

# Podzemne vode Jadranskog vodnog područja

---

**Novak, Vlatka**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

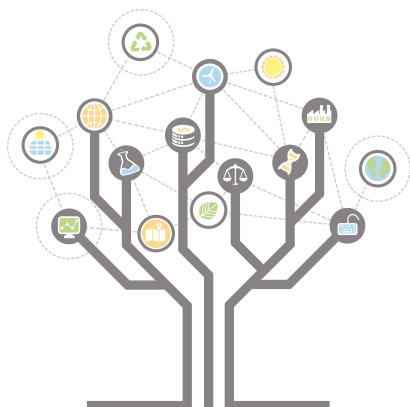
**2017**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:596622>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-13**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



# Podzemne vode Jadranskog vodnog područja

---

**Novak, Vlatka**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:596622>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2020-11-04**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET**

**VLATKA NOVAK**

**PODZEMNE VODE JADRANSKOG VODNOG PODRUČJA**

**ZAVRŠNI RAD**

**VARAŽDIN, 2017.**



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET**

**ZAVRŠNI RAD**

**PODZEMNE VODE JADRANSKOG VODNOG PODRUČJA**

**KANDIDAT:**

**Vlatka Novak**

**MENTOR:**

**prof. dr. sc. Ranko Biondić**

**VARAŽDIN, 2017.**



Sveučilište u Zagrebu  
Geotehnički fakultet



## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnica: VLATKA NOVAK

Matični broj: 2302 - 2013./2014.

### NASLOV ZAVRŠNOG RADA:

PODZEMNE VODE JADRANSKOG VODNOG PODRUČJA

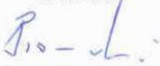
- Rad treba sadržati:
1. Uvod
  2. Glavna obilježja podzemnih krških terena
  3. Metode istraživanja
  4. Značajke podzemnih voda Jadranskog vodnog područja
  5. Zaštita voda
  6. Zaključak
  7. Literatura
  8. Popis slika

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

Zadatak zadan: 03.07.2017.

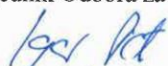
Rok predaje: 08.09.2017.

Mentor:

  
Prof.dr.sc. Ranko Biondić



Predsjednik Odbora za nastavu:

  
Doc.dr.sc. Igor Petrović

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom

### **Podzemne vode Jadranskog vodnog područja**

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **prof.dr.sc.Ranka Biondića**. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 08.09.2017.

\_\_\_\_\_  
Vlatka Novak

(Ime i prezime)

\_\_\_\_\_  
*Ranka Vlatka*

(Vlastoručni potpis)

## Sažetak

Krš je specifičan krajolik uglavnom razvijen u karbonatnim stijenama, a podrazumijeva razvoj specifične podzemne morfologije i vodonosnika u podzemnim špiljama. Hrvatska spada u mediteransku zemlju s prostranim krškim područjima u planinskom i jadranskom dijelu državnog teritorija, ali je krš u Hrvatskoj pretežito vezan za geološke strukture Dinarida u čijoj građi prevladavaju karbonatne stijene.

Jadransko vodno područje obuhvaća kopno Republike Hrvatske, uključujući otoke, s kojeg vode površinskim ili podzemnim putem otječu u Jadransko more te pripadajuće prijelazne i priobalne vode. Kopneni dio obuhvaća niz slivova jadranskih rijeka i površine kopna bez površinskog otjecanja.

Temeljne značajke krških slivova su prostrane zone prikupljanja vode u planinskim područjima vrlo bogatim oborinama i vrlo složeni uvjeti izviranja na kontaktima okršenih vodopropusnih karbonatnih vodonosnika i vodonepropusnih klastičnih stijena, ili pod uspornim djelovanjem mora. Tokovi podzemne vode vezani su za pukotinske sustave, relativno su velike brzine podzemnih tokova i amplitude istjecanja krških izvora.

U svrhu istraživanja podzemnih voda primijenjuju se razne metode istraživanja od kojih su najznačajnije trasiranje podzemnih tokova, hidrokemijske metode istraživanja, monitoring, izotopna istraživanja, geofizička istraživanja te metoda istražnog bušenja i ispitivanja u bušotinama. Kako se podzemne vode ponajprije iskorištavaju za javnu vodoopskrbu njihova se kakvoća uglavnom ocjenjuje prema pokazateljima definiranim *Pravilnikom o parametrima sukladnosti i o metodama analize vode za ljudsku potrošnju*.

**Ključne riječi:** *podzemna voda, jadransko vodno područje, krški vodonosnik, metode istraživanja podzemnih tokova*



## SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. GLAVNA OBILJEŽJA PODZEMNIH KRŠKIH TERENA</b> .....	2
2.1. Litološka svojstva karbonatnih stijena.....	2
2.2. Tipovi krških vodonosnika .....	3
2.3. Procesi okršavanja .....	3
2.4. Podzemne geomorfološke karakteristike krških terena.....	4
<b>3. METODE ISTRAŽIVANJA</b> .....	5
3.1. Izrada programa hidrogeoloških istraživanja .....	5
3.2. Trasiranja podzemnih tokova .....	5
3.3. Hidrokemijske metode istraživanja .....	9
3.3.1. Prirodne vode.....	10
3.3.2. Onečišćivala krških voda.....	12
3.3.3. Monitoring.....	14
3.4. Metode izotopnih istraživanja .....	14
3.5. Metode geofizičkih istraživanja .....	16
3.6. Istražno bušenje i ispitivanja u bušotinama .....	19
<b>4. ZNAČAJKE PODZEMNIH VODA JADRANSKOG VODNOG PODRUČJA</b> . 21	
4.1 Opis vodnog područja.....	22
4.1.1. Geografski položaj .....	22
4.1.2. Prirodna obilježja.....	23
4.1.2.1. Geološke, litološke i pedološke značajke .....	23
4.1.2.2. Klimatske karakteristike .....	23

4.1.2.3. Zemljišni pokrov .....	24
<b>4.2 Prirodne značajke voda.....</b>	<b>24</b>
4.2.1. Podzemne vode.....	24
4.2.1.1. Hidrogeološke značajke područja .....	24
4.2.1.2. Prirodna ranjivost vodonosnika .....	25
4.2.1.3. Zalihe podzemnih voda.....	27
4.2.1.4. Kakvoća podzemnih voda prema <i>Pravilniku o parametrima sukladnosti i o metodama analize vode za ljudsku potrošnju</i> .....	27
4.2.1.5. Vodna tijela podzemnih voda.....	29
<b>5. ZAŠTITA VODA .....</b>	<b>31</b>
<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>33</b>
<b>7. LITERATURA .....</b>	<b>34</b>
<b>8. POPIS SLIKA.....</b>	<b>36</b>

## 1. UVOD

Krš podrazumijeva specifičan krajolik i morfološke oblike koji su uglavnom razvijeni u karbonatnim stijenama, ali uključuje i razvoj specifične podzemne morfologije i vodonosnika u podzemnim špiljama [1]. Nastaje otapanjem vapnenca vodom koja u sebi sadrži ugljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ), pritom se kalcijev karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) pretvara u kalcijev hidrogenkarbonat ( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ) te na taj način nastaju podzemne i nadzemne pojave u kršu [2].

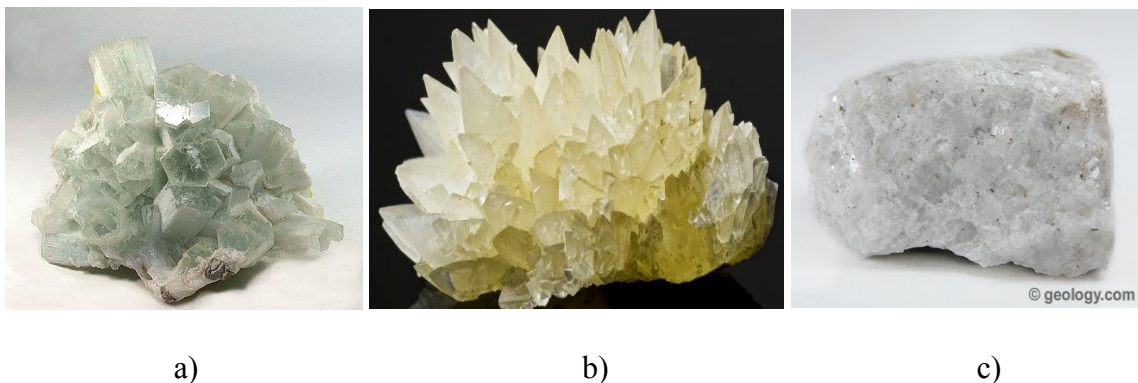
Hrvatska spada u mediteransku zemlju s prostranim krškim područjima u planinskom i jadranskom dijelu državnog teritorija, ali je krš u Hrvatskoj pretežito vezan za geološke strukture Dinarida u čijoj građi prevladavaju karbonatne stijene. Tipično karbonatno krško područje pokriva gotovo 50% ukupnog kopnenog dijela Hrvatske i jadranske otoke te je gotovo polovica svih resursa podzemne vode vezana za krške vodonosnike [1].

Krški vodonosnici važni su za održavanje vodoopskrbnih sustava u cijelom području Dinarida što podrazumijava cjelokupnu jadransku obalu te neke gradove u unutrašnjosti. Oni predstavljaju stratešku rezervu pitke vode te osiguravaju njenu kvalitetu, a također su važni za razvoj turizma u jadranskom obalnom području [1].

## 2. GLAVNA OBILJEŽJA PODZEMNIH KRŠKIH TERENA

### 2.1. Litološka svojstva karbonatnih stijena

Karbonatne su stijene jednostavnog mineraloškog sastava u kojem prevladavaju karbonatni minerali u kombinaciji s dvovalentnim kationima karbonatnih radikalakala [3]. Tri glavna sastojka karbonatnih stijena su aragonit, kalcit i dolomit (slika 1). Aragonit je uglavnom čisti kalcijev karbonat s vrlo malim udjelom Mg i u tragovima Ba, Sr, Pb i K. Kalcit je kalcijev karbonat, ali znatno podložniji ionskoj izmjeni u odnosu na aragonit. Često dolazi do izmjena Ca i Mg. Dolomit je mineral sekundarnog podrijetla nastao potiskivanjem  $\text{CaCO}_3$  u vapnenačkim muljevima ili očvrslulim vapnencima [4]. Sastojci karbonatnih stijena su i nekarbonatni materijal poput detritusa i drugih dijagenetskih komponenata.



Slika 1. Sastojci karbonatnih stijena: a) aragonit [5]; b) kalcit [6]; c) dolomit [7]

Opće klasifikacije karbonatnih stijena temelje se na relativnom odnosu karbonatnog i nekarbonatnog sadržaja, a označuju se kao sedimenti koji sadrže više od 50 % karbonatnih minerala. Vapnenac podrazumijeva stijenu koja sadži više od 90% kalcijeva karbonata [1]. Često korištena klasifikacija karbonatnih stijena je ona prema Dunhamu, a bazira se na trima glavnim svojstvima: prisutnost ili odsutnost mikrita, složenost alokemijskih konstituenata u stijeni te prisutnost organskih ostataka u stijeni. Početna podjela povezana je s utvrđivanjem originalnih sedimentacijskih tekstura. Ako je sedimentacijska tekstura prekrivena dijagenezom stijena se naziva kristalinični karbonat, a ako su vidljive tekture s organskih ostacima boundstone. Karbonatne se

stijene klasificiraju ovisno o prisutnosti ili nedostatku mikrita ukoliko nema ostataka iz vremena sedimentacije. Stijene bez mikrita nazivaju se grainstone, a s mikritom packstone. Stijena se naziva wackestone ako u mikritu plivaju zrna, a ukoliko je zrna manje od 10 % stijena se naziva mudstone [1].

## **2.2. Tipovi krških vodonosnika**

Sekundarna, pukotinska poroznost osnovno je obilježje karbonatnih krških terena i unutar njih formiranih vodonosnika. Pukotinski sustavi disolucijskim radom vode mogu ponekad biti prošireni do dimenzija kanala pa i velikih špiljskih prostora. Krški procesi znatno mijenjaju prvotne pukotinske sustave karbonatnih masiva izgrađujući područja specifičnih obilježja. Od tih obilježja razlikuje se opći nedostatak stalnih površinskih tokova uz postojanje ponora, krških polja i ostalih krških formi; česte pojave kaverni i podzemnih kanala; postojanje velikih krških stalnih i povremenih izvora te razvoj specifičnog okoliša koji je obično vrlo oštih morfoloških oblika [1].

## **2.3. Proces i okršavanja**

Procesi okršavanja karbonatnih stijena imaju odlučujuće značenje u formiranju krških vodonosnika kao i krškog okoliša općenito. Predispozicija procesa okršavanja predstavljaju intenzivno razlomljene karbonatne stijene što je posljedica tektonskih pokreta u geološkoj prošlosti Zemlje. Dubinski prodori okršavanja vezani su uz širenje pukotinskih sustava kemijskim radom vode. Kada se govori o karbonatnim stijena uglavnom se misli na vapnenice i dolomite te njihove prijelazne oblike ovisno o sadržajau Ca i Mg komponente. U kompleksu karbonatnih stijena prevladavaju vapnenci sastavljeni pretežno od kalcita ( $\text{CaCO}_3$ ), ali i od drugih sastojaka poput minerala glina, silikata, bitumena i dr. Različiti varijeteti vapnenca različito se troše kemijskim djelovanjem vode. Što su vapnenci čistiji podložniji su okršavanju. Topljenje karbonatnih stijena zapravo je dezintegracija različitih minerala u zasebne ione ili molekule koji difuzno prelaze u vodene otopine. Razlog različitog stupnja razvoja krških procesa je različita topivost minerala u vodi [1].

#### **2.4. Podzemne geomorfološke karakteristike krških terena**

Podzemni krški morfološki oblici rezultat su nastavka krških procesa s površine terena u podzemlje gdje voda svojim djelovanjem proširuje pukotinske sustave i rasjede do dimenzija većih kaverni koje mogu doseći goleme dimenzije. Podzemni krški oblici čest su uzrok formiranja karakterističnog površinskog reljefa. Podzemni krški morfološki oblici u odnosu na površinu terena dijele se na jame i špilje. Jame su vertikalne do subvertikalne podzemne šupljine koje najvećim dijelom sežu do podzemne vode dok su špilje horizontalne i subhorizontalne šupljine čije prostiranje može doseći stotine kilometara duljine s više ulaznih šupljina s površine terena. Podzemne morfološke forme u krškim poručjima su i sekundarne tvorevine nastale naknadnim radom vode odnosno sigasti ukrasi špilja i jama nastali odlaganjem kalcijeva karbonata iz procjednih voda. Sige su prirodne tvorevine koje nastaju isključivo u nesaturiranim dijelovima krških vodonosnika. Dijele se na stalaktite i stalagmite te stalagnate, kalcitne stupove kada se stalaktiti i stalagmiti spoje [1].

### **3. METODE ISTRAŽIVANJA**

#### **3.1. Izrada programa hidrogeoloških istraživanja**

Izrada programa i koncepcije hidrogeoloških istraživanja ključno je za vođenje i konačnu izradu projekta. Svaki projekt istraživanja vodnih resursa originalan je kroz definiranje ciljeva i načina pronalaznja odgovarajućih rješenja. Kako su krški vodonosnici vrlo heretogenih i nepredvidljivih prirodnih uvjeta nemoguće je propisati metode istraživanja. Predmet hidrogeoloških istraživanja može biti od izrade planova upravljanja vodama, pronalaznje novih izvora pitke vode, zaštite krških vodonosnika, izgradnja hidroenergetskih objekata, odvodnje autocesta, rješavanje problema utjecaja mora, do izgradnje dubokih podzemnih prostora različitih namjena i dr. U studijama je potrebno podzemne i površinske vode promatrati kao jedinstven sustav, a posebno kada je riječ o krškim vodonosnicima gdje ista voda može u više navrata izvirati i ponirati unutar jedinstvenog vodonosnog sustava [1].

#### **3.2. Trasiranja podzemnih tokova**

Trasiranja podzemnih tokova spadaju u najefikasnije metode istraživanja krških vodonosnika. Točni su pokazatelji brzina i smjerova podzemnih tokova u određenim hidrološkim uvjetima. Trasiranjem podzemnih tokova određuju se granični uvjeti vodonosnika, dinamike podzemne vode i glavnih drenažnih usmjerenja unutar vodonosnika. Tradicionalno trasiranje izvodi se umjetnim traserima i različitim kemikalijama koje se nakon višednevnog puta krškim podzemljem mogu detektirati u izvorskim vodama. Razvojem hidrogeokemijske analitičke tehnologije koriste se prirodni ili okolišni traseri. Bitna činjenica vezana za traser jest da nije opasan za zdravlje čovjeka, ne mijenja miris i okus podzemne vode, relativno se lako identificira u velikim razrjeđenjima, ne stvara štetne produkte te je dostupan na tržištu. Umjetni se traseri dijele na topive i netopive u vodi [1].

Od topivih trasera najčešće se upotrebljavaju različite fluorescentne boje i soli. Umjetni traser korišten najviše u svijetu i području Dinarida je Na- fluorescein ili uranin (slika 2). Ostali fluorescentni traseri koji se koriste su eozin, sulfrodamin, amidorodamin, rodamin, pyranin, naftionat i tinopal. Soli koje se koriste kao umjetni

traseri su natrijeve, kalijeve, litijeve, stroncijeve te bromit i jodit, a od čestica se koriste obojene spore, mikrosfere, specifične bakterije i bakteriofagi [1].

Metoda trasiranja značajna je u istraživanju krških vodonosnika što potvrđuje interes istraživača udruženih u više udruga kako bi se unaprijedile metode trasiranja te pronašli novi traseri koji će dati efikasne rezultate u istraživanjima krških vodonosnika.



Slika 2. Trasiranje uraninom [8, 9]

Neke prirodne i sintetske organske tvari koje imaju strukturu ugljikova prstena imaju fluorescentna svojstva, apsorbiraju svjetlost određenih valnih duljina te ih nakon toga reemitiraju u višim valnimduljinama. Takve tvari nedostaju u prirodnim vodama i zbog toga imaju niske granice detekcije [1].

Na - fluorescein ili uranin najčešće je primjenjivan traser, ima vrlo niske granice detekcije napose uz korištenje preciznih luminiscencijskih spektrometara. Koncentrirani uranin u vodi tvori vrlo kiselu otopinu koja se može neutralizirati dodatkom male količine natrijeve lužine. Sunčeva svjetlost razgrađuje uranin pa treba voditi računa o skladištenju uzoraka jer su u uzorcima koncentracije uranina uglavnom vrlo niske.

Rodamini su široka grupa kemijskih crvenih trasera od kojih se samo neki primjenjuju za trasiranje podzemnih voda jer su određeni toksični.

Soli pripadaju grupi trasera topivih u vodi u kojoj disociraju na anione i katione te svojom pojavom izazivaju povećanje električne vodljivosti vode. Ranije je često korištena kuhinjska sol koja ima visoke granice detekcije odnosno prilikom trasiranja treba injektirati veće količine u podzemlje. Obično se koristila za određivanje smjerova podzemnih tokova na manjim udaljenostima. U sklopu hidrogeoloških istraživanja, trasiranje podzemnih tokova ozbiljna je aktivnost koja se mora pažljivo pripremiti.



Izrađuje se detaljan program takvog postupka koji uključuje obradu mjesta injektiranja traseru, procjene ili mjerenja količine poniranja i izviranja vode, izračun potrebne količine traseru, određivanje mjesta i režima uzokovanja i određivanje analitičke metode identifikacije traseru u uzorcima vode. Značajan razvoj doživjele su metode identifikacije traseru u uzorcima vode ili izravno u izvorima što je značajno povećalo točnost rezultata izvedenih trasiranja podzemnih tokova. Kako bi tip i količina traseru za pokus bili adekvatni, traser mora biti neopasan za zdravlje čovjeka, analitički mjerljiv u niskim koncentracijama te ne smije biti prirodno sadržan u vodi u značajnim koncentracijama. Zbog toga se kuhinjska sol ne može koristiti u obalnim područjima radi mogućih dubljih utjecaja mora na slatke vode.

Za određivanje smjerova i brzine podzemnih tokova i mogućeg transporta onečišćivala, u krškim se područjima Dinarida tradicionalno koristi uranin ( $C_{20}H_{10}O_5Na_2$ ), samo prilikom istodobnih izvođenja trasiranja u slivu treba ga koristiti u kombinaciji s nekim od drugih navedenih traseru. Važno je odrediti količine potrebnoga uranina jer se prekomjernom količinom može izazvati panika kod stanovništva zbog intenzivne zelene boje izvorskih voda u vrijeme nailaska uranina, dok u slučaju premale količine na izvorima može doći do koncentracija nižih od analitičkih mogućnosti instrumenata [1]. Uranin je dobro topiv u vodi, međutim zbog povećanja topivosti dodaje se manja količina NaOH kojom se smanjuje kiselost otopine prije injektiranja u krško podzemlje. Kao traser, uranin je postojan u vodi jer njegovo zadržavanje u podzemlju pri regionalnim trasiranjima s potencijalno dugim putovima može premašiti i mjesec dana.

Za injektiranje uranina u krško podzemlje najčešće se koriste prirodni ponori sa povremenim ili stalnim uviranjem vode, čiji režim treba poznavati. Optimalno vrijeme za injektiranje traseru je vrijeme visokog vodnog vala na odlasku kad je poniranje vode najveće kao i brzine podzemnih tokova prema izvorima. U svrhu zaštite voda trasiranje podzemnih tokova sve se više rade injektiranjem traseru s površine terena ili se rade plitke bušotine radi boljeg utiskivanja traseru u podzemlje. Količine uranina koje će se pri trasiranju injektirati u podzemlje ovisi o nekoliko čimbenika. Najvažniji čimbenici su karakteristike krških vodonosnika, udaljenosti od mjesta trasiranja do izvorišta na kojima se očekuje pojava traseru, količine vode na injektiranome ponoru i izvorima te vrsta analitičkih metoda za identifikaciju uranina u uzorcima vode.

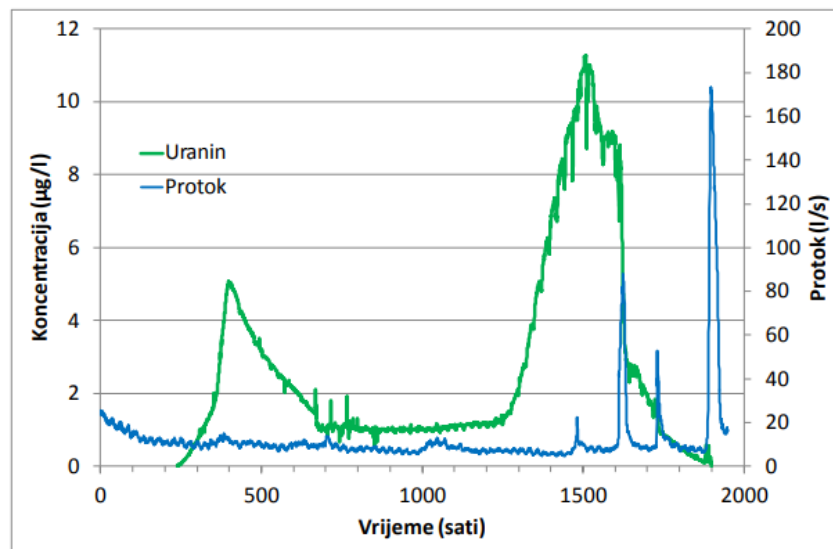
Važan dio trasiranja podzemnih tokova jest određivanje mjesta i vremenskog rasporeda opažanja. Kako bi mreža opažanja bila uspješna potrebno je opće poznavanje hidrogeoloških prilika u području gdje se eksperiment izvodi. Prilikom organizacije mreže opažanja bitno je uzeti tzv. nulte uzorke na svakom mjestu opažanja radi dobivanja pozadinskih vrijednosti kao temeljne na različitim mjestima opažanja. Uzorci se trebaju uzimati odmah nakon injektiranja trasera kako zbog odgode uzimanja uzoraka ne bi došlo do nekontroliranog istjecanja trasera te gubitka podataka o njegovoj prvoj pojavi. Prilikom regionalnih trasiranja uzorkovanje treba raditi svakih šest sati osim kod teško dostupnih izvora kod kojih se uzorkovanje prorjeđuje na svakih osam sati uz izbjegavanje odlaska na izvor noću [1]. Uzorci se uzimaju u staklene epruvete ili bočice zapremnine oko 50 ml, a svaka se označuje datumom i vremenom uzimanja uzorka. Traser i bočice za uzorkovanja potrebno je zasebno transportirati na teren u svrhu osiguranja čistoća bočica, a osoba koja je sudjelovala u injektiranju trasera radi moguće kontaminacije istim ne smije sudjelovati u organizaciji uzorkovanja ili samom uzorkovanju. Trajanje uzorkovanja ovisi o udaljenosti mjesta opažanja od mjesta injektiranja trasera te o karakteristikama samog krškog vodonosnika. Prilikom regionalnih trasiranja uzorkovanje može trajati i dulje od mjesec dana [1].

Trasiranja podzemnih tokova često se rade u sklopu detaljnih hidrogeoloških istraživanja, uglavnom zbog izrade novih kaptaznih zahvata vode ili definiranje visokih zona zaštite izvorišta uključenih u javnu vodoopskrbu. Prilikom toga količine trasera su daleko manje, a uzorkovanje je kraće i puno češće. Takva trasiranja traju od nekoliko sati do nekoliko dana dok se uzorci prema potrebi uzimaju svakih pola sata.

Uzorci se analiziraju u laboratorijima na vrlo preciznim luminiscencijskim spektrometrima koji omogućuju točnost analize do koncentracija od  $0,01 \mu\text{g/l}$ . Kako bi se precizno odredilo vrijeme i koncentracija pojave uranina na mjestima opažanja danas se koriste terenski prijenosni spektrofotometri, koji se uronjavaju u izvorsku vodu i kontinuirano prate promjenu koncentracije uranina u vodi. Točnost takvih mjerenja može se uspoređivati s laboratorijskim mjerenjima, iako određene promjene mutnoće, pH i sadržaja organskog ugljika mogu smanjiti točnost te su potrebne korekcije s mjerenjima na uzorcima u laboratoriju. Zbog rjeđeg uzimanja uzorka na teže dostupnim točkama opažanja koristi se aktivni ugljen koji apsorbira uranin pa se kasnijom analizom u laboratoriju može utvrditi da li je bilo pojave uranina, međutim ne mogu se dobiti kvantitativne vrijednosti pojave. Laboratorijske analize uzoraka sigurno daju najtočnije

podatke o koncentraciji trasera u vodi, ali uzorkovanja imaju vremenski raspon unutar kojeg nema podataka pa maksimalne koncentracije mogu promaknuti analitičkom postupku. Najbolje rezultate daje uzorkovanje u kombinaciji s izravnim mjerenjem u izvoru.

Analizom uzoraka dobivaju se podaci o koncentraciji trasera (slika 3) u vodi ( $\mu\text{g/l}$ ) koji se grafički prikazuju krivuljom intenziteta za svako mjesto opažanja gdje je registrirana pojava trasera. Na osi x prikazuje se vremenski raspon od injektiranja trasera u krško podzemlje do završetka razdoblja uzorkovanja, dok se na osi y prikazuju koncentracije trasera. Oblik krivulje intenziteta pojave trasera indikativan je za ponašanje krških vodonosnika. Uobičajeni tip krivulje jest onaj s jednim maksimumom pojave trasera koja započinje prvom pojavom, zatim vrlo brzim postizanjem maksimuma i nakon toga postupnim smanjenjem koncentracije do potpunog nestanka trasera u vodi [1].



Slika 3. Krivulja koncentracije trasera i protoka [10]

### 3.3. Hidrokemijske metode istraživanja

Dva temeljna cilja hidrokemijskih istraživanja su identifikacija prirodnih trasera i ocjena kvalitete vode uz moguću kombinaciju tih ciljeva. Kemijski sastav podzemne vode ovisi o brojnim čimbenicima kao što je način korištenja prostora, način napajanja vodonosnika, klimatski uvjeti, litologija, tip podzemnoga tečenja i dr. [1].

### 3.3.1. Prirodne vode

Kemijski sastav oborina pod utjecajem je evaporacije i ionskog sastava koji su dobile ili izgubile tijekom pronosa atmosferom. Kontaktom oborina s tlom i infiltracijom u podzemlje, posebice izgrađenom od karbonatnih stijena, počinje cijeli niz fizičkih i kemijskih procesa kojima se naglo povećava mineralizacija vode. Prije svega to je velika mogućnost otapanja vode obogaćene  $\text{CO}_2$  infiltracijom kroz pokrovno tlo. Plinoviti  $\text{CO}_2$  oslobađa se iz korijenja bilja i prilikom raspada organske tvari u pokrovnom tlu. Količina plinovitog  $\text{CO}_2$  u tlu, pa tako i disolucijska sposobnost vode, smanjuje se s nadmorskom visinom jer je pokrovnog tla manje, a stijene su uglavnom bez veće vegetacije i niža je temperatura. Dio otopljenog  $\text{CO}_2$  prelazi u karbonatnu kiselinu što također povećava topivost karbonatnih stijena. Otapanje karbonatnih stijena događa se samo kod visokih koncentracija  $\text{CO}_2$ , a odlaganje kalcita kod nedostatka otopljenog  $\text{CO}_2$ . Navedeni procesi vidljivi su u kavernama krškog podzemlja. Vode obogaćene  $\text{CO}_2$  svojom infiltracijom u karbonatno podzemlje proširuju pukotinske sustave, a kad se u te kaverne infiltrira voda osiromašena  $\text{CO}_2$ , odlaže se kalcit te nastaju stalaktiti i stalagmiti [1].

Kemijski sastav vode tj. disolucijska sposobnost vode u karbonatnim stijenama ovisi i o tipu tečenja podzemne vode kroz stijensku masu. Izvori s pretežito koncentriranim tokovima pokazuju promjene u kemijskom sastavu, temperaturi i količini istjecanja tijekom godine, dok su izvori s pretežito difuznim tokovima daleko stabilniji. U kemijskom sastavu prirodnih voda može se izdvojiti pet grupa sastavnica: otopljeni plinovi, glavni ioni, biogene tvari, mikroelementi i organske tvari [1].

Od otopljenih plinova dominiraju  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$  i  $\text{SO}_2$ . Za otopljeni kisik najvažnija je apsorpcija iz zraka, dok se njegova količina smanjuje truljenjem biogene mase. Sadržaj otopljenog kisika u vodi smanjuje se i oksidacijom amonijaka u nitrite i nitrate, oksidacijom sumporovodika i željeza i sl. Koncentracija otopljenog kisika u vodi kreće se u rasponu od 0 do oko 14 mg/l [1]. Ugljikov dioksid u velikoj mjeri određuje aktivnosti prirodnih voda. Njegova koncentracija u prirodnim vodama kreće se u rasponu od 1 do 30 mg/l [1]. Sumporovodik je rijedak u prirodnim vodama, a stvara se u zonama redukcijskih uvjeta ili se nalazi u tzv. sumpornim vrelima. U prirodnim vodama dušik može biti prirodnog i antropogenog podrijetla, dok je u onečišćenim i zagađenim vodama pretežito antropogenog podrijetla [1].

Glavni ioni u prirodnim vodama su kationi, kalcij, magnezij, natrij i kalij te anioni hidrogenkarbonati, kloridi i sulfati. Karbonati i hidrogenkarbonati dominirajući su sastojci krških voda Dinarida, a jednako tako i drugih područja s prevladavajućim karbonatnim stijenama. Kloridi su prisutni u svim vodama krških područja Dinarida u koncentracijama oko 1 mg/l, ali su u obalnim područjima, ovisno o hidrološkim uvjetima, bitno zastupljeniji i dosežu razine do koncentracija mora. Sulfati su kao i kloridi iskonski vezani za morsku vodu, ali i za minerale koji sadrže sulfate i kloride unutar karbonatnog kompleksa stijena. Koncentracija sulfata u prirodnim slatkim vodama varira između 0,2 i 100 mg/l [1]. U površinske i podzemne vode ulaze otapanjem sulfidnih i kloridnih minerala, kiselim kišama, otpadnim vodama gradova i industrije, mineralnim gnojivima i dr. Spojevi dušika ovisno o pH i redoks uvjetima nalaze se u formi amonijaka  $\text{NH}_3$ , nitrata  $\text{NO}_3^-$ , nitrita  $\text{NO}_2^-$  i amonijeva iona  $\text{NH}_4^+$ . Dušikovi spojevi u prirodne vode ulaze oborinama i truljenjem organske tvari u prirodnim sustavima, ali najveće se količine unose putem umjetnih gnojiva i komunalnih otpadnih voda. Spojevi mangana i željeza uglavnom su posljedica otapanja određenih minerala u podzemlju, a ako prelaze dopuštene količine mogu izazvati velike probleme u vodoopskrbi [1].

Biogene tvari nastaju kao produkti razgradnje organskog supstrata uz prisutnost  $\text{O}_2$  u vodi. Nastaju uglavnom spojevi dušika, fosfora i sumpora. Najčešće biogene tvari u prirodnim vodama su ioni amonijaka, nitriti i nitrati. Pojave metana nastale mikrobiološkom razgradnjom organskih spojeva također mogu biti organogenoga podrijetla.

Mikroelementi disperzirani su u tlu, a u podzemnim vodama dolaze u vrlo malim koncentracijama. Imaju velik značaj u praćenju migracije elemenata u vodi, iako bitno ne utječu na kemijski sastav. Grupa mikroelemenata obuhvaća halogene elemente osim klora, obojene i teške metale i poneke radioaktivne elemente.

Organske tvari u prirodnim vodama dio su građe organizama ili su produkti metabolizma i raspadanja organizama. Obzirom da sve organske tvari sadrže ugljik količina organske tvari u vodi može se odrediti posredstvom određivanja  $C_{\text{org}}$ .

Morska voda najzastupljenija je vrsta vode na zemlji, a unatoč golemom obujmu ima ujednačen kemijski sastav i gotovo se svi kemijski elementi u prirodi mogu u njoj naći u velikim ili manjim količinama. Najvažnija značajka morske vode je salinitet koji se izražava u mg/l i ‰. Salinitet Jadranskog mora u prosjeku iznosi 38- 39 ‰. More je

slabo lužnato zbog hidrolize hidrogenkarbonata. Za krške obalne i otočne vodonosnike Dinarida odnos slatkovodnih kopnenih područja i mora vrlo je značajan zbog otvorenosti krških vodonosnika utjecaju mora te labilne ravnoteže slatke i morske vode u krškom podzemlju [1].

### 3.3.2. Onečišćivala krških voda

Onečišćenja se dijele na fizikalna i kemijska. Fizikalni pokazatelji kvalitete vode mogu biti raspršene ili suspendirane tvari, mutnoća, boja, miris, okus i temperatura. Raspršene ili suspendirane tvari u vodama mogu biti anorganskog i organskog podrijetla. Čestice pijeska i gline anorganskog su podrijetla, a različite vrste mikroorganizama organskog podrijetla. Mutnoća je rezultat povećanja količine raspršenih tvari u vodi. Boja vode se također mijenja radi prisutnosti raspršenih anorganskih i organskih tvari u vodi, ali i oksidacijom povećanih količina željeza i mangana. Uzrok obojene vode mogu biti industrijske otpadne vode i cijeli niz drugih čimbenika koji vodu čine neupotrebljivom za vodoopskrbu. Čista je voda bez okusa i mirisa, a oni se mijenjaju zbog različitih oblika onečišćenja. Promjene temperature vode ovisne su o klimatskim uvjetima u slivu, a trajnije promjene mogu ukazivati na ispuštanje rashladnih voda elektrana ili nekih industrijskih pogona.

Kemijska onečišćivala krških voda mogu se podijeliti na anorganske, organske, pesticide i mikroorganizme, a mogu biti prirodnog ili antropogenog podrijetla.

Anorganska onečišćivala su prirodnog ili antropogenog podrijetla. Prirodni anorganski ioni i teški metali nastaju trošenjem i otapanjem stijena, vulkanskih plinova i pojavom redukcijskih uvjeta u krškim vodonosnicima. Dušik u krške vodonosnike ulazi kao posljedica korištenja velike količine umjetnih gnojiva i otpuštanjem otpadnih voda koje kemijskim procesima u vodi prelaze u nitrate, nitrite i amonijak. Fosfor u vodi također je posljedica poljoprivredne proizvodnje, dok teški metali najčešće nastaju proizvodnjom u kemijskoj industriji, rudarskim aktivnostima, deponiranjem komunalnog otada i ispuštanjem otpadnih voda. Radioaktivni elementi u vode dolaze otpadnim vodama industrije satova, otpadom iz znanstvenih institucija, bolnica i dr. [1].

U krškom podzemlju događaju se brojni procesi pretvorbe koji određene sastojke unesene vodom u podzemlje mijenjaju u srodne sastojke. Prilikom toga značajnu ulogu ima karbonatni medij, pH i redoks potencijal, radioaktivno raspadanje, glina, organska tvar te krški okoliš u cijelosti. Transport onečišćivala u krško podzemlje ima važnu ulogu

u reguliranju specifične ranjivosti krških vodonosnika. Prilikom koncentrirane infiltracije unos onečišćivala je izravan i bez većeg zadržavanja vode prije kontakta sa saturiranom zonom, a jednaka situacija je s dinamikom vode kroz saturiranu zonu vodonosnika.

Organska onečišćivala klasificiraju se prema sastavu, funkcionalnosti, strukturi i korištenju. Najčešća organska onečišćivala u krškim terenima su naftni ugljikovodici. Tu spadaju različiti produkti destilacije, kao što su čista nafta, benzin, kerozin, dizel, teška ulja ili asfalti. Razlikuju se produkti lakši i teži od vode. Organske tvari mogu biti utisnute u duboke krške kanale i kao takve postaju trajni izvori onečišćenja.

Pesticidi su vrlo česta onečišćivala krških vodonosnika jer otvoreni krški kanali imaju vrlo nizak stupanj mogućnosti pročišćavanja prije istjecanja na krškim izvorima. Pesticidi uključuju na stotine organskih i anorganskih komponenata korištenih u poljoprivredi. Mjesta koncentrirane infiltracije vode u krško podzemlje posebno su prirodno ranjiva područja za pronos pesticida s površine terena u saturiranu zonu vodonosnika. Pesticidi su vrlo podložni transformaciji u podzemlju, s mikroorganizmima ili bez njih.

Mikroorganizmi obuhvaćaju parazitske viruse, bakterije, protozoe i male višestanične organizme. U krškim područjima najčešće su pojave bakterija pa se one najviše istražuju i kontroliraju. Pojavljuju se u različitim oblicima autohtonog ili alohtonog podrijetla. One autohtonog podrijetla dio su prirodnog sustava dok su one alohtonog uglavnom posljedica antropogenog djelovanja. U krškim vodama mikroorganizmi koji žive u obliku biofilmova na pukotinama i kavernama imaju važnu ulogu u ocjeni sanitarne kvalitete vode. Promjenom hidroloških uvjeta mikroorganizmi iz biofilmova ponovno ulaze u podzemne tokove. Njihov transport uglavnom je vezan za transport koloida kroz podzemne vode. Za zdravlje ljudi najopasniji su patogeni mikroorganizmi fekalnog podrijetla jer izazivaju različite bolesti, uglavnom probavnog sustava. Stanje kvalitete vode utvrđuje se tzv. organizmom pokazateljem koji ukazuje na postojanje patogenih organizama u vodi, u Hrvatskoj se kao pokazatelji primjenjuju koliformni organizmi. Oni su sastavni dio crijevne flore pa ne izazivaju bolesti, ali izvan organizma postaju patogeni. Krški vodonosnici Dinarida vrlo su podložni bakterijskim onečišćenjima zbog velikih brzina podzemnih tokova i niske sposobnosti samopročišćavanja [1].

### 3.3.3. Monitoring

Hrvatska regulativa vodnog gospodarstva u potpunosti je usklađena sa regulativom vodnog gospodarstva Europske unije. Osnovni dokument Europske unije za vodno gospodarstvo je *Okvirna direktiva o vodama* [11], ali je problematika vodnog gospodarstva detaljno obrađena u nizu pratećih direktiva i tehničkih vodiča.

Monitoring kvalitete vode najvažnija je karika u ocjeni stanja voda kao jedne od temeljnih vrijednosti sustava upravljanja vodnim resursima. Osnovnu jedinicu upravljanja vodnim resursima čine riječni bazeni podijeljeni na vodne cjeline i kroz takav se prostorni raspored organizira mreža monitoringa. Cilj monitoringa je definiranje koherentnog i cjelovitog pregleda statusa voda za svako slivno područje te klasifikacija površinskih i podzemnih voda u kategorije. U krškim područjima Dinarida kao točke opažanja koriste se mjesta koncentriranog istjecanja vode iz podzemlja odnosno krški izvori. Obzirom na velike brzine izmjene vode u krškim vodonosnicima mreža opažanja je gušća i vremenski rasponi uzokovaja kraći nego u vodonosnicima međuzrnske poroznosti. Monitoring se dijeli na nadzorni, operativni i istraživački.

Nadzorni monitoring ima zadatak temeljnog sustava kontrole i u funkciji je procjene utjecaja ljudskih djelatnosti na vodne resurse, izrade budućih planova monitoringa, procjene dugoročnih pomjena prirodnih uvjeta i procjene dugoročnih promjena kao posljedice antropogenih utjecaja. Operativni monitoring namjenjen je vodnim cjelinama ocijenjenima rizičnim. Zadaća mu je progustiti točke opažanja vodnih cjelina gdje je status kvalitete narušen antropogenim utjecajima. Istraživački monitoring obavlja se kad je razlog bilo koje vrste prekoračenja ekoloških ciljeva nepoznat i služi za utvrđivanja veličine i utjecaja incidentnih događanja. Za planiranje i organizaciju monitoringa potrebno je definirati njegove ciljeve, hidogeološke karakteristike vodonosnika, konceptualni model dinamike vode u obrađivanim vodnim cjelinama, tip i veličinu pritisaka i pouzdanost procjene rizika [1].

### 3.4. Metode izotopnih istraživanja

Zadnjih nekoliko desetljeća za potrebe hidogeoloških istraživanja i proučavanja hidogeološkog ciklusa vode na Zemlji intenzivno se koriste izotopi iz okoliša. Teorijska osnovica u korištenju izotopa leži u spoznaji da su različite vrste elemenata u prirodi definirane brojem protona u njihovim jezgrama. Svaki element može imati veći broj



izotopa koji se međusobno razlikuju po broju neutrona u jezgri. Nestabilni izotopi ili radioizotopi spontano se raspadaju i ispuštanju radioaktivne emisije. Kvantitativnom analizom karakterističnog izotopnog sastava mogu se karakterizirati i trasirati vode hidrogeološkog ciklusa. Najčešće se koriste stabilni izotopi vodika, ugljika, kisika i sumpora.

Odnosi među stabilnim izotopima nisu ujednačeni za sve tipove voda jer molekule različitih izotopa reagiraju s okolišem što dovodi do manjih razlika. Molekule s teškim izotopima pokreću se polaganije od lakih i u prosjeku tvore čvršće veze te trajnije ostaju u tekućem mediju. Prilikom evaporacije vodena je para obogaćena lakim izotopima, dok je ostatak tekuće faze obogaćen teškim izotopima.

Radioizotopi su nestabilni i njihove se jezgre spontano razaraju ispuštajući visoku energiju radijacije u procese. To su najčešće alfa - čestice, beta - čestice, neutroni i gama - zrake. Najčešći radioizotopi u prirodnim vodama su uran -238 i njegovi produkti raspadanja uran - 234, torij - 230, radij - 226 i radan - 222. Krajnji produkt raspadanja urana - 238 je izotop olovo - 206. Radioizotopi u pravilu su opasni za okoliš i zdravlje ljudi, ali zbog raspada, u određenim vrijednostima, korisni su za određivanje starosti različitih stvari, procesa pa tako i podzemne vode. Za određivanje starosti recentnih podzemnih voda najčešće se koristi radioizotop tricij ( $^3\text{H}$ ) kao dobar traser za vode jer je uklopljen u molekule vode. Vrijeme njegovog poluraspada iznosi 12,4 godine, a to ga čini vrlo efikasnim za istraživanje podzemnih voda. Koncentracija tricija prikazuje se tricijevim jedinicama (TU). U atmosferi tricij je prirodno prisutan u malim koncentracijama kao posljedica procesa u gornjim slojevima atmosfere.

Istraživanja izotopa zahtijevaju kompleksan način praćenja vodnog sustava od oborina do podzemnih i površinskih voda. Praćenje sezonskih promjena vrijednosti stabilnih i radioaktivnih izotopa u oborinama prvi je korak istraživanja izotopa. Brojni prirodni procesi mogu prouzročiti promjene sadržaja izotopa u prirodnim vodama i oborinama. Najvažnije među njima su evaporacija i kondenzacija. Temperatura znatno utječe na sezonske promjene izotopa u oborinama pa su tako zimske oborine siromašnije teškim izotopima od ljetnih, a sadržaj teških izotopa smanjuje se povećavanjem nadmorske visine zbog sniženja temperature [1].

### 3.5. Metode geofizičkih istraživanja

Geofizička istraživanja nezaobilazan su dio hidrogeoloških istraživanja u definiranju struktura i litoloških značajka vodonosnih slojeva. To je posebno složeno pitanje u područjima izgrađenim od okršenih karbonatnih stijena koje se odlikuju vrlo heterogenim sustavom tečenja podzemne vode kroz pukotinske sustave i podzemne kanale čiji je prostorni i dubinski raspored izravno ovisan o ranijim tektonskim zbivanjima i procesima okršavanja. Za programiranje geofizičkih istraživanja nužno je prethodno izraditi geološki i hidrogeološki model terena. To uključuje litostratigrafske i tektonske odnose, položaj izvora i glavnih mjerova tečenja podzemne vode. Za istraživanje krških vodonosnika uobičajeno se preporučuje korištenje različitih geofizičkih metoda na istome terenu zbog utvrđivanja stanja u podzemlju s različitih gledišta. Metode koje se najčešće koriste dijele se na geoelektrične, elektromagnetske, seizmičke i metode prirodnog potencijala.

Od geoelektričnih metoda za istraživanje podzemnih voda u krškim terenima najčešće se koriste metode električnog sondiranja, električnog profiliranja, električna tomografija i metoda spontanog potencijala. Geoelektrične metode istraživanja temelje se na mjerenjima električnih značajki stijena s time da različite vrste stijena imaju različite električne značajke. Dije se na metode koje mjere prirodna i izazvana električna polja. Prilikom toga treba razlikovati tri osnovne električne značajke stijena: otpornost ili inverznu provodljivost, elektrokemijske značajke i prihvatni kapacitet stijena. Kada se misli na efikasnost i izbor geoelektričnih metoda istraživanja, treba uzeti u obzir moguće probleme sa smetnjama i pogreškama u mjerenju kod istraživanja urbaniziranih i industrijskih područja gdje smetnje mogu izazvati električne i komunalne instalacije u podzemlju.

Električno sondiranje ima značajke točkastog istraživanja kod kojeg se pomicanjem elektroda zahvaća sve veća dubina. U otvorenim krškim, jednoslojnim, tektonski vrlo heterogenim terenima, metoda električnog sondiranja dobra je za dobivanje prvih projekcija stanja podzemlja i eventualnih visinskih odvajanja saturiranih od nesaturiranih zona vodonosnika. Električno profiliranje metoda je mjerenja električne otpornosti stijena po različito usmjerenim pravcima ujednačenog dubinskog zahvata uz mogućnost korištenja simetričnog i asimetričnog rasporeda elektroda. Prilikom simetričnog rasporeda elektroda pomiču se sve četiri elektrode, a kod asimetričnog neke od elektroda

stalno su uzemljene, a samo se neke od njih pomiču. U krškim se terenima najčešće primjenjuje asimetrični sustav gradijentnog rasporeda elektroda.

Profiliranje daje odlične rezultate u identifikaciji položaja rasjeda u karbonatnim stijenama što je vrlo značajno za hidrogeološka istraživanja s obzirom da su rasjedni potencijalni drenovi podzemne vode. Električna tomografija omogućuje kontinuirano pokrivanje podzemlja u dvodimenzijском i trodimenzijском prostoru mjerenjem geoelektrične otpornosti stijena u podzemlju. Glavna prednost ove metode jest mogućnost kartiranja vrlo složenih geoloških struktura. Metoda geoelektrične tomografije često se koristi u istraživanjima krških vodonosnika s mogućnošću dobrog razdvajanja površinskog rastrošenog dijela krških stijena i zona rasjeda u osnovnoj stijenskoj masi.

Metoda spontanog ili prirodnog potencijala temelji se na mjerenjima prirodnog potencijala na površini terena. Mjere se prirodni potencijali nastali u podzemlju radi prisutnosti nekih pojava prirodno vodljivih rudnih tijela te napone nastali strujanjem vode u podzemlju. Za hidrogeološka istraživanja interesantni su potencijali nastali strujanjem vode u krškom podzemlju gdje ulazni tokovi izazivaju pozitivnu, a ponirući tokovi negativnu anomaliju. Rezultat mjerenja je karta izolinja spontanog potencijala, a na njoj se ističu zone jakih negativnih vrijednosti potencijala koje ukazuju na moguću prisutnost većih količina podzemne vode bliže površini terena [1].

Elektromagnetske metode umjesto izravnog praćenja prolaska električne energije kroz slojeve, mjere efekte elektromagnetske indukcije. Uglavnom se koriste za istraživanje relativno plitkih podzemnih voda. Za istraživanje krških vodonosnika u Dinaridima najzanimljivije su metoda s pomičnim odašiljačem i metoda georadara.

Kod metode s pomičnim elektrodama elektromagnetsko polje odašilje se pomoću dugačkog kabela u obliku pravokutnika. Mjerenja se izvode pomičnim prijamnikom do određene udaljenosti od odašiljača, a ona se mogu raditi točkasto (sondiranje) i po profilima. Metoda elektromagnetskog sondiranja sve više zamjenjuje klasično geoelektrično sondiranje zbog jednostavnijeg terenskog rada posebno kod zahvata većih dubina.

Metoda georadara temelji se na lomu i refleksiji elektromagnetskih valova na kontaktima stijena različitih električnih značajki. U tlo se pomoću antene predajnika emitiraju visokofrekventni elektromagnetski valovi. Dio emitirane energije reflektira se od zone diskontinuiteta u podzemlju prema anteni prijammniku i pohranjuje se u digitalnom zapisu.

Pomoću pojedinačnih tragova određuju se anomalije, dok se pomicanjem antena dobivaju profili. Moguća dubina detekcije iznosi do 30 metara ispod površine terena. Metoda je uspješna u detekciji dubinskog prostiranja rasjednih zona unutar karbonatnih stijena. Prilikom ispitivanja georadarom treba biti oprezan zbog mogućih utjecaja pokrovnih glinovitih naslaga koje mogu deformirati povratne signale.

Seizmičke metode istraživanja temelje se na izazivanju elastičnih titraja blizu površine terena i praćenju rasprostiranja stijenskom masom na mjernim točkama na površini terena. Elastični valovi imaju različite brzine kroz različite vrste stijena, tj. stijena različitog stupnja razlomljenosti. Seizmičkim metodama istraživanja dubinski je zahvat mnogo jasniji u odnosu na druge geofizičke metode. Razlikuju se refleksijske i refrakcijske metode istraživanja odnosno metode koje koriste odbijene ili lomljene valove. Refleksijske metode istraživanja koriste se uglavnom za istraživanje dubokih ležišta nafte i plina, dok se refrakcijske metode od samog početka razvoja koriste za pliće zone i hidrogeološka istraživanja do dubina od nekoliko desetaka metara. Izazvanim potresom nastaju tri vrste elastičnih valova koji se kroz prirodnu sredinu rasprostiru različitim brzinama. Dva se vala rasprostiru u obliku polukružnih formi i to su tzv. glavni valovi, a treći val je površinski i rasprostire se površinom terena. Prvi val je primarni (P val) ili longitudinalni kao posljedica stezanja i rastezanja materijala kroz koji val prolazi i sličan je prostiranju zvuka. Drugi je sekundarni (S val) ili transverzalni u kojem je titranje okomito na prostiranje valova. Svaki seizmički val određen je valnom duljinom, brzinom ili frekvencijom te se razlikuje za različite vrste stijena.

Metoda seizmičke refleksije najčešće se primjenjuje duž profila uz korištenje idealiziranog dvoslojnog modela podzemlja s horizontalnom granicom. Elastična svojstva sredine karakterizirana su brzinama primarnog vala  $V_1$  i  $V_2$  i gustoćama  $\rho_1$  i  $\rho_2$ , a temeljni je cilj metode maksimiziranje emitirane energije koja se reflektira od diskontinuiteta u podzemlju. Reflektirana seizmička energija identificira se pomoću preklapajućih seizmičkih valova koji se prikupljaju i reduciraju filtriranjem. Metoda se široko primjenjuje u istraživanjima podzemnih voda u krškom području Dinarida i daje dosta dobre rezultate.

Metoda seizmičke refrakcije temelji se na slomu elastičnog vala na granici dviju sredina čije brzine zadovoljavaju uvjet da je  $V_2 > V_1$ , gdje je  $V_1$  brzina vala u gornjoj sredini, a  $V_2$  u donjoj. Elastični se val generira na površini terena i počinje se širiti brzinom prve

sredine. Val koji na granicu dviju sredina dolazi pod kritičnim kutom ili kutom totalne refleksije najvažniji je val. On se dalje širi duž granice sredina brzinom donjeg medija  $V_2$  i vraća se na površinu terena gdje se registrira geofonima. Iz rasporeda geofona i točaka izazivanja potresnih valova na površini terena, kao iz vremena prvih registracija elastičnog vala, formiraju se s-t dijagrami, iz kojih je moguće odrediti dubinski raspored elastičnih diskontinuiteta [1].

### **3.6. Istražno bušenje i ispitivanja u bušotinama**

U krškom se području Dinarida uglavnom koriste dvije skupine metoda bušenja, rotacijsko i udarno.

Rotacijsko bušenje temelji se na rotaciji alatka određenim brojem okretaja pri čemu dljeto pod kontroliranim osnim tlakom drobi stijenu. Krhotine zdrobljene stijene na površinu terena iznosi isplaka koja ujedno služi za hlađenje bušačke krune. Rotacijsko se bušenje, ovisno o potrebi, obavlja s jezgrovanjem ili bez njega. Jezgrovanje se obavlja različitim tipovima jezgrenih cijevi koje u svojem vrhu imaju bušaće krune prstenastih oblika različitih dimenzija od različitih materijala, ovisno o stijeni koju se želi probušiti. Prilikom bušenja s jezgrovanjem najviše se koriste jednostruke i dvostruke jezgrene cijevi, a za specijalno precizne zadatke trostruke jezgrene cijevi, kojom je moguće dobiti usmjerenje slojeva i pukotinskih sustava stijenske mase. Najviše se koriste dvostruke jezgrene cijevi zbog mogućnosti vađenja visokog postotka jezgre bez obzira na razlomljenost stijenske mase i ispune pukotina glinovitim materijalom. Rotacijska se bušenja mogu raditi s isplakom pripremljenom ovisno o značajkama stijenske mase.

Udarno bušenje temelji se na dizanju i slobodnom padu bušačkih alatki obješenih o čelično uže sa stalnim dodavanjem vode ukoliko se buši u nesaturiranim zonama vodonosnika. Dlijeto drobi dno bušotine, s time da se okrene prilikom svakog udarca. Čišćenje dna bušotine provodi se specijalnom žlicom. Rijetko se koristi pri izvedbi istražnih bušotina jer nema jezgrovanja pa praktički nema mogućnosti identifikacije prirodnog stanja stijenske mase osim procjene mehaničkog otpora stijene. Istražno bušenje podrazumijeva izravan ulazak u dubinske dijelove vodonosnika, a njihove su lokacije i broj ovisni o problemu koji treba riješiti hidrogeološkim istraživanjima. Izrada istražnih bušotina te njihovo pretvaranje u opažачke objekte zasigurno je najskuplji dio

istraživačkih postupaka pa tako broj istražnih bušotina ovisi o problemu koji treba riješiti i raspoloživim financijskim sredstvima.

Tijekom istražnog bušenja uobičajeno se rade ispitivanja vodopropusnosti stijenske mase. Obzirom da se dinamika podzemne vode u krškim vodonosnicima događa kroz pukotinske sustave i podzemne kanale, stijenska je masa u hidrogeološkom pogledu vrlo heterogena, što znatno otežava određivanje hidrauličkih parametara turbulentne vodonosne sredine. Ispitivanje u bušotini obavlja se utiskivanjem vode pod različitim tlakovima u etažama od po 5 metara u saturiranoj zoni vodonosnika u vremenski ograničenom razdoblju od po 5 minuta. Ispitivanja etaža duljine 5 metara ograničava se pakerom. Ispitivanje vodopropusnosti dobar su pokazatelj stanja stijene do dubine bušenja. Nakon završetka istražnih bušotina do projektiranih dubina rade se karotažna ispitivanja po dubini bušotina, a mjerenja se izvode spuštanjem različitih vrsta sonde za ispitivanje otpornosti i SP karotaže. Ispitivanja otpornosti i spontanog potencijala (SP) značajna su za određivanje stupnja razlomljenosti karbonatnih stijena i odnosa prema klasičnim stijenama.

Razine podzemne vode bitan su pokazatelj smjera promjena potencijala i glavnih smjerova tokova podzemne vode. Mogućnost mjerenja razina podzemnih voda inaju praktički sve mjerne sonde s ugrađenim sensorima za mjerenje više fizikalno-kemijskih parametara. Od fizikalno-kemijskih parametara najčešće se mjere temperatura, električna vodljivost, pH, zasićenje vode kisikom, redoks potencijal i dr. Smanjenje temperature podzemne vode po dubini vodonosnika dobar je indikator za dio vodonosnika s jačom cirkulacijom prema određenom izvorištu [1].

#### 4. ZNAČAJKE PODZEMNIH VODA JADRANSKOG VODNOG PODRUČJA

Jadranskom slivu Dinarida pripada obalno područje i krško zaleđe od Istre na sjeverozapadu do Dubrovnika na jugoistoku, kao i svi otoci na istočnoj strani Jadrana. To je veliko područje napajanja izgrađeno većinom od okršenih karbonatnih stijena. Osnovne značajke jadranskog sliva prostrane su zone nakupljanja vode u planinskim područjima vrlo bogatim oborinama, dugački podzemni tokovi te vrlo kompleksni uvjeti izviranja na kontaktima s vodonepropusnim barijerama ili pod usporenim djelovanjem mora.

U današnje je vrijeme nezamislivo uspostaviti zaštitu izvorišta pitke vode ili sustava upravljanja vodnim resursima bez poznavanja slivova odnosno prostornog rasporeda cjelina podzemnih voda. Cjeline podzemnih voda zamišljene su kao temeljne vodne jedinice za sprečavanje degradacije voda, zaštitu i poboljšanja stanja ekosustava kao i uspostavu sustava održivog korištenja voda. Cjeline podzemne vode određene su grupiranjem prirodnih hidrogeoloških slivova radi lakše organizacije upravljanja vodnim resursima i ocjene kvalitativnog i kvantitativnog stanja vodnih resursa [1].

Analiza značajki Jadranskog vodnog područja sastavni je dio *Plana upravljanja vodnim područjima* u Republici Hrvatskoj [12]. Dokument je izrađen sukladno *Zakonu o vodama* [13] koji za svako od dva vodna područja utvrđena u Republici Hrvatskoj propisuje analizu njegovih značajki te pregled utjecaja ljudskog djelovanja na stanje površinskih voda, uključivo prijelaznih i priobalnih voda te podzemnih voda. Analiza značajki vodnog područja polazišna je točka za procjenu deficita u stanju voda i vodnoga okoliša, identifikaciju značajnih vodnogospodarskih problema i planiranje mjera za njihovo rješavanje, sukladno postavljenim ciljevima zaštite vodnoga okoliša.

Analiza značajki Jadranskog vodnog područja uključuje opis vodnog područja, prirodne značajke voda, opterećenja voda uslijed ljudskih djelatnosti te utjecaj ljudskih djelatnosti na stanje voda [12].

## 4.1 Opis vodnog područja

### 4.1.1. Geografski položaj

Jadransko vodno područje (slika 4) obuhvaća kopno Republike Hrvatske, uključujući otoke, s kojeg vode površinskim ili podzemnim putem otječu u Jadransko more te pripadajuće prijelazne i priobalne vode. Kopneni dio obuhvaća niz slivova jadranskih rijeka i površine kopna bez površinskog otjecanja. Sjeveroistočnu granicu vodnog područja čini razvodnica između jadranskog i crnomorskog sliva. Razgraničenje je hidrogeološki određeno i odnosi se na površinske i podzemne vode. Zapadna i jugozapadna granica vodnog područja prolazi teritorijalnim dijelom Hrvatske i odgovara vanjskoj granici priobalnih voda, dok su ostale granice vodnog područja definirane državnom granicom, na sjeveru sa Slovenijom, istoku s Bosnom i Hercegovinom, a jugu Crnom Gorom [12].

Površina vodnog područja iznosi 35 303 km<sup>2</sup>, što je oko 40 % ukupnog teritorija Republike Hrvatske. Od toga na kopno otpada 18 183 km<sup>2</sup>, na otoke 3 262 km<sup>2</sup>, a na prijelazne i priobalne vode mora 13 858 km<sup>2</sup> [14]. Dio voda jadranskog vodnog područja spada u pogranične ili prekogranične vode pa imaju i međudržavni značaj.



Slika 4. Karta jadranskog vodnog područja Republike Hrvatske [12]



#### 4.1.2. Prirodna obilježja

##### 4.1.2.1. Geološke, litološke i pedološke značajke

Prema reljefnim obilježjima na prostoru jadranskog vodnog područja izdvajaju se dvije prirodno - geografske cjeline, a to su gorsko - planinski prostor i jadranski prostor. Gorsko - planinski prostor je Dinarski gorski blok koji čini razvodnicu između crnomorskog i jadranskog sliva. Prevladavaju okršene karbonatne stijene s tipičnom krškom hidrogeologijom, odnosno pojavom krških polja i velikih izviranja i poniranja voda. Duž površinskih i podzemno - ponornih vodnih tokova stvoreno je mnoštvo kanjona, klanaca, špilja i sedrenih barijera, najmlađih i najosjetljivijih tvorbi iznimne aktivnosti. Jadranski prostor dio je dinarskog krša, kojeg čine otoci te uzak kopneni pojas odjeljen od unutrašnjosti visokim planinama. Uzduž jadranskog područja uočavaju se otočni, priobalni i zagorski reljefni pojas. U građi stijena prevladavaju vapnenci visoke čistoće te manje otporne i nepropusne naslage fliša i dolomita. Današnja obala nastala je podizanjem morske razine te je tako stvorena mogućnost dubokih prodora morske vode u priobalne vodonosnike.

Za gorske predjele karakteristični su razni tipovi smeđih tala. Priobalje i otoci siromašni su obradivim tlima, a najvredniji poljodjelski prostori su polja u kršu te tla nastala na flišu, laporu i izoliranim aluvijalnim nanosima. Samo vrlo lokalno, ponajprije u Istri, nalaze se dublja tla plodne crvenice. Na temelju indikatora potencijala ispiranja i potencijala sorpcije onečišćivala i klasama načina vlaženja tla, tla su svrstana u četiri kategorije osjetljivosti na propuštanje onečišćenja: vrlo slabo osjetljivo, slabo osjetljivo, umjereno osjetljivo i jako osjetljivo [12].

##### 4.1.2.2. Klimatske karakteristike

Specifična i raznolika klimatska obilježja posljedica su geografskog položaja i morfologije. Na jadranskom vodnom području postoje dva oborinska režima tj. mediteranski i prijelazni. Prijelazni oborinski režim obuhvaća karakteristike mediteranskog i kontinentalnog režima [12]. „Prosječne godišnje oborine se kreću od oko 800 mm u zapadnoj Istri i na otocima do 3.500 mm i više u gorskim predjelima Gorskog kotara. Prijelazno područje (između kontinentalne i mediteranske klime) ima najviše oborina u studenome, a najmanje u veljači, a kopneni dio u zaleđu jadranske obale ima obilježje maritimnoga oborinskog režima s najviše oborina u studenome, a najmanje u srpnju.“ [12]. Najviše prosječne temperature pojavljuju se u južnim predjelima i otocima

zbog značajnog utjecaja geografske širine, dok se prema sjeveru i unutrašnjosti smanjuju [12].

#### 4.1.2.3. Zemljišni pokrov

More pokriva 39 % površine vodnog područja. Od zemljišnog pokrova kopna i otoka na poljoprivredne površine otpada četvrtina (25 %), na šume 35 %, na ostale prirodne površine također 35 %, dok na izgrađene površine otpada oko 4 %. Na kopnu šume čine 37 %, dok ostale prirodne površine obuhvaćaju 35 %. Na otocima šume čine 26 % zemljišnog pokrova [14].

## 4.2 Prirodne značajke voda

Plan upravljanja vodnim područjem usmjeren je na zaštitu i poboljšanje ekološkog i kemijskog stanja površinskih voda, odnosno količinskog i kemijskog stanja podzemnih voda. Dodatni zahtjevi vrijede za zaštićena područja voda. Vodna tijela su najmanje jedinice za upravljanje vodama izdvojena za opisivanje stanja voda, definiranje ciljeva u zaštiti voda, definiranje problema i mjera za ostvarenje postavljenih ciljeva, definiranje programa monitoringa i praćenje i izvještavanje o rezultatima provedbe [12].

### 4.2.1. Podzemne vode

#### 4.2.1.1. Hidrogeološke značajke područja

Za jadransko vodno područje karakterističan je krš, a značajke krškog područja Dinarida su velika količina padalina na području, niska retencijska sposobnost krškog podzemlja i brzi podzemni tokovi, povremena plavljenja krških polja, pojave velikih krških izvora, višestruko izviranje i poniranje vode u istom vodnom tijelu podzemne vode, visok stupanj prirodne ranjivosti vodonosnika zbog nedostatka pokrovnih naslaga i značajan utjecaj mora na slatkovodne sustave u obalnom području i na otocima.

Temeljne značajke krških slivova su prostrane zone prihranjivanja u planinskim područjima vrlo bogatim oborinama i vrlo složeni uvjeti izviranja na kontaktima okršenih vodopropusnih karbonatnih vodonosnika i vodonepropusnih klastičnih stijena, ili pod uspornim djelovanjem mora. Tokovi podzemne vode vezani su za pukotinske sustave, relativno su velike brzine podzemnih tokova i amplitude istjecanja krških izvora. Brojna su krška polja sa zonama izviranja i ponorima. Osnovni problem količinske nestabilnosti krških vodonosnih sustava vezana je uz duga ljetna sušna razdoblja i relativno slabe

retencijske sposobnosti vodonosnika pa ljetna razdoblja najčešće znače bitno smanjenje istjecanja vode na izvorima, a ponekad i potpuna presušivanja.

Podzemna voda promatrana kao kemijski i dinamički višekomponentni sustav ima značajan odraz na stanje kakvoće vode u krškim vodnim tijelima podzemne vode. Dugo zadržavajuća komponenta temeljnih tokova vezana je za duboke retencijske prostore tijela podzemne vode i prevladavajuća je tijekom sušnih razdoblja, kada nema aktivnih padalina. To su vode izuzetne kakvoće, uglavnom bez kemijskog i bakteriološkog onečišćenja. Opterećenja vodonosnika ublažavaju epikrške i nesaturirane zone vodonosnika. Vode kratkog zadržavanja u krškom podzemlju stvaraju velike probleme s količinom i kakvoćom, jer nastaju kao posljedica poplavnih valova koji ispiru onečišćenja akumulirana na površini terena, epikrškoj i nesaturiranoj zoni vodonosnika tijekom sušnih razdoblja. Značajni problemi vezani su za obalne dijelove vodnih tijela podzemne vode i otoke, gdje se tijekom ljetnih sušnih razdoblja, zbog smanjenog pritiska slatke vode iz unutrašnjosti tijela te direktnog prihranjivanja padalinama, povećava utjecaj mora. Veliki broj krških priobalnih izvora tijekom sušnih razdoblja zaslanjuje se i u prirodnim uvjetima. Najveći su problem izvorišta u obalnom području i na otocima uključena u vodoopskrbu, gdje zbog eksploatacije vode dolazi do jačih prodora morske vode u vodonosnike [12].

#### 4.2.1.2. Prirodna ranjivost vodonosnika

Prirodna ranjivost krških vodonosnika važna je zbog utjecaja onečišćenja na podzemne vode, odnosno negativan utjecaj s površine terena s koje bi onečišćivalo najbrže i u najvećoj koncentraciji moglo negativno utjecati na kvalitetu podzemne vode. Kod krških vodonosnika površinske vode dolaze u direktan kontakt s podzemnim vodama preko jama, ponora i kaverni, gdje transport vode kroz nesaturiranu zonu može biti vrlo brz i na taj način može omogućiti brzo širenje onečišćivala tj. onečišćenja [14]. Prirodna ranjivost vodonosnika podzemnih voda (slika 5) u kršu ocijenjena je temeljem tri skupine podataka. To su hidrogeološke karakteristike vodonosnika, stupanj okršenosti te nagib terena i oborine [12].

Za hidrogeološke karakteristike vodonosnika procjenom je obuhvaćena građa krških vodonosnika od površine terena, preko nesaturirane do saturirane zone. Ovisno o stupnju raspucalosti stijene i napredovanju procesa okršavanja, ukazuje se na mogućnost pronosa onečišćenja do saturirane zone i daljnji transfer prema izvorima koji se štite [12].

Koncentracija vrtača na jedinici površine je prostorni podatak koji ukazuje na površinski raspored karbonatnih stijena različitog stupnja okršenosti. Jače okršena područja, odnosno područja s najvećom koncentracijom vrtača predisponirana su područja povećanog poniranja, odnosno moguće zone visoke ranjivosti. Jame do vode i ponori su točke gdje je mogućnost onečišćenja podzemnih voda najveća, radi izravne veze površine terena sa saturiranom zonom vodonosnika [12].

Nagib terena bitan je preduvjet formiranja hidrografske mreže. Što su nagibi veći, bujične osobine vodotoka su naglašenije, a to znači brži pronos potencijalnog onečišćenja s nekog prostora dalje u smjeru toka. Najveći je rizik na zaravnjenim područjima, odnosno na područjima gdje su nagibi najmanji, jer se na tim prostorima voda najduže zadržava, a isto tako i potencijalna onečišćivala. Srednja godišnja količina oborina jedna je od najbitnijih komponenata za ocjenu vodnoga režima određenoga prostora. Količina oborina jedan je od parametara konačne procjene ranjivosti koji prikazuje područja s najvećom količinom oborina, koja povećave mogućnost unosa potencijalnih onečišćivala u krško podzemlje [12].



Slika 5. Prirodna ranjivost vodonosnika [12]

Prirodna ranjivost vodonosnika koristi se u zaštiti podzemnih krških vodonosnika. Metodama procjene prirodne ranjivosti proučavaju se prirodne karakteristike te se na taj način nastoje izdvojiti najranjiviji dijelovi sliva na moguće onečišćenje [15].

#### 4.2.1.3. Zalihe podzemnih voda

Određivanje zaliha podzemnih voda uvelike se temelji na procjenama radi složenih hidrogeoloških odnosa te nedovoljne i neravnomjerne istraženosti vodonosnika, a zbog vodnogospodarske važnosti u obzir se uzimaju samo obnovljive zalihe podzemnih voda. Zbog složenih strukturno-tektonskih odnosa krških vodonosnika te višestrukog izviranja i poniranja vode unutar istoga sliva u većini slučajeva nepouzđano je odvajanje površinskih i podzemnih voda, a posebice utvrđivanje zaliha podzemne vode. Upravo su radi toga obnovljive zalihe podzemnih voda određene na temelju minimalnih izdašnosti izvora, kapaciteta vodozahvatnih objekata, procijenjenih efektivnih poroznosti i retencijskih sposobnosti vodonosnika [16].

#### 4.2.1.4. Kakvoća podzemnih voda prema *Pravilniku o parametrima sukladnosti i o metodama analize vode za ljudsku potrošnju*

Podzemne se vode ponajprije iskorištavaju za javnu vodoopskrbu te se njihova kakvoća uglavnom ocjenjuje prema pokazateljima definiranim *Pravilnikom o parametrima sukladnosti i o metodama analize vode za ljudsku potrošnju* [17]. Monitoring kakvoće podzemnih voda na području krša prati se i ocjenjuje i prema *Uredbi o klasifikaciji voda* [18].

Sve podzemne vode na području Istre, u ustaljenim hidrološkim uvjetima, dobre su kakvoće. Prema hidrokemijskom facijesu vode su pretežno kalcijsko-hidrokarbonatnog tipa, a prema tvrdoći su srednje tvrde do vrlo tvrde. Povećane koncentracije dušikovih i fosfornih spojeva u podzemnim vodama upućuju na posljedicu unosa otpadnih voda naselja, a dijelom i ispiranja poljoprivrednih površina. Najviši sadržaj nitrata zabilježen je u vodama pulskih zdenaca, od kojih su neki isključeni iz javne vodoopskrbe zbog antropogenih onečišćenja. Svi istarski izvori, osim izvora Kožljak i Plomin, stalno su mikrobiološki onečišćeni.

Vode svih većih i izdašnijih izvora na području Kvarnerskog zaljeva jesu kalcijsko-hidrogenkarbonatnog tipa, umjerene tvrdoće i s niskim sadržajem klorida i sulfata, izuzevši neke priobalne izvora pod utjecajem mora. Kakvoća vode izvora Rječine i izvora u Bakarskom zaljevu vrlo je dobra, osim za vrijeme i nakon jačih kiša, a posebno nakon sušnih razdoblja, kada se u vodi pojavljuje mikrobiološko onečišćenje. Koncentracije nitrata u vodi svih izvorišta znatno su niže od maksimalno dopuštene za vodu za piće, a podzemne vode nisu onečišćene teškim metalima.

Kakvoća vode na području Like i Podvelebita vrlo je dobra, a osobito na izvorima Novljanske Žrnovnice i Žižića vrelo. Podzemna voda u slivu rijeke Gacke izuzetno je dobre kakvoće s ujednačenim fizikalno - kemijskim pokazateljima.

Podzemne vode sliva rijeke Zrmanje kalcijско-hidrokarbonatnog su tipa, osim priobalnih izvora, gdje je evidentan utjecaj mora. Podzemne su vode za sada visoke kakvoće.

Zajednička značajka podzemnih voda Ravnih kotara jest da su tvrdoća i alkalitet približno dvaput veći nego u tipičnim krškim vodama.

Najveći dio podzemnih voda sliva rijeke Krke pripada kalcijско-karbonatnom tipu. Izuzetak su podzemne vode u najnižvodnijem dijelu sliva, gdje je Krka u razini i pod utjecajem mora pa pripadaju natrijsko-kloridnom tipu. Vode izvora Jaruga i Pećina karakterizira povećani sadržaj sulfata prirodnog porijekla.

Najveći dio podzemnih voda u slivu Vranskog jezera pripada kalcijско-hidrokarbonatnom tipu, osim u priobalnoj zoni i dijelu Vranskog polja, gdje su podzemne vode pod utjecajem mora. Izvorišne vode u slivu Pantana većim dijelom godine zaslanjene su morskom vodom.

Podzemne vode u slivu rijeke Cetine relativno su dobre kakvoće, međutim uočava se utjecaj antropogenog onečišćenja. Pripadaju kalcijско-hidrokarbonatnom tipu. Sadrže malo otopljenog ugljičnog dioksida, dobro su zasićene kisikom i umjerene su tvrdoće. Vode se, u pravilu, ne zamućuju, osim na izvoru Jadro, gdje je zamućenje relativno često i intenzivno. Na izvoru Jadro također se pojavljuje i povremeno povećana koncentracija mineralnih ulja i fenola, te dušikovih i fosfornih spojeva.

Osnovni kemijski sastav podzemnih voda u slivu desne i lijeve obale Neretve bitno se razlikuje. Podzemne vode sliva desne obale Neretve su kalcijско-hidrogenkarbonatno-sulfatne vode. Te vode sadrže relativno malo klorida, osim na izvoru Prud, koji je povremeno kao i rijeka Neretva pod utjecajem mora. Podzemna se voda rijetko zamućuje. Podzemne vode u slivu lijeve obale Neretve uglavnom su kalcijско-hidrogenkarbonatnog tipa i dobro su zasićene kisikom. U vodi izvora povremeno se pojavljuju povećane koncentracije klorida. Za vrijeme obilnih oborina voda se na pojedinim izvorima zamuti. Uočava se opća tendencija pogoršanja kakvoće vode u mikrobiološkom i u kemijskom smislu [16].

#### 4.2.1.5. Vodna tijela podzemnih voda

Vodna tijela podzemnih voda trebaju omogućiti odgovarajuće opisivanje količinskog i kemijskog stanja podzemnih voda i planiranje mjera koje treba poduzeti za ostvarenje postavljenih ciljeva u zaštiti podzemnih voda i o njima ovisnih površinskih ekosustava. Vodna tijela, obzirom na količinsko stanje treba izdvojiti tako da između susjednih tijela nema značajnih podzemnih tokova ili, ako oni postoje, da ih je moguće dovoljno dobro kvantificirati. Vodna tijela prema kemijskom stanju moraju biti dovoljno jasno određena s obzirom na svoj prirodni kemijski sastav i na stvarno stanje kakvoće, uzrokovano antropogenim djelovanjem.

Temeljni kriterij za izdvajanje vodnih tijela podzemne vode prirodna je povezanost nepromjenljivih i promjenljivih elemenata bilance voda u određenom prostoru, imajući u vidu povezanost podzemnih i površinskih voda u krškim terenima, gdje vode u više navrata unutar istog sliva izvire i ponovno poniru u krško podzemlje. U krškim područjima posebno je teško odvojiti podzemne od površinskih voda jer je njihova interakcija izuzetno velika zbog geološke građe terena. Pojedine rijeke započinju svoj tok na krškim izvorima, dijelom svoga toka teku površinski, pa poniru na dobro vodopropusnim karbonatnim stijenama i kao podzemna voda opet istječu na izvorima u nižim dijelovima sliva. Inicijalna analiza brojnih utjecajnih elemenata provedena je 2006. godine, a rezultirala je izdvajanjem 86 vodnih tijela podzemnih voda na kopnenom dijelu vodnog područja i 12 vodnih tijela podzemnih voda na većim otocima [12]. Na jadranskom vodnom području, grupiranjem primarno izdvojenih vodnih tijela, utvrđeno je 12 grupiranih vodnih tijela podzemnih voda. U grupirano vodno tijelo Jadranski otoci obuhvaćeni su samo veći otoci na kojima postoje izvori koji se potencijalno mogu zahvatiti za javnu vodoopskrbu ili se podzemna voda već koristi za javnu vodoopskrbu.

Većina se grupiranih vodnih tijela podzemne vode izdvojenih u Hrvatskoj prostire u susjedne države Sloveniju i Bosnu i Hercegovinu. To se odnosi na grupirana vodna tijela na istarskom i riječkom području, koja su dijelom u Sloveniji i grupirana vodna tijela Krka, Cetina i Neretva, koja su dijelom nalaze u Bosni i Hercegovini. Prema jugu se udio prekograničnog dijela grupiranih vodnih tijela podzemne vode povećava pa se na dubrovačkom području samo izvorišne zone grupiranog vodnog tijela Neretva nalaze u Hrvatskoj, dok se njegov najveći dio nalazi u Bosni i Hercegovini. Iz podataka Ekološke mreže Republike Hrvatske vidljivo je da ekosustavi ovisni o podzemnoj vodi postoje na području većine grupiranih vodnih tijela podzemne vode na jadranskom vodnom

području, a takvi ekosustavi nisu identificirani samo na grupiranim vodnim tijelima Središnja Istra i Južna Istra. Veliki je dio ekosustava u krškim područjima u direktnoj ili posrednoj vezi s podzemnim vodama, a naročito vodeni ekosustavi locirani u dolinskim dijelovima krških područja, ali i kopneni ekosustavi koji ovise o vlazi tla, koja je indirektno ovisna o stabilnosti razine podzemnih voda. Opći problem s podzemnim vodama u krškim područjima je dugačko ljetno sušno razdoblje, kada se bitno smanjuju kapaciteti prirodnih izvorišta, a time i protoci krških rijeka, koji imaju direktan utjecaj na ekosustave u dolinskim dijelovima krških područja. Situaciju otežava korištenje vode za potrebe vodoopskrbe pa na velikom broju krških izvora nema preljevanja vode u korita vodotoka. To smanjuje protoke u koritima rijeka te izaziva negativne utjecaje na biološke sustave direktno vezane za plitku podzemnu i površinsku vodu. Veliki dio visokih vodnih valova akumuliran je za potrebe hidroelektrana, a time su trajno potopljene dijelovi krških polja i kanjona rijeka. Danas je sve to u uravnoteženom stanju, s pozitivnim i negativnim posljedicama u odnosu na ranije prirodne sustave [12].



## 5. ZAŠTITA VODA

Krški vodonosnici Dinarida s gledišta zaštite voda prirodno su vrlo ranjivi sustavi zbog karakterističnih brzih podzemnih tokova, slabih mogućnosti samopročišćavanja te otvorenosti utjecajima s površine terena. Znanstvenim i stručnim pristupima nastoji se odgovoriti na pitanje kako zaštititi tako ranjive vodonosnike, a da su pritom osigurani prihvatljivi uvjeti razvitka u tim prostorima [1].

Voda izravno utječe na ljudsko zdravlje pa npr. eventualni veći prodori komunalnih otpadnih voda u krško podzemlje mogu izazvati prave epidemije crijevnih oboljenja, a neka druga opterećenja u duljim razdobljima mogu izazvati trajnije narušavanje kvalitete voda i posredno zdravlje ljudi. Stoga je zaštita prirodno ranjivih vodnih resursa u krškim vodonosnicima obveza ukoliko se žele osigurati normalni uvjeti života današnjim i budućim generacijama tih prostora [1].

Zaštita izvorišta vode za piće Dinarskog krša u Hrvatskoj vrši se prema *Pravilniku o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta* [19], koji obrađuje izvorišta vodonosnika s pukotinskom i pukotinsko-kavernoznom poroznošću.

Za krška izvorišta vode za piće u Hrvatskoj izdvajaju se četiri osnovne zone sanitarne zaštite.

*I. Zona sanitarne zaštite ili zona strogog režima zaštite* obuhvaća nalazište vode, crpnu stanicu, postrojenje za preradu vode te objekte potrebne za pogon, održavanje i čuvanje crpne stanice. Zona pokriva neposredni površinski sliv s kojeg je moguće površinsko uljevanje onečišćivala u izvorište. U ovoj zoni nije dopuštena niti jedna aktivnost koja se ne tiče eksploatacije, prerade ili transfera vode u vodoopskrbni sustav.

*II. Zona sanitarne zaštite ili zona strogih ograničenja* odnosi se na podzemne dotoke vode prema šticekim krškim izvorima i obuhvaća glavne drenažne smjerove. U II. zoni sanitarne zaštite treba izbjegavati gradnju prometnica, urbanih i industrijskih sadržaja, ali ako takvi sadržaji već postoje u zoni treba ih adekvatno sanirati.

*III. Zona sanitarne zaštite ili zona ograničenja i kontrole* obuhvaća dijelove slivova izvorišta voda za piće s kojih je moguć dotok podzemne vode u uvjetima visokih voda. U III. zoni mjere zaštite su nešto blaže nego u II. zoni, ali je strogo zabranjeno odlaganje

svake vrste otpada, građenje cjevovoda bez sustava zaštite, eksploatacija mineralnih sirovina i izgradnja kemijskih industrijskih pogona.

*IV. Zona sanitarne zaštite ili zona ograničene zaštite* obuhvaća cjelokupno priljevno područje izvan III. zone zaštite s mogućim dotocima podzemne vode na izvorišta. Obično su to područja udaljena od šticevinih izvora preko desetak kilometara, ali zbog mogućnosti utjecaja na izvore propisane su određene zabrane [1].

Onečišćenje podzemnih voda gotovo je nemoguće izbjeći, a najveće je tamo gdje su i potrebe za vodom najveće. Pod onečišćenjem podzemnih voda u užem smislu podrazumijeva se degradacija kakvoće vode fizičkim, kemijskim, biološkim i radiološkim onečišćenjem do stupnja pri kojem voda postaje štetna po ljudsko zdravlje. Uzroci onečišćenja su brojni, a najčešći su otpadne vode, komunalni i industrijski otpad, poljoprivredna djelatnost, promet, industrija, naftovodi i plinovodi. Kako bi se postigla veća kontrola i zaštita voda potrebno je uskladiti pravilnike i zakone te vršiti terenska ispitivanja i kontrolu vodnih područja [20].

## 6. ZAKLJUČAK

Hrvatska spada u mediteransku zemlju s prostranim krškim područjima u planinskom i jadranskom dijelu državnog teritorija gdje je krš pretežito vezan za geološke strukture Dinarida u čijoj građi prevladavaju karbonatne stijene.

Krški vodonosnici Dinarida s gledišta zaštite voda prirodno su vrlo ranjivi sustavi zbog njihove hidrogeološke građe. Karakteriziraju ih brzi podzemni tokovi, slaba mogućnost samopročišćavanja te otvorenost utjecajima s površine terena. Zbog navedenih karakteristika moguća onečišćenja vodonosnika brzo se šire te u kratkom vremenu onečiste velike količine pitke vode. Stoga je zaštita tih resursa pitke vode od iznimne važnosti.

Kako bi se omogućio uvid u stanje podzemnih tokova primijenjuju se razne metode hidrogeoloških istraživanja i praćenja stanja u podzemlju. Neke od metoda su trasiranje podzemnih tokova, hidrokemijske metode istraživanja, monitoring kvalitativnog i kvantitativnog stanja voda, izotopna istraživanja, geofizička istraživanja te metoda istražnog bušenja i ispitivanja u bušotinama.

Osim metoda istraživanja jedan od načina veće kontrole i zaštite zasigurno je usklađivanje i donošenje mnogobrojnih pravilnika i zakona te podizanje svijesti građana o kompleksnosti i osjetljivosti sustava podzemnih voda u kršu te načinu njihove zaštite.

## 7. LITERATURA

[1] Biondić B., Biondić R. *Hydrogeologija Dinarskog krša u Hrvatskoj*. Sveučilišni udžbenik. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu Geotehnički fakultet. 2014.

[2] Dostupno na: <http://proleksis.lzmk.hr/32903/> Datum pristupa: 11.07.2017.

[3] Benson R.C. & La Fountain L.J. *Evaluation of subsidence or collapse potential due to subsurface cavities*. Orlando, Florida. 1984.

[4] Tišljarić J. *Sedimentologija karbonata i evaporita*. Zagreb: Institut za geološka istraživanja. 2001.

[5] Dostupno na:

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e9/Aragonite-Sulphur-35879.jpg/440px-Aragonite-Sulphur-35879.jpg> Datum pristupa: 02.08.2017.

[6] Dostupno na: [http://2.bp.blogspot.com/-FE1bW-HwO3c/VTpYwQQXTAI/AAAAAAAAAQ/QiZXR\\_-te3I/s1600/Kalcite.jpg](http://2.bp.blogspot.com/-FE1bW-HwO3c/VTpYwQQXTAI/AAAAAAAAAQ/QiZXR_-te3I/s1600/Kalcite.jpg) Datum pristupa: 02.08.2017.

[7] Dostupno na: <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/originals/cd/17/eb/cd17eb9a0ef19bb2e0ac6b3dfb3ae64c.jpg> Datum pristupa: 02.08.2017.

[8] Dostupno na: [https://www.agw.kit.edu/img/Hydro/Tracer\\_Uranin.jpg](https://www.agw.kit.edu/img/Hydro/Tracer_Uranin.jpg) Datum pristupa: 02.08.2017.

[9] Dostupno na: <http://www.blauhoehle.de/wp-content/uploads/2012/04/Uranin.jpg> Datum pristupa 02.08.2017.

[10] Dostupno na: [https://bib.irb.hr/datoteka/670370.Frangen\\_disertacija.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/670370.Frangen_disertacija.pdf) Datum pristupa: 06.09.2017.

[11] Hrvatske vode, Okvirna direktiva o vodama – 2000/60/EC, Dostupno na: [http://www.voda.hr/sites/default/files/04\\_-\\_okvirna\\_direktiva\\_o\\_vodama\\_-\\_2000\\_60\\_ec\\_-\\_2000.pdf](http://www.voda.hr/sites/default/files/04_-_okvirna_direktiva_o_vodama_-_2000_60_ec_-_2000.pdf) Datum pristupa: 05.09.2017.

[12] Hrvatske vode, *Plan upravljanja vodnim područjima*, Dodatak II. Analiza značajki Jadranskog vodnog područja,

Dostupno na: <http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/dodatni/427138.pdf> Datum pristupa: 12.07.2017.

[13] *Zakon o vodama*. Narodne novine. 1995. Broj 1769. [27.12.1995.]

[14] Hrvatske vode, Plan upravljanja vodnim područjima 2016. – 2021., Dostupno na: [http://www.voda.hr/sites/default/files/clanak/nacrt\\_plana\\_upravljanja\\_vodnim\\_podrucjima\\_za\\_razdoblje\\_2016.\\_-\\_2021.pdf](http://www.voda.hr/sites/default/files/clanak/nacrt_plana_upravljanja_vodnim_podrucjima_za_razdoblje_2016._-_2021.pdf) Datum pristupa: 12.07.2017.

[15] Dostupno na: <https://repozitorij.gfv.unizg.hr/en/islandora/object/gfv%3A87> Datum pristupa: 03.09.2017.

[16] Hrvatske vode, *Strategija upravljanja vodama*, Dostupno na: [http://www.voda.hr/sites/default/files/dokumenti/strategija\\_upravljanja\\_vodama.pdf](http://www.voda.hr/sites/default/files/dokumenti/strategija_upravljanja_vodama.pdf) Datum pristupa: 15.07.2017.

[17] *Pravilnik o parametrima sukladnosti i o metodama analize vode za ljudsku potrošnju*. Narodne novine. 2013. Broj 2694. [11.10.2013]

[18] *Uredba o klasifikaciji voda*. Narodne novine. 1998. Broj 1037. [02.06.1998]

[19] *Pravilnik o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta*. Narodne novine. 2011. Broj 1460. [15.06.2011.]

[20] Dostupno na: <http://www.geografija.hr teme/klima-i-vode/zastita-izvora-pitke-vode-u-krsu/> Datum pristupa: 20.07.2017.

## **8. POPIS SLIKA**

Slika 1. Sastojci karbonatnih stijena: a) aragonit; b) kalcit; c) dolomit

Slika 2. Trasiranje uraninom

Slika 3. Krivulja koncentracije traseera i protoka

Slika 4. Karta jadranskog vodnog područja Republike Hrvatske

Slika 5. Prirodna ranjivost vodonosnika