci tijekom studiranja.*



## 1. UVOD

Podmorski izvori slatke vode ili vrulje su krški fenomeni formirani zbog geomorfoloških procesa. Ti geomorfološki procesi odvijali su se pod utjecajem promjene razine mora. Vrulje su česta pojava duž istočne obale Jadranskog mora te su najistaknutija obilježja na mjestima gdje se planinski lanci uzdižu izravno iz mora (Novosel et al, 2004).

One predstavljaju potopljene jame ili izvore te su ishod protoka slatke vode pod tlakom u karstificiranoj obali. Postoje vrulje oblika sita te u njima slatka voda protječe s morskog dna kroz mnoge malene otvore u pijesku. Takve vrulje su slabo pristupačne za istraživanje. Također, postoje vrulje oblika jame koje su znatno veće te su pristupačnije znanstvenicima koji u njima mogu provoditi ronilačka istraživanja. Vrulje jamskog tipa mogu se u velikom broju naći na istočnoj obali Jadrana (Bakran-Petricioli & Petricioli, 2008). Dobro su poznata zemljopisna, geološka i hidrološka obilježja vrulja. Međutim, malo se zna o njihovoj biologiji i bioraznolikosti. U vruljama obitava mali broj vrsta te one mogu biti podvrgnute slanom šoku. Taj slani šok nastaje kada slatka voda odjednom stiže podzemnim kanalima te salinitet u vruljama opada (Novosel et al, 2002; Bakran-Petricioli & Petricioli, 2008).

Vrulje ili podmorski izvori slatke vode mogu se opaziti po koncentričnim krugovima te se negdje može primijetiti bubrenje. Zbog tog bubrenja izgleda kao da more „vrije“ u središnjem dijelu. One se mogu pojaviti pojedinačno ili u skupinama te mogu biti udaljenije od kopna ili otoka. Promjenjiva je jačina izbijanja vrulja, a samim time i njihova „vidljivost“. To je uvjetovano količinom vode koja pritječe iz zaleđa, odnosno ovisi o zimskom i ljetnom razdoblju godine. Vrulje su prisutne duž naše obale, a naročito podno Učke, Velebita i Biokova. One su specifične za jadransko područje Dinarskog krša – vanjsko krško područje (Bačani & Vlahović, 2012).

Osim toga, vrulje čine jedan od karakterističnih hidrogeoloških oblika u kršu. Krš označava skup morfoloških, hidroloških i hidrogeoloških značajki terena. Ti tereni su uglavnom formirani od karbonatnih stijena; vapnenca i dolomita. Podzemna protjecanja su karakteristična i intenzivnija od površinskih u krškim područjima. Također, u krškim područjima se pojavljuju i specifični površinski i podzemni geomorfološki oblici (Bačani & Vlahović, 2012).

Vrulje su fenomen zato što se stvaraju uz kršku obalu na područjima gdje se morska razina podigla ili gdje se obala spustila. Tim procesima pod morem su ostale karbonatne stijene kroz koje teče slatka voda (Novosel et al., 2004; Bakran-Petricioli, 2007).

Podmorsko ispuštanje podzemnih voda (*Submarine groundwater discharge, SGD*) označava izravno ispuštanje podzemne vode do mora. Imenovanje ovog fenomena varira ovisno o pozadini zajednice znanstvenika koji ga opisuju. Pojam „podmorsko ispuštanje podzemnih voda“ prvi put je bio spomenut 1970-ih te ga je ubrzo usvojila zajednica morskih znanstvenika. Drugi, usredotočujući se na krška okruženja nazvali su ispuštanje vode „podmorskim izvorima“ ili „vrulja“ (Moosdorf & Oehler, 2017).

Podmorsko ispuštanje podzemnih voda je fenomen sa značajnim volumetrijskim i kemijskim doprinosom zato što dolazi do unosa slatke vode s kopna u more. Javlja se svugdje gdje je more hidraulički povezano s vodonosnikom koji ima vodostaj iznad razine mora i kada isparavanje ne premašuje ispuštanje podzemne vode (Surić et al., 2015).

Općenito, procjeđivanje podzemne vode obično je mjestimično, difuzno, može uključivati više vodonosnika i pokazuje značajnu prostornu i vremensku varijabilnost. Podmorsko ispuštanje podzemnih voda također karakterizira energija izmjene koja se može pratiti po temperaturnom impulsu. Naime, podzemna voda ima prosječnu godišnju temperaturu zraka, pa se obično na otvorenim vodama pojavljuju anomalije hladne vode tijekom ljeta, a anomalije tople vode javljaju se tijekom zime (Surić et al., 2015).

## **2. CILJEVI I SVRHA RADA**

Cilj rada je pregled dostupnih znanja o fenomenu vrulja kao izvora slatke vode u moru te uvid u rasprostranjenost vrulja i njihovih hidrogeoloških i stanišnih karakteristika. Na taj način moguće je dobiti pregledan uvid u specifičnost i izuzetnu važnost ovih podmorskih izvora slatke vode.

Svrha ovog rada je predstaviti specifičnost i važnost vrulja ili podmorskih izvora slatke vode u moru u ekološkom i gospodarskom smislu, u smislu zaštite tih staništa te mogućnosti održivog korištenja istih.

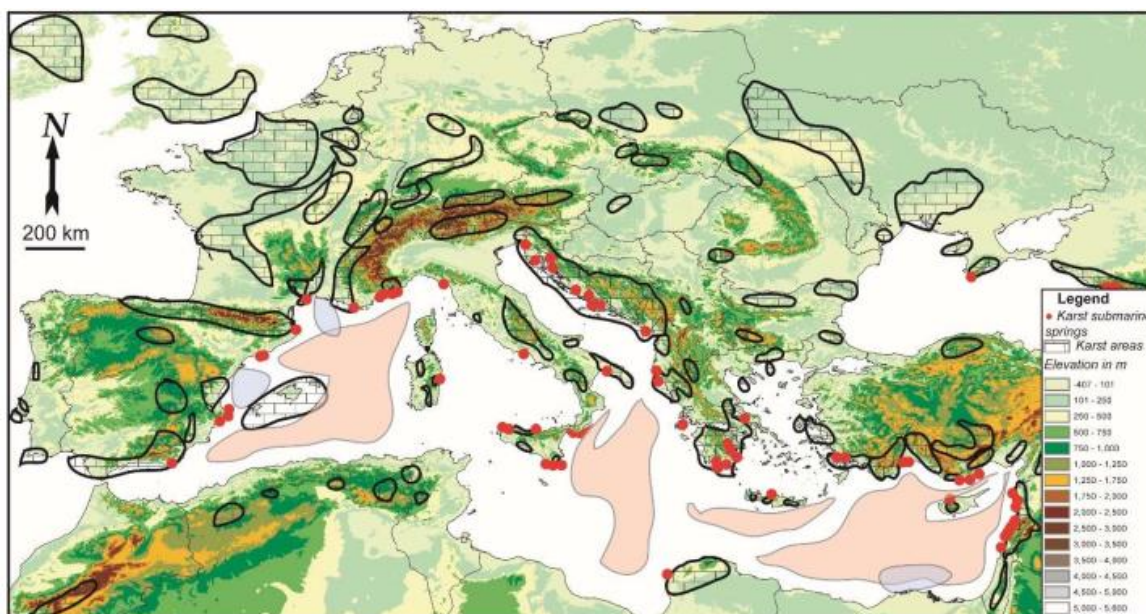
### **3. RAZRADA TEME**

#### **3.1. Raširenost vrulja u Svijetu**

Vrulje ili podmorski izvori su otkriveni širom svijeta: u Perzijskom zaljevu; uz obalu SAD-a, u blizini New Yorka, Floride i Kalifornije; uz obale Kube, Meksika, Jamajke, Čilea, Havaja, Australije i Japana; i u Crnom Moru. Najčešći su na području mediteranskog bazena. Oni sa najvećim kapacitetima nalaze se na obalama Libije, Izraela, Libanona, Sirije, Grčke, Francuske, Španjolske, Italije i Hrvatske. Duž istočne obale Jadranskog mora uočeno je pedeset velikih vrulja. Većina vrulja, njih oko 80 %, se nalazi na morskom dnu na dubini od 10 m. Na dubinama do najviše 50 m nalazi se samo nekoliko podmorskih izvora ili vrulja (Bonacci, 1987; LaMoreaux & Tanner, 2001; Ayoub et al., 2002).

U svom radu Zekter et al. (1973) navode detaljnije gdje su sve prisutni podmorski izvori u Svijetu. Oni u svom znanstvenom radu ističu da Sredozemno more obiluje podmorskim izvorima. Krška voda masiva Garraf (poluotok Pirineji) ispušta se dalje kroz morsko dno kao podmorski izvori. Jedan od njih je podmorski izvor velikog podzemnog toka. „Vrenje“ vode ovog izvora toliko je veliko da je to primijećeno iz zrakoplova. Također, podmorski izvori prisutni su i duž francuske obale, u blizini francusko-talijanske granice, u Tarantskom zaljevu. Takvi izvori primijećeni su i u blizini obale Grčke, na istoku Mediteranske obale te u Siriji. Osim toga, ti izvori promatrani su i u Crnom moru u regiji Gagra uz kavkasku obalu i na Krimu. Podmorsko ispuštanje podzemnih voda primijećeno je i duž Atlantske obale Amerike, u zapadnoj Indiji, u priobalju mnogih pacifičkih otoka, u blizini australijske obale. Također, u radu se navode i pomorski izvori u Indoneziji, Filipinima, u blizini obale Japana, Korejskog poluotoka i u Perzijskom zaljevu.

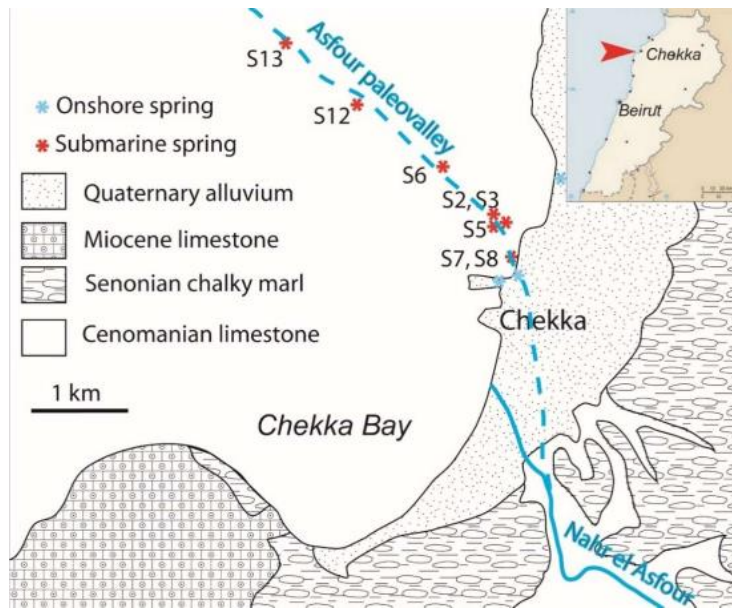
Ustanovljeno je da se podmorsko ispuštanje podzemnih voda pojavljuje duž vulkanskih i krških obalnih vodonosnika. Konstatirano je da su najčešći krški podmorski izvori te da se većina njih, čak 90%, pojavljuje duž Sredozemne obale (Slika 1.) (Bakalowicz, 2018).



Slika 1. Karta krških područja Mediterana s položajem glavnih poznatih krških podmorskih izvora (Bakalowicz, 2018)

Podmorski izvori zabilježeni su u regiji Chekka u Libanonu. Ustanovljeno je da ti podmorski izvori leže na udaljenosti do 2 km od obale te se pojavljuju na različitim dubinama. Istraživanjima je uočeno da plitki podmorski izvori djeluju cijelo vrijeme, a da najdublji podmorski izvor funkcionira samo kad je visoka voda. Svi ti podmorski izvori u toj regiji pri velikom protoku stvaraju ogromnu količinu vode. Pretpostavljena količina vode koju oni proizvode je  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ , a salinitet je manji od 1 g/l. Također, zamijećeno je da neki od tih podmorskih izvora mogu funkcionirati i obrnuto, a to je prisutno prilikom niskog protoka. To se posebno odnosi na najdublji podmorski izvor koji tijekom zime ima najveći protok. Oni podmorski izvori koji su trajni proizvode bočatu vodu koja ima salinitet oko 20 g/l te ima malu brzinu protoka od nekoliko desetaka l/s (Fleury et al., 2007).

U regiji Chekka u Libanonu (Slika 2.) sistem ispuštanja vode sastoji se od nekoliko malih stalnih obalnih izvora (S7 i S8) i stalnih podmorskih izvora (S2, S3 i S5). Ti podmorski izvori nalaze se na 22 m ispod razine mora te izbacuju bočatu vodu jedan dio godine. Osim toga, taj sustav ispuštanja vode sastoji se i od sezonskih izvora koji su prisutni samo tijekom poplava. Ti sezonski izvori se nalaze na kopnu i u moru (S6, S12 i S13) do 110 m ispod razine mora i izbacuju slatku vodu (Bakalowicz, 2018).



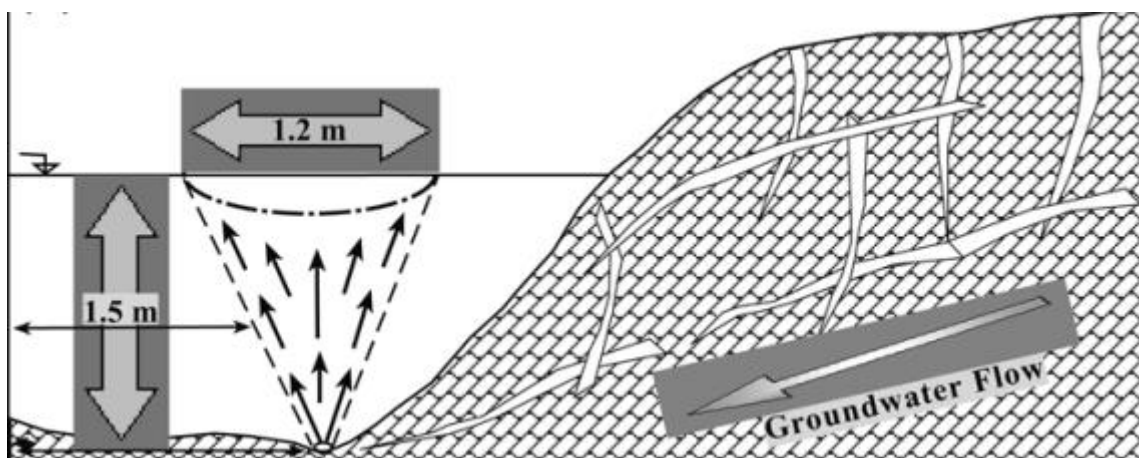
Slika 2. Prikaz podmorskih izvora u regiji Chekka u Libanonu (Bakalowicz, 2018)

Također, u Siriji je zabilježeno tridesetak podmorskih izvora uz obalu. Točnije oni se nalaze na području Bassieh-Banyas koji je dio sirijske obale južnog Mediterana. Podmorski izvori na tom području nalaze se na raznim dubinama. U prosjeku oni se nalaze na između 5 i 35 m ispod razine mora. Procjenjuje se da je ukupni godišnji ispust slatke vode putem podmorskih izvora u zaljevu Bassieh 162 milijuna  $m^3$  godišnje ili  $5,1 m^3$  u sekundi (Dörfliger et al., 2009).

Vrlo bitno je i spomenuti najveći podmorski sustav izvora Spring Creek Springs na Floridi. Naime, velika područja Floridske platforme bila su podvrgnuta vremenskim utjecajima i mehanizmima stvaranja krša tijekom perioda snižene razine mora. To je onda uzrokovalo stvaranje mreže protoka većine današnjih podmorskih izvora na tom području. Veliki broj otvora tih podmorskih izvora ima oblik konusa te se nalaze na dubinama do 30 m. Na površini se može vidjeti vrenje ovih podmorskih izvora kada dođe do većeg protjecanja vode. Najveći podmorski izvor sustava Spring Creek Springs je Main Rise. Ustanovljeno je da površina vrenja tog najvećeg podmorskog izvora može biti promjera od 9 do 12 m. Još uvijek nije poznato podrijetlo vode ovom sustavu podmorskih izvora. Međutim, na temelju nedavnih istraživanja neki znanstvenici smatraju da veliki doprinos vode stiže iz malog potoka Lost Creek. Taj mali potok teče nekoliko kilometara od podmorskih izvora kao tijelo površinske vode. Također, bitno je i spomenuti i fenomen ovih podmorskih izvora, a to je njihova pulsirajuća priroda ispuštanja. Tu pojavu obilježavaju naizmjenični navali vode koji su onda dovedeni do površine. Osim toga, ti navali vode mogu prouzročiti i vidljive turbulencije. Ustanovljeno je da protok

može i obrnuti smjer. To onda predstavlja kompleksnu prirodu vodenih putova kroz podzemne kanale (Dimova et al., 2011).

Također, podmorski izvori prisutni su i u Turskoj. Dostupna podzemna voda iz razvijenog krškog sistema ispušta se prema moru kroz plitke podmorske izvore. Taj fenomen ispuštanja vode kroz plitke podmorske izvore zbiva se u Ovacik-Silifkeu koje označava jedno od najbitnijih turističkih mjesta na Turskoj obali. Istraživanjima je ustanovljeno da iz podmorskog izvora Ovacik voda se izlijeva iz tri glavne izlazne točke (Slika 3.). Te točke se nalaze na različitim dubinama od oko 1,5 m, 1,8 m i 2 m ispod srednje razine mora. Također, otkriveno je da su te izlazne točke u obliku krnjeg konusa promjera 0,30 m, 0,16 m i 0,1 m, a promjer podmorskih izvora na površini mora je 1,2 m, 1,4 m i 1,7 m. Godišnje se ovim podmorskim izvorima ispusti oko  $23,3 \times 10^6 \text{ m}^3$  odnosno  $0,740 \text{ m}^3/\text{s}$ . Međutim, tijekom vlažnog razdoblja ustanovljeno je da će količina ispuštanja iz tih izvora varirati i može iznositi do  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ . To sve je uvjetovano količinom vode koja puni obalni vodonosnik, fizikalnim i kemijskim svojstvima vodonosnika i ulazom morske vode (Elhatip, 2003).

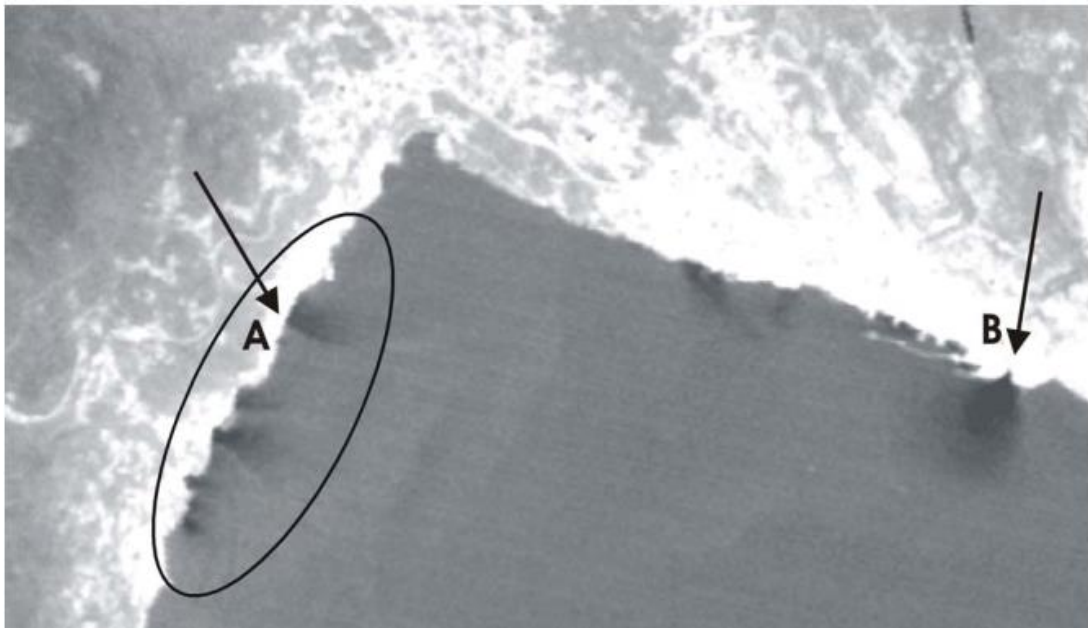


Slika 3. Presjek podmorskog izvora Ovacik na prvoj izlaznoj točki (Elhatip, 2003)

### 3.2. Raširenost vrulja u Hrvatskoj

Prostor Republike Hrvatske ima mnogo krških područja te se tu otjecanje podzemnih voda odvija površinskom hidrografskom mrežom. Ta mreža iako nije baš dobro razvijena, vrši drenažu podzemnih voda krških izvorišta te koncentriranih priobalnih krških izvora. Istjecanje se također odvija i putem širih drenažnih zona i vrulja (Biondić et al., 2009).

U aktivnom kontaktu s morem je dio krških vodonosnika. Oni se dreniraju u more kao lokalizirani ili najčešće nelokalizirani priobalni krški izvori ili vrulje. Također, drenaže se vrše i u vidu širokih zona difuznog istjecanja. Na takvim priobalnim izvorima i vruljama ne može se znati količina vode koja istječe, a ni njihove lokacije. Da bi to otkrili služe se infracrvenom termalnom satelitskom snimkom (Slika 4.) (Biondić et al., 2009).



Slika 4. Infracrvena termalna satelitska snimka u riječkom zaljevu; A – priobalni izvori u vrulje na području Opatije, B – istjecanje voda izvora Rječine i Zvira (Biondić et al., 2009)

Zbog brojnih varijacija na osnovnoj razini obalni krški vodonosnici su složeni. Te varijacije su uzrokovane promjenom prošle razine mora. Upravo zbog tih promjena u morskoj razini odvodne mreže su se generirale jedna iznad druge. Međutim, kroz svoju gornju zonu punjenja uvijek su bile povezane. Najznačajniji pad morske razine dogodio se na prijelazu iz miocena u pliocen, a on se zove „mesinska kriza saliniteta“. Tada se razina mediteranskog mora spustila za 1500 m. Također, istočna obala Jadranskog mora bila je pogođena i lokalnom tektonikom. Tijekom te faze regresije događala se karstifikacija te se dokazi o njoj mogu naći na cijelom istoku Jadranskog mora. Ti dokazi su potopljene špilje, doline, podmorski krški izvori ili vrulje (Bonacci, 2015; Surić et al., 2015).

Vrulje su fenomen zato što se stvaraju uz kršku obalu na područjima gdje se morska razina podigla ili gdje se obala spustila. Tim procesima pod morem su ostale karbonatne stijene kroz koje teče slatka voda (Novosel et al., 2004; Bakran-Petricioli, 2007). Vrulje se manifestiraju



kao povremena ili stalna izbijanja slatke vode iz dna mora, dalje od obale. Vrulja uz našu obalu ima mnogo. To je posljedica geološkog razvoja Jadranskog mora (Bakran-Petricioli, 2007; Bakran-Petricioli, 2011; Bonacci, 2015; Surić et al., 2015).

Vidljive su u jesen, zimu i proljeće. Naime, u tim razdobljima zbog obilnih kiša ili otapanja snijega jača je cirkulacija podzemnih voda i njihovo izbijanje na dnu mora. Mnogobrojne su u Velebitskom kanalu, iznimno u području Sv. Jurja, Žrnovnice, Lukova, Jablanca, Prizne i Starigrada. Razlikuju se po obliku, veličini i hidrološkoj aktivnosti. U nekim vruljama slatka voda prolazi kroz mnogo otvora u obliku sita na pješčanom dnu, dok u nekima slatka voda izlazi kroz jedan, dosta velik otvor. Vrulja najčešće izgleda kao jama kao što su to vrulje Modrič i Zečica kod Starigrada. Također, one mogu imati veliki otvor te vrulja podsjeća na morem preplavljene vrtače kao što je to “Vrulja kod plantaže”, sjeverno od Starigrada (Bakran-Petricioli, 2007; Bakran-Petricioli, 2011).

Na planinama, npr. Velebitu ili Biokovu, nastale su jame, ponori i špilje uslijed oborina odnosno nastali su kanali kojima voda teče u vodoravnom i okomitom smjeru. Više takvih kanala nastalo je kad je razina mora bila niža nego danas. Kad je završilo ledeno doba i kad je došlo do otapanja leda donji dio kanala našao se ispod razine mora. Kanali koji su u dijelu koji je iznad razine mora slabo su propusnih zidova te u njima nastaje nadtlak. Kad je nadtlak viši od tlaka koji radi stupac mora iznad samog otvora vrulja, dogodit će se da slatka voda izgura more iz kanala i izbije van. Budući da je slatka voda lakša od morske, ona može brzo doprijeti do površine. Kad je more mirno ona onda stvara ispupčenja u obliku koncentričnih krugova (Bakran-Petricioli, 2007; Bakran-Petricioli, 2011).

Vrulje se javljaju u podnožju planina Velebita i Biokova, ali ih ima i uz obalu kao i oko nekih otoka (Bakran-Petricioli, 2007; Bakran-Petricioli, 2011). Podmorski izvori ili vrulje obilježavaju istočnu obalu Jadranskog mora i najznačajnije su smještene na mjestima gdje su karstificirani planinski lanci. Ne zna se točan broj vrulja u Jadranskom moru (Novosel et al., 2004).

### 3.2.1. Velebitski kanal

Brojne vrulje i obalni izvori, koji su posljedica tektonski napuknutih stijena i karstifikacije karbonatnih stijena, karakteriziraju područje Velebitskog kanala. Voda cirkulira kroz brojne podzemne kanale i pukotine zbog visoke sekundarne poroznosti karbonatnih stijena. Zbog toga u zaleđu planine Velebit slatka voda tone u podzemlje i izlazi u obalno područje. Uzlazni tok podzemne vode i njezino dizanje dalje na morsko dno i uz obalu omogućuje kontaktna zona između slatke i morske vode unutar podzemnih kanala i pukotina.

Krški vodonosnici pune se iz rijeka Like i Gacke te se djelomično ispuštaju u vrulje. To je ustanovljeno traženjem podzemnih voda pomoću bojila fluoresceina.

Brojne vrulje su promatrane uz obalu i litice Senjskog arhipelaga te je većina njih bila privremeno aktivna. Vrulje su bile pronađene na različitim dubinama, od 0,5 do 35 m. Nalazile su se u stjenovitim frakturama, u krhotinama, u klastičnom sedimentu i na mekom dnu. Ustanovljeno je da su se promjenjivo pojavljivale s obzirom na obilje i položaj. Promjer lijevka im se kretao od nekoliko cm do najviše 2,5 m na pješčanom dnu (Cocito et al., 2004).

Jako karstificirano područje Velebitskog kanala karakteriziraju brojni podmorski izvori slatke vode ili vrulje. Područje Velebitskog kanala odlikuje niži salinitet i 1,5 do 3,0°C niža površinska temperatura nego izvan kanala. Naime, to je zbog dohotka veće količine slatke vode u to područje. Ustanovljeno je da je temperatura izljeva vrulja niska i iznosi  $10,5^{\circ}\text{C} \pm 0,3$  te varira minimalno tijekom cijele godine između  $10^{\circ}\text{C}$  i  $14^{\circ}\text{C}$ . Za temperaturu okolnog mora je ustanovljeno da je nešto viša i iznosi  $15,1^{\circ}\text{C} \pm 3,7$ , a tijekom godine varira između  $8^{\circ}\text{C}$  i  $24^{\circ}\text{C}$  (Cocito et al., 2006).

#### 3.2.1.1. Jurjevska Žrnovnica

Jaki izvori i mnogo vrulja nalazi se na izvorištu Jurjevska Žrnovnica. Prema priobalnim izvorima južno od Senja nakon poniranja teče velik dio rijeke Gacke i Like. Prema izvorištu Jurjevska Žrnovnica su zamijećene najveće prividne brzine podzemnog toka. Na području Jurjevska Žrnovnica voda izvire na izvorima koji su udaljeniji od obale i na jakim vruljama

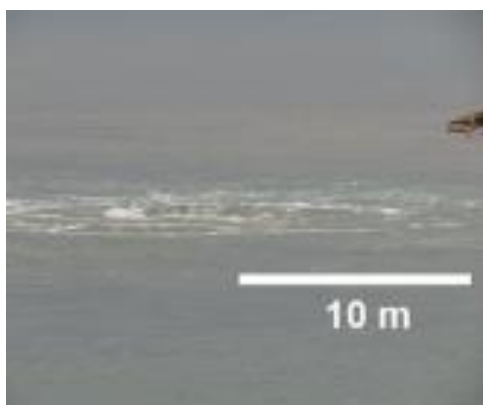
(Slika 5.). Kad nastupi razdoblje suša, "konusi" vrulja se smanjuju. Također je primijećeno da za vrijeme suša izvor na kopnu se zbog utjecaja mora zaslanjuje, a to se događa kroz dio povremenih vrulja. Smatra se da se to događa zbog znatno nižih morskih razina početkom kvartara, dubokog okršavanja i naposljetku zbog dizanja razine mora do recentnih razina i potapanja ranijih kopnenih izvorišta. Ustanovljeno je da slatka voda dolazi iz ličkih rijeka ponornica, a to su Lika i Gacka. To se otkrilo trasiranjem velikog broja podzemnih tokova (Biondić et al., 2009).



Slika 5. Jurjevska Žrnovnica (Biondić et al., 2009)

### 3.2.1.2. Vrulja Zečica i Vrulja Modrič

Podmorskim ispuštanjem podzemnih voda u obliku podmorskih izvora i u difuznom obliku obiluje primorsko područje Rovanjaska-Modrič. To područje vrvi i s obalnim izljevima različite postojanosti, slatkovodnim ribnjacima te podzemnim i podmorskim špiljskim mrežama. Područje od grada Rovanjaska do rta Tanki je oko 4 km obale. Tu se susrećemo s 5 vrulja koje su uočljive, a najveće su Vrulja Zečica (Slika 6 (a)) i Vrulja Modrič (Slika 6 (b)) (Surić et al., 2015).



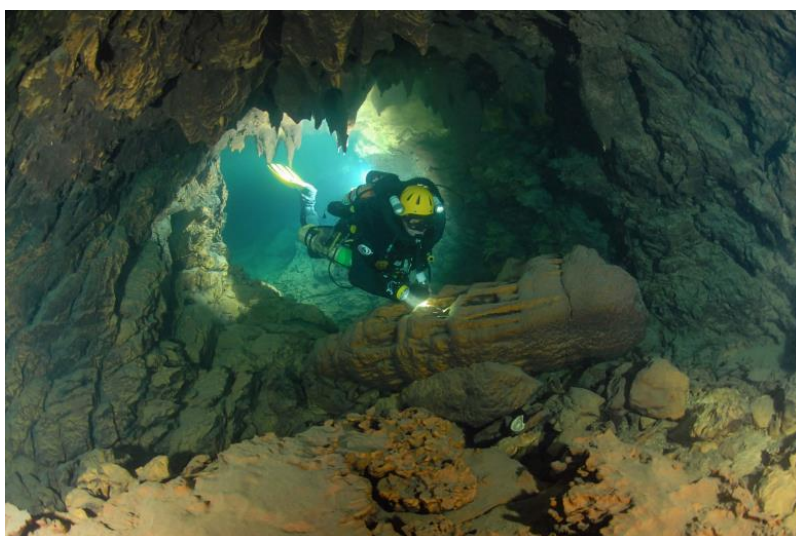
a)



b)

Slika 6. Vrulje na području Rovanjaska-Modrič: a) Vrulja Zečica, b) Vrulja Modrič (Surić et al., 2015).

Najatraktivnija obilježja područja Rovanjaska-Modrič su podmorski izvori Vrulja Zečica i Vrulja Modrič. U smislu speleologije (Slika 7.) te vrulje su već istražene. To su zapravo špilje koje djeluju kao potopljeni izvori. Njihov postanak započeo je kao tektonski predisponirani diskontinuiteti u karbonatnoj podlozi, koji su prošireni na dimenzije špilje karstifikacijom. Kasnije je došlo do taloženja protočnog kamena, a na to su utjecali nadzemni uvjeti. Također, u obalnom pojasu podzemna voda i razina mora variraju gotovo istovremeno. Dakle, kod porasta razine mora, špilje na obali dožive prijelaz kroz različite uvjete okoliša (Surić et al., 2015).



Slika 7. Istraživanja u Vrulji Modrič (Vasseur, 2019)

U Vrulji Zečici na dubini od 41,5 m istraživanje speleotema otkrilo je neprekidan proces podvodne karstifikacije. Karstifikacija je nastavljena iako je po teoriji trebala prestati ako se razina mora smatra apsolutnom erozijskom bazom. Ona se nastavlja zbog abrazivnog djelovanja čvrstog materijala koju nose podzemne vode. Veličine sedimentnih čestica kreću se od mulja do gromada. Špiljska istraživanja SCUBA ronjenjem u Vrulji Zečica i Vrulji Modrič provedena su ljeti jer je tada hidrološka aktivnost malena. U Vrulji Modrič prilikom ronjenja u špilji (svibanj 2013.) uočena je haloklina, na 400 m od ulaza u kanal. Ona se na dubini od 9 m kretala prema kopnu. Od 2011. do 2014. godine prilikom zarona u Vrulji Zečica, primijećeni su tanki slojevi svježije vode u gornjim dijelovima prolaza. To znači da je tu slab protok a i da se miješa voda zbog turbulencije koju uzrokuje hrapavost stropa.

Postoji nekoliko uzgajališta dagnji u blizini podmorskih izvora Vrulja Zečica i Vrulja Modrič. U tom području zastupljen je i uspješan ribolov. To nam potvrđuje obogaćivanje područja hranjivim tvarima putem podmorskog ispuštanje podzemnih voda koje je u suprotnom oligotrofno (Surić et al., 2015).

Blizu Starigrada je Vrulja Zečica te je to povremeno aktivan podmorski izvor. Nalazi se na dubini od 9 m i s izlazom na 20 m od obale. Speleotemi na 41,5 m dubine ukazuju na bivšu fazu vadoze (Surić et al., 2004; Surić & Juračić, 2010). Ta vrulja je pretvorena u obalno izvorište i konačno u podmorski izvor zbog porasta razine mora. Vrulja Zečica ima širok oblik lijevka (Surić & Juračić, 2010).

Vidljiv je učinak mehaničke erozije na primjeru stalagmita s 41,5 m dubine iz Vrulje Zečice. Naime, taj učinak je vidljiv na strani sige okrenutoj prema dotoku slatke vode koja sobom nosi klastični materijal. Na moguću koroziju ispod morske razine ukazuju sifonalni oblik vrulje te periodični snažan dotok slatke vode iz zaleđa. Na mjestu gdje se miješaju slatka i slana voda, premda obje znaju biti prezasićene na kalcijev (II) karbonat, zastupljeno je aktivno otapanje karbonata (Surić, 2015).

### 3.2.2. Bakarski zaljev

Veći broj manjih podmorskih izvora ili vrulja može se naći u jugoistočnom dijelu Bakarskog zaljeva, između mjesta Črno i Žminjca. Voda u podmorskim izvorima ili vruljama potječe od podzemnih voda koje istječu u sjeveroistočnom dijelu Bakarskog zaljeva. Voda se najčešće izljeva uz rasjede između karbonatnog i flišnog kompleksa. Sjeverna i sjeveroistočna strana Bakarskog zaljeva upravo zbog toga ima brojne podmorske izvore.

Podmorski izvori ili vrulje od mjesta Črno do Bakarca napajaju se sa sjeveroistočnog dijela sliva. Kapacitet ovih izvora je dosta promjenjiv. To nam potvrđuje da je sposobnost zadržavanja ovog dijela sliva niža od onih na sjeverozapadu. Na mjestu Črno također možemo povremeno vidjeti podmorske izvore.

Izviranja vrulja između Črna i Žminjca interesantan je primjer. U sredini Črna zna se vidjeti samo jedan podmorski izvor, premda se i on pojavljuje povremeno. Od rta Križ idući do Črna na sjeverozapadu, prilikom velikog dotoka na površinu mirnog mora, može se vidjeti čitav niz linearno raspoređenih podmorskih izvora. Ova se pojava baš i ne viđa često nego samo prilikom velikog dotoka vode. Ta serija izvora završava podmorskim izvorom najvećeg kapaciteta (Slika 8.). Smatra se da zbog kontakta između fliša i vapnenca nastaje takav raspored podmorskih izvora. To je zona komunikacije između mora i krških vodonosnika iz kojeg se napajaju izvori oko Bakra i razlog zašto su povremeno bočati (Benac et al., 2003).



Slika 8. Podmorski izvor ili vrulja na lokaciji Črno (Benac et al., 2003)

Na mjestu Črno potopljeni su i obalni izvori, a novi na višim razinama su formirani (Benac et al., 2003). Brzi porast razine mora s kraja pleistocena i tijekom holocena uzrokovalo je smanjenje ili čak poništavanje gradijenata podzemnog toka. U tim uvjetima, hidrogeološki su se uvjeti brzo mijenjali. Obalni izvori su potopljeni i novi izvori na višim razinama su formirani. Neki od potopljenih izvora nastavili su izbacivati vodu, odnosno započeli su djelovati kao podmorski izvori (vrulja) zbog jakog dotoka vode i visokog pritiska (Bonacci, 2015).

Na lokacijama Črno i Žminjca podzemne vode imaju intenzivan nagib protoka. Njihovo istjecanje u hidraulički nestabilnoj zoni olakšava miješanje morske i slatke vode i kao rezultat izvorska voda je obično slankasta. Na tim lokacijama više vode se odvodi pod morskom razinom bilo koncentrirano u podmorskim izvorima (vruljama) ili difuzno (Benac et al., 2003).

### 3.2.3. Kaštelanski zaljev

U Kaštelanskom zaljevu istraživanja vrulja pokazuju da morfološki ove vrulje odgovaraju poplavljenim fosilnim dolinama iz predaluvijalnog doba koje su nastale u kontinentalnoj fazi dinarskog primorskog krša. Padaline u slivu utječu na salinitet i temperaturu vrulja. Oborine izravno rezultiraju cirkulacijom podzemne vode koja se pojavljuje u vruljama i u cijelom sustavu obalnih izvora (Bonacci, 1987; LaMoreaux & Tanner, 2001). Na mjestu vrulja, najčešće u jesen i zimu, utvrđeno je postojanje homoterme vode. Tad se prosječna temperatura zraka kreće od 0 do 4°C. U blizini vrulja homotermne karakteristike morske vode nisu zabilježene u istom periodu, otkako je voda bila na dnu toplija, a na površini hladnija. Salinitet vode također odstupa ovisno o dubini, na dnu je salinitet manji, dok je na površini veći. S morskom vodom situacija je obrnuta (Bonacci, 1987).

U vruljama ljeti ima malo vode te je, s obzirom na dubinu, raspon temperatura isti u moru i u vodi iznad vrulja. Temperatura je na dnu niža, a viša na površini. Isto je i s rasponom saliniteta koji potvrđuje smanjenje aktivnosti vrulja ili njihov potpuni nestanak. Općenito, ljeti je salinitet veći nego zimi (Bonacci, 1987).

Kaštelanski zaljev se prostire između Splita i Trogira te se tu javljaju dva podmorska izvora ili vrulje. Podmorski izvor Arbanija udaljen je oko 800 m, a Slatina oko 3200 m od kopna. Podaci o njihovoj dubini se razlikuju. Oba podmorska izvora prema Alfireviću ispuštaju se sa

udubljenja poput dolina: Arbanija na 35 m i Slatina na 32 m ispod razine mora. Breznik spominje da se Arbanija nalazi na 32 m, a Slatina na 39 m dubine. Oba se autora slažu da je dno Kaštelanskog zaljeva oko podmorskih izvora uglavnom ravno i oko 15 m ispod razine mora (Fritz & Bahun, 1997).

Mnogi priobalni izvori i velika koncentracija istjecanja obilježava obalno područje od uvale Grebašnice do priobalnog izvora Pantan (Slika 9.). Pantan je povezan s vruljama u Kaštelanskom zaljevu. Rasjedni kontakt dobro vodopropusnih karbonatnih i vodonepropusnih klastičnih stijena omogućuje izviranje. Međutim, funkcija barijere nije uspostavljena s obzirom na položaj na morskoj obali. Zbog toga tijekom kišnih razdoblja podzemne vode prodiru duboko u Kaštelanski zaljev i pojavljuju se vrulje usred zaljeva. Međutim, kad su sušni mjeseci vrulje presušuju te se izvor Pantan zaslanjuje zato što nadvlada more (Biondić et al., 2009).



Slika 9. Izvor Pantan (Biondić et al., 2009)

Ustanovljeno je da Pantan, kao veliki krški izvor, ima kapacitet u maksimumu do 12  $m^3/s$ . Također, on za vrijeme sušnih ljetnih mjeseci ima kapacitet oko 600 l/s. Arbanija i Slatina su dvije vrulje u Kaštelanskom zaljevu koje se aktiviraju za vrijeme kišnih razdoblja (Biondić et al., 2009).

Dakle hidrogeološki sustav kraj Trogira sastoji se od dvije vrulje, Arbanija i Slatina, stalnog boćatog priobalnog izvora Pantan i povremenog boćatog izvora Slanac. Vrulje su za nižih morskih razina funkcionirale kao priobalni izvori, a prilikom dizanja morske razine postale su podmorski izvori. Naime, za vrijeme kišnog perioda djeluju kao vrulje, a za sušnog



perioda imaju ulogu ponora koji usmjerava morsku vodu prema kopnu, te su zapravo morske estavele. Za vrijeme smanjenog dotoka slatke vode iz zaleđa, odnosno tijekom sušnih perioda, podzemlje se ispuni morskom vodom tako da se na priobalnom izvoru Pantan povećava salinitet. Ponekad, nakon naglih i jakih oborina, u slučaju nailaska znatnih količina podzemne vode iz zaleđa, aktivira se i povremeni izvor Slanac. On izbacuje vodu povišena saliniteta odnosno podzemnu vodu iz zaleđa pomiješanu s morskom vodom (Surić, 2015).

#### 3.2.4. Podnožje planine Biokova

Dio cjeline podzemne vode Cetina su izvori i vrulje koji se nalaze u području od ušća rijeke Cetine u more do uvala Drašnica. Pojava velike vrulje u uvali Dubci kod Brela (Slika 10.) se ističe u tom obalnom području. Osim toga, u tom području bitni su i izvori u Baškoj Vodi i vrulje u uvali Drašnice, gdje je fliška barijera potopljena morem. U to priobalno područje podzemni dotoci vezani su uz protoke podzemne vode kroz planinu Biokovo.



Slika 10. Uvala Vrulja (uvala Dubci) kod Brela (Biondić et al., 2009)

Jedna od najvećih vrulja na Jadranu nalazi se u uvali Vrulja. Ta vrulja ima dvije glavne lokacije izviranja. Prva lokacija je uz samu strmu obalu i stalno je aktivna. Druga lokacija izviranja je dalje od obale i aktivna je samo u razdoblju kiša. Bočata voda istječe na vruljama, a koncentracije klorida su 14,500-19,000 mg/l Cl (Biondić et al., 2009).

### 3.3. Hidrogeološke karakteristike vrulja

Izlijevanje iz otvora podmorskog izvora u osnovi je posljedica razlike u gustoći između vode koja izlazi i okolne slane vode. Diskontinuitet brzine protoka kroz sučelje koje razdvaja mlaz koji istječe i okolnu morsku vodu, ubrzava slanu vodu i miješa dvije vrste vode zbog viskoznih interakcija. Stoga, kao rezultat takvog povlačenja povećava se prividna brzina protoka mlaza vode. Ukoliko se može pretpostaviti potpuno miješanje morske i izvorske vode, jednadžba stabilnog očuvanja mase može se napisati na sljedeći način (Slika 11.) (Cotecchia & Frederico, 1983):

$$Q_o \cdot \rho_o + \Delta Q \cdot \rho_s = (Q_o + \Delta Q)\rho_h \quad (1)$$

Pri čemu je:

$Q_o$  = protok koji istječe iz otvora

$\Delta Q$  = brzina protoka inducirana slanom vodom

$\rho_o$  = gustoća izvorske vode

$\rho_s$  = gustoća slane vode

$\rho_h$  = gustoća mlaza pri  $z = h$ .

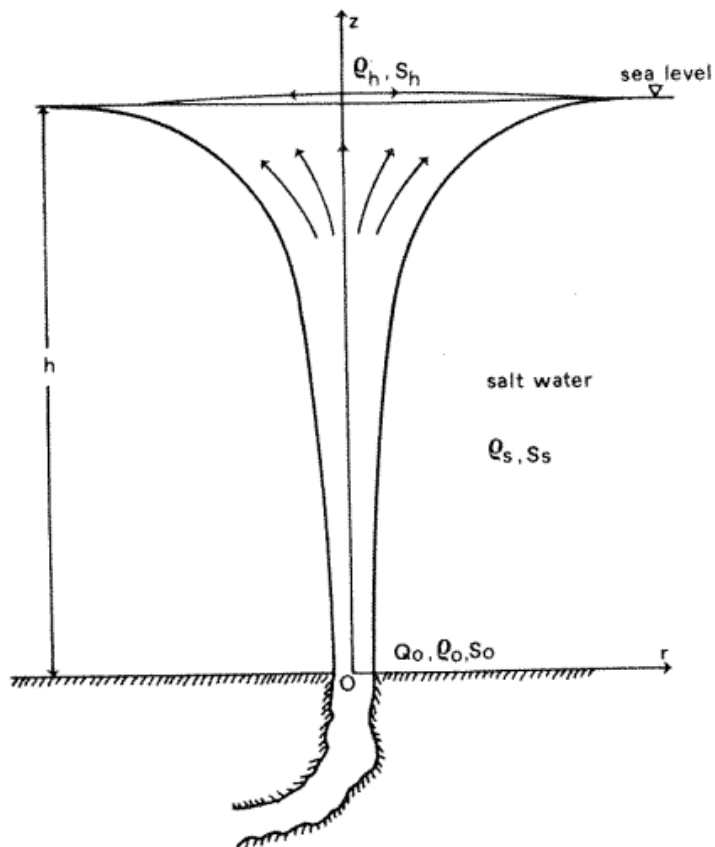
Budući da je gustoća u korelaciji sa salinitetom, jednadžba pod (1) postaje:

$$Q_o \cdot S_o + \Delta Q \cdot S_s = (Q_o + \Delta Q)S_h \quad (2)$$

Iz jednadžbe pod (2) možemo dobiti:

$$\frac{\Delta Q}{Q_o} = \frac{S_h - S_o}{S_s - S_h} = \beta$$

$$\text{Tj. } \Delta Q = \beta \cdot Q_o$$



Slika 11. Izljev iz podmorskog izvora (Cotecchia & Frederico, 1983)

Ukoliko se uvede unutar otvora dodatni protok  $q$  otopine s koncentracijom  $K_l$  na način da je otopina ravnomjerno raspoređena po površini presjeka na morskom dnu, rezultirajuća koncentracija  $K_h$  na razini  $z = h$  uzlazne izvorske vode se može izraziti kako slijedi:

$$q \cdot K_l = (Q_o + \beta \cdot Q_o + q)K_h$$

Zato što je  $q \ll (Q_o + \beta \cdot Q_o)$ , slijedi:

$$Q_o = \frac{q \cdot K_l}{(1 + \beta)k_h}$$

Takav odnos omogućuje procjenu protoka izvora pomoću mjera koncentracije (Cotecchia & Frederico, 1983).

Hidraulična glava odnosno zbroj svih energija je zemaljski faktor koji uglavnom pokreće podmorsko ispuštanje podzemnih voda. Podzemna voda dolazi u kontakt s infiltriranom slanom vodom kad krene prema moru. Kad svježja podzemna voda dolazi u kontakt sa slanom podzemnom vodom, ona se uzdiže iznad zbog razlike u gustoći (Babu et al., 2021).

Budući da podzemna voda teče kroz porozni medij, brzina protoka ovisi o svojstvima tla poput stupnja kojim su prostori između pora međusobno povezani. Propusnost,  $k$ , je svojstvo od interesa za protok podzemne vode. To označava mjeru lakoće kojom tekućina teče kroz matricu tla. Tada se brzina protoka podzemne vode može izračunati pomoću Darcyjeva zakona koji kaže da je protok linearno proporcionalan hidrauličkom gradijentu:

$$q = - \frac{\rho g k}{\mu} (\nabla h)$$

gdje je  $q$  Darcyjev tok ili brzina protoka po jedinici površine, a  $\mu$  viskoznost fluida. Općenitiji izraz Darcyjeva zakona je (Mulligan et al., 2019):

$$q = - \frac{k}{\mu} (\nabla P + \rho g \nabla z)$$

Za procjenu podmorskog ispuštanja podzemnih voda postoje dva hidrološka pristupa: metoda masene ravnoteže i izračun Darcyjeva zakona. Obje metode obično se primjenjuju za procjenu ispuštanja slatke podzemne vode. Osim toga, Darcyjev zakon također se može koristiti za procjenu protoka slane vode u i izvan morskog dna (Szymczycha & Pempkowiak, 2015; Mulligan et al., 2019).

Jednostavna jednadžba ravnoteže vode pokazala se korisnom kao procjena podmorskog ispuštanja podzemnih voda u nekim slivovima. Ona se može opisati kao:

$$P = E_T + D_S + D_G + dS$$

gdje  $P$  je oznaka za oborine,  $E_T$  evapotranspiraciju,  $D_S$  za površinsko pražnjenje,  $D_G$  je ispuštanje podzemne vode i  $dS$  je promjena u skladištu vode. Metoda ima određena ograničenja iako je prilično jednostavna. Prvo treba točno odrediti oborine, evapotranspiraciju, površinsko

pražnjenje i promjenu u skladištu vode. Kao drugo, vodonosnik bi trebao biti izoliran nepropusnim slojevima i ispuštanje bi trebalo biti izravno u more. Treće, ograničenje metode je njezina primjena. Ona se primjenjuje samo na formacije, gdje vrijednost duboke infiltracije premašuje točnost ostalih komponenata jednadžbe vodene bilance. Kaže se da je metoda bilance vode pogodna za procjenu ispuštanja slatke podzemne vode (Burnett et al., 2006; Moore, 2009; Szymczycha & Pempkowiak, 2015).

Metoda masene ravnoteže zahtijeva utvrđivanje svih ulaznih i izlaznih tokova vode kroz podzemlje za procjenu podmorskog ispuštanja podzemnih voda. Brzina ispuštanja podzemne vode izračunava se kao razlika između svih ulaza i svih izlaza pod pretpostavkom stabilnog stanja tijekom određenog vremenskog okvira. Provedba ovog pristupa može biti prilično jednostavna ili može rezultirati složenim terenskim uzorkovanjem. Također, kvaliteta podataka utječe na razinu nesigurnosti. Naime, proračuni vode rijetko su poznati sa sigurnošću čak i uz opsežno uzorkovanje na terenu i zato ih treba koristiti imajući to na umu. Nadalje, ako je potrebna prostorna i vremenska varijabilnost podmorskog ispuštanja podzemnih voda za određeno istraživanje, pristup ravnoteži mase nije prikladan (Moore, 2009; Mulligan et al., 2019).

Darcyev zakon obično se koristi zajedno s drugim metodama poput piezometra, premda je bitno mjerenje propusnosti tla i hidraulične glave na nekoliko mjesta. Prvo se trebaju prikupiti podaci na terenu, a zatim se uz pomoć Darcyjevog zakona može izračunati stopa podmorskog ispuštanja podzemnih voda (Szymczycha & Pempkowiak, 2015).

Na terenu se mora izmjeriti propusnost tla i hidraulična glava na nekoliko mjesta da bi se primijenio Darcyev zakon. Osim toga, moraju se prikupiti podaci za određivanje područja presjeka protoka. Zatim, uz pomoć Darcyjevog zakona podaci sa terena koriste se za izračunavanje brzine protoka podzemne vode u obalni ocean. Glavni nedostatak ovog pristupa uključuje činjenicu da je propusnost vrlo heterogena, često u rasponu od nekoliko redova veličine. Zbog toga je rijetko dobro poznata "prosječna" vrijednost koja se koristi s Darcyjevim zakonom. Osim toga, hidraulična mjerenja glave zahtijevaju invazivne, obično skupe, instalacije bušotina. Također, hidraulična glava je točka mjerenja, a bilježenje prostorne varijabilnosti stoga zahtijeva instaliranje mnogih bušotina. Glavna prednost ovog pristupa je što je dobro uspostavljen i jednostavan za primjenu. Naime, izračuni fluksa su jednostavni i mjerenja glave lako se prikupljaju nakon postavljanja bušotina (Mulligan et al., 2019).

Brojni procesi utječu na podmorsko ispuštanje podzemnih voda. Neki od njih su plima i oseka, valovi i visinske razlike. Valovi generiraju gradijent tlaka i voda ulazi u sloj sedimenta prema grebenu i dolazi do izmjene vode iz pora. Uslijed djelovanja plime i oseke, oscilacija na razini mora i razlika u gustoći nastaje podmorsko ispuštanje podzemne vode. Ovo se uglavnom sastoji od slane voda koja se recirkulira u prostor pora. Osim tih procesa postoje i brojni drugi koji su endogene prirode. To su primjerice osmotski tlak, toplinski gradijenti i obrnuta stratifikacija gustoće. Termalni gradijenti razvijaju se zato što je morska voda hladnija, a voda u dodiru sa zemljinom površinom je toplija. Topla voda koja je nošena u porama se uzdiže, a njezino mjesto zauzima dotok morske vode. Ona se opet zagrijava i stvara cirkulaciju (Babu et al., 2021).

Glavni procesi koji uzrokuju vremenske fluktuacije su dugoročne ili sezonske promjene u unutrašnjoj hidrauličnoj glavi, dnevne promjene u gradijentu tlaka, kratkotrajni gradijenti tlaka inducirani valovima (Babu et al., 2021).

Količinu i mjesto podmorskog ispuštanja podzemnih voda kontroliraju oborine, crpljenje vode, karakteristike vodonosnika, morfologija plaža, prisutnost i stupanj razvijenosti sustava potoka, valovi, plima i oseka. Podmorskom ispuštanju podzemnih voda može pridonijeti zbijanje i odvođenje sedimenata. Međutim, ti učinci nisu kvantificirani. Vodonosni sloj dopunjava kiša održavajući hidraulični gradijent potreban za pogon protoka podzemne vode prema moru. Karakteristike vodonosnika koje utječu na protok podzemne vode također utječu na podmorsko ispuštanje podzemnih voda. To uključuje poroznost, propusnost i hidrauličnu vodljivost podloge vodonosnika; homogenost ili heterogenost podloge vodonosnika; prisutnost prijeloma ili drugih poželjnih putova protoka poput rasjeda; i konture hidraulične glave unutar vodonosnika. Izvor ili ponor za protok podzemne vode mogu biti jezera, rijeke i potoci (Burnett et al., 2003; Knee & Paytan, 2011).

Podmorski izvori ili vrulje su uzrokovani arteškim protokom podzemne vode kao odgovor na gradijente tlaka u vodonosnicima i probijanje u ograničavajućim slojevima (Moore, 2009).

Kroz vodonosnik teče slatka podzemna voda, a on se pokreće unutrašnjom hidrauličnom glavom prema moru. Kako se približava moru, nailazi na slanu podzemnu vodu koja se infiltrirala iz oceana. Slatka podzemna voda teče iznad slane vode budući da je njena gustoća niža od slane vode. U neograničenom homogenom vodonosnom sloju u kojem nema drugih sila, područje podmorskog ispuštanja podzemnih voda može biti predviđeno razlikom gustoće

između tekućina. Relacija Ghyben – Herzberg predviđa da će ispuštanje takvih smjesa biti ograničeno na nekoliko stotina metara od obale u tako homogenim neograničenim vodonosnicima. Međutim, obalni sedimenti često se sastoje se od složenog skupa ograničenih, poluograničenih i neograničenih vodonosnika. Jednostavni modeli ne uzimaju u obzir anizotropnu prirodu priobalnih sedimenata, dinamičke procese disperzije, valove, toplinske gradijente, obrnutu stratifikaciju gustoće i promjenu razine mora (Moore, 2009).

Pokušalo se razumjeti ponašanje slatke vode pri miješanju s morskom vodom u obalnim vodonosnicima. Položaj sučelja slane vode i slatke vode može se procijeniti koristeći Ghyben-Herzbergov odnos. Upotrebljava se pod pretpostavkom da u sustavu postoji samo vodoravni protok slatkovodnog područja i da nema protoka unutar slanog područja. To znači da tlakovi u susjednim točkama s obje strane duž sučelja su jednaki. Jednadžba koja se koristi za izračunavanje je sljedeća (Bonacci, 1987; Fleury et al., 2007; Mulligan et al., 2019; Babu et al., 2021):

$$z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \times h$$

U toj jednadžbi  $z$  označava debljinu slatke vode ispod razine mora, a  $h$  je debljina morske vode ispod razine mora,  $\rho_f$  je gustoća slatke vode, a  $\rho_s$  gustoća slane vode.

Ta jednadžba se može pojednostavniti u (Mulligan et al., 2019; Babu et al., 2021):

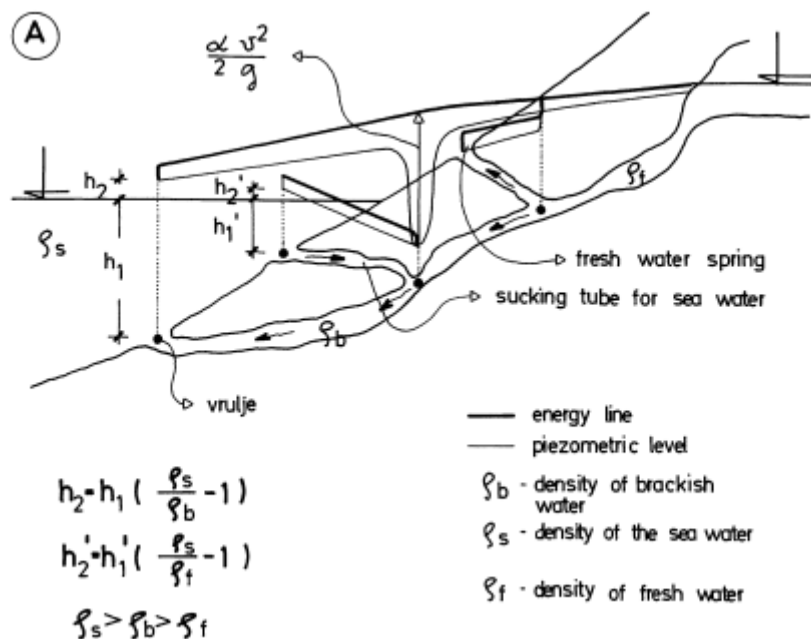
$$z = 40h$$

Slatka podzemna voda koja teče prema moru u stvarnom svijetu nailazi na nepravilno sučelje gdje miješanje tekućina je vođeno difuzijom i disperzijom. One su pojačane morskim mijenama i valovima. Ovaj obrazac dvoslojne cirkulacije i miješanja sličan je onome koji je uočen u mnogim površinskim ušćima. Raspršivanje duž sučelja može biti pojačano morskim mijenama koje djeluju u anizotropnom mediju. Morska voda ulazi u vodonosnik kroz propusne izbočine i proboje u zatvorenim jedinicama tijekom porasta razine mora ili plime. Međutim, tijekom pada razine mora ili oseke morska voda teče natrag u more. Neto kretanje slatkovodna voda - slana voda može biti malo kroz svaki plimni ciklus. Međutim, tijekom plime protok slane vode duž kanala visoke hidraulične vodljivosti može biti uzrokovan anizotropnom propusnošću. Tada onda dolazi do nepravilnog prodiranja slane vode u slatkovodne zone. Difuzija miješa sol

u susjednoj slatkoj vodi i kemijske reakcije mogu nastati. Obrnuta situacija događa se za vrijeme oseke te slatka voda prodire istim tim stazama i dobiva sol difuzijom (Moore, 2009).

Postojanje podmorskog bočatog izvora može biti posljedica nekoliko mehanizama zaslanjivanja, tj. dotok morske vode uz Venturijev efekt, razlika u hidrauličnoj glavi zbog razlike gustoće, stratifikacija gustoće toka, ulaz mora u sučelje kanala (Fleury et al., 2007).

Koristeći Bernoullijevu jednadžbu i hidrodinamički učinak Bögli je pokušao objasniti proces zaslanjivanja vrulja i priobalnih izvora. Detaljnije objašnjenje ovog fenomena prikazuje slika 12. Svježa voda postaje bočata na takav način da otvoreni zglobovi imaju niži tlak od razine mora i tako usisavaju morsku vodu. Prvi koji je objasnio ovaj fenomen zaslanjivanja vrulja i priobalnih izvora bio je Lehmann. Važno je napomenuti da je ova pojava prilično rijetka u prirodnom okruženju, iako je u literaturi navedena kao jedino objašnjenje zaslanjivanja obalnih izvora i vrulja (Bonacci, 1987).

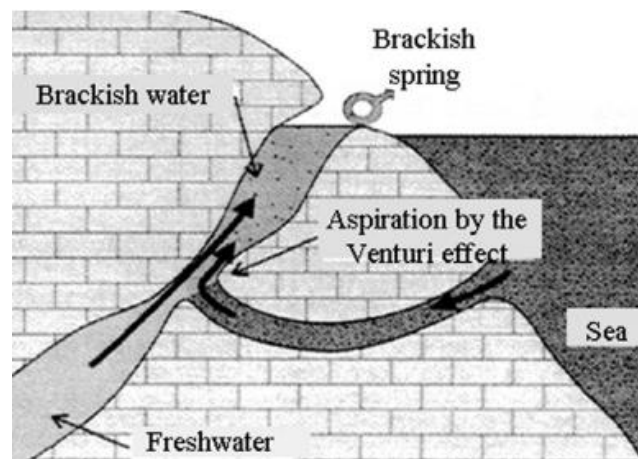


Slika 12. Funkcioniranje vrulje (Bonacci, 1987)

Kao objašnjenje ulaza slane vode, Lehmann zastupa Venturijev efekt (Slika 13.). Uski prolaz u glavni kanal zajedno s uskim sekundarnim kanalom koji je povezan s morem, propušta vodu, ali uzrokuje depresiju koja usisava morsku vodu. Venturijev efekt povećava protok ulazne

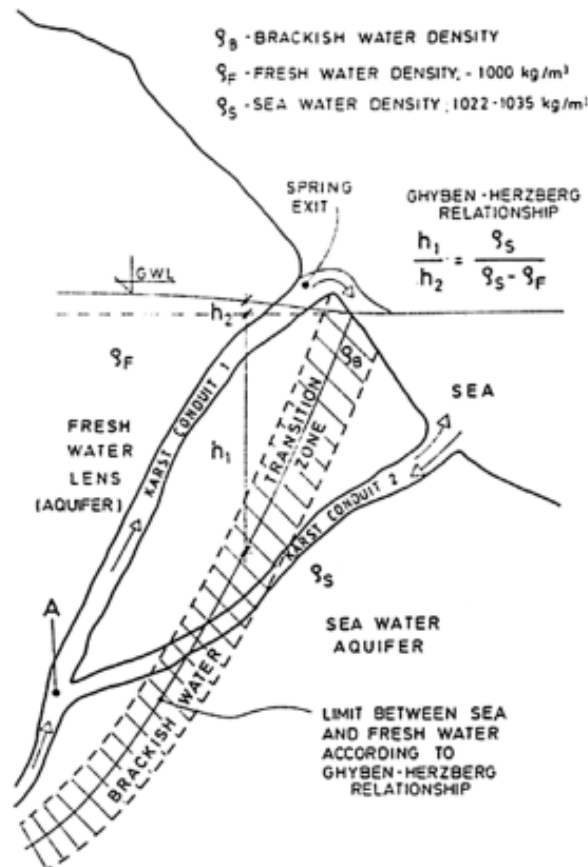


morske vode kada se povećava ispuštanje slatke vode. Međutim, prema Mijatoviću, ovaj mehanizam nije kompatibilan sa morfologijom krša jer karstifikacija teži eliminaciji veza u ovoj vrsti sustava. Prema njegovom mišljenju bilo bi vrlo neobično ako bi taj mehanizam bio prisutan (Fleury et al., 2007).



Slika 13. Ulaz slane vode u vodonosnik zbog Venturijevog efekta (Fleury et al., 2007)

Ovaj mehanizam ne može se uopćiti za objašnjenje saliniteta u krškim obalnim izvorima. Zbog toga je Đurašin sugerirao da je ulaz slane vode zbog razlike u gustoći između slatke vode i morske vode. Dakle, obalni i podmorski izvori povezani su s dubokim kanalom koji završava u moru (Slika 14.). Morska voda ulazi i kontaminira vodonosnik sve dok je hidraulična glava morske vode viša od slatkovodne na spoju dvaju kanala (Fleury et al., 2007).



Slika 14. Prodor morske vode u vodonosnik kroz kanal povezan s morem (Fleury et al., 2007)

Na stopu otjecanja podzemnih voda u obalno područje utječe mnogo čimbenika. Ti čimbenici mogu utjecati izravno ili neizravno. Glavni čimbenici koji određuju tok podmorskog ispuštanja podzemnih voda su tlak i propusnost. Nadalje, bitna je i funkcija hidrauličkog gradijenta te brzina obnavljanja kopnene podzemne vode pod utjecajem oborina i evapotranspiracije. Stope evapotranspiracije odredit će vrste i opseg vegetacije, kao i klima. Dakle, faktori koji određuju stope zemaljskog izvođenja podzemne vode u more su parametri koji se odnose na geologiju, oborine, vegetaciju i topografiju. Moglo bi se predvidjeti da bi se podmorsko ispuštanje podzemnih voda pojačalo u područjima visoke propusnosti (krš), visokog ispuštanja u blizini obale, područja bez dobro razvijenih riječnih sustava i regije s visokom stopom obnavljanja podzemnih voda (Burnett et al., 2003).

Sile koje pokreću podmorsko ispuštanje podzemnih voda su: kopneni hidraulički gradijent (gravitacija) koji rezultira protokom vode nizbrdo; razlike u razini vode na propusnoj barijeri; morske mijene, valovi, oluje ili gradijenti tlaka u blizini obale koje induciraju struje; konvekcija izazvana slanom vodom koja prekriva slatku podzemnu vodu u nekim okruženjima blizu obale;

sezonski dotok i odljev morske vode u vodonosnik koji je rezultat kretanja sučelja slatke vode – morske vode kao odgovor na godišnje cikluse punjenja; i geotermalno grijanje (Burnett et al., 2006).

### 3.4. Stanišne karakteristike vrulja

Nagli dolasci slatke vode u vruljama uzrokuju vrlo česte “salinitetne šokove” morskim organizmima koji tu žive. Naime, to im stvara probleme prilikom osmotske regulacije (Novosel et al., 2002; Bakran-Petricioli, 2007; Bakran-Petricioli, 2011). Ponekad snaga vode koja izlazi iz vrulja je toliko snažna da može ukloniti sve organizme sa stijene. Potpuni mrak je prisutan u dubokim dijelovima vrulja te stoga tu nailazimo samo životinjske organizme. Jadranske vrulje odlikuju specifični ekološki uvjeti pa u njima možemo naći osebujan živi svijet. Tako primjerice u Velebitskom kanalu u “Vrulji kod plantaže” na dubini do 60 m možemo naići na organizme koji žive na zidovima te pripadaju cirkalitoralu, i to koraligenskoj biocenozi. U toj vrulji na dubinama ispod 60 m možemo naći dagnje *Mytilus galloprovincialis*. Bitno je i spomenuti da to označava i najdublje nalazište prirodnog naselja dagnji u Jadranu (Bakran-Petricioli, 2007; Bakran-Petricioli, 2011).

Kameni supstrati sa slabom sedimentacijom karakteriziraju okoliš podmorskih vrulja. Iz donjih otvora uzdiže se izljev hladne slatke vode te se potom proširuje u površinskom morskom sloju. Vrulje naime prouzrokuju bočate uvjete u infralitoralnoj vegetaciji populacije *Ulva lactuca* i *Cystoseira fimbriata* - *C.ercegovicii*. Fragmentarno je gornjo infralitoralno područje te je nazočno i abrazivno rušenje zemlje ili dominira biološka litogeneza vapnenastih konstrukcija *Amphirhoa cryptarthrodia* - *Corallina officinalis* s.s. Scijafilno – eurihaline zajednice *Sphaerococcus coronopifolius* – *Dictyopteris membranacea* i *Rhytiphloea tinctoria* - *Rhodymenia corallicola* su prisutne oko vrulja u polumračnim podmorskim kavernama (Lovrić, 1974).

U blizini trajno aktivne vrulje Vruje kod Biokova prisutan je bogat i raznolik živi svijet. Na tom području površine stijena su pokrivene mnogobrojnim spužvama te žarnjacima vrste *Corynactis viridis* i *Parazoanthus axinallae*. Dagnje *Mytilus galloprovincialis* su bile najčešći organizmi na zidovima vrulja u Velebitskom kanalu (Slika 15.). Također, kamenica *Ostrea edulis*

pronađena je i u plićim dijelovima tih vrulja. Jegulje i glavoči su bili zabilježeni kao pokretni organizmi u vruljama (Bakran-Petricioli, 2007; Bakran-Petricioli, 2011).



Slika 15. Vrulja Zečica i živi svijet u njoj (Bakran-Petricioli, 2011)

Podmorsko ispuštanje podzemnih voda može sadržavati veće količine hranjive tvari i stoga djeluje kao glavni izvor hranjivih tvari za razne obalne ekosustave (Pisternick et al., 2020). Također, pozitivnu povezanost sa podmorskim ispuštanjem podzemnih voda pokazuje obilje bentoskih beskralježnjaka, poput školjkaša, polihheta i nematoda. Stoga, postavljena je hipoteza da poliheti djeluju kao trofička veza između obogaćivanja hranjivim tvarima putem podmorskog ispuštanja podzemnih voda, povećane proizvodnje bentoskih mikroalgi i grabežljivaca koji se hrane crvima, poput riba. U skladu s tim, u priobalju područja s visokim podmorskim ispuštanjem podzemnih voda primijećene su značajno veće gustoće i biomasa mekušaca i rakova, kao i veće gustoće riba (Pisternick et al., 2020; Starke et al., 2020).

Pozitivan učinak podmorskih izvora na rast ribe pokazale su dvije nedavne studije. Fujita et al. (2019) objašnjavaju pozitivnu vezu između rasta ribe i unosa hranjivih tvari dobivenih podmorskim izvorom koji sadrži povećan broj primarnih proizvođača i veću brojnost plijena. Sugestiju da je kombinacija fizioloških učinaka uzrokovala povećani rast iznijeli su Lilkendey et al. (2019). Svi dosadašnji rezultati ukazuju na vezu između podmorskog izvora bogatog nutrijentima i povišene količine morskih riba (Pisternick et al., 2020; Starke et al., 2020).

Podmorski izvori bogati hranjivim tvarima u priobalnim ekosustavima povećavaju primarnu proizvodnju i održavaju veću primarnu i sekundarnu biomasu potrošača. Nadalje, priljev podmorskog ispuštanja podzemnih voda uzrokuje fiziološki povoljne okolišne uvjete koji povećavaju fitnes riba. To onda može rezultirati povećanjem veličine njihove populacije. Rezultati istraživanja ukazuju na pozitivan odnos između promijenjene hidrografije i povećanog broja sekundarnih potrošača oko izvora podzemnih voda. Podmorsko ispuštanje podzemnih voda može biti odgovorno za izmjene u bentoskim zajednicama putem lokalnih promjena temperature vode, saliniteta i pH (Pisternick et al., 2020).

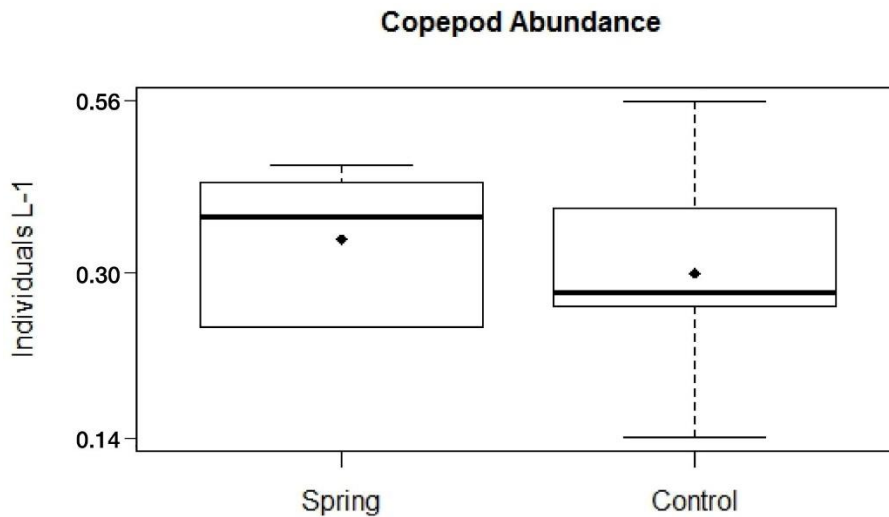
Podmorski izvori ili vrulje općenito utječu na okolno okruženje tako što mijenjaju salinitet, temperaturu, količinu hranjive tvari i sedimenata. Osim toga, mogu utjecati na okruženje tako što stvaraju morfološka obilježja na morskom dnu. Ekološki utjecaji podmorskih izvora uglavnom su izvedeni iz pretpostavki o utjecaju na povišenje sadržaja hranjivih tvari (Ayoub et al., 2002; Starke et al., 2020). Istraživanjem je ustanovljeno da su salinitet i vrijednosti pH niže na području vrulja nego na područjima koje su pod utjecajem vrulja i na kontrolnom području. Također, prosječne koncentracije hranjivih tvari tj. nutrijenata općenito su bile veće na području vrulja nego na područjima koja su pod utjecajem vrulja i kontrolnim mjestima (Ayoub et al., 2002; Pisternick et al., 2020; Starke et al., 2020).

Koncentracija klorofila-a, temperatura i salinitet su čimbenici okoliša koji utječu na brojnost i raznolikost zooplanktona. Budući da podmorski izvori utječu na te čimbenike i da zooplankton uvelike ovisi o primarnim proizvođačima, zooplankton se koristi kao pokazatelj za podmorske izvore i njegov utjecaj na više trofičke razine (Starke et al., 2020).

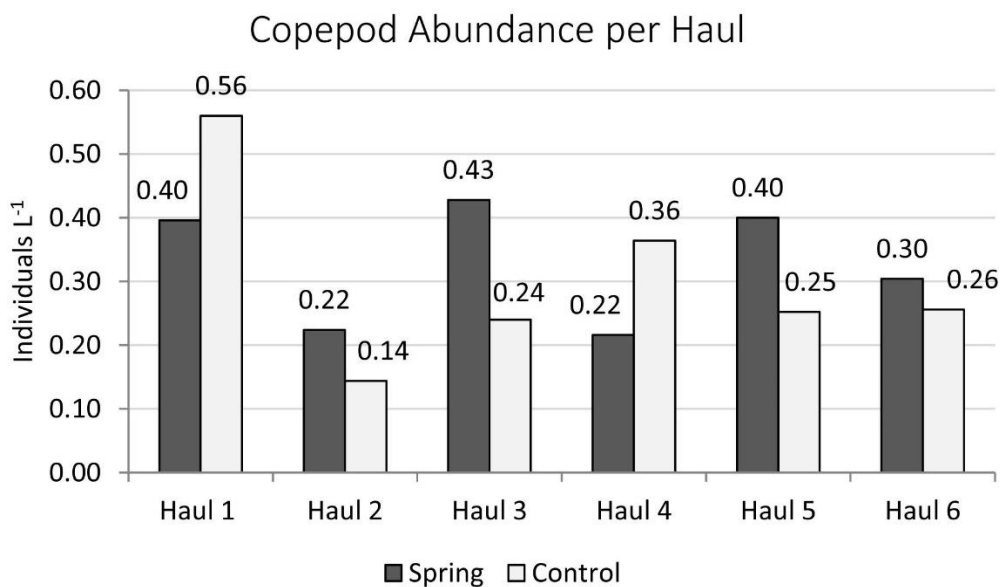
Istraživanjem na Tahitiju ustanovljeno je da temperatura na području vrulja ili podzemnih izvora je manja nego na kontrolnoj točki. Na području podzemnog izvora temperatura je bila u rasponu od 23,0°C do 24,0°C dok je na kontrolnom području temperatura bila između 29,2°C do 30,2°C. Salinitet na području vrulja je bio niži nego na kontrolnom području te je iznosio između 18,5 do 26,5 a na kontrolnoj točki je bio od 35,4 do 35,9. Također, ustanovljeno je da koncentracije  $NO_x$  i  $PO_4$  su veće na području gdje su vrulje nego na području kontrolne točke (Ayoub et al., 2002; Starke et al., 2020). Osim toga, utvrđeno je da je ukupna količina zooplanktona bila nešto veća oko podmorskih izvora nego na kontrolnom mjestu. Najrasprostranjenije svojite na mjestu podmorskog izvora i kontrolnoj točki bili su Copepoda, a

zatim slijede Appendicularia, Chaetognatha, Malacostraca, Polychaeta i riblja jaja (Starke et al., 2020).

Ustanovljena je nešto veća brojnost Copepoda (Slika 16., Slika 17.) oko podmorskog izvora u usporedbi s kontrolnim mjestima. To je bilo zamijećeno u četiri od šest mjerenja (Starke et al., 2020).



Slika 16. Obilje Copepoda oko podmorskog izvora i kontrolne točke (Starke et al., 2020)



Slika 17. Obilje Copepoda oko podmorskog izvora i kontrolne točke tijekom šest mjerenja (Starke et al., 2020)

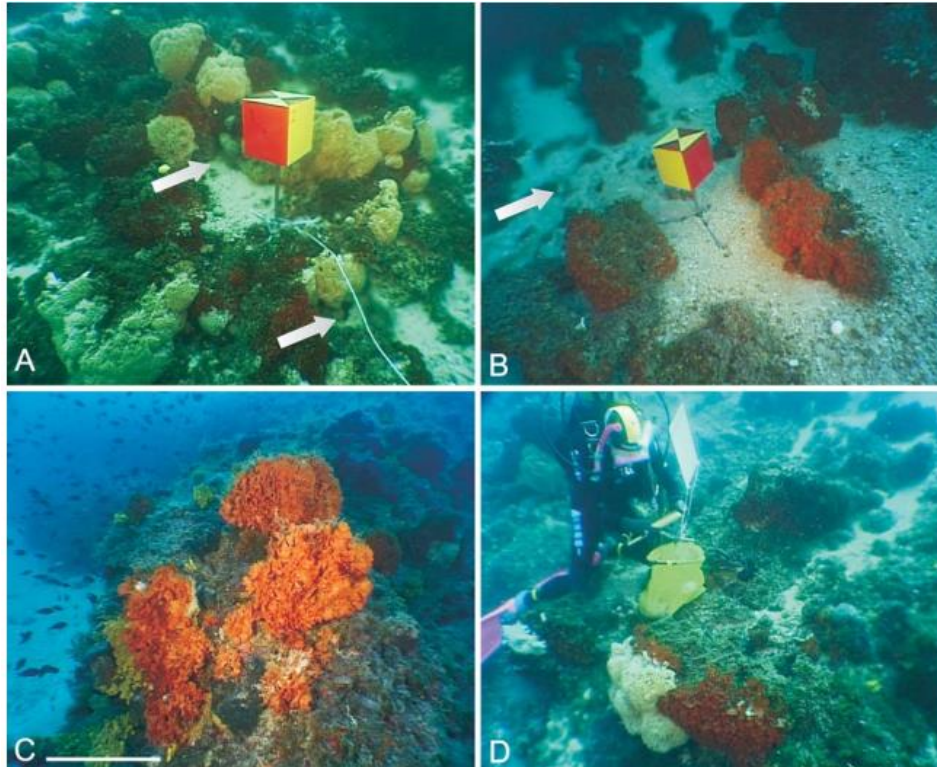
Utjecaj podmorskog izvora na parametre okoliša naglašavaju razlike u salinitetu između podmorskog izvora ili vrulje i kontrolnog mjesta. Niske vrijednosti saliniteta podvodnog izvora uzrokovane su neposrednim miješanjem podzemne i morske vode tijekom njezina ispuštanja. Na podmorskim izvorima povišene su koncentracije dušika i fosfora u usporedbi s uzorcima morske vode na kontrolnom mjestu. Također, oko vrulja je zamijećen povećan broj ribe. Uzrok tome je povećan dotok hranjivih tvari ispuštanjem podzemnih voda. To onda poboljšava primarnu proizvodnju što dovodi do veće dostupnosti plijena. Budući da podmorski izvori ili vrulje uzrokuju niže vrijednosti temperature i saliniteta, samim time uzrokuju i povećanje otopljenog kisika. Stoga, to bi također moglo utjecati na brojnost ribe oko podmorskih izvora (Ayoub et al., 2002; Starke et al., 2020).

Na istočnoj obali poluotoka Yucatan provedena je studija koja je istraživala potencijal podmorskih izvora da utječu na procese hranjivih tvari na livadama morske trave. Studija je provela procjenu stanja hranjivosti livade *Thalassia testudinum* u dvije kontrastne obalne lagune duž sjeveroistočnog poluotoka Yucatan. Ispitivane su koncentracije hranjivih tvari u tkivu kao i vrijednosti stabilnog izotopa dušika  $\delta^{15}\text{N}$  *T. testudinum* u grebennoj laguni Puerto Morelos i sustavu lagune Nichupte. To je ispitivano tijekom duljeg sušnog razdoblja i ponovno nakon obilnih oborina. Otkriveno je da nakon razdoblja obilnih oborina, *T. testudinum* u blizini podmorskih izvora u laguni Puerto Morelos su imale iznimno visoke koncentracije fosfora u tkivu lista koncentracije  $0,38 \pm 0,06\%$ . Ti su podmorski izvori mogli biti izravni izvor fosfora i/ili izvor željeza ovom karbonatnom sustavu sa vrlo ograničenom količinom željeza (Carruthers et al., 2005).

Dakle, u blizini podmorskih izvora u laguni Puerto Morelos zabilježeno je povećanje postotka fosfora u listu *Thalassia testudinum*. To je zabilježeno osobito nakon kiše i stoga pruža dokaz o tome kako istjecanje iz podmorskih izvora može utjecati na procese hranjivih tvari unutar ove grebenaste lagune. Za uočeni trend predlažu se dva moguća objašnjenja: podzemne vode sadrže visoke koncentracije fosfora i/ili sadrže željezo, što neizravno može povećati dostupnost fosfora *T. testudinum* koja raste u laguni (Carruthers et al., 2005).

Oko podvodnih izvora ili vrulja u Senjskom arhipelagu pronađene su velike karbonatne konstrukcije mahovnjaka i serpulida. Te konstrukcije su izradile *Pentapora fascialis* i *Salmacina dysteri* (Slika 18.) (Cocito et al., 2004; Cocito et al., 2004). Nekoliko nalazišta na stjenovitim liticama Grmac i Ždralova istraživali su SCUBA ronionci u lipnju 2002. godine.

Istraživanje je provedeno na dubinama od 19 do 32 m. Ustanovljeno je da se srednji promjer kolonije smanjivao s povećanjem udaljenosti od vrulja. U blizini vrulja srednji promjer je bio  $65,8 \pm 21$  cm, na udaljenosti od 2 m bio je  $40,4 \pm 8,2$  (Cocito et al., 2004).



Slika 18. Istraživanje u Senjskom arhipelagu: A *Pentapora fascialis* i *Salmacina dysteri* rastu blizu vrulja (bijeले strelice), B Samo *Pentapora fascialis* radi bioformacije na udaljenijim područjima od vrulja, C *Pentapora fascialis* na dnu Ždralove, D In situ mjerenje veličine kolonije (Cocito et al., 2004)

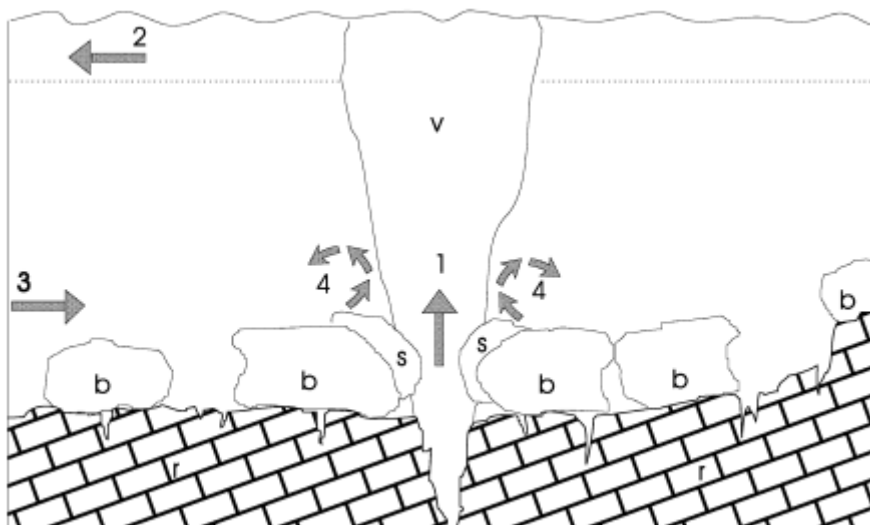
Na sva četiri proučena mjesta zabilježene su velike dimenzije i značajno prekrivanje podloge formacijama mahovnjaka i serpulida. To je bilo uočeno osobito na podlozi blizu vrulja, gdje je pronađena najveća kolonija *Pentapora fascialis* koja je bila promjera 100 cm. Pojava i razvoj tih bioformacija u velikoj su mjeri pod utjecajem njihove blizine vruljama. Međutim, još treba istražiti da li se pojačava njihova pojava i osebujna kontrukcijska sposobnost hidrodinamičkim uvjetima, miješanjem različitih voda te unosom hranjivih tvari i karbonata (Cocito et al., 2004; Cocito et al., 2006).

Kao značajke u osnivanju i razvoju formacija mahovnjaka i serpulida može se pretpostaviti nekoliko okolišnih faktora povezanih s vruljama. Hranjive tvari i karbonate u more prenosi



podzemna voda te ih mahovnjaci i serpulidi mogu koristiti kao hranu ili građevinski materijal. Rast ovih organizama koji se hrane suspenzijom mogu pojačati jake vodene struje i niska stopa sedimentacije (Cocito et al., 2004).

Na slici 19. može se prikazati moguće postavljanje ovih karbonatnih bioformacija. Podmorski izvor ili vrulja teče turbulentno prema gore od dna te se miješao s morskom vodom (1). Protok slatke vode prenosi fragmente algi, mahovnjake i druge organske ostatke ovisno o tlaku protoka i volumena isporuke. Na površini mora nazočan je tanki sloj bočate vode (2). Uzlazni tok koji stvara vrulja generira kompenzacijski tok morske vode na dnu koji se kreće prema vrulji (3). Lokalni kompenzacijski protok morske vode na dnu teče prema vrulji (4). Tijekom terenskih aktivnosti to je dokazano bojama za praćenje koje su koristili SCUBA ronionici za testiranje. Kolonije mahovnjaka (b) rastu sa živim, konveksnim dijelom prema uzvodnom odljevu bočate vode, noseći na ovom dijelu serpulidne mase (s). Mahovnjaci i serpulidi mogli bi iskoristiti prednosti protoka vode za poboljšanje performansi hranjenja budući da se hrane česticama i organizmima koji su u suspenziji na način da ih filtriraju ili hvataju (Cocito et al., 2004).



Slika 19. Postavljanje bioformacija mahovnjaka i serpulida (Cocito et al., 2004)

Kao mehanizam za transport kopnenih materijala do mora, istaknuto je ispuštanje podzemnih voda. Bio-ekološke procese u obalnim morima mogu pokrenuti hranjive tvari, ugljik, metali i drugi materijali koji su otopljeni u podzemnoj vodi. Osim toga, podmorski izvori ili vrulje mogu djelovati i kao prijenos antropogenih zagađivača do obalnih područja. Također, niži salinitet i pH mogu uzrokovati stres na lokalnu morsku biotu (Taniguchi et al., 2019).

Studije o morskoj bioti s obzirom na podmorske izvore usredotočuju se na primarne proizvođače. Naime, ti primarni proizvođači su baza morskih ekosustava, a i glavni odgovor na opskrbu hranjivim tvarima putem podmorskih izvora. Mnoge studije su do danas otkrile da hranjive tvari transportirane putem podzemne vode mogu podržati primarnu proizvodnju bentoskog i vodenog stupca u raznim obalnim ekosustavima. Produktivnosti grebena i/ili kalcifikaciji također značajno doprinosi podmorsko ispuštanje podzemnih voda. Nasuprot tome, kulturnu eutrofikaciju i cvjetanje mikroalgi može izazvati prekomjerno unošenje hranjivih tvari putem onečišćenih podzemnih voda u obalna mora. Podmorsko ispuštanje podzemnih voda može promijeniti mikrobiološke zajednice, odrediti raznolikost vrsta, rasprostranjenost, distribuciju biomase i proliferaciju bentoskih životinja (Taniguchi et al., 2019).

Zabilježeno je da optimalne uvjete rasta za kolonije mahovnjaka *Pentapora fascialis* mogu pružiti velike koncentracije  $CO_2$ , bikarbonata i hranjivih tvari koje su prisutne oko podmorskih slatkovodnih izvora u sjeveroistočnom Jadranu. Ta vrsta je dominantna komponenta bentosa oko vrulja. Naime, hranjive tvari izvor su hrane za plankton koje mahovnjaci aktivno filtriraju, a bikarbonati i  $CO_2$  su građevinski materijal za karbonatni kostur mahovnjaka. Također, vrulje uzrokuju jaka i stalna strujanja tijekom cijele godine što pospješuje hranjenje i smanjuje nakupljanje taloga na koloniji. Osim toga, vrulje pružaju nisku i konstantnu temperaturu morske vode (Cocito et al., 2006).

Cocito et al. (2006) proveli su istraživanje na litici Grmac gdje su SCUBA ronjenjem promatrali vrstu mahovnjaka *Pentapora fascialis*. Analizirani su rast kolonije, veličina i smrtnost mahovnjaka *Pentapora fascialis* (Cheilostomata, Ascophora) koji raste u blizini podmorskih slatkovodnih izvora na Grmcu (sjeveroistočni Jadran). Istraživanje je bilo provedeno tijekom jednogodišnjeg razdoblja (lipanj 2002. - lipanj 2003.). Tijekom istraživanja obavljena su ponovljena mjerenja duljine i širine živih i nekrotičnih dijelova šest kolonija koja su bila označena čeličnim štapićem.

Tijekom zime i proljeća opći izgled živih dijelova kolonija bio je jarko narančast s istisnutim lofoforama. Nasuprot tome, tijekom ljeta i jeseni, kolonije su bile blijedo narančaste sa uvučenim lofoforama i djelomično prekrivene sedimentom i epibiontima. Epibionti su uključivali alge, uglavnom Dictyotales, serpulid *Salmacina dysteri* i mahovnjake (*Aetea truncata*, *Beania magellanica*, *B. mirabilis*, *Bugula fulva*, *Diplosolen obelia* i *Patinella*

*radiata*). Na stranu kolonije koja je bila udaljena od izljeva vrulja uglavnom su utjecali epibionti. Ustanovljeno je da je *P. fascialis* uglavnom rastao tijekom hladnijih mjeseci, od listopada do ožujka. Naime, to razdoblje se podudara s najvećim istjecanjem iz vrulja. Nadalje, uvijek okrenuti prema vruljama bili su živi dijelovi kolonija. Još jedna karakteristika *Pentapora fascialis* nađene u blizini vrulja bilo je razbijanje kolonija. Smatra se da je to vjerojatno zbog njihove krhkosti i djelovanja jakih struja. U podnožju litice na pjeskovitom dnu bili su uočeni fragmenti kolonije (Cocito et al., 2004; Novosel et al., 2004; Cocito et al., 2006; Novosel et al., 2012). Na područjima gdje su vrulje određena je srednja stopa rasta kolonije od približno 9,8 ( $\pm 4,0$ ) cm godišnje. To je određeno mjerenjem prirasta duljine i širine kolonije *Pentapora fascialis*. Također, podatak o još bržem rastu od 10,6 cm/god dala je metoda analize izotopa kisika. Kolonije su bile stare četiri godine, a na to je ukazao godišnji ciklus izotopa kisika (Novosel et al., 2004; Cocito et al., 2006; Novosel et al., 2012).

U tablicama 1. i 2. prikazana je analiza promjena kolonije tijekom vremena. Smanjenje u rastu za tri od pet kolonija zamijećeno je od lipnja 2002. do rujna 2002. Povećanje svih pet kolonija zamijećeno je prilikom ispitivanja dužih vremenskih okvira, tj. šest mjeseci i dvanaest mjeseci (Cocito et al., 2006).

Tablica 1. Promjena površine živog i nekrotičnog dijela pet kolonija ( $cm^2$ ) *Pentapora fascialis* za tri, šest i dvanaest mjeseci (Cocito et al., 2006)

Colony number	3 months	6 months	12 months
	June 2002 – Sept 2002	Sept 2002 – March 2003	July 2002 – July 2003
1	260	1460	285
2	- 54	630	595
3	364	1580	342
4	- 150	1260	465
5	- 650	480	60
Min	- 650	480	60
Mean	- 46	1082	349
Max	260	1580	595
SD	399	497	201

Tablica 2. Neto promjena živuće površine pet kolonija ( $cm^2$ ) *Pentapora fascialis* za razdoblja od tri, šest i dvanaest mjeseci (Cocito et al., 2006)

Colony number	3 months June 2002 – Sept 2002	6 months Sept 2002 – March 2003	12 months July 2002 – July 2003
1	- 180	840	75
2	168	840	695
3	152	730	306
4	- 165	285	205
5	- 50	600	205
Min	-180	285	75
Mean	- 15	659	297
Max	168	840	695
SD	168	231	237

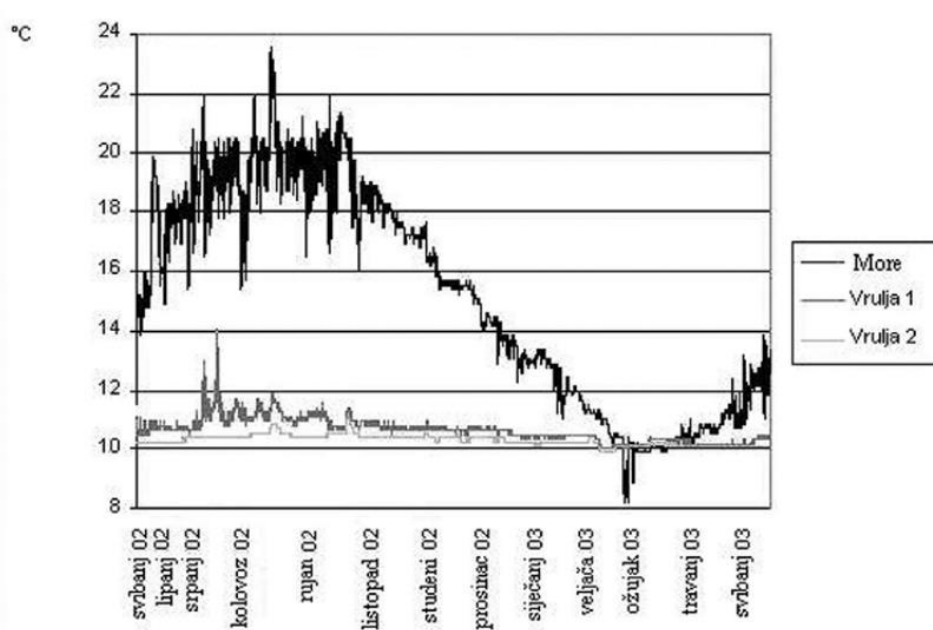
Rezultati su pokazali da su, unatoč čestim lomovima, kolonije *Pentapora fascialis* u Velebitskom kanalu rasle vrlo brzo. Moglo bi se pretpostaviti da velike količine karbonata i hranjivih tvari osiguranih izljevom vrulja uzrokuju ovaj izraziti rast. Velike kolonije karbonata, poput *P. fascialis*, imaju koristi od bogatog izvora građevinskog materijala iz vrulja. Nadalje, niski salinitet i otopljeni kisik mogli bi rezultirati manjim brojem predatora u blizini vrulja. To onda može povećati stope rasta. Također, veliki strujni tokovi u blizini vrulja omogućuju manje energetske zahtjeve hranjenje. Osim toga, zabilježena je i krhkost kolonija jer su uočeni brojni lomovi i njihovi fragmenti. Slomljeni dijelovi kolonija često nastavljaju rasti stoga bi fragmentacija kolonije mogla biti metoda nespornog razmnožavanja *P. fascialis* (Cocito et al., 2006).

Od rujna do ožujka, dakle tijekom hladnijih mjeseci u godini, uglavnom su rasle kolonije *Pentapora fascialis*. Naime, to razdoblje se podudara s najvećim istjecanjem vrulja. Od svibnja do rujna bilo je zabilježeno povećanje temperature okolne morske vode i smanjenje aktivnosti vrulja. Stoga, u tom periodu kolonije su pokazale najsporiji rast i najveće lomove (Cocito et al., 2006; Novosel et al., 2012).

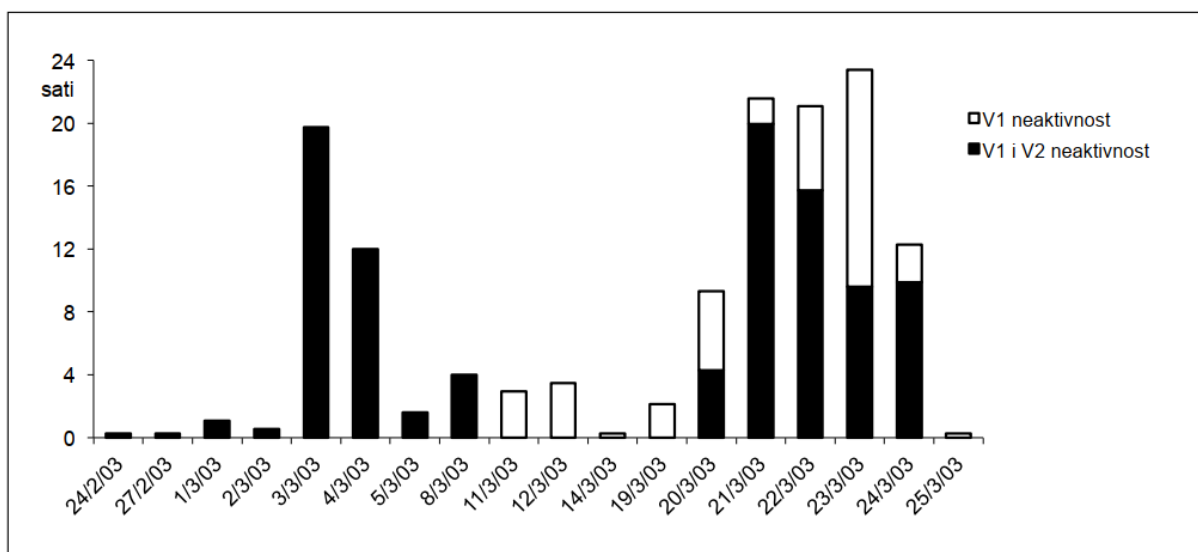
Poznato je da na stopu rasta sesilnih organizama utječu brojni čimbenici. Stoga, na razvoj veličine kolonije utječu količina i kvaliteta suspendiranih čestica hrane, stupanj sezonske toplinske varijacije i, posebno za karbonatne mahovnjake, koncentracija  $CO_2$  i bikarbonat (Cocito et al., 2006).

Štirn et al. (1969) prvi spominju *P. fascialis* kao eurihalinu vrstu u Velebitskom kanalu. Oni su ustanovili nazočnost velikih kolonija ove vrste u blizini vrulja te pojašnjavaju da kolonije žive u bočatoj vodi, pri salinitetu između 8 i 20 PSU. Osim toga, oni ističu da te kolonije žive u posebnoj facijesu koraligenske biocenoze gdje su prisutne niska razina sedimentacije i jaka pridnena strujanja koje uzrokuju vrulje. Također, oni objašnjavaju da vrsta *P. fascialis*, unutar tog facijesa, stvara podlogu za naseljavanje mnogih sesilnih i mobilnih vrsta (Novosel et al., 2004; Novosel et al., 2012).

Istraživanjem u Velebitskom kanalu u Grmcu ustanovljeno je da je temperatura mora varirala između 8,22°C i 23,52°C tijekom godine dana na 23 m dubine (Slika 20.). Temperatura vode u vrulji 1 na istoj dubini te u istom razdoblju varirala je između 9,76°C i 11,16°C. Osim toga, temperatura vode u vrulji 2 na dubini 24 m varirala je između 10,00°C i 14,02°C. Tijekom 12. i 13. rujna 2002. godine zabilježene su najveće temperaturne oscilacije mora. Tada je u vremenskom razdoblju kraćem od 10 h uočen temperaturni skok s 16,64°C na 22°C. Nasuprot tome, tijekom cijele godine temperatura vode iz vrulja je bila stalna što upućuje na konstantnu aktivnost vrulja. Samo u vrlo kratkom razdoblju između 24. veljače i 25. ožujka 2003. godine ustanovljeno je da su vrulje bile neaktivne (Slika 21.). Temperatura vode iz vrulja bila je jednaka temperaturi mora tijekom razdoblja neaktivnosti (Novosel et al., 2004; Novosel et al., 2012).

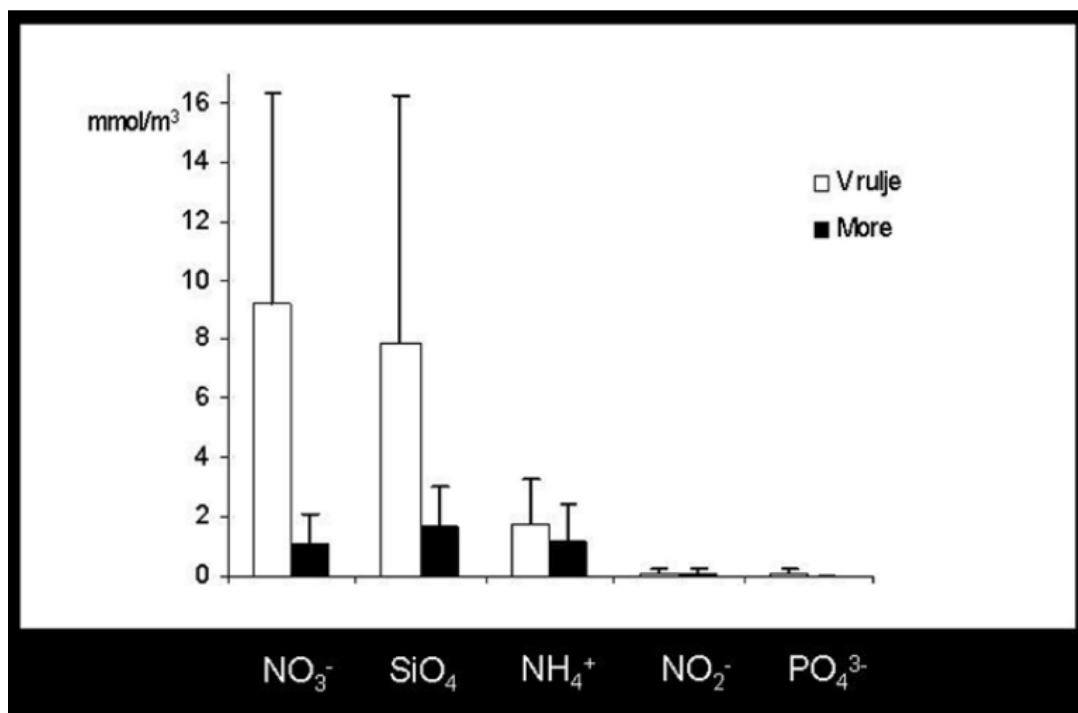


Slika 20. Temperature mora i dviju vrulja zabilježene u Grmcu u periodu od 27. svibnja 2002. do 21. svibnja 2003 (Novosel et al., 2012)

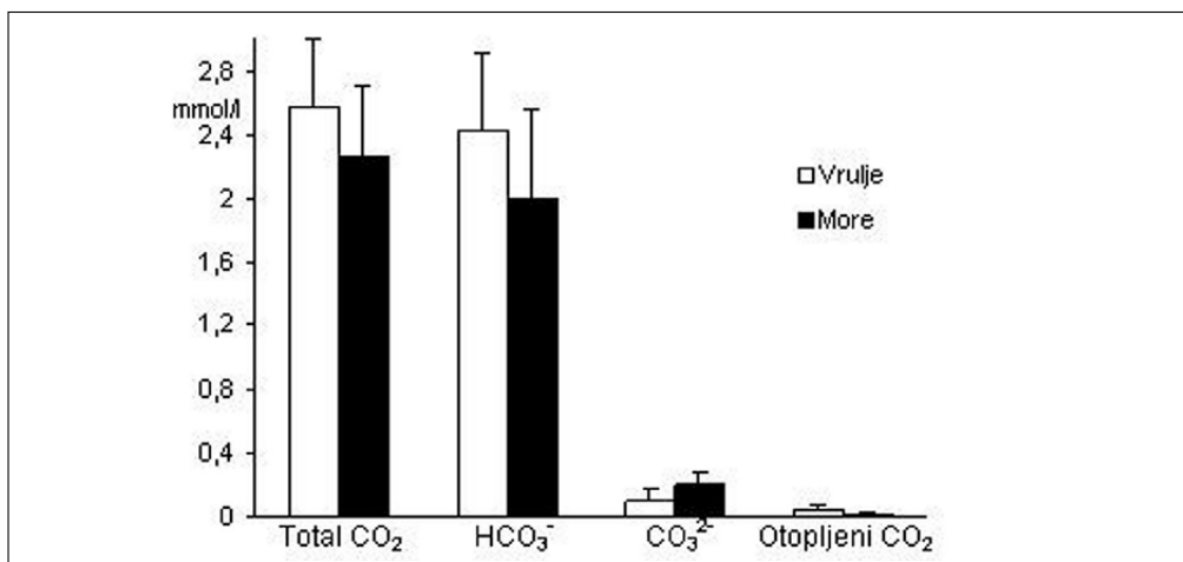


Slika 21. Neaktivnost vrulja (sati i datumi) u Grmcu u periodu od 27. svibnja 2002. do 21. svibnja 2003 (Novosel et al., 2012)

U proljeće, ljeto i zimu mjerene su hranjive soli i karbonati iz vrulja (Slika 22., Slika 23.). U vruljama, u odnosu na okolno more, bile su znatno povećane koncentracije svih hranjivih soli (nitrati, nitriti, fosfati, amonijak i silikati). Osobito su bile povećane koncentracije nitrata, silikata i amonijaka. Mjerenjima je ustanovljeno da je koncentracija nitrata u vruljama u odnosu na onu u moru 10 do 50 puta veća (Tablica 3.). Također, količina ukupnog  $CO_2$ ,  $HCO_3^-$  i otopljenog  $CO_2$  bila je viša u vruljama. Međutim, zabilježena je niža količina  $CO_3^{2-}$  u vruljama nego u morskoj vodi (Tablica 4.) (Novosel et al., 2004; Novosel et al., 2012).



Slika 22. Prosječne koncentracije hranjivih soli u moru i vruljama u periodu od 27. svibnja 2002. do 21. svibnja 2003 (Novosel et al., 2012)



Slika 23. Prosječne koncentracije karbonata u moru i vruljama u periodu od 27. svibnja 2002. do 21. svibnja 2003 (Novosel et al., 2012)

Tablica 3. Prosječne koncentracije hranjivih soli  $\pm$  SD u tri vrulje i u moru (Novosel et al., 2012)

Lokalitet	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mmol/m <sup>3</sup> )	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mmol/m <sup>3</sup> )	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mmol/m <sup>3</sup> )	SiO <sub>4</sub> (mmol/m <sup>3</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mmol/m <sup>3</sup> )
Vrulje	0.102 $\pm$ 0.189	0.116 $\pm$ 0.119	9.185 $\pm$ 7.111	7.911 $\pm$ 8.316	1.757 $\pm$ 1.496
More	0.025 $\pm$ 0.013	0.105 $\pm$ 0.106	1.109 $\pm$ 0.949	1.643 $\pm$ 1.330	1.141 $\pm$ 1.299

Tablica 4. Prosječne koncentracije karbonata  $\pm$  SD u tri vrulje i u moru (Novosel et al., 2012)

Lokalitet	Ukupni CO <sub>2</sub> (mmol/l)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mmol/l)	Otopljeni CO <sub>2</sub> (mmol/l)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mmol/l)
Vrulje	2.570 $\pm$ 0.436	2.431 $\pm$ 0.479	0.044 $\pm$ 0.034	0.098 $\pm$ 0.075
More	2.270 $\pm$ 0.441	2.003 $\pm$ 0.549	0.017 $\pm$ 0.012	0.202 $\pm$ 0.081

Na stijenama unutar otvora samih vrulja utvrđeno je da, osim vrste *P. fascialis*, rastu samo druge četiri vrste. Koraste su tri vrste, a to su *Schizomavella cornuta*, *Celleporina tubulosa* i *Schizobrachiella sanguinea*. Pronađena je i jedna mala, uzdignuta i slabo kalcificirana vrsta *Bugula fulva*. Nadalje, utvrđeno je da pod utjecajem vode iz vrulja rastu i sesilni kolonijalni organizmi kao što su koralj *Eunicella cavolinii* i serpulid *Salmacina dysteri*. Samo kao epibiont na mahovnjaku *P. fascialis*, svaki puta je utvrđena vrsta *S. dysteri*. Također, unutar samog dotoka vode iz vrulja često je primijećena vrlo brojna pomična vrsta, krinoid *Antedon mediterranea* (Novosel et al., 2004; Novosel et al., 2012).

Autori zaključuju da razlozi zašto *P. fascialis* raste samo unutar odljeva vrulja na istraživanom području su visoka koncentracija CO<sub>2</sub> i bikarbonata, veća koncentracija nutrijenata te jake i stalne struje. Naime, CO<sub>2</sub> i bikarbonat važni su kao građevinski materijal za *P. fascialis*, a veća koncentracija nutrijenata stimulira veću koncentraciju fitoplanktona u području. Prolazeći kroz Velebit brojnim podzemnim kanalima i pukotinama, vrulje donose sa sobom velike količine hranjivih soli. Dakle, te hranjive soli donesene vruljama potiču veću produkciju fitoplanktona u podmorju istraživanog područja. Slatkovodni fitoplankton i organski detritus također u more donose podzemne vode. To bi moglo služiti kao hrana kolonijama *P. fascialis*. Osim toga, kolonijama vrste *P. fascialis* više hrane donose kompenzacijska pridnena strujanja morske vode. Nastanak takvog strujanja potiču snažna uzlazna strujanja uzrokovana vruljama (Cocito et al., 2004; Novosel et al., 2004; Novosel et al., 2012).



Fiziološki gledano osmoregulacijom se može objasniti utjecaj temperature na životinje prilagođene životu u bočatoj vodi. Sa smanjenjem temperature uglavnom se smanjuje permeabilnost živih membrana. Upravo ta tvrdnja može obrazložiti kako *P. fascialis* može opstati u području u blizini vrulja odnosno u bočatoj vodi te pri niskim i stalnim temperaturama. Premda je bitna osmotska regulacija, ipak je najvažnija selektivna regulacija specifičnih iona. Naime, u odsutnosti ili suvišku određenih iona integritet protoplazme ne može se očuvati (Novosel et al., 2004; Novosel et al., 2012).

### **3.5.    Zaštita vrulja**

Važnu hidrološku vezu između kopna i mora predstavlja podmorsko ispuštanje podzemnih voda (*Submarine groundwater discharge* SGD). Imenovanje ovog fenomena varira ovisno o pozadini zajednice znanstvenika koji ga opisuju. Zajednica morskih znanstvenika koji se usredotočuju na krška okruženja nazvali su ispuštanje vode „podmorskim izvorima“ ili „vrulja“ (Knee & Paytan, 2011; Moosdorf & Oehler, 2017). Dakle, kroz prirodne procese ili ljudske aktivnosti bilo koji sastojak može ući u podzemne vode te može na kraju pronaći put u obalne vode putem podmorskog ispuštanja podzemnih voda. Osim hranjivih sastojaka i metala u tragovima ti sastojci obuhvaćaju i mikrobe te otopljeni organski ugljik. Neki od tih sastojaka su relativno bezopasni međutim neki mogu ukazivati na prisutnost kanalizacija ili predstavljaju prijetnju zdravlju ljudi i ekosustava (Knee & Paytan, 2011; Szymczycha & Pempkowiak, 2015; Mulligan et al., 2019; Babu et al., 2021).

Vjerojatno će u budućnosti na količinu i kvalitetu podmorskog ispuštanja podzemnih voda utjecati klimatske promjene i razvoj obalnog zemljišta. Toplije, kišovitiije uvijete tijekom sljedećeg stoljeća predviđa većina globalnih klimatskih modela. Također, promjene temperature i oborina će se uvelike razlikovati ovisno o mjestu. Očekuje se da će povećanjem oborina doći do povećanja podmorskog ispuštanja podzemnih voda, dok bi povećanje temperature moglo povećati isparavanje, i tako smanjiti podmorsko ispuštanje podzemnih voda. O uzajamnom djelovanju ova dva efekta ovisit će promjene u količini podmorskog ispuštanja podzemnih voda te će se jako razlikovati od mjesta do mjesta (Knee & Paytan, 2011; Moosdorf & Oehler, 2017).

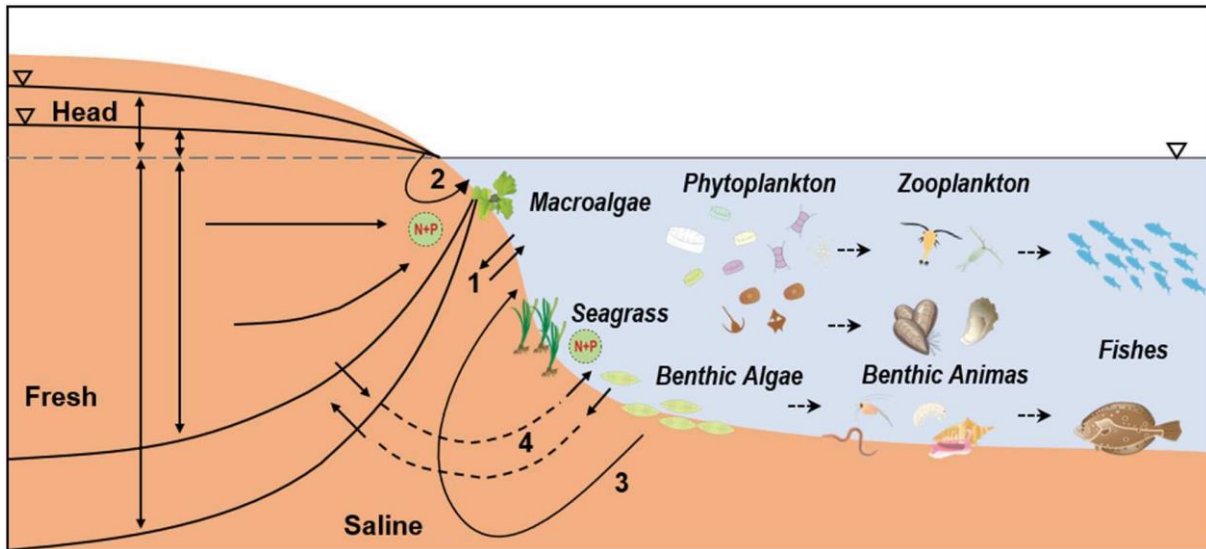
Također, očekuje se da će količinu podmorskog ispuštanja podzemnih voda smanjiti urbani razvoj. Naime, prodiranje vode u obalni vodonosni sloj spriječit će nepropusne površine koje karakteriziraju urbana područja. Uz to, u nekim područjima se crpi podzemna voda zato što velika ljudska populacija u urbaniziranim područjima ima odgovarajuće velike potrebe za vodom. Dakle, vodu iz vodonosnog sloja bi uklonilo crpljenje podzemne vode prije nego što dosegne obalu. To bi onda uzrokovalo smanjenje količine podmorskog ispuštanja podzemnih voda. Osim toga, mnogi gradovi mogu uvesti značajne količine vode i napuniti vodonosni sloj. To se može dogoditi kada voda ističe kroz cijevi koje cure i puni vodonosni sloj. Podmorsko ispuštanje podzemnih voda mogu povećati ostali načini razvoja zemljišta, poput navodnjavanja u poljoprivredi. Tada može doći do umjetnog punjenja podzemne vode ako je voda uvezena, a ne lokalno pumpana (Knee & Paytan, 2011).

Eutrofikaciju i cvjetanje mikroalgi može prouzročiti prekomjerno opterećenje hranjivim tvarima u zagađenoj podzemnoj vodi koja dolazi u obalna mora. Podmorsko ispuštanje podzemnih voda može promijeniti mikrobiološke zajednice, određivati raznolikost vrsta, rasprostranjenost, distribuciju biomase i širenje bentoskih životinja. Na primjer, bentoske zajednice u blizini slatkovodnih podmorskih izvora su često karakterizirane smanjenim bogatstvom i raznolikošću vrsta, zbog prisutnosti eurihalinih vrsta ili slatkovodnih vrsta (Mulligan et al., 2019; Taniguchi et al., 2019; Babu et al., 2021)

Temperaturu podzemne vode mogu povećati globalno zatopljenje i urbanizacija. Kao rezultat globalnih klimatskih promjena, povećane oborine mogu poboljšati kvalitetu podzemnih voda razrjeđivanjem zagađivača. Teže je predvidjeti ostale, neizravne učinke globalnih klimatskih promjena na kvalitetu podzemne vode. Na primjer, temperatura utječe na mikrobe vodonosnika, koji pak utječu na koncentracije hranjivih tvari, metala i drugih sastojaka. Promjene zemljišta ljudskim djelovanjem povezane su s kvalitetom podzemne vode kao što su visoke koncentracije hranjivih tvari i metala, prisutnost farmaceutskih proizvoda i proizvoda za osobnu njegu. Dio ovog zagađenja mogu umanjiti prirodni biogeokemijski procesi. Međutim, očekuje se da će se povećati količina štetnih tvari koja bi se podmorskim ispuštanjem podzemnih voda unijela u obalno područje (Knee & Paytan, 2011; Moosdorf & Oehler, 2017).

Ispuštanje podzemnih voda prepoznato je kao mehanizam za transport kopnenih materijala do mora. Bioekološke procese u obalnim morima mogu pokretati hranjive tvari, ugljik, metali i drugi materijali koji su otopljeni u podzemnoj vodi (Slika 24.). Recirkulirana morska voda koja

reagira unutar sedimenta vodonosnika pojačava te učinke. Podmorsko ispuštanje podzemnih voda može djelovati i kao kanal antropogenih zagađivača do obalnih regija. Osim toga, stres na lokalnu morsku biotu može uzrokovati niži salinitet i pH (Taniguchi et al., 2019).



Slika 24. Biološka proizvodnja u obalnim ekosustavima na temelju hranjivih tvari koje se donose podmorskim ispuštanjem podzemnih voda (Taniguchi et al., 2019)

Smatra se da na mnogim mjestima širom svijeta podmorsko ispuštanje podzemnih voda doprinosi obalnom ribarstvu i ekstenzivnoj akvakulturi (npr. kamenice i dagnje). Na primjer, izrazito vrijedna komercijalna vrsta je mediteranska dagnja. Prepoznato je da unos podzemne vode povećava brojnost i veličinu tijela ovih dagnji na plaži Olhos de Aqua u Portugalu. Također, važni su bili i pokusi u kavezu dagnje *Mytilus galloprovincialis* u laguni Salses-Leucate u Francuskoj. Tada je otkriveno da povoljne uvjete okoliša za brži rast osigurava ispuštanje podzemne vode. Osim toga, smatra se da ispuštanje podzemnih voda je glavni izvor hranjivih sastojaka i utječe na primarnu proizvodnju unutar ovih ekosustava. Ustanovljeno je da je podmorsko ispuštanje podzemnih voda važan čimbenik uz vulkansku obalu sjevernog Japana. Naime, bitan je čimbenik zato što pruža pogodno okruženje za fitoplanktone koji omogućavaju visoku kvalitetu školjkaša *Crassostrea nippona*, koja je komercijalno važna lokalna kamenica (Mulligan et al., 2019; Taniguchi et al., 2019; Babu et al., 2021)

Ustanovljeno je da na morsku biotu u raznim vrstama obalnih ekosustava utječe podmorsko ispuštanje podzemnih voda. Međutim, s obzirom na ekosustav razlikuju se mehanizmi pomoću kojih podmorsko ispuštanje podzemnih voda utječe na primarnu proizvodnju i na morske

životinje. To je ovisno o hidrogeografskim svojstvima poput vrsti ispuštanja podzemne vode, mjestu, prisutnim vrstama, sadržaju hranjivih sastojaka podzemne vode, protoku (Taniguchi et al., 2019).

Dakle na temelju gore napisanog može se zaključiti da su vrulje “točkasta” staništa odnosno podrazumijevaju vrlo male površine i shodno tome su ugrožena. Vrulje su ugrožene zbog onečišćenja koje dolazi u njih putem slatke vode koja se procjeđuje kroz krš. Osim toga, vrulje mogu ugroziti i nasipavanje te gradnja uz obalu. Kako bi se vrulje zaštitile i očuvale potrebno je provoditi monitoring kakvoće morske vode i slatke vode u kršu. Također, potrebno je zabraniti gradnju i nasipanje u more na mjestima gdje su vrulje te zabraniti nelegalno ostavljanje smeća u kršu pogotovo u špiljama i jamama koje mogu biti povezane s vruljama. Za zaštitu vrulja vrlo je bitno i educiranje javnosti o važnosti i specifičnosti vrulja te uspostaviti registar vrulja. Vrulje kao stanište nisu sadržane u Direktivi o staništima. One su u Hrvatskoj ugroženi stanišni tip (Bakran-Petricioli, 2007; Bakran-Petricioli, 2011).

U Uredbi o ekološkoj mreži i nadležnostima javnih ustanova za upravljanje područjima ekološke mreže (NN 80/2019) neke vrulje su svrstane kao područja očuvanja značajna za vrste i stanišne tipove. Na tom popisu je uvala Vrulja kod Brela gdje su važni grebeni i preplavljene ili dijelom preplavljene morske špilje, vrulja Plantaža i vrulja Zečica kod kojih su bitni grebeni, uvala Drašnica - vrulja gdje je bitna obalna laguna. Također, u toj Uredbi sadržan je i popis javnih ustanova koje su nadležne za upravljanje pojedinim područjima. Uvala Vrulja kod Brela i uvala Drašnica - vrulja su pod nadležnosti javne ustanove za upravljanje zaštićenim dijelovima prirode na području Splitsko-dalmatinske županije More i krš, vrulja Plantaža je pod nadležnosti Javne ustanove Park prirode Velebit, a vrulja Zečica je pod nadležnosti Nature Jadere – javne ustanove za upravljanje zaštićenim dijelovima prirode na području Zadarske županije.

Dakle, treba pozornost usmjeriti na monitoring krških izvora i vodonosnika u priobalju. Potrebno je kontrolirati njihova kvalitativna i kvantitativna stanja. Vrlo su bitna hidrološka praćenja na područjima gdje je istjecanje koncentrirano. Da bi dobili širu sliku stanja javlja se važnost praćenja dinamike kolebanja mora te razine vode u zaleđu. Da bi se mogle detektirati zone istjecanja vrulja i količina vode koja istječe potrebno je izvršiti i analizu satelitskih termalnih infracrvenih snimaka (Biondić et al., 2009).

### 3.6. Korištenje vrulja

Jedna od najvažnijih uloga vrulja mogla bi biti uloga vodnog resursa. Vrulje su bile korištene još u doba Rimljana. Oni su ih koristili na način da su uzimali vodu iz tih podmorskih izvora pomoću brodova. Dakle, oni su vrulje koristili za opskrbu pitkom vodom. Oko Sredozemlja podmorski slatkovodni izvori su obilni i učinjeni su određeni naponi da se tehnički iskoriste za pitku vodu. Međutim, veća eksploatacija podmorskih izvora obično nije uspjela zbog problema sa salinitetom (Moosdorf & Oehler, 2017).

U većini zemalja Bliskog istoka može biti prisutan ekstremni nedostatak vodnih zaliha. Primjerice Libanon se može suočiti s akutnom situacijom nestašica vode u prvim godinama novog tisućljeća. Stoga je potrebno provesti plan za pristupačne i održive mjere kao što su očuvanje, korištenje otpadnih voda, umjetno punjenje vodonosnika te posebno korištenje podmorskih izvora ili vrulja (Ghannam et al., 1998; Ayoub et al, 2001; Ayoub et al., 2002).

Poduzeta je studija za ocjenu izvedivosti iskorištavanja podmorskih izvora u uvali Chekka. Ona je bila poduzeta zato što se uvidjela važnost takvog vodnog resursa i njegov potencijalni utjecaj na lokalno područje, državu i moguće regiju. Studija je uzimala u obzir tehničke, ekonomske, društvene i ekološke aspekte projekta (Ayoub et al, 2001; Ayoub et al., 2002).

Istraživanjem je pokazano da je iskorištavanje vrulje na moru tehnički i financijski zahtjevno stoga je moguće iskorištavanje na kopnu. Dva glavna čimbenika koji kontroliraju način iskorištavanja podmorskih izvora su udaljenost od obale i dubina ispod srednje razine mora. Također, način pražnjenja vrulja je dodatni faktor koji treba uzeti u obzir (Ayoub et al, 2001; Ayoub et al., 2002).

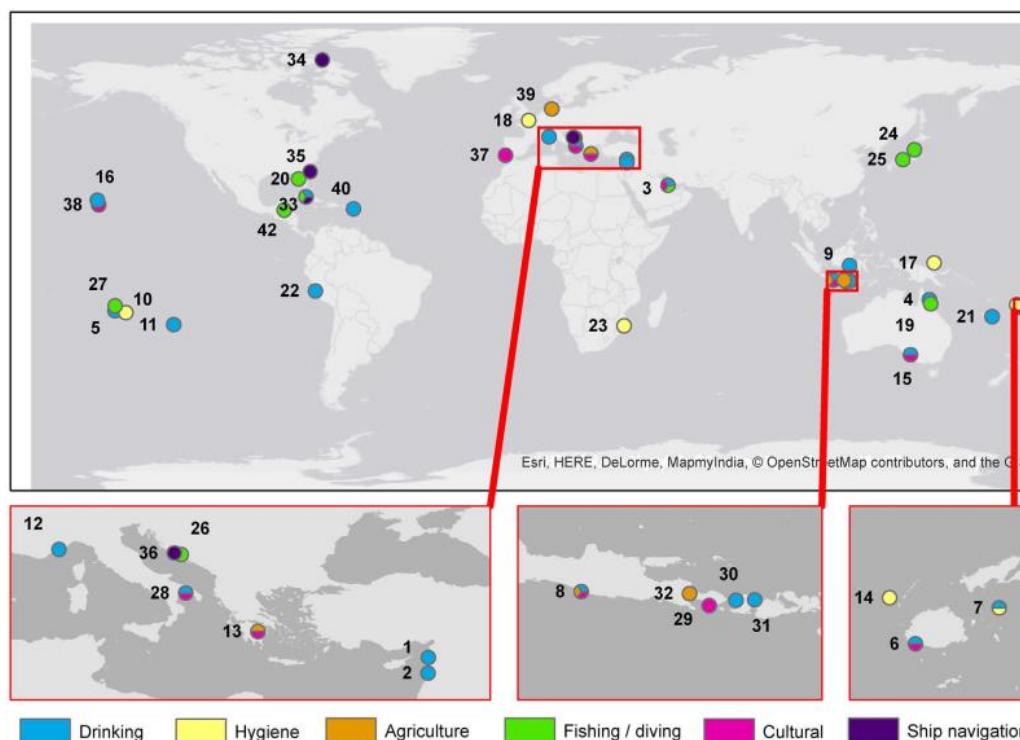
Osim toga, na izlazima podmorskih izvora prilikom ispitivanja kvalitete vode zabilježeno je značajno miješanje slatke i morske vode što je čini neprikladnom za upotrebu ako se ne pročišćava. Stoga, eksploatacija podmorskih izvora tehnički je teška i financijski skupa zbog svih tih čimbenika. Prikladnija alternativa bi bila spojiti podmorske izvore u unutrašnjosti kroz bušotine dubine od 50 do 150 m. Međutim, treba se kontrolirati takav oblik iskorištavanja te je potrebno izbjeći ulaz morske vode, što se već znalo dogoditi u određenim područjima. Uz relativno niske troškove, lokalne vještine i tehnologiju ovaj način eksploatacije se može postići (Ayoub et al., 2002).

Veći utjecaji na okoliš ne očekuju se kratkoročno. Međutim, dugoročno gledano bila bi dva utjecaja. Prvi utjecaj bio bi promjena morskog ekosustava što dovodi do gubitka određenih morskih vrsta. Drugi utjecaj bio bi ulaz morske vode zbog prekomjerne eksploatacije slatke vode. To bi u konačnici dovelo do kontaminacije slatke vode (Ayoub et al., 2002).

Podmorski izvori ili vrulje su promjenjive u pogledu kvalitete i količine te se kroz njih gubi velika količina vode u more. Svaki podmorski izvor je jedinstven i treba ga dobro poznavati da bi ga se moglo iskorištavati kao izvor pitke vode. Problem je u prevelikom salinitetu takve vode, promjenjivosti kapaciteta dotjecanja i velikom tlaku u trenucima maksimalnog izbijanja. Pogoni za desalinizaciju su skupi i mogu nanijeti štetu okolišu (Bačani & Vlahović, 2012; Gaillard, 2013).

Na nekim mjestima podmorski izvori nisu potrebni za piće, ali se još uvijek koriste za osobnu higijenu. Osim toga, postoje i brojni izvještaji o korištenju podmorskih izvora za pranje rublja. Postoji vrlo malo primjera poljoprivredne uporabe podmorskih izvora. No, u velikoj se mjeri koristi u Kiveriju u Grčkoj, gdje je voda iz podmorskog izvora pregrađena u prstenastoj strukturi u moru i koristi se za navodnjavanje. Iako je salinitet vode nizak, njezina upotreba za navodnjavanje s vremenom povećava salinitet podzemnih voda (Moosdorf & Oehler, 2017).

Također, zabilježeno je veće bogatstvo riba u blizini podmorskih izvora ili vrulja. To je povezano sa većim donosom nutrijenata putem slatke vode koja izlazi iz vrulja. Budući da je obilje riba povećano u blizini vrulja, povećava se i ulov. Stoga ribari profitiraju od tih podmorskih izvora. Također, povećani broj riba može uzrokovati veću zainteresiranost za ronilačke aktivnosti na određenim područjima. Izljev podmorskih izvora ili vrulja također ima i kulturnu vrijednost (Slika 25.). Neka društva koja žive uz obalu smatraju ih svetima te stoga imaju duhovnu važnost. Osim uloge vodenog resursa, vrulje su bile bitne i za plovidbu brodom. Stvara i održava zone bez leda, npr. u Baffin Bayu, za koji je predloženo da se koristi za arktički pomorski promet. Mjehurići i valovi povezani s podmorskim izvorima su navedeni kao opasnost za mala plovila u Jagui na Kubi te Kaštelima u Hrvatskoj gdje se podmorski izvori nalaze tri kilometra od obale (Moosdorf & Oehler, 2017).



Slika 25. Iskorištavanje podmorskog ispuštanja podzemnih voda u Svijetu (Moosdorf & Oehler, 2017)

Osim toga vuljke su bitne i u turističkom kontekstu. Naime, Hrvatska kao turistički orijentirana zemlja privlači mnoge posjetitelje te se mnogi od njih odlučuju i za ronilački turizam. Tržište ronilačkog turizma je veliko i ono stalno raste. Većina ronioaca su rekreativci, a dio njih su iskusni ronionci koji često rone s ciljem. Jedna od najpopularnijih lokacija koja je prilagođena turističkom ronjenju je na području Makarske rivijere, a to su Brela, Uvala Vuljke. Popularno je zato što je tu podmorski izvor slatke vode, spilje i podvodni kanjon te prisutnost jedinstvenih biljnih i životinjskih vrsta (Zurak, 2016; Tomljenović et al., 2018). Također, na području podvelebitskog kanala i Novigradskog mora prisutne su morske vuljke. More na tim područjima je toplo i čisto te su stoga pogodna za kupanje. Zbog podmorskih izvora ili vuljka ta mora onda omogućuju i potrebno osvježanje tijekom sušnih i vrućih ljetnih mjeseci (Matassi et al., 2013).

Također, vuljke imaju i znanstveni potencijal. Naime brojni znanstvenici i istraživači dolaze na lokacije vuljka kako bi proveli svoja istraživanja. Oni mogu provoditi monitoring vode na području vuljka. Osim toga, ukoliko su vuljke ujedno i spilje mogu se provoditi i ekspedicije speleoronilačkih udruga (Slika 26.). Jedna takva ekspedicija provedena je u Hrvatskoj te su se istraživale vuljke Zečica i Modrič (Vasseur, 2019).



Slika 26. Ronjenje u kanalu vrulje Modrič (Vasseur, 2019)

Također, vrulje imaju bitnu ulogu i u marikulturi. Duž obale podvelebitskog kanala i Novigradskog mora izvire podmorski izvori ili vrulje. One izvire zbog djelovanja krških površinskih i podzemnih voda. Upravo zbog toga ta područja su prikladna za uzgoj školjkaša te su njihova uzgajališta prisutna na nekoliko lokacija (Matassi et al., 2013; Župan & Šarić, 2014). Tijekom istraživanja zabilježeno je da kunjka *Arca noae* naseljava u većem broju područja gdje je povećan dotok slatke vode odnosno gdje su prisutne vrulje (Župan, 2012).

Osim toga, podmorski izvori ili vrulje su prisutne i u Limskom kanalu. One tu uzrokuju smanjeni salinitet koji također oscilira ovisno o godišnjem dobu i dubini. Na tom području primijećeno je povećano obilje morskog biljnog i životinjskog svijeta. Također, to područje je i prirodno mrjestilište za neke vrste riba. Najproduktivniji dio zaljeva je njegov plići dio zato što je on pod jakim djelovanjem podzemnih voda koje donose organsku tvar. Upravo zbog toga na tom plićem dijelu je uspostavljen intenzivan uzgoj kamenica i dagnji, a uzgoj riba je razvijen u dubljem dijelu zaljeva (Župan & Šarić, 2014; Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, 2015).



## 4. ZAKLJUČAK

Vrulje ili podmorski izvori slatke vode predstavljaju fenomen zbog njihovog nastanka, hidrogeloških i stanišnih karakteristika. Mogu biti oblika sita ili jame te u njima živi mali broj vrsta koje mogu biti podvrgnute slanom šoku. Vrulje se na površini mora mogu zamijetiti po koncentričnim krugovima, a ponegdje je prisutno i bubrenje. Upravo zbog tog bubrenja može izgledati kao da more vrije u središnjem dijelu.

Diljem svijeta možemo naići na ovaj fenomen podmorskih izvora, a najčešći i najveći su na području Mediterana. Mnogo vrulja ima i u Hrvatskoj, a to je posljedica geološkog razvoja Jadranskog mora. Brojne vrulje prisutne su na području Velebitskog kanala. Tu se nalaze i dvije važne vrulje, a to su Vrulja Zečica i Vrulja Modrič. One su ujedno i špilje te djeluju kao potopljeni izvori. Također, vrulje su prisutne i u jugoistočnom dijelu Bakarskog zaljeva. Važne su vrulje i u Kaštelanskom zaljevu, a to su Arbanija i Slatina koje se aktiviraju tijekom kišnog razdoblja. Osim toga, podnožje planine Biokova karakteriziraju vrulje. Tu se nalazi velika vrulja u uvali Dubci kod Brele.

Na podmorsko ispuštanje podzemnih voda mogu utjecati brojni procesi. Neki od njih su plima i oseka, valovi i visinske razlike. Također, bitan je i utjecaj procesa koji su endogene prirode. Smatra se da su tlak i propusnost glavni čimbenici koji određuju tok podmorskog ispuštanja podzemnih voda. Također, važan je i hidraulički gradijent te brzina obnavljanja kopnene podzemne vode.

Bogat i raznolik svijet je prisutan oko vrulja. Na stijenama oko vrulja mogu živjeti žarnjaci, dagnje i kamenice. Od pokretnih organizama u vruljama su bile uočene jegulje i glavoči. Ustanovljeno je da oko vrulja rastu i mahovnjaci *Pentapora fascialis* i serpulidi *Salmacina dysteri*. Vrulje mogu utjecati na okolno područje tako što mijenjaju salinitet, pH, temperaturu, količinu hranjive tvari i sedimenata. Također, vrulje mogu i utjecati na morfološka obilježja na morskom dnu.

Vrulje su jako ugrožena i krhka staništa. Naime, u vrulje ulazi slatka voda koja putuje kroz krš, a ona može biti onečišćena raznim sastojcima koji mogu uzrokovati prijetnju zdravlju ljudi i

ekosustava. Neke vrulje su bitna kao područja očuvanja za određene vrste i stanišne tipove. Zbog toga je bitno zaštititi i očuvati vrulje.

Vrulje se mogu koristiti kao vodeni resurs. U državama gdje je zabilježena nestašica vode može se provoditi iskorištavanje vrulja za pitku vodu. No problem se javlja jer su vrulje promjenjive što se tiče kvalitete i količine. Problem predstavlja i salinitet vode te pogoni za desalinizaciju koji mogu biti skupi i prouzrokovati štetu u okolišu. Na nekim mjestima vrulje se koriste za osobnu higijenu, pranje rublja, u poljoprivredi za navodnjavanje. Osim toga, oko vrulja je zamijećeno veće obilje riba pa se povećava ulov na određenim područjima. Ponegdje vrulje smatraju svetima te imaju duhovnu važnost. Značaj vrulja je i u turističkom kontekstu zbog ronilačkog turizma i kupanja. Vrulje imaju i znanstveni potencijal te se na njihovim lokacijama mogu provoditi razna istraživanja. Vrlo bitna uloga vrulja je u marikulturi. Naime, područja koja obiluju vruljama pogodna su za uzgoj školjkaša i riba.

## 5. POPIS LITERATURE

1. Ayoub, G., Khoury, R., Ghannam, J., Acra, A., & Hamdar, B. (2001). Submarine Springs as an Alternative Water Resource: A Field Investigation. In *Bridging the Gap: Meeting the World's Water and Environmental Resources Challenges*, 1-10.
2. Ayoub, G., Khoury, R., Ghannam, J., Acra, A., & Hamdar, B. (2002). Exploitation of submarine springs in Lebanon: assessment of potential. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 51(1), 47-64.
3. Babu, D. S., Khandekar, A., Bhagat, C., Singh, A., Jain, V., Verma, M., Bansal, B. K. & Kumar, M. (2021). Evaluation, effect and utilization of submarine groundwater discharge for coastal population and ecosystem: A special emphasis on Indian coastline, *Journal of Environmental Management*, 277.
4. Bačani, A. & Vlahović, T., (2012). *Hidrogeologija – Primjena u graditeljstvu, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Tiskara Zelina d.d., Split.*
5. Bakalowicz, M. (2018). Coastal karst groundwater in the Mediterranean: A resource to be preferably exploited onshore, not from karst submarine springs, *Geosciences*, 8, 258.
6. Bakalowicz, M., Fleury, P., Jouvencel, B., Promé, J. J., Becker, P., Carlin, T., Dörfliger, N., Seidel, J. L. & Sergent, P. (2003). Coastal karst aquifers in Mediterranean regions. 2. A methodology for exploring, exploiting and monitoring submarine springs. In *TIAC: Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros*.
7. Bakken, T. H., Ruden, F., & Mangset, L. E. (2011). Submarine Groundwater: A New Concept for the Supply of Drinking Water. *Water Resources Management*, 26 (4), 1015–1026.

8. Bakran-Petricioli, T. & Petricioli, D. (2008). Habitats in submerged karst of Eastern Adriatic coast – Croatian natural heritage, *Croat Med J.*, 49 (4), 455-458.
9. Bakran-Petricioli, T. (2011). Priručnik za određivanje morskih staništa u Hrvatskoj prema Direktivi o staništima EU. Državni zavod za zaštitu prirode, Zagreb, 177.
10. Bakran-Petricioli, T., (2007). Morska staništa – Priručnik za inventarizaciju i praćenje stanja, Denona d.o.o., Zagreb.
11. Benac, Č., Rubinić, J. & Ožanić, N. (2003). The origine and evolution of coastal and submarine springs in Bakar bay. *Acta carsologica*, 32 (1), 157-171.
12. Biondić, R., Biondić, B., Rubinić, J., Meaški, H., Kapelj, S., & Tepeš, P. (2009). Ocjena stanja i rizika cjelina podzemnih voda na krškom području u Republici Hrvatskoj, Završno izvješće, Arhiv Geotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Varaždin.
13. Bonacci, O. (1987). Karst hydrology: with special reference to the Dinaric karst, Springer Science & Business Media, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
14. Bonacci, O. (2015). Karst hydrogeology/hydrology of dinaric chain isles, *Environmental Earth Sciences*, 74, 37-55.
15. Burnett, W. C., Aggarwal, P. K., Aureli, A., Bokuniewicz, H., Cable, J. E., Charette, M. A., Kontar, E., Krupa, S., Kulkarni, K. M., Loveless, A., Moore, W. S., Oberdorfer, J. A., Oliviera, J., Ozyurt, N., Povinec, P., Privitera, A. M. G., Rajar, R., Ramessur, R. T., Scholten, J., Stieglitz, T., Taniguchi, M. & Turner, J. V. (2006). Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods. *Science of the total Environment*, 367(2-3), 498-543.
16. Burnett, W. C., Bokuniewicz, H., Huttel, M., Moore, W. S. & Taniguchi, M. (2003). Groundwater and pore water inputs to the coastal zone, *Biogeochemistry*, 66 (1), 3-33.

17. Carruthers, T. J. B., Van Tussenbroek, B. I., & Dennison, W. C. (2005). Influence of submarine springs and wastewater on nutrient dynamics of Caribbean seagrass meadows. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 64(2-3), 191-199.
18. Cocito, S., Novosel, M. & Novosel, A. (2004). Carbonate bioformations around underwater freshwater springs in the north-eastern Adriatic Sea, *Facies*, 50 (1), 13-17.
19. Cocito, S., Novosel, M., Novosel, A., Peirano, A., & Sgorbini, S. (2004). Occurrence of carbonate bioconstructions around vruljas in the north-east Adriatic Sea. *Biologia Marina Mediterranea*, 11, 416-418.
20. Cocito, S., Novosel, M., Pasarić, Z. & Key Jr., M. M. (2006). Growth of the bryozoan *Pentapora fascialis* (Cheilostomata, Ascophora) around submarine freshwater springs in the Adriatic Sea, *Linzer biol. Beitr.*, 38/1, 15-24.
21. Cotecchia, V. & Frederico, A. (1983). On an approximate evaluation of the mass flow rate of submarine springs, *Geologica Applicata e Idrologia*, 18 (Part II), 253-255.
22. Dimova, N., T., Burnett, W., C. & Speer, K. (2011). A natural tracer investigation of the hydrological regime of Spring Creek Springs, the largest submarine spring system in Florida, *Continental Shelf Research*, 31, 731-738.
23. Dörfliger, N, Fleury, P., Balakowicz, M., el Hajj, H., al Charideh, A. & Ekmekci, M. (2009). Specificities of coastal karst aquifers with the hydrogeological characterisation of submarine springs – overview of various examples in the Mediterranean basin, *Sustainability of the karst environment: Dinaric karst and other karst regions*, 41-47.
24. Elhatip, H. (2003). The use of hydrochemical techniques to estimate the discharge of Ovacik submarine springs on the Mediterranean coast of Turkey, *Environmental Geology*, 43, 714-719.
25. Fleury, P., Bakalowicz, M. & de Marsily, G. (2007). Submarine springs and coastal karst aquifers: A review, *Journal of Hydrology*, 339, 79-92.

26. Fritz, F. & Bahun, S. (1997). The morphogenesis of submarine springs in the Bay of Kaštela, Croatia, *Geologia Croatica*, 50 (1), 105-110.
27. Fujita, K., Shoji, J., Sugimoto, R., Nakajima, T., Honda, H., Takeuchi, M., Tominaga, O. & Taniguchi, M. (2019). Increase in fish production through bottom-up trophic linkage in coastal waters induced by nutrients supplied via submarine groundwater. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 82.
28. Gaillard, T. (2013). Submarine springs: an alternative to desalination?, *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*.
29. Ghannam, J., Ayoub, G. M., & Acra, A. (1998). A profile of the submarine springs in Lebanon as a potential water resource. *Water international*, 23(4), 278-286.
30. Knee, K., & Paytan, A. (2011). Submarine groundwater discharge: a source of nutrients, metals, and pollutants to the Coastal Ocean, *Treatise Estuar. Coast. Sci*, 4, 205-234.
31. LaMoreaux, P. E. & Tanner, J. T. (2001). Springs and bottled waters of the world: ancient history, source, occurrence, quality and use. Springer Science & Business Media, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
32. Lilkendey, J., Pisternick, T., Neumann, S. I., Dumur Neelayya, D., Bröhl, S., Neehaul, Y., & Moosdorf, N. (2019). Fresh submarine groundwater discharge augments growth in a reef fish. *Frontiers in Marine Science*, 6, 613.
33. Lovrić, A. Z. (1974). Zonation and succession in brackish environments of the Eastern Adriatic. *Hydrobiological Bulletin*, 8 (1), 166-171.
34. Matassi, J., Kevrić, V., Peričić, S., Krc Miočić, B., Razović, M., Klarin, T., Magaš, D., Brkić-Velmejka, J., Krajnović, A. (2013). Glavni plan razvoja turizma Zadarske županije 2013.-2023., Zadarska županija, Turistička zajednica Zadarske županije

35. Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja (2015). Elaborat zaštite okoliša, Ocjena o potrebi procjene utjecaja zahvata na okoliš, Povećanje kapaciteta uzgajališta u Lirskom kanalu na 500 t, Oikon d.o.o., Institut za primijenjenu ekologiju, <[https://mingor.gov.hr/UserDocsImages//ARHIVA%20DOKUMENATA/ARHIVA%20---%20OPUO/2015/elaborat\\_zastite\\_okolisa\\_475.pdf](https://mingor.gov.hr/UserDocsImages//ARHIVA%20DOKUMENATA/ARHIVA%20---%20OPUO/2015/elaborat_zastite_okolisa_475.pdf)>, [02.09.2021.]
36. Moore, W. S. (2009). Submarine Groundwater Discharge. Encyclopedia of Ocean Sciences, 551–558.
37. Moosdorf, N., & Oehler, T. (2017). Societal use of fresh submarine groundwater discharge: An overlooked water resource. Earth-Science Reviews, 171, 338-348.
38. Mulligan, A., E., Charette, M., A., Tamborski, J., J. & Moosdorf, N. (2019). Submarine Groundwater Discharge, Encyclopedia of Ocean Sciences, third edition, Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Volume 6, Elsevier, Netherlands, 108-119.
39. Novosel, M., Bakran-Petricioli, T., Požar-Domac, A., Kružić, P., & Radić, I. (2002). The benthos of the northern part of the Velebit Channel (Adriatic Sea, Croatia). Natura Croatica: Periodicum Musei Historiae Naturalis Croatici, 11(4), 387-409.
40. Novosel, M., Novosel, A., Požar-Domac, A., Pasarić, M., Olujić, G. (2012). Utjecaj vrulja na rast vrste *Pentapora fascialis* (Bryozoa) u Velebitskom kanalu. Prirodoslovna istraživanja riječkog područja, 237-243.
41. Novosel, M., Olujić, G., Cocito, S. & Požar-Domac, A. (2004). Submarine freshwater springs in the Adriatic Sea: a unique habitat for the bryozoan *Pentapora facialis*, Bryozoan studies, AA Balkerma Publisher, Lisse.
42. Pisternick, T., Lilkendey, J., Audit-Manna, A., Dumur Neelayya, D., Neehaul, Y., & Moosdorf, N. (2020). Submarine groundwater springs are characterized by distinct fish communities. Marine Ecology, 41(5).

43. Starke, C., Ekau, W., & Moosdorf, N. (2020). Enhanced productivity and fish abundance at a submarine spring in a coastal lagoon on Tahiti, French Polynesia. *Frontiers in Marine Science*, 6, 809.
44. Surić, M. & Juračić, M. (2010). Late Pleistocene-Holocene environmental changes – records from submerged speleotherms along the Eastern Adriatic coast (Croatia), *Geologia Croatica*, 63/2, 155-169.
45. Surić, M. (2005). Submerged karst – dead or alive? Examples from the eastern Adriatic coast (Croatia), *Geoadria*, 10, 1, 5-19.
46. Surić, M., Juračić, M. & Horvatinčić, N. (2004). Comparison of  $^{14}\text{C}$  and  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  dating of speleothems from submarine caves in the Adriatic Sea (Croatia), *Acta carsologica*, 33 (2), 239-248.
47. Surić, M., Lončarić, R., Buzjak, N., Schultz, S., T., Šangulin, J., Maldini, K. & Tomas, D. (2015). Influence of submarine groundwater discharge on seawater properties in Rovanjaska-Modrič karst region, *Environmental Earth Sciences*, 74, 7, 5625-5638.
48. Szymczycha, B., & Pempkowiak, J. (2015). The role of submarine groundwater discharge as material source to the Baltic Sea. Springer.
49. Štirn, J., Kralj, Z., Richter, M. & Valentinčić, T. (1969). Prilog poznavanju jadranskog koraligena. *Thalassia Jugosl.*, 5: 369-376.
50. Taniguchi, M., Dulai, H., Burnett, K. M., Santos, I. R., Sugimoto, R., Stieglitz, T., Kim, G., Moosdorf, N. & Burnett, W. C. (2019). Submarine groundwater discharge: updates on its measurement techniques, geophysical drivers, magnitudes, and effects. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 141.
51. Tomljenović, R., Krešić, D., Boranić Živoder, S., Kunst, I. & Čorak, S. (2018). Glavni plan razvoja turizma Splitsko-dalmatinske županije (2017 – 2027) sa strateškim i operativnim planom marketinga, Turistička zajednica Splitsko-dalmatinske županije



52. Uredba o ekološkoj mreži i nadležnostima javnih ustanova za upravljanje područjima ekološke mreže (Narodne novine br. 80/2019)
53. Vasseur, F. (2019). Ekspedicije speleoroničke udruge PlongeeSout u Hrvatskoj 2013-2015., *Subterranea Croatica*, 17, 1, 2-11.
54. Zektzer, I., S., Ivanov, V., A. & Meskheteli, A., V. (1973). The problem of direct groundwater discharge to the seas, *Journal of Hydrology*, 29, 1-36.
55. Zurak, J. (2016). Aktivan turizam na hrvatskoj obali i otocima, završni rad, Sveučilište u Zadru.
56. Župan, I. (2012). Integralni uzgoj dagnje (*Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819) i kunjke (*Arca noae* Linnaeus, 1758) na uzgajalištima riba (Doctoral dissertation, Doktorska disertacija, Sveučilište u Splitu i Sveučilište u Dubrovniku).
57. Župan, I. & Šarić, T. (2014). Growth and condition index – two important factors in mussel farming. *MESO: Prvi hrvatski časopis o mesu*, 16 (3), 275-278.