

# Izvedba dubokih istražno - eksploatacijskih bušotina za potrebe motrenja podzemne vode u kršu

---

Ister, Danijela

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:456459>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-20**



Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**GEOTEHNIČKI FAKULTET**

**DANIJELA ISTER**

**IZVEDBA DUBOKIH ISTRAŽNO EKSPLOATACIJSKIH BUŠOTINA ZA  
POTREBE MOTRENJA PODZEMNE VODE U KRŠU**

**DIPLOMSKI RAD**

**VARAŽDIN, 2019.**

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**

**GEOTEHNIČKI FAKULTET**

**DIPLOMSKI RAD**

**IZVEDBA DUBOKIH ISTRAŽNO EKSPLOATACIJSKIH BUŠOTINA ZA  
POTREBE MOTRENJA PODZEMNE VODE U KRŠU**

**KANDIDAT:**

**DANIJELA ISTER**

**MENTOR:**

**Doc.dr.sc. JELENA LOBOREC**

**KOMENTOR:**

**Prof.dr.sc. SANJA KAPELJ**

**VARAŽDIN, 2019.**

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom

**Izvedba dubokih istražno eksploatacijskih bušotina za potrebe motrenja  
podzemne vode u kršu**

Rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom doc.dr.sc. Jelene Loborec i komentora prof.dr.sc. Sanje Kapelj.

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, 1.07.2019.

DANIJELA ISTER

(Ime i prezime)

Danijela Ister

(Vlastoručni potpis)

**IME I PREZIME AUTORA:** Danijela Ister

**NASLOV RADA:** Izvedba dubokih istražno eksploatacijskih bušotina za potrebe motrenja podzemnih voda u kršu

**SAŽETAK:**

U ovome radu biti će prikazan pristup motrenju podzemnih voda prema smjernicama Okvirne direktive o vodama u dubokom vodonosniku dinarskog krša. Prikazat će se način određivanja lokacija i izvedba istražnih bušotina s ciljem motrenja količine i kakvoće podzemnih voda za upravljanja vodama izvora Jadra i Žrnovnica. Bušotine su locirane na osnovi litostratigrafskih, strukturnih i hidrogeoloških elemenata dobivenih detaljnim geološkim kartiranjem i geofizičkim istraživanjima. Na taj način najprije su izdvojeni položaji diskontinuiteta i okršenih zona u podzemlju za koje se smatra da su zone pretežitog prihranjivanja i tečenja podzemnih voda. Zatim su temeljem rezultata provedenog geoelektričnog sondiranja izdvojene stijene s obilježjima potencijalnih vodonosnika i odabrane lokacije za bušenje tako da se u području pretpostavljenog vodnog gradijenta probuše spomenute razlomljene i moguće kavernozone stijene. Bušotine su zatim izvedene i opremljene za kontinuirani monitoring podzemnih voda, a rezultati provedenog monitoringa koriste se za upravljanje podacima o količinskom i kemijskom stanju voda te za identificiranje antropogenih utjecaja u slivu izvora Jadra i Žrnovnice. Zaključeno je da bez monitoringa podzemnih voda kako velikih tako i manjih slivova nije moguće racionalno upravljati vodnim resursima u smislu zaštite kako kakvoće tako i količine podzemnih voda.

**KLJUČNE RIJEČI:** podzemna voda, dinarski krš, bušotina, geofizička istraživanja, monitoring podzemnih voda

## **SADRŽAJ:**

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. PODZEMNA VODA U KRŠU</b> .....	2
2.1. Krški reljef u Hrvatskoj .....	3
2.2. Krški vodotoci.....	6
2.3. Podzemna voda u kršu .....	7
<b>3. MONITORING PODZEMNE VODE</b> .....	9
3.1. Konceptualni model .....	10
a) Regionalni konceptualni model.....	10
b) Lokalni konceptualni model .....	11
3.2. Vrste monitoringa podzemnih voda.....	11
3.2.1. S obzirom na način praćenja: .....	11
a) Nadzorni monitoring .....	11
b) Operativni monitoring .....	11
c) Istraživački monitoring .....	12
3.2.2. S obzirom na motrene vrijednosti .....	12
a) Monitoring kvantitativnog statusa koji određuje količine podzemne vode .....	12
b) Monitoring kemijskog statusa koji je pokazatelj kakvoće podzemne vode .....	13
<b>4. PRIMJER - PLAN MOTRENJA PODZEMNIH VODA U SLIVU IZVORA JADRA I ŽRNOVNICE</b> .....	14
4.1. Opis sliva izvora Jadra i Žrnovnice.....	14
4.2. Geološka i hidrogeološka obilježja sliva.....	16
4.3. Kakvoća podzemne vode u slivu Jadra i Žrnovnice .....	19
4.4. Potencijalni i aktivni izvori onečišćenja na području sliva Jadro i Žrnovnice .....	22
<b>5. PROVEDENA ISTRAŽIVANJA ZA LOCIRANJE OPAŽAČKIH BUŠOTINA</b> .....	24
5.1. Strukturno – tektonska analiza .....	24
5.2. Geofizička istraživanja .....	27
5.2.1. Metoda seizmičke plitke refleksije.....	28
5.2.2. Metoda geoelektrične tomografije (LIS) .....	29

5.2.3. Geoelektično sondiranje .....	30
5.2.4. Rezultati geofizičkih istraživanja na području sliva Jadra i Žrnovnice .....	31
<b>6. METODE IZRADE ISTRAŽNIH BUŠOTINA.....</b>	<b>34</b>
6.1. Istražno udarno bušenje .....	34
6.2. Istražno rotacijsko bušenje.....	35
6.2.1. Rotacijsko bušenje spiralnim svrdlima .....	35
6.2.2. Rotacijsko bušenje s jezgrovanjem.....	35
6.2.3. Rotacijsko bušenje bez jezgrovanja.....	36
6.3. Uzimanje uzoraka iz bušotina .....	36
6.3.1. Uzorkovanje slabovezanih materijala .....	36
6.3.2. Uzorkovanje stijenske mase .....	37
<b>7. IZVEDBA I OPREMANJE BUŠOTINA .....</b>	<b>39</b>
7.1. Izvedba istražno – piezometarske bušotine na lokaciji Dugopolje B-1..	39
7.2. Izvedba istražno –piezometarske bušotine na lokaciji Gizdavac B-3 ....	41
<b>8. RASPRAVA.....</b>	<b>44</b>
<b>9. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>47</b>
<b>10. POPIS LITERATURE.....</b>	<b>49</b>
<b>11. POPIS SLIKA: .....</b>	<b>52</b>
<b>12. POPIS TABLICA: .....</b>	<b>53</b>

## 1. UVOD

Oduvijek su ljudi imali poštovanje prema vodi, posebice prema podzemnoj vodi koju dugo vremena nisu mogli razumjeti. Podzemna voda je primarni izvor vode za ljudsku potrošnju. Osim za piće, koristi se za navodnjavanje, u industriji, kao i u mnogim drugim vidovima svakodnevnog života. Povećanje broja stanovnika i porast životnog standarda uzrokovali su povećanje potrošnje vode, što je dovelo do porasta količine otpadne vode.

Otpadna voda koja se upuštala u površinske tokove vrlo brzo bi promijenila karakteristike površinskog toka, dok je ona koja se upuštala u podzemlje na izvorima ponovo postala čista. Dugo vremena se vjerovalo da podzemlje "čarolijom" pročisti podzemnu vodu. Danas se zna da to ne funkcionira tako. Došlo se do zaključka da je podzemna voda bolja za ljudsku potrošnju od površinske vode i to zbog različitih karakteristika: prirodno je bolje kvalitete, zahtijeva manje tretiranja prije upotrebe što smanjuje cijenu obrade, količine su konstantno dostupne za razliku od površinskih voda koje mnogo brže reagiraju na hidrološke prilike koje uzrokuju nestašicu u sušnim periodima. Stoga se u današnje vrijeme veliki naglasak stavlja na motrenje podzemne vode s ciljem zaštite od narušavanja njenog količinskog stanja, precrpljivanjem te narušavanjem stanja kakvoće onečišćenjem.

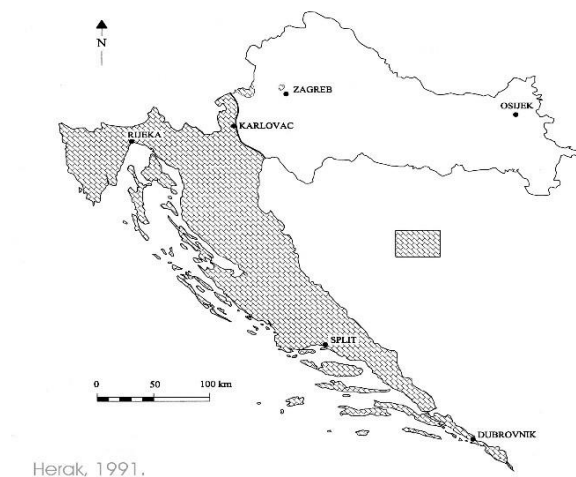
Potreba za motrenjem količine i kakvoće podzemne voda u svim aspektima ljudskog djelovanja postaje sve izraženija. Monitoring predstavlja osnovu za zaštitu i upravljanje vodama te se smatra jednom od osnovnih aktivnosti za osiguranje tog vrlo važnog resursa budućeg razvoja. Hrvatska, kao vodom bogata zemlja, ima posebnu obvezu brinuti se za održavanje visokog stupnja kakvoće kao i odgovarajućim upravljanjem osigurati dostatne količine za potrebe turizma, vodoopskrbe, poljoprivrede i energetike.



## 2. PODZEMNA VODA U KRŠU

Podzemna voda je voda koja se nalazi ispod površine Zemlje unutar šupljina, pukotina i pora u tlu ili u stijenama. Od ukupne količine slatke vode na Zemlji 30% se nalazi u podzemlju gdje dolazi infiltracijom ili gravitacijskim procjeđivanjem s površine Zemlje. Podzemna voda je glavni ekonomski resurs, pogotovo u sušnim ili aridnim područjima gdje je u pravilu nedostaje. U mnogim gradovima i naseljima velike količine podzemne vode se dobivaju iz bušenih zdenaca.

Hrvatska je mediteranska zemlja 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. Karbonatno krško područje pokriva oko 50% ukupnog kopnenog dijela Hrvatske i jadranske otoke te je gotovo polovica svih resursa podzemne vode vezana za krške vodonosnike. Krš u Hrvatskoj obuhvaća površinu oko 26 000 km<sup>2</sup>, gotovo cijeli južni dio Hrvatske, odnosno približno polovicu ukupnog teritorija, kao što je prikazano na Slici 1.[1].



**Slika 1. Krško područje u Hrvatskoj [2]**

## 2.1. Krški reljef u Hrvatskoj

Krš podrazumijeva specifičan krajolik i morfološke oblike koji su uglavnom razvijeni u karbonatnim stijinama, ali uključuje i razvoj specifične podzemne morfologije i vodonosnika u podzemnim špiljama. Hrvatski krš je pretežito izgrađen od karbonatnih stijena vapnenaca i dolomita. Na hidrodinamiku podzemne vode najveći utjecaj imaju pukotinska poroznost, gustoća, raspored i međusobna povezanost pukotina. Krš je vrlo heterogeno i anizotropno područje u kojem se kretanje podzemne vode može sagledati samo na osnovu velikog broja mjerenja razine vode, protoka i brzine, kemijskog sastava i temperature. Mjerenja treba provoditi na nizu mjernih mjesta kroz relativno dugo razdoblje.

Krška područja Hrvatske imaju velike zalihe podzemnih voda. Zbog specifičnih hidrogeoloških obilježja krša Dinarida podzemne vode iznimno su osjetljive na različite prirodne i antropogene utjecaje. Krški vodonosnici važni su za održavanje vodoopskrbnih sustava u cijelom području Dinarida što podrazumijeva cjelokupnu jadransku obalu te neke gradove u unutrašnjosti. Predstavljaju stratešku rezervu pitke vode te osiguravaju njenu kvalitetu, a također su važni za razvoj turizma u jadranskom obalnom području [3].

Hidrološke specifičnosti krša su brza infiltracija oborina, mala akumulacijska sposobnost u zoni sitne pukotinske poroznosti, te velika provodnost i stvaranje povremenih površinskih i podzemnih akumulacija u zonama krupnih pukotina. Posljedica ovakvih karakteristika je da slivovi, ili njihovi dijelovi izgrađeni od karbonatnih stijena, imaju slabo razvijenu mrežu površinskih vodotoka. Za korištenje voda u kršu neophodno je poznavanje prirodnih uvjeta među kojima su najznačajnije poznavanje položaja glavnih pukotinskih zona u podzemlju, koje imaju funkciju provodnika u slivu i podzemlju te poznavanje protoka kroz te provodnike u funkciji vremena. Analiza režima tečenja započinje opisivanjem oblika pukotina. Prilikom strujanja kroz pukotine voda traži put najmanjeg otpora, tako da se vremenom neke pukotine zbog kemijske erozije stijenske mase

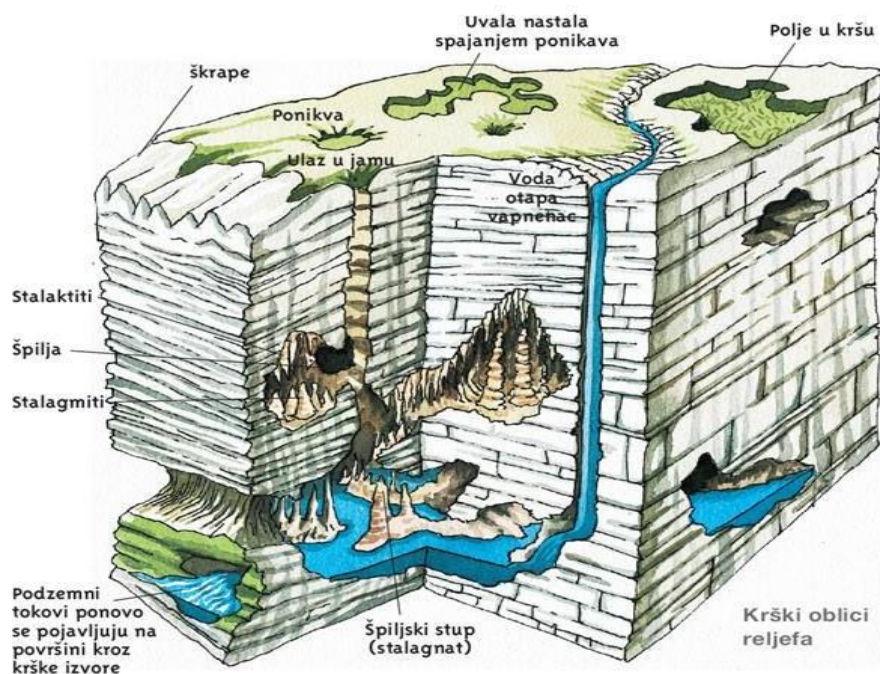
proširuju. U poprečnim presjecima pukotina koje čine podzemne tokove u kršu jedna dimenzija je razvijenija od druge tj. manja debljina, a veća širina. Svaka ovakva pukotina se treba zamišljati kao razgranati sustav sasvim nepravilnih cijevi raznih oblika i dimenzija, što bitno otežava opis strujanja [4].

Tektonika je najznačajniji činitelj okršavanja, snažni tektonski procesi u karbonatnim stijenama stvorili su mnogo rasjeda i pukotina, koje omogućuju prodiranje vode u dublje zone. Smjerovi toka podzemnih voda u kršu se najpouzdanije određuju trasiranjem. Trasiranje se sastoji od upuštanja trasera, obično boje ili nekog drugom markera u ponor te mjerenjem koncentracije trasera na izvoru. Na osnovu podataka o položaju ponora i izvora, vremenu koje je bilo potrebno da traser prijeđe put od ponora do izvora, kao i na osnovu podataka o promjeni koncentracije trasera u vremenu na lokaciji opažanih izvora se mogu donositi zaključci o kretanju vode u stijenskoj masi pukotinske ili pukotinsko-disolucijske poroznosti [4].

Krški geomorfološki oblici se dijele na nadzemne: ponikve, škrape, kamenice, udoline, uvale, polja te podzemne: špilje, jame (slika 2). Česta uzvišenja su kukovi kao strme tornjaste stijene koje strše uvis. Špilje su pretežno vodoravne šupljine poput tunela i razgranjenih hodnika u krškom podzemlju, a slične jame su uglavnom okomite ili vrlo strme u dubinu, nastaju tečenjem podzemnih voda. Kaverne su zatvorene špilje kao podzemne šupljine bez izlaza na površinu, a često se otkrivaju u kršu pri bušenju tunela. Ponori su vodene špilje kroz koje poniru rijeke ponornice.

Ponikve ili vrtače su veće kružne udubine sa strmim stranama. Najčešće su u obliku lijevka, ali postoje tanjuraste i kotlaste. Prostor s mnogim ponikvama se naziva mrežasti krš, tj. boginjavi krš. Vrlo male kružne udubine do par metara se zovu kamenice. Škrape su izduženi kameni žlijebovi nastali tečenjem vode koja otapa stijenu. Postoje raznih veličina, a izrazito duboke i velike škrape se nazivaju škripovi. Česte su rebraste škrape tj. mnogo paralelnih škrapa u nizu, ili kao prostrani škrapari (krasine), a rjeđe su meandarske (vijugave) škrape.

Uvale ili udoline su šire tanjuraste udubine veće od ponikvi, ali manje od polja. Nastale su djelovanjem vode koja otapa stijene. Uvale su nepravilne doline nastale spajanjem više ponikvi. Krška polja su najveće udubine kao doline na kršu. Nastaju dugim radom tekućice koja teče između krških stijena koja ih otapa. Na dnu polja se taloži rastresito tlo, pa su plodna i čine centar naseljenosti. Najveća krška polja u Hrvatskoj su Gacko, Ličko i Krbavsko [5].



**Slika 2. Podzemni i površinski krški geomorfološki oblici [6]**

Izlučivanjem kalcijeva karbonata iz prezasićenih otopina kalcijeva hidrogekarbonata u špiljama se stvaraju stalaktiti (slika 3.) i stalagmiti, a biološkim procesima porozna sedra. Pokriveni krš nastaje kada se preko krškoga reljefa istaloži naplavljeni materijal koji zaštićuje kršku podlogu od izravne površinske erozije i denudacije. Krš može biti pošumljen ili gol.



**Slika 3. Stalaktiti [7]**

Pri proučavanju toka podzemnih voda razlikuje se tečenje u stijenama pukotinske i pukotinsko-disolucijske poroznosti i tečenje u stijenama međuzrsne poroznosti. Međuzrsna poroznost se najčešće javlja kod rastresitih sedimenata (aluvijalnih sedimenata), pukotinska je karakteristična za stijenske mase karbonatnih stijena [5].

## **2.2. Krški vodotoci**

Osnovna značajka vodotoka u kršu je manjak vode na pretežno suhoj površini, te istodobno mnogo vode u podzemlju gdje uz kišnu klimu u dubljim šupljinama nastaju prirodni vodeni rezervoari. Krške tekućice su većinom kraće ponornice, a tipični i višestruki sustavi ponornica Republici Hrvatskoj su osobito u slivu Kupe, Like i Neretve. Više vode u kršu teče kroz karbonatno podzemlje, pa izviru kao velika krška vrela npr. Kupa, Rječina, Čikola, dubrovačka Ombla, itd.

Za tipične krške vodotoke osobito su značajni sedrene barijere preko kojih se formiraju slapovi gdje se obično taloži sedra koja stvara traventinske barijere, njih je najviše u našim krškim Dinaridima, turskom Taurusu i aližirskom Atlasu, dok ih je malo u netipskom polukršu zapadnih zemalja [8].

Dinamičan proces taloženja sedre stvorio je slapove impozantnih visina i izuzetno zanimljivih formi u Plitvičkim jezerima i poznatim slapovima rijeke Krke. U geološkoj prošlosti slapovi su bivali razarani prirodnim djelovanjem leda i

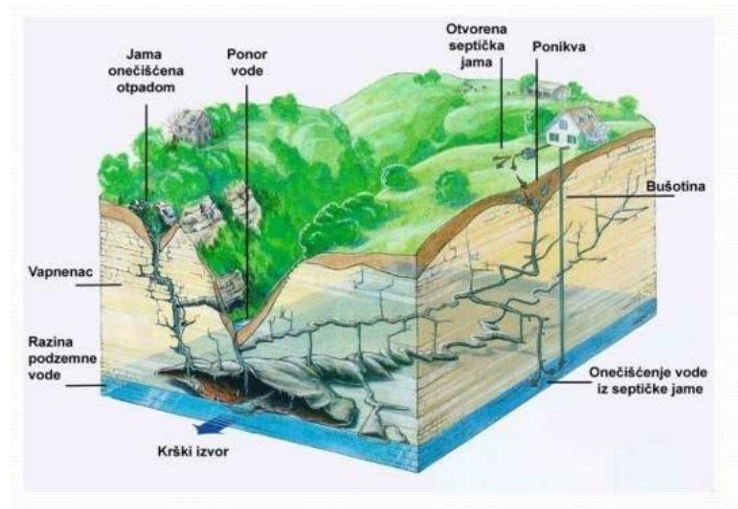
erozijom, preplavljivani ujezerenim dijelovima tokova rijeka zbog nastanka novih, viših barijera, potapani izdizanjem razine mora i ponovno građeni taloženjem sedre. Ovaj fenomen posebno se javlja gdje ima mahovina, koje omogućuje bolje prijanjanje kristala. Mahovine, alge i vodeno bilje imaju važnu ulogu u oblikovanju sedrenih barijera. Sedra je lagana, stijena puna šupljina. O vrsti mahovine ovisi izgled sedre, pa govorimo o kratoneuronskoj i briumskoj sedri. Na nejakoj mahovini stalnim prirastom nastaju i najveći slapovi, tj. što više prska, to će slap biti jači, a time i jači prirast sedre[9].

### **2.3. Podzemna voda u kršu**

Kršku podzemnu vodu teško je identificirati ili kontrolirati, budući da se bunarima ili bušotinama vrlo lako mogu promašiti glavni podzemni tokovi. Najčešći oblik korištenja podzemne vode u kršu je upravo na mjestu istjecanja, na krškim izvorima gdje podzemna voda prirodno izlazi na površinu. Glavna karakteristika krških izvora proizlazi iz činjenice da voda najčešće ima vrlo kratko vrijeme zadržavanja u podzemlju. Zato je efekt čišćenja vode u podzemlju minimalan. Voda izvire već nakon nekoliko dana ponovo na izvoru. Oluje, otopljeni snijeg i sezonske promjene u oborinama se jasno odražava na količini vode koja izvire. Na mnogim krškim izvorima količina vode koja izvire znatno varira ovisno o godišnjem dobu i hidrološkim prilikama. Karakteristike krških izvora u naseljenim područjima upravo zbog antropogenih utjecaja obično nisu zadovoljavajuće da bi ta voda bila pogodna za korištenje za ljudsku potrošnju. Neravnomjerne količine dostupne vode te prisustvo onečišćujućih tvari u vodi na mjestima istjecanja može uvelike otežati vodoopskrbu u krškim područjima, gdje vrlo često nema alternativnog izvora pitke vode [10].

Općenito, krški vodonosnici onemogućuju pouzdano predviđanje smjerova tečenja podzemne vode kao i precizno određivanje vremena putovanja podzemne vode. Karakteristike tečenja mijenjaju se vrlo brzo tijekom vremena u zavisnosti od hidrauličnog gradijenta u pojedinim dijelovima krškog vodonosnika. Hidraulička svojstva svake pojedine stijenske mase ključni su čimbenik koji kontrolira tečenje podzemnih voda. Cirkulacija podzemne vode u krškim je vodonosnicima značajno različita od cirkulacije u ostalim vrstama vodonosnika.

Specifično svojstvo krških vodonosnika, po čemu se oni najviše razlikuju od ostalih vodonosnika, je postojanje i funkcioniranje razgranate mreže krških kanala (slika 4.) koji meandriraju između slabije propusnih često i nepropusnih blokova stijena. Gustoća razgranate mreže se povećava u smjeru podzemnog toka. Unutar krškog vodonosnika istovremeno se javlja turbulentno i laminarno tečenje [12].



**Slika 4. Krški vodonosnik [13]**

Najveća opasnost onečišćenja krških vodonosnika prijeti iz naselja koje nemaju riješen sustav zbrinjavanja otpadnih voda, zatim iz podzemnih rezervoara u kojima su uskladištene štetne tvari ili iz neodgovarajuće odvodnje prometnica u zoni prihranjivanja [11].

### 3. MONITORING PODZEMNE VODE

Monitoring podzemne vode propisan je u odrednicama Okvirne direktive o vodama (2000/60/EC). Još je bolje razrađen u CIS vodiču br. 15 – Monitoring podzemne vode u kojem su dane opće upute monitoringa za različite kategorije vodonosnika, izradu konceptualnog modela, izradu mreže motrenja i učestalost uzorkovanja itd.

Monitoring se, općenito definira kao programirani proces uzorkovanja, mjerenja i kasnijeg bilježenja ili signaliziranja za različita obilježja vode s ciljem procjene postizanja specifičnih okolišnih ciljeva. Motrenje količine i kakvoće podzemne voda predstavlja osnovu za zaštitu i upravljanje vodnim resursima. Motrenje voda ostvaruje se uspostavom mreže monitoringa [14].

Monitoring podzemne vode podrazumijeva definiranje:

- hidrogeoloških karakteristika vodonosne sredine,
- kolebanje razine podzemne vode,
- odnos prihranjivanja i dreniranja,
- tok podzemne vode,
- utjecaj urbanih područja,
- prometne infrastrukture i ostalih izvora opasnosti,
- prepoznatog rizika od intruzije slane vode u vodonosnik,
- utjecaj na promjene u vodenim ekosustavima

Ciljevi monitoringa podzemnih voda su dobivanje informacija o količinskom stanju voda, dobivanje informacija koje se mogu koristiti za prikaz rasporeda kemijskog sastava podzemnih i površinskih voda, pronalaženje prisustva bilo kakvih značajnih rastućih i padajućih trendova koncentracije onečišćivača u tijelima podzemnih voda odnosno identifikacija antropogenih utjecaja [11].

Rezultati monitoringa moraju se koristiti za:

- određivanje kemijskog i količinskog stanja cjelina podzemnih voda, te uključujući procjenu raspoloživih zaliha podzemnih voda,
- pomoć u daljnjoj karakterizaciji cjelina podzemnih voda,



- vrijednost procjene rizika,
- ocjenu smjera i brzine toka u cjelinama podzemnih voda koje prelaze granice država članica EU-a,
- pomoć u izradi programa mjera,
- ocjenu učinkovitosti programa mjera,
- demonstriranje usklađenosti s ciljevima zaštite vodnih cjelina namijenjenih za zahvaćanje vode za ljudsku potrošnju i ciljevima zaštite drugih zaštićenih područja,
- karakteriziranje prirodne kakvoće podzemnih voda,
- uključujući prirodne trendove (polazne vrijednosti),
- utvrđivanje ljudskih aktivnosti potaknutih trendova u koncentraciji onečišćujućih tvari [14].

### **3.1. Konceptualni model**

Konceptualni modeli služe kao osnova za monitoring podzemnih voda. S povećavanjem količine dostupnih informacija, povećava se i točnost i složenost modela, te postaju učinkovitiji i pouzdaniji opisi sustava. Konceptualni modeli su pojednostavljeni prikazi ili opisi hidrogeološkog sustava koji se istražuje. Predstavlja trenutno razumijevanje sustava podzemnih voda temeljenog na poznavanju prirodnih karakteristika sustava.

Koriste se dva osnovna tipa konceptualnog modela:

#### a) Regionalni konceptualni model

Regionalni konceptualni model služi za razumijevanje faktora na razini cjeline podzemnih voda kojim se utvrđuje potreba uspostavljanja mreže, odnosno točke monitoringa i kako će se podaci koristiti.

## b) Lokalni konceptualni model

Lokalni konceptualni model služi za razumijevanje lokalnih faktora koji utječu na ponašanje pojedinih točaka monitoringa i u smislu kemijskog i količinskog stanja. Odabir točke monitoringa podzemnih voda zahtijeva i poznavanje lokalnih faktora koji djeluju na ponašanje točke monitoringa. Na taj se način može procijeniti prikladnost te točke za pružanje reprezentativnih informacija i podataka za potporu ciljevima programa monitoringa. Konceptualno razumijevanje je ključno za učinkovito funkcioniranje programa monitoringa [14].

### **3.2. Vrste monitoringa podzemnih voda**

**3.2.1.** S obzirom na način praćenja:

#### **a) Nadzorni monitoring**

Nadzorni monitoring je stalan sustav motrenja koji se sastoji od specifičnih mjerenja i promatranja sa svrhom upravljanja količinom i kakvoćom voda. Nadzorni monitoring usredotočen je na cjelinu podzemnih voda. Programom nadzornog monitoringa mora se vrednovati procjena rizika, dopuniti i vrednovati postupak karakterizacije i procjene rizika u odnosu na rizike neostvarivanja dobrog kemijskog stanja podzemnih voda, klasificirati cjeline podzemnih voda, potvrditi stanje cjelina podzemnih voda ili grupe cjelina za koje je na temelju procjene rizika utvrđeno da nisu pod rizikom, te procijeniti trendove. Pružanje informacija za procjenu dugoročnih trendova u prirodnim uvjetima i u koncentracijama onečišćujućih tvari koje su posljedica ljudskih aktivnosti. Program se mora provoditi tijekom svakog ciklusa upravljanja riječnim slivom, neovisno o tome je li cjelina ili skupina cjelina podzemnih voda pod rizikom.

#### **b) Operativni monitoring**

Operativnim monitoringom moraju biti obuhvaćene cjeline voda kod kojih je već ustanovljen rizik, odnosno pojava onečišćenja ili rizik od precrpljivanja, pruža podatke potrebne za ocjenu povećanja ili smanjenja koncentracije indikatora

nekog onečišćenja u vodama odnosno praćenje trenda. Operativni monitoring potreban je za: utvrđivanje kemijskog stanja svih cjelina podzemnih voda, ili grupe cjelina, za koje je ustanovljen rizik, utvrđivanje svih dugoročnih uzlaznih trendova u koncentracijama onečišćujućih tvari potaknutih ljudskim aktivnostima, može se koristiti i za procjenu djelotvornosti programa mjera provedenih radi vraćanja vodne cjeline u dobro stanje ili preokretanje uzlaznih trendova u koncentracijama onečišćujućih tvari. Pri izradi programa operativnog monitoringa mora se definirati traženo povjerenje u rezultate monitoringa. Traženo povjerenje u operativni monitoring ovisi o varijabilnosti izvora učinka i značajkama podzemne vode ili vodonosnika u pitanju, kao i o riziku u slučaju pogreške [14].

### **c) Istraživački monitoring**

**3.2.2.** S obzirom na motrene vrijednosti:

#### **a) Monitoring kvantitativnog statusa koji određuje količine podzemne vode**

Mreža praćenja količinskog stanja voda potrebna je kao pomoć pri karakterizaciji, za određivanje količinskog stanja podzemnih voda, za procjenu kemijskog stanja i analizu trendova, te podršku izradi i ocjeni programa mjera.

Preporučeni parametri za potrebe količinske procjene podzemnih voda uključuju:

- razine podzemnih voda u bušotinama ili zdencima,
- izdašnost izvora,
- karakteristike toka i/ili razine tokova površinskih voda u sušnim razdobljima (tj. kada se komponenta toka izravno povezana s oborinama može zanemariti, a istjecanje u znatnoj mjeri podržavaju podzemne vode),
- razine u značajnim močvarama i jezerima ovisnima o podzemnim vodama.

## **b) Monitoring kemijskog statusa koji je pokazatelj kakvoće podzemne vode**

Mreža opažanja moraju biti tako postavljena da pružaju skladan i sveobuhvatan pregled kemijskog stanja podzemne vode unutar cjeline s ciljem otkrivanja nazočnosti dugotrajnih antropogeno induciranih trendova onečišćenja. Temeljem inicijalne karakterizacije i ocjene antropogenog utjecaja u okviru plana upravljanja cjelinom ili skupinom cjelina podzemne vode za svaki određeni period postavlja se program nadzornog monitoringa. Ukoliko se ustanovi veliki rizik od onečišćenja uz uzlazni trend, prelazi se na operativni monitoring sve do uspostave prijašnjeg kemijskog stanja kada se vraća režim nadzornog monitoringa.

Važno je istaknuti da se prema prijedlogu monitoringa stanja kakvoće (kemijskog stanja) cjeline podzemne vode, klasifikacija vrši samo s obzirom na koncentraciju tvari čija nazočnost je rezultat ljudske aktivnosti. Povišena koncentracija tvari u neporemećenoj sredini cjeline podzemnih voda, koja je odraz prirodnih uvjeta ne utječe na kemijsko stanje cjeline podzemne vode.

Rezultati provedenog monitoringa koriste se za upravljanje podacima o količinskom i kemijskom stanju voda te za identificiranje antropogenih utjecaja [19].

## 4. PRIMJER - PLAN MOTRENJA PODZEMNIH VODA U SLIVU IZVORA JADRA I ŽRNOVNICE

### 4.1. Opis sliva izvora Jadra i Žrnovnice

Izvor Jadra je krški izvor vode s karakterističnim brzim i velikim oscilacijama protoka (slika 5.). Slivno područje izvora Jadra pripada Dinaridima, a karakteriziraju ga prevlast karbonatnih stijena i visoki stupanj tektonskih poremećaja te drugi tipični krški fenomeni. Jadro je tipična krška rijeka čiji vodni potencijal dijelom potječe od podzemnoga dotoka iz okršenog podzemlja i površinskog dotoka s direktnog sliva. Od izvora Jadro u podnožju jugozapadnih padina Mosora na visini oko 33,0 m nad morem cijelim svojim tokom ukupne dužine oko 4,2 km prolazi područjem grada Solina i na istočnom rubu Kaštelanskoga zaljeva ulazi u more. U samom središtu Solina rijeka Jadro se razdvaja na glavno korito i više rukavaca koji se prije ušća u more opet spajaju u zajedničko korito. Najveći dio rijeke je reguliran. Jadro prima bujične vode iz pet pritoka od kojih su najjači bujice Rupotina i Poklinovac. Dosadašnjim regulacijskim radovima na bujičnim pritocima i njihovim slivovima nije zaustavljena erozija zemljišta niti je bitnije smanjeno donošenje nanosa do rijeke Jadro [16].



Slika 5. Izvor Jadra [15]

Najveći potrošač izvorske vode Jadra je grad Split do kojega se voda doprema kroz dva paralelna kanala, kroz stari Dioklecijanov kanal propusne moći 550-880 l/s i novi betonski kanal kapaciteta 2000 l/s u gornjem i 1350 l/s u donjem dijelu. Stari Dioklecijanov kanal je nastao još u doba Rimskog Carstva prije 1700 godina. Kanal je širok 60 cm, visok 120 cm i dugačak oko 9 km.

Minimalna izdašnost samoga izvora Jadra kreće se između 3,60 m<sup>3</sup>/s i 3,90 m<sup>3</sup>/s. Izdašnost izvora Jadra najmanja je u sušnom razdoblju i to uglavnom u kolovozu i rujnu kada srednji mjesečni protok može pasti na svega 4,0 m<sup>3</sup>/s. U sušnom razdoblju zahvaćanje vode s izvora Jadra za potrebe vodoopskrbe najčešće poraste zbog pojačane potrošnje pa se umjesto dopuštenih 2,0 m<sup>3</sup>/s tada uzima i do 2,9 m<sup>3</sup>/s.

Prema pokazateljima kakvoće rijeka Jadro pripada prvoj kategoriji voda na cijelom toku od izvora do vodnih pragova nizvodno od središnjega dijela grada. Nizvodni dio rijeke, koji je pod utjecajem mora, i ušće pripadaju drugoj kategoriji voda [16].

Izvorište Žrnovnice se sastoji od nekoliko manjih izvora koji se javljaju na širem području u visinskom rasponu od 77,0 do 90,0 m nad morem. Izvorišne vode se djelomično koriste za vodoopskrbu naselja Žrnovnice i za navodnjavanje okolnoga poljoprivrednog zemljišta, a planira ga se uključiti u vodoopskrbni sustav grada Splita, posebno u sušnom ljetnom periodu.

Rijeka Žrnovnica (slika 6.) ima nekoliko bujičnih pritoka koji su uglavnom suhi veći dio godine. Ukupna dužina Žrnovnice od izvora do ušća u more u Stobrečkoj uvali iznosi oko 4,5 km. Protoke joj značajno i brzo variraju ovisno o količini oborina na slivu. Najveći izmjereni protok u koritu rijeke Žrnovnice (kod postaje Laboratorij) iznosi 58,4 m<sup>3</sup>/s (18.12.2004. godine), najmanji protok oko 200 l/s (1.9.1993. godine), a srednji godišnji protok 1,8 m<sup>3</sup>/s [16].



**Slika 6. Rijeka Žrnovnica [17].**

Zadnjih desetak godina u slivu izvora Jadra i Žrnovnice izgrađeni su brojni poslovni, uslužni, servisni, industrijski, prometni i ostali pretežito gospodarski objekti. Izgrađene su nove poslovne zone na području Dugopolja i Muća te se planiraju izgraditi objekti na Dicmanskom polju. To sve može uzrokovati znatno onečišćenje podzemnih voda sliva izvora Jadra i Žrnovnice, stoga od 2000. godine kontinuirano traju hidrogeološka istraživanja u svrhu zaštite resursa podzemnih voda tog područja [16].

#### **4.2. Geološka i hidrogeološka obilježja sliva**

Na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice prema geološkim značajkama zastupljeni su stijene vapnenci, dolomiti i laporoviti vapnenci mezozojske, eocenske starosti koji su prostorno vrlo male rasprostranjenosti – tj. vapnenci perma. Klastične naslage u slivu su fliške naslage eocena, klastiti trijasa i paleocenski lapori. Stratigrafski najmlađe naslage su kvartarni deluvijalni sedimenti krških polja, pretežito siltozno-pjeskovitoga sastava s različitim udjelom karbonatnih stijena. Morfološki uzdignute dijelove reljefa izgrađuju isključivo

čvrste karbonatne stijene, vapnenci i dolomiti u kojima su zastupljeni svi elementi krške morfologije, kao što su povremeni ponori, jame, spilje, vrtače, škrape, suhe doline, pojave strmo odsječenih padina itd.

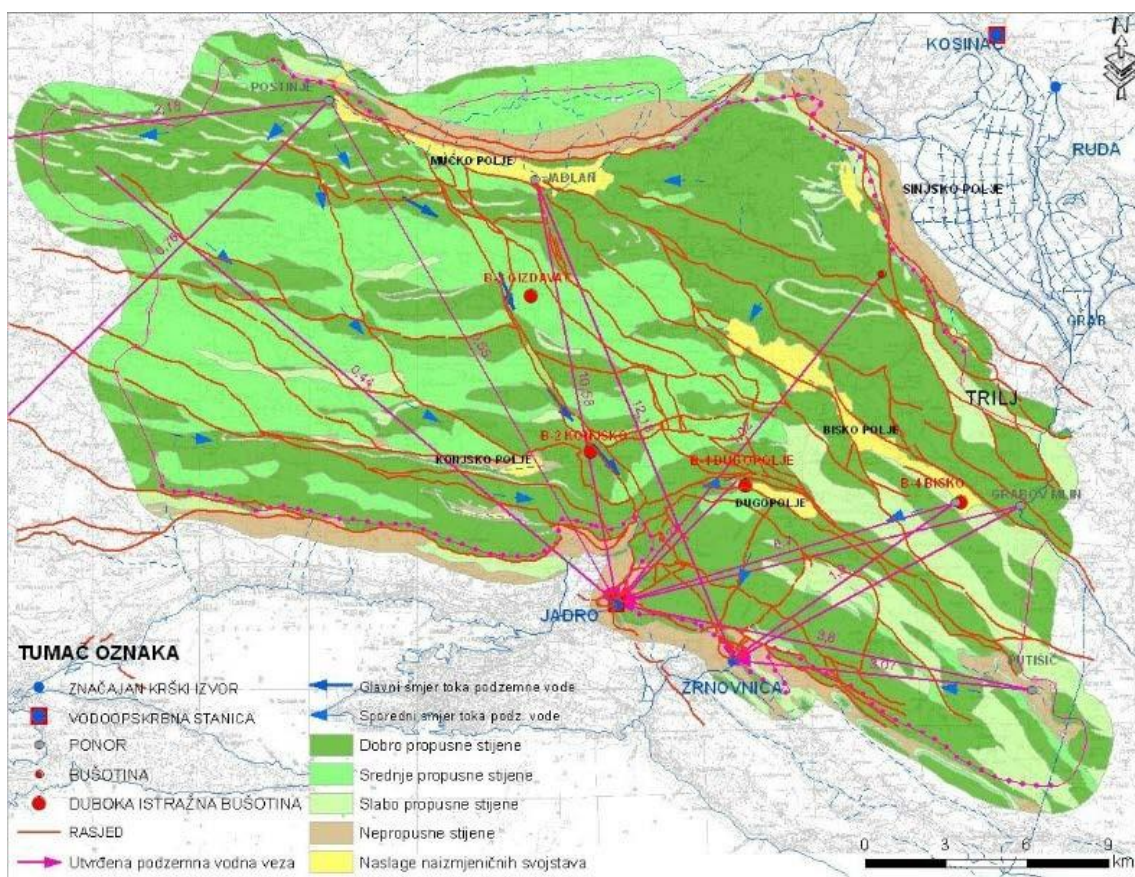
Prema hidrogeološkim karakteristikama sliva izvora Jadra i Žrnovnice izdvojene su po svojstvu vodopropusnosti četiri osnovne kategorije stijena: propusne stijene, djelomično propusne, djelomično nepropusne stijene i nepropusne stijene. Osim ovih navedenih izdvojena je podskupina naslaga naizmjeničnih svojstava, u koju su uvrštene razne nevezane ili slabovezane naslage, koje su nastale bilo površinskim trošenjem osnovne stijene ili deluvijalnim procesima trošenja materijala na padini, a koje nalazimo u krškim poljima, riječnim dolinama i općenito lokalnim depresijama. Sve kategorije vidljive su na hidrogeološkoj karti sliva (slika 7.).

Hidrogeološke značajke zastupljenih stijena, relativno su dobro upoznate temeljem dosadašnjih istraživanja. Svojstvo vodopropusnosti u prvom je redu ovisno o litološkom sastavu stijena. Međutim stijene istog litološkog sastava, zbog različitog položaja u strukturnom sklopu terena, kao i sekundarnih obilježja mogu imati različite hidrogeološke funkcije

Područje sliva Jadra i Žrnovnice općenito, pripada tipu orogenskog akumuliranog krša, u kojem su zastupljeni svi krški fenomeni. Izrazita razlomljenost terena omogućila je intenzivno okršavanje karbonatnih stijena. U području rasprostranjenja karbonatnih stijena nema stalnih tokova, već sva oborinska voda vrlo brzo ponire u podzemlje.

U dijelovima sliva u kojima su razvijene klastične naslage (krška polja), postoje lokalni gravitirajući povremeni površinski vodotoci, koji ubrzo koncentrirano poniru u ponore koji su razvijeni u krškim poljima, i na taj način dolaze u zonu horizontalne cirkulacije podzemne vode. Takvi su slučajevi zabilježeni u Mućkom, Dicmanskom, Dugopolju, Biskom i polju kod Konjskog. U vrijeme visokih voda ova polja povremeno plave, a vode kratko vrijeme poniru u brojne povremene ponore [21].





**Slika 7. Shematska hidrogeološka karta sliva izvora Jadro i Žrnovnice [18]**

Područje sliva Jadra i Žrnovnice odlikuje se naglašenom razlomljenošću i tektonskom aktivnošću. Na to izravno upućuje stalno pojavljivanje potresa. Tektonska aktivnost rezultira i promjenama strukturnih odnosa, osobito pojava rasjeda i pukotina. U zonama rasjeda koji se pružaju unutar struktura često nastaju doline. Primjer na slici 8. je duboko usječena dolina u zoni rasjeda kod izvora Žrnovnica. Uzročnici tektonske aktivnosti jesu pomaci Jadranske mikroploče. Dodatno mikroploča gura pred sobom dijelove jedinice Adriatik. Nastupa odupiranje masa stijena smještenih unutar Dinarika, tako da u dodirnom prostoru između te dvije jedinice nastaje izražena kompresija. Stijene se boraju i rasjedaju, te reversno pomiču duž rasjeda koji dopiru do površine. Položaj stijena i rasjeda otkriven je seizmičkom refleksijom [19].



**Slika 8. Duboku usječena dolina kod izvora Žrnovnice [19]**

#### **4.3. Kakvoća podzemne vode u slivu Jadra i Žrnovnice**

Posljednjih desetljeća na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice izgrađeni su i planirani razni poslovni, uslužni, prometni i gospodarski objekti, od kojih su najznačajniji poslovni objekti u Dugopolju i Muću te na Dicmanskom polju, a sve to dovelo je do povećanog rizika od pogoršanja kakvoće izvorskih voda Jadra i Žrnovnice te predstavlja potencijalne probleme za budućnost. Zbog toga su započela kompleksna hidrogeološka istraživanja s ciljem zaštite podzemnih voda tog područja.

Provedena je analiza izvora opasnosti od onečišćenja koji prijete slivu izvora Jadro i Žrnovnice po protokolu koji je predložen u sklopu projekta COST 620. Analiza opasnosti od onečišćenja podzemnih voda sastoji se od nekoliko unaprijed određenih koraka koji omogućuju dobivanje ujednačenih prikaza izvora onečišćenja te procjenu stvarne prijetnje koji izdvojeni izvori opasnosti predstavljaju za podzemnu vodu. Krajnji rezultat takve analize su karte neklasificiranih i klasificiranih izvora opasnosti koje vrlo jasno izdvajaju područja na kojima postoje objekti koji ugrožavaju kvalitetu vode u slivu.

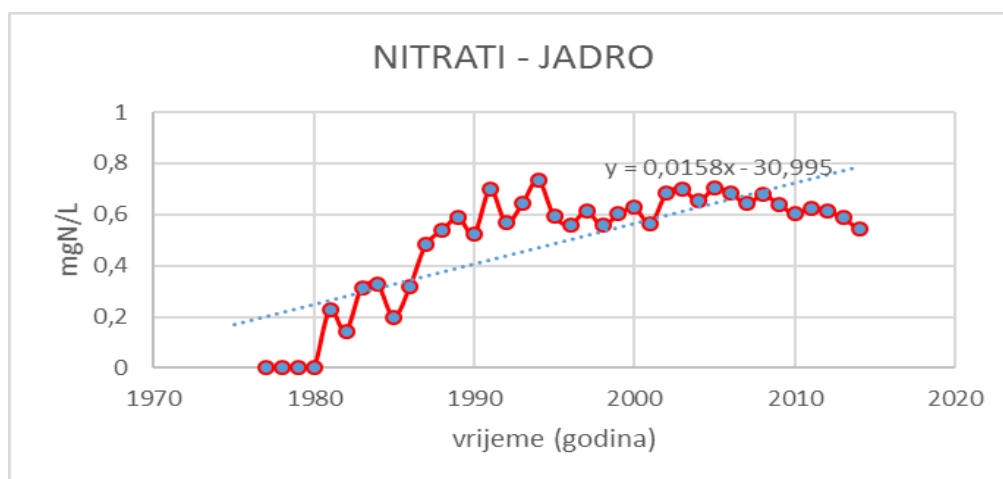
Izvorske vode Jadra i Žrnovnice uključene su i u monitoring kakvoće vode budući da se koriste za potrebe javne vodoopskrbe. Monitoring provodi Zavod za javno zdravstvo Splitsko-dalmatinske županije u mjesečnim intervalima, na temelju tih podataka su izdvojene prosječne, minimalne i maksimalne godišnje vrijednosti koncentracija ili sadržaja odabranih pokazatelja kakvoće vode. Nizovi nekih pokazatelja onečišćenja, koje propisuju i upute o implementaciji Okvirne direktive o vodama Europske unije, omogućavaju dobru ocjenu kakvoće podzemne vode u slivu [20].

Za ocjenu stanja kakvoće izvorskih voda Jadra i Žrnovnice statistički su analizirani rezultati kemijskih analiza pokazatelja kakvoće vode na izvorištu rijeke Jadro i Žrnovnica u razdoblju od 1975. do 2014.godine. Na osnovi odabranog niza podataka donijeta je prosudba o stanju kakvoće izvorskih voda i analiziranje trenda pojedinih pokazatelja onečišćenja. Za svaki od promatranih pokazatelja određene su najmanja, prosječna i najveća vrijednost za svaku godinu promatranoga razdoblja. Prema prikazanim minimalnim, prosječnim i maksimalnim pokazateljima, izvorska voda Jadra najviše je opterećena povremenim bakteriološkim onečišćenjem (Tablica 1.).Trend porasta bakteriološkog onečišćenja izvora Jadra nazočan je u cijelom intervalu opažanja od 1975. do 2014.godine. S obzirom na vrstu bakteriološkog onečišćenja izvor su pretežito otpadne vode iz domaćinstava zbog nepostojanja kanalizacijskog sustava i njihovog pročišćavanja i regulirane dispozicije. U velikom dijelu sliva intenzivirala se tijekom promatranog razdoblja izgradnja stambenih i poslovnih objekata. Naselja u slivu većinom su dobila pitku vodu, a time raste i količina otpadne vode. I druge aktivnosti u slivu uzrokuju porast onečišćenja, od poljodjelske aktivnosti, servisnih postaja za različite namjene, kamenoloma, specifičnih industrijskih pogona itd. (slika 9.) [21].

Tablica 1. Trend porasta bakteriološkog onečišćenja u razdoblju od 1975. do 2014.

[20]

godina	Broj koliformnih bakterija (NBK/100mL)			Broj fekalnih koliforma (NBFK/100mL)		
	min.	prosjeak.	max.	min.	prosjeak.	max.
1975.	0	442	3100	0	0	0
1976.	5	278	1840	0	0	0
1977.	5	299	1000	0	0	0
1978.	5	179	1000	0	193	1000
1979.	11	251	390	0	30	61
1980.	30	349	1100	0	178	390
1981.	4	727	2400	4	541	2400
1982.	9	121	460	0	69	240
1983.	0	313	2400	0	92	240
1984.	4	39	150	0	10	43
1985.	3	641	2400	0	490	2400
1986.	0	207	2400	0	41	400
1987.	0	100	460	0	33	240
1988.	0	173	460	0	59	240
1989.	0	839	2400	0	309	2400
1990.	0	1122	2400	0	863	2400
1991.	0	431	2400	0	250	2400
1992.	0	594	2400	0	594	2400
1993.	23	1443	2400	23	1443	2400
1994.	0	36	210	0	35	210
1995.	0	424	2400	0	406	2400
1996.	2	1070	3800	0	299	1500
1997.	0	461	1300	0	207	1300
1998.	5	335	1300	0	307	1300
1999.	0	1063	3500	0	1398	3500
2000.	0	1259	3500	0	504	1800
2001.	0	271	1600	0	95	350
2002.	11	628	1800	2	260	1600
2003.	5	622	1800	0	403	1800
2004.	0	41553	430000	0	472	1800
2005.	130	5946	45000	0	63	350
2006.	34	2875	16000	4	800	3500
2007.	8	35703	180000	9	2861	24000
2008.	170	22118	160000	0	115	540
2009.	540	18997	92000	2	5874	35000
2010.	5	257	1600	0	208	1600
2011.	0	54	220	0	22	79
2012.	12	57	110	0	35	85
2013.	5	256	813	1	108	499
2014.	25	121	224	9	47	184



**Slika 9. Trend koncentracije nitrata [20]**

#### **4.4. Potencijalni i aktivni izvori onečišćenja na području sliva Jadro i Žrnovnice**

U prošlosti cijeli sliv je bio vrlo slabo naseljeno područje, sa slabom potrošnjom pitke vode te samim time malom količinom otpadne vode. Porastom standarda, gradnjom prometnica, razvojem turizma i industrije, izgradnjom komunalnih i regionalnih vodovoda, povećala se i količina otpadnih voda.

U području krša vrijeme površinske koncentracije i vertikalne filtracije u podzemne vode je vrlo kratko. Kratko vrijeme kao i često ne kontinuiran pokrov tla te njegov specifičan sastav ne omogućavaju u potpunosti otopljenjenu otpadnoj tvari pročišćavanje prirodnim načinima kao disperzijom, adsorpcijom, razgradnjom i sl., te se na krškim izvorima otpadna tvar pojavljuje vrlo često po količini i sastavu znatno malo promijenjena [19].

#### **Onečišćivala prema vrsti i sastavu ispuštene tvari**

- **Organska tvar**

Organska tvar dolazi u podzemlje kao rezultat prirodnih procesa ili kao utjecaj čovjeka kroz odlaganje otpadne organske tvari i ispuste otpadnih voda. U slučaju nepostojanja odgovarajućeg kanalizacijskog sustava ili odgovarajuće nepropusne sabirne jame za prikupljanje sanitarne otpadne vode, organska tvar

će dospjeti do podzemne vode. Pri onečišćenju okoliša s tvari organskog porijekla obično dolazi i do promjena u okolišu, ali i do promjene same organske tvari.

- **Anorganska tvar**

Glavni izvori anorganskih onečišćivala podzemnih voda, među kojima su najznačajniji nitrati, fosfati, teški metali, su otpadne vode naselja, industrije i poljoprivrede. U podzemlje dolaze ispiranjem tla pripadajućeg sliva ili direktnim ispuštanjem u podzemlje. Porijeklo anorganskog onečišćenja u slivu Jadra i Žrnovnice može se povezati s uporabom mineralnih gnojiva u poljodjelstvu, ali i nizom drugih aktivnosti u slivu, metalno-prerađivačke i servisne usluge, odlagališta otpada, otpadne vode domaćinstva.

- **Mikroorganizmi**

Bakterije i virusi su značajan pokazatelj zdravstvene ispravnosti vode, te se stoga i propisuje njihovo utvrđivanje u vodi koja je namijenjena za vodoopskrbu. Kretanje mikroorganizama kroz podzemlje je složen proces, koji uključuje mehanizam transporta, disperzije i filtracije, te smanjenje broja mikroorganizama u poroznoj sredini može biti značajno. U kršu zbog kratkog vremena zadržavanja vode u podzemlju nema izraženih prirodnih odumiranja mikroorganizama. Zdravstvena ispravnost vode za piće osigurava se dezinfekcijom vode koja je zakonom propisana. Izvor mogućeg mikrobiološkog onečišćenja podzemnih voda u slivu su nedostatak kanalizacijske infrastrukture, otpadne vode iz domaćinstva, peradarstva, stočarstva i upotreba organskih gnojiva.

## 5. PROVEDENA ISTRAŽIVANJA ZA LOCIRANJE OPAŽAČKIH BUŠOTINA

Iz razloga navedenih u prethodnom poglavlju na vrijeme je prepoznata potreba uspostave sustavnog monitoringa podzemnih voda na području sliva izvora Jadro i Žrnovnica, a planom motrenja predviđena je izrada četiri istražne bušotine kojima se omogućuje izravan pristup podzemnoj vodi. Takav pristup omogućava egzaktn nadzor nad količinom i kakvoćom podzemne vode u slivu što predstavlja temelj uspješnog upravljanja vrijednim vodnim zalihama u zaleđu grada Splita i okolnog područja.

### 5.1. Strukturno – tektonska analiza

Za utvrđivanje količinskog stanja vode u kršu bušotine se lociraju prema litostratigrafskih, strukturnih i hidrogeoloških elemenata dobivenih kartiranjem na površini terena. Na taj način izdvojena su četiri lokaliteta koja su na osnovi ranijih i novih istraživanja ocijenjena perspektivnim dijelovima sliva u smislu pretežitog prihranjivanja i tečenja podzemnih voda iz perifernih dijelova sliva prema izvorima Jadra i Žrnovnice. Izdvojeno je područje Dugopolja, Konjskog, Gizdavca i Biskog.

**Područje Dugopolja** (slika 10.) koje je krško polje izduženog oblika, orijentacije osi istok-zapad, smješteno u zaleđu mosorske antiklinale. U širem području Dugopolja zastupljeni su uslojeni, pločasti, a dijelom i gromadasti vapnenci gornje krede. Sadrže lokalno proslojke i leće dolomita. Detaljnim kartiranjem izdvojene su naslage cenomana, turona i senona. Karbonatne stijene gornjokredne starosti koje izgrađuju područje potencijalne lokacije istraživačke bušotine zastupljene su od starijih prema mlađima superpozicijskim sljedovima.



**Slika 10. Područje lokacije Dugopolje [22]**

Slijedeća istraživana lokacija je **lokacija Konjsko**. Područje (slika 11.) se nalazi istočno od zaseoka Golemi. Ovim terenom prolazi trasa Jadranske autoceste, regionalna cesta Klis-Muč, kao i lokalna cesta Konjsko-Koprivno. U geološkom smislu područje izgrađuju pretežito propusne stijene krede i eocena. Na ovom području pored hidrogeoloških članova, treba izdvojiti dio široke rasjedne zone, koja je dio regionalnog rasjeda. Zona je širine više od 650 m.

U području zaseoka Golemi ovaj reversni rasjed odvaja vapnence gornje krede i eocenske fliške naslage pokrivena kvartarnim pokrivačem. U ovoj zoni na tom kontaktu postoje dva manja povremena ponora, te nedaleko rasklopnog postrojenja nalazi se Golemova jama. Na ovom je području predložena lokacija duboke istražne bušotine B-2, također predviđene dubine od 300 m.



**Slika 11. Područje lokacije Konjsko [23]**



Sljedeća je **lokacija Gizdavac** (slika 12.), područje izgrađuju karbonatne stijene gornje krede. Zastupljene su dobro uslojenim do gromadastim vapnencima turona i senona, koji sadrže lokalno tanke proslojke i leće dolomita. Osim ovih naslaga zastupljeni su i tanje uslojeni do pločasti vapnenci turona s proslojcima dolomita. Ove su dvije grupe stijena u tektonskom kontaktu. Razmatrano područje je smješteno između Konjskog i Muća između zaselaka Prugovo i Gizdavac. Najbliži zaseok su Milini na istoku dok se na jugu uzdiže brdo Smijavac. Na ovom je području predložena lokacija duboke istražno opažачke bušotine B-3, također predviđene dubine od 280 do 300 m [19].



**Slika 12. Područje lokacije Gizdavac [19]**

Četvrto izdvojeno područje (slika 13.) je smješteno u najistočnijem dijelu **Biskog polja**. Polje je na tom mjestu okruženo zaseocima Bisko, Akrap i Strikići. Radi se o završetku krškog polja u kojem poniru visoke vode koje se formiraju u Dicmanskome polju i teku prema jugoistoku i poniru u Bazin, Stipića i Balinov ponor. To je dakle područje povremenih ponora. Osim ovih u zaleđu Stipića ponora nalazi se povremeni krški izvor Litnoga, a južno od zaseoka Videkići nalazi se Videkina jama. Na Slici 11. vidi se dio Biskog polja. Na ovom je području predložena lokacija duboke istražno opažачke bušotine B-4, također predviđene dubine od 300 m.



**Slika 13. Područje lokacije Bisko [24]**

## **5.2. Geofizička istraživanja**

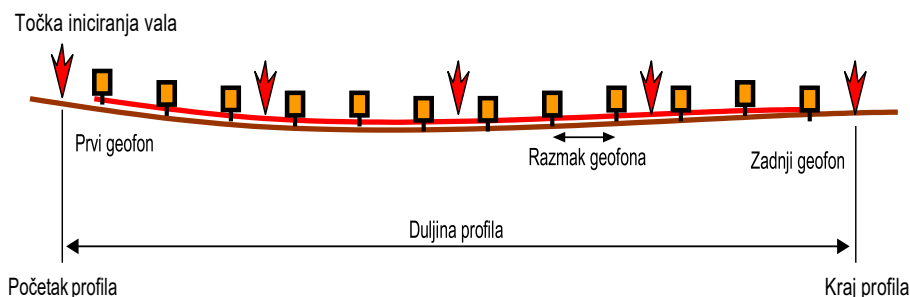
Geofizičkim istraživanjima dobije se položaj diskontinuiteta i okršenih zona u podzemlju za koje se smatra da su perspektivni po pitanju pretežitog prihranjivanja i tečenja podzemnih voda u prioritetnim podzemnim tokovima. Geofizička istraživanja nezaobilazan su dio hidrogeoloških istraživanja u definiranju 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 smjerova tečenja podzemne vode.

Za istraživanje krških vodonosnika uobičajeno se koriste različite geofizičke metode na istome terenu zbog utvrđivanja stanja u podzemlju s različitih gledišta. Najčešće se koriste geoelektrične, elektromagnetske i seizmičke metode te metode prirodnog potencijala [28].

### 5.2.1. Metoda seizmičke plitke refleksije

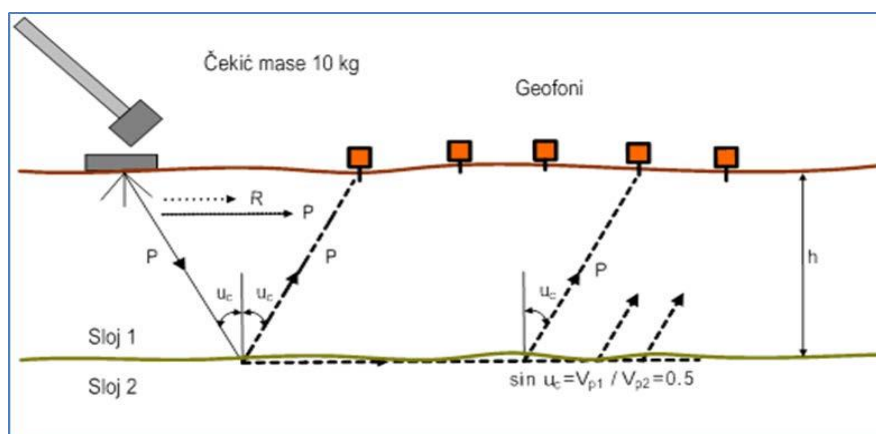
Seizmička refleksija je često korištena metoda u terenskim istraživanjima dinamičkog ponašanja tla i stijena. Ova metoda omogućuje određivanje brzina elastičnih valova u uslojenom tlu i stijeni kao funkcije dubine. U ovoj metodi se precizno mjere nailasci seizmičkih valova koji uzrokuju promjene u volumenu. 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. Temelji se na mjerenju vremena širenja elastičnih seizmičkih valova, od izvora do geofona, kroz geološke strukture pod površinom. Valovi se reflektiraju i lome na granicama geo-materijala, čija je različitost određena promjenama u njihovoj gustoći i deformacijskim svojstvima.

Pažljivo odabran raspored geofona i duljina profila omogućuju dobru rezoluciju po dubini i širini istražnog prostora (slika 14.). Na taj se način jasno mogu odrediti konture geoloških formacija i dubina do kontakata materijala različitih mehaničkih svojstava. Pouzdanost interpretacije rezultata mjerenja ovisi i o mogućnosti pojave slojeva veće brzine iznad slojeva manje seizmičke brzine. Morfološki oblik istraživnog prostora nije bio ograničavajući parametar za optimalno postavljenje profila, odnosno izbora njegove duljine.



Slika 14. Raspored geofona [28]

Kao izvor seizmičkog vala u provedenim se istraživanjima koristio čekić mase 10 kg (slika 15.). Impuls mase čekića i prijenos energije udara preko udarne ploče znatno ovisi o ostvarenom dobrom kontaktu ploče i podloge.



**Slika 15. Princip mjerenja plitkom seizmičkom refrakcijom [28]**

Metoda je korisna kod istraživanja podzemlja kojeg tvore nevezani sedimenti, te i kod karbonatnih stijena krša. Prednost refleksije je da nisu potrebne bušotine, dok joj je nedostatak velika cijena, a efikasna je samo u uslojenom tlu.

### **5.2.2. Metoda geoelektrične tomografije (LIS)**

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. Mjerenje na terenu izvodi se opremom koja se sastoji od digitalnog instrumenta za mjerenje otpora u tlu, selektora elektroda, 4 elektrodna kabla od

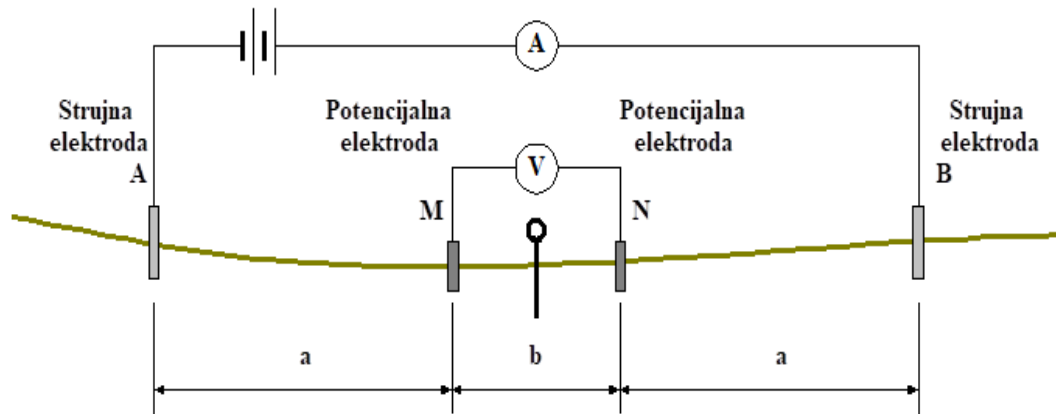
kojih svaki ima 21 izlaz, i 64 elektrode od nehrđajućeg čelika sa spojnicama. Mjerenje je potpuno automatizirano i kontrolirano programom za prikupljanje podataka. U izrazito kompleksnim i kompliciranim geološkim modelima najbolje bi bilo primijeniti trodimenzionalna istraživanja jer ona uzimaju u obzir promjene otpornosti u sve tri dimenzije geomedija [19].

### **5.2.3. Geoelektično sondiranje**

Metodageoelektričnog sondiranja je utvrđivanje granica i debljina litoloških struktura koje bi mogle biti potencijalni vodonosnici. Mjerenja se temelje na razlici i kontrastu geofizičkih svojstava, odnosno električne otpornosti geomedija koji se promatra. Geoelektrična sonda predstavlja geoelektričnu strukturnu bušotinu, pa su rezultati sondiranja relevantni za promjene specifičnog električnog otpora ispod određene točke na površini terena. Dubina sondiranja ovisi o međusobnoj udaljenosti strujnih i naponskih elektroda, pa što je veći međusobni razmak elektroda, veća je dubina ispitivanja. Elektrode se obično postavljaju u ravnoj liniji, s time da se strujne elektrode nalaze izvan naponskih elektroda. Mjeri se jakost struje između strujnih elektroda pa se iz razlike potencijala između potencijalnih elektroda, pomoću konstante geometrijskih odnosa svih elektroda, određuje prividna otpornost. Interpretacijom se određuju debljine i specifični električni otpor pojedinih geoelektričnih sredina.

Vertikalno električno sondiranje (VES) je metoda geofizičkog istraživanja kod koje se koristi određen raspored četiri elektrode, tako da se struja preko dvije vanjske strujne elektrode uvodi u tlo, a između dvije naponske elektrode se mjeri razlika potencijala nastala propuštanjem struje kroz tlo. Podaci mjerenja odnose se na središnju točku, a postupnim udaljavanjem strujnih elektroda od te točke, po određenom pravcu, dubina prodiranja struje se povećava, pa se podaci mjerenja odnose na sve dublje horizonte.

Za geoelektrično sondiranje najčešće se koriste dva načina rasporeda elektroda. Najjednostavniji način, u smislu geometrijskog rasporeda elektroda, je Wennerov raspored, dok je najbrži raspored, u smislu terenskog rada, Schlumbergerov način geoelektričnog sondiranja (slika 16.) [19].



Slika 16. Schlumbergerov elektrodni raspored [19]

#### 5.2.4. Rezultati geofizičkih istraživanja na području sliva Jadra i Žrnovnice

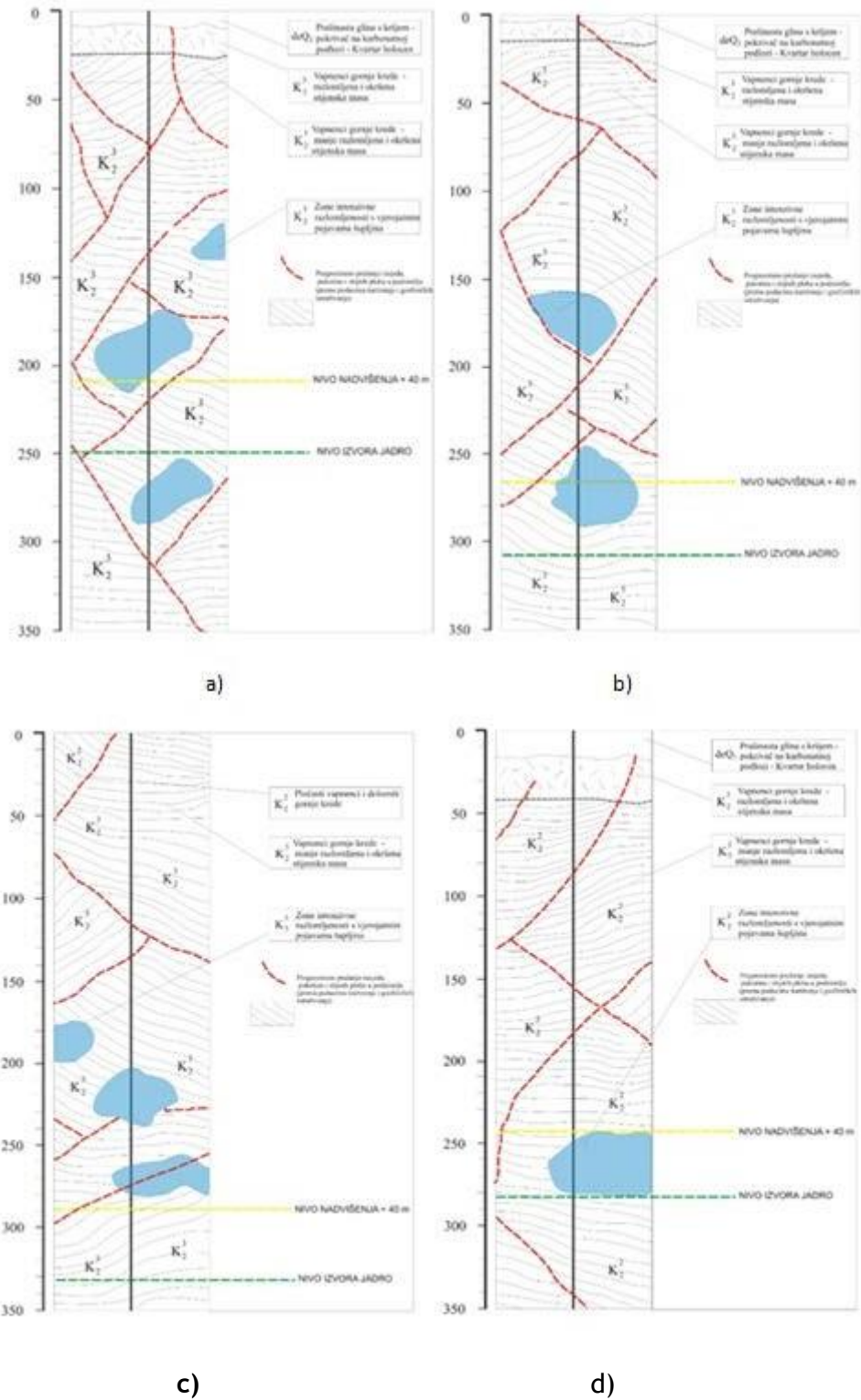
Na osnovi hidrogeoloških karata planirani su detaljni geofizički istražni radovi. Najprije je primijenjena metoda seizmičke plitke refleksije visoke razlučivosti, s ciljem otkrivanja područja intenzivne razlomljenosti u karbonatnim stijenama gdje postoji komunikacija podzemne vode. Rezultati dobiveni mjerenjima metodom seizmičke plitke refleksije visoke razlučivosti prikazani su u obliku interpretiranih dubinskih seizmičkih presjeka (slika 17). Sva mjerenja su svedena na površinu terena i od nje se mjere dubine.

Cilj istraživanja geoelektričnim sondiranjem je bio detekcija okršenih zona, a primijenjena je Schlumbergerova metoda vertikalnog geoelektričnog sondiranja (VES) na ukupno 6 geoelektričnih sondi. Schlumbergerova metoda geoelektričnog sondiranja je odabrana i kao kontrolno i komplementarno geofizičko istraživanje u odnosu na geoelektričnu tomografiju i seizmičku refleksiju, primarne metode geofizičkog istraživanja. Na temelju izmjerenih i

interpretiranih geoelektričnih otpornosti moguće je razlučiti krške formacije prema stupnju okršenosti i na dubinama većim od 100 m.

Rezultati mjerenja geoelektričnom tomografijom poslužili su za što točnije lociranje rasjednih i pukotinskih zona, u prvom redu bliže površini terena, a onda i praćenje njihovih prostiranja dalje u dubinu identificirajući ih na presjecima refleksijske seizmike. Na presjecima geoelektrične tomografije utvrđene su rasjedno-pukotinske zone relativno plitko, do dubine od 85m. Područja u kojima su u dijelovima ispod kvartarnih naslaga dobivene niže električne otpornosti ukazuju na postojanje rasjeda ili rasjednih zona [19].

Nakon obrade terenski snimljenih podataka rezultati su interpretirani te su identificirana područja u podzemlju u kojima se očekuje velika razlomljenost stijena i pojava šupljina koje omogućavaju komunikaciju podzemne vode. Kao krajnji rezultat istraživanja predložene su točke bušenja tako da se na dubinama u području pretpostavljenog vodnog gradijenta probuše spomenute razlomljene i moguće kavernozone stijene, što se vidi iz prognoznih profila istražnih bušotina (Slika 18).



Slika 17. Prognozirani hidrološki profil projektirane istražno opažačke bušotine a) B-1 Dugopolje, b) B-2 Konjsko, c) B-3 Gizdovac, d) B-4 Bisko [19]



## 6. METODE IZRADE ISTRAŽNIH BUŠOTINA

Bušenje je postupak prodiranja bušačkog pribora u tlo ili stijenu do određene dubine. Dubina bušenja treba dosegnuti zonu tla u kojoj se ne očekuju znatnije promjene naprezanja i pojave deformacija izgradnjom objekta, ako se rade istraživanja za temeljenje objekta. Izvođenje bušenja za potrebe građenja podrazumijeva uzimanje poremećenih i neporemećenih uzoraka za laboratorijska ispitivanja i izvođenje terenskih ispitivanja u bušotinama. Postoji niz metoda za izvođenje bušotina u tlu i stijeni. Prema principu rada bušačkog pribora istražno bušenje se izvodi udarnom, rotacijskom ili kombiniranom metodom [28].

### 6.1. Istražno udarno bušenje

Udarno bušenje je najstarija metoda bušenja (slika 18.). Glava se pogonskim strojem podiže na određenu visinu i pušta da slobodno pada na dno bušotine. Postupak je vrlo grub, teško je uočiti fine detalje uslojenosti, a uzorci tla su poremećeni i mogu koristiti samo za klasifikacijska ispitivanja. Koristi se najčešće zbog jednostavnosti izvedbe i niske cijene.



Slika 18. Istražno udarno bušenje [27]

## **6.2. Istražno rotacijsko bušenje**

Rotacijsko bušenje izvodi se nanošenjem okretnog momenta na bušači pribor. Postoji veliki broj tipova rotacijskih bušačih garnitura, a najjednostavnija je podjela na garniture koje pri bušenju koriste spiralna svrdla, na garniture koje koriste metodu bušenja s jezgrovanjem i one bez jezgrovanja.

### **6.2.1. Rotacijsko bušenje spiralnim svrdlima**

Svrdlanje je postupak koji koristi čeličnu plosnatu spiralu učvršćenu na bušaču šipku. Šipka sa spiralom strojno se uvrće u tlo. Prilikom vađenja spirala iznosi pregnječene uzorke tla. Prilikom vađenja šipke sa spiralom u pijesku i šljunku može doći do urušavanja bušotine, a kod meke gline do njenog istiskivanja u otvor bušotine. Iz tog se razloga koristi zaštita bušotine čeličnom obloženom cijevi odnosno zaštitna kolona kroz koju prolazi svrdlo i koja se utiskuje rotacijom kroz nestabilne zone tla. Postupak svrdlanja je relativno ekonomičan i pruža mogućnost vađenja poremećenih i neporemećenih uzoraka tla.

### **6.2.2. Rotacijsko bušenje s jezgrovanjem**

Bušači alat, koji je pričvršćen na niz šupljih bušačih šipki, strojno se rotira i hidraulički utiskuje s površine terena. Na dnu šipki pričvršćena je posebna jezgrena cijev na čijem je dnu šuplja bušača glava s krunom. Kruna je nazubljeni alat, čiji su zubi izrađeni od posebno obrađenog čelika (vidija) ili industrijskih dijamanata koji su otporni na habanje. Kroz bušaće šipke i jezgrenu cijev utiskuje se voda koja hladi pribor ugrijan od rada, a iznosi strugotine ispod krune kroz bušotinu do površine terena.

### **6.2.3. Rotacijsko bušenje bez jezgrovanja**

Koristi se kod istražnog bušenja u stijenama kada uzorci mogu biti poremećeni, odnosno važno je samo identificirati uzorak stijene. Bušenje bez jezgrovanja puno je brže i jeftinije od bušenja s jezgrovanjem.

Na dnu šipki pričvršćeno je bušaće dlijetlo koje je većeg promjera od promjera bušaćih šipki, kako bi se uz vanjske stijenske šipki na površinu mogle iznositi nabušene čestice stijene. Za iznošenje nabušenih čestica na površinu koristi se voda, pjena ili komprimirani zrak [28].

### **6.3. Uzimanje uzoraka iz bušotina**

Eurokod 7 definira pet kategorija kvalitete uzorka za laboratorijsko ispitivanje pojedinih parametara tla. Krutost i čvrstoću moguće je ispitivati samo iz uzoraka najbolje klase kvalitete koja karakterizira neporemećeni uzorak. Neka druga svojstva, koja su manje osjetljiva na poremećaje, mogu se određivati i iz uzoraka niže klase kvalitete [28]. U ovom slučaju radi ispitivanja prihvatnog kapaciteta pokrova krškog vodonosnika tijekom bušenja obavljeno je i prikupljanje uzoraka tla i sedimenata u intervalima duž bušotina, kao i snimljeno stanje bušotine.

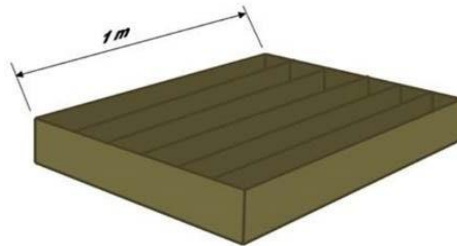
#### **6.3.1. Uzorkovanje slabovezanih materijala**

Iz bušotina se neporemećeni uzorci tla vade posebnim priborom. On se sastoji od noža koji prodire u tlo, dvodijelne cijevi dužine 0,5 m u koji ulazi uzorak i spojnog dijela između bušaćih šipki i cijevi za uzorak. Postoje i razni dodaci koji su umetnuti u cijev, odmah iza noža, a koji sprečavaju ispadanje uzorka.

Istraživanja su pokazala da je poremećaj uzorka manji što cijev uzorkivača (cilindar) ima tanje stijenke (ili veći promjer), što je oštrije kut noža na dnu cijevi i ako se stabilnost dna bušotine tijekom utiskivanja uzorkivača može osigurati s pridržanim klipom, čije je pomicanje spriječeno tijekom utiskivanja tankostijenog cilindra.

### 6.3.2. Uzorkovanje stijenske mase

Da bi se smanjilo moguće oštećenje jezgre, do kojeg dolazi rotacijom jezgrene cijevi i prolaskom vode za hlađenje i ispiranje, razvijen je alat s dvostrukom jezgrenom cijevi. Jezgra iz jezgrene cijevi (slika 19.) odlaže se u posebne drvene sanduke (slika 20.) radi daljnjeg pregleda i uzimanja uzoraka za ispitivanje u laboratoriju, te se izrađuje fotodokumentacija. Sanduci su širine 1 m.



Slika 19. Sanduk za odlaganje jezgre iz bušotine [28]

Na izvađenim jezgrama iz istražnih bušotina dobivaju se važni podaci o rasporedu naslaga te o njihovim osnovnim značajkama.



Slika 20. Primjer izvađene jezgre [25]

Determinacijom jezgri želi se dobiti:

- Raspored naslaga po dubini;
- Litološki opis;
- RQD (Rock Quality Designation);
- Linijski broj pukotina;

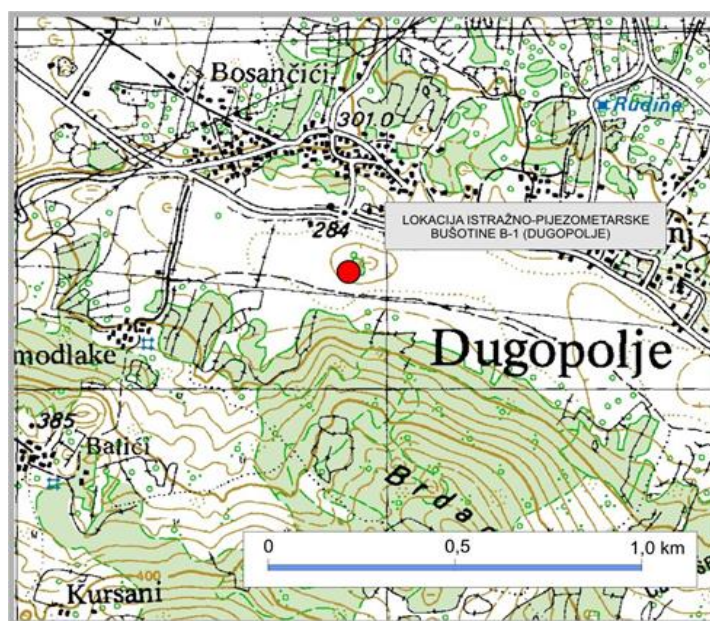
- Osnovne značajke diskontinuiteta (nagib, međusobni razmak susjednih ploha iste familije pukotina, hrapavost i čvrstoća stjenki diskontinuiteta);
- Čvrstoća intaktnog materijala pomoću Schmidtovog čekića;
- Reprezentativni uzorci za provedbu laboratorijskih ispitivanja.

S obzirom na to da je predviđeno u bušotine nakon bušenja ugrađivati senzore za stalno praćenje kvalitete vode, bilo je jako važno da se bušenje izvede vrlo odgovorno, kvalitetno i uz minimalnu devijaciju, što je i učinjeno.

## 7. IZVEDBA I OPREMANJE BUŠOTINA

### 7.1. Izvedba istražno – piezometarske bušotine na lokaciji Dugopolje B-1

Lokacija je odabrana na osnovi poznavanja regionalnih hidrogeoloških odnosa u slivu, rezultata detaljnog hidrogeološkog kartiranja i detaljnih geofizičkih istraživanja.



Slika 21. Lokacija bušotine B-1 [25]

Radovi su započeli 12. veljače 2008. dopremom postrojenja i opreme na lokaciju, a završeni 05. lipnja 2008. godine. Bušenje je izvedeno uz kontinuirani geotehnički nadzor. Bušenje je prema nadzoru ocjenjeno vrlo kvalitetnim, bilo je predviđeno intervalno jezgrovanje do dubine 180 m, s ciljem uštede sredstava. Prije snimanja kamerom u bušotini, čišćenje bušotine nije najbolje uspjelo, što se odrazilo i na kvalitetu snimanja. Oprema za videoendoskopiju bušotine nije bila odgovarajuća jer je poslužila samo za video snimanje, ali ne i za mjerenje dimenzija i prostornog položaja diskontinuiteta u stijeni. Nekoliko desetaka metara iznad razine podzemne vode kamera je prolazila kroz gustu pjenu. Prisutnost čestica u vodi onemogućilo je kvalitetno snimanje, posebno zbog jake refleksije svjetla.

Zbog toga nije bilo moguće vertikalno snimanje, koje u kontinuitetu daje pregled bušotine od 360°. Pogled kamere morao je biti pod kosim kutom zbog čega cca 180° bušotine nije snimano. Također je izvršeno mjerenje hidrogeokemijskih pokazatelja po dubini u bušotini B-1. Mjerenjem elektrolitičke vodljivosti ustanovljeno je da je stupac vode od 108,90 pa do 150,00 m saturiran pjenom za bušenje i česticama. To se vidjelo na osnovi visokih vrijednosti elektrolitičke vodljivosti. Ispod tog intervala vrijednosti elektrolitičke vodljivosti imaju vrijednosti karakteristične za krške podzemne vode. Dubina do podzemne vode je iznosila 108,90 m od ušća bušotine. Kod bušotine na Dugopolju (slika 21.) izmjerene minimalne razine podzemne vode iznose 85 m n.m., a maksimalne 205 m n.m., što ukazuje na veliku amplitudu kolebanja podzemnih voda, a ujedno ukazuje da je u vrijeme visokih voda podzemna voda na samo 30 metara dubine od površine terena [29].

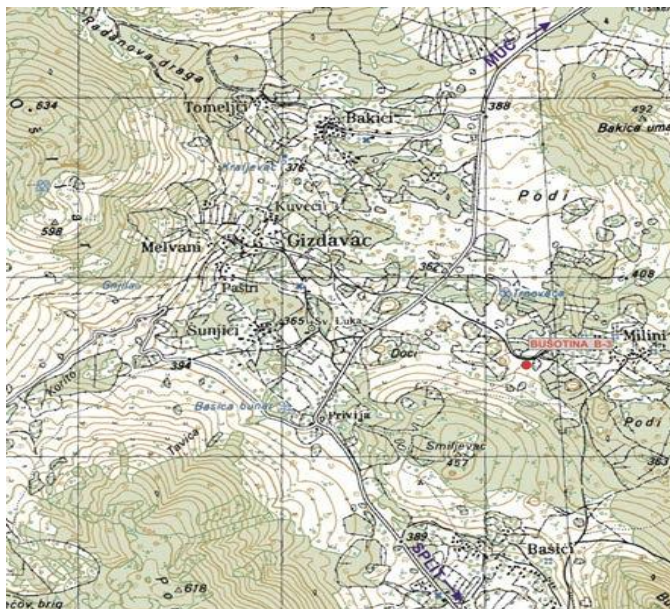
Bušotina je do 10,40 m bušena u kvartarnim naslagama glinovitog i prašinasto-glinovitog sastava. Nakon 10,40 m nabušila karbonatnu podlogu krškog polja te je cijelom dužinom bušena u vapnencima, te brečolikim vapnencima. Nabušene su brojne kose i vertikalne pukotine [25].

Predviđena mjerna oprema za ugradnju u bušotinu:

- Sonda sa sensorima :razina vode,temperatura vode,elektrovodljivost,mutnoća vode,
- Višekanalniprikupljač podataka (logger) sa GSM/GPRS modemom,
- Stup solarnog kolektora,
- Solarni kolektor snage 50 W,
- Regulator punjenja akumulatora,
- Akumulator 60 Ah,
- Pribor za montažu [25].

## 7.2. Izvedba istražno –piezometarske bušotine na lokaciji Gizdovac B-3

Odabir lokacije je odabran na osnovu poznavanja regionalnih hidrogeoloških odnosa u slivu, rezultata detaljnog hidrogeološkog kartiranja i detaljnih geofizičkih istraživanja.



Slika 22. Lokacija bušotine B-3 [26]

Bušenje je izvedeno pod geotehničkim nadzorom, te je provedena determinacija jezgre. Bušotina je do 1 m bušena u kvartarnim naslagama glinovitog i prašinsto-glinovitog sastava s brojnim stijenskim kršem različitih dimenzija. Nakon toga odmah su nabušene karbonatne stijene koje su se nastavile nizati cijelom dužinom bušotine do brečolikih i okršenih vapnenaca i razlomljenih dolomita. Nabušene su brojne kose i vertikalne pukotine. Numerički pokazatelji kvalitete stijene RQD izračunati su u dijelu bušotine u kojem je provedeno kontinuirano jezgrovanje. Bušenje je prošlo bez značajnijih problema, a za bušotinu je utvrđeno kako ima zadovoljavajuću komunikaciju s podzemnom vodom, što i jest njihov glavni cilj. Nakon izvedbe, bušotine su opremljene sondama sa sensorima za mjerenje razina vode, temperature vode, elektrovodljivosti i mutnoće vode, zatim višekanalnim prikupljačem podataka (logger) s GMS/GPRS modemom te akumulatorom. Nakon početnog upuštanja u rad uočeni su neki nedostaci senzora, mjernih sonde te napajanja koji su u toku rada ispravljani.



Motrenjem promjena razine vode u istražno-piezometarskoj bušotini B-1 u Dugopolju od ljeta 2008. godine do ljeta 2009. u svrhu promjene razine podzemne vode uspostavilo se da je raspon minimalnih i maksimalnih razina ispod 100 m, očekuje se sličan raspon i u istražno-piezometarskoj bušotini B-3 (slika 22.) na Gizdavcu. Na temelju tih rezultata, uzimajući u obzir mjerenja razine podzemne vode, odabran je senzor razine vode sa mjernim opsegom od 0 – 100 m te senzor mutnoće kojemu je rad limitiran do maksimalnih 10 bara. Međutim na taj način nije ispoštovan dogovor s hidrogeološkim nadzorom koji je inzistirao da se mjerna sonda na Gizdavcu spusti na dubinu 240 m.

To je rezultiralo preko 100 m stupca vode do koliko su predviđeni radni tlakovi senzora razine i mutnoće. Time je došlo do pojave blokiranja rada i neispravnog mjerenja sonde. Dosadašnja mjerenja razine podzemne vode u bušotini B-1 na Dugopolju pokazala su varijacije razine veće od 90 m tijekom jednoipolgodišnjeg monitoringa dok su u bušotini B-3 na Gizdavcu nakon 6 mjeseci mjerenja ustanovljene varijacije od 30 m. Isto tako zanimljiva je usporedba mjerenja razina podzemnih voda u bušotini B-1 sredinom prosinca 2008. i 2009. kada je razina podzemne vode za približno 70 metara niža od one iz 2008. godine [26].

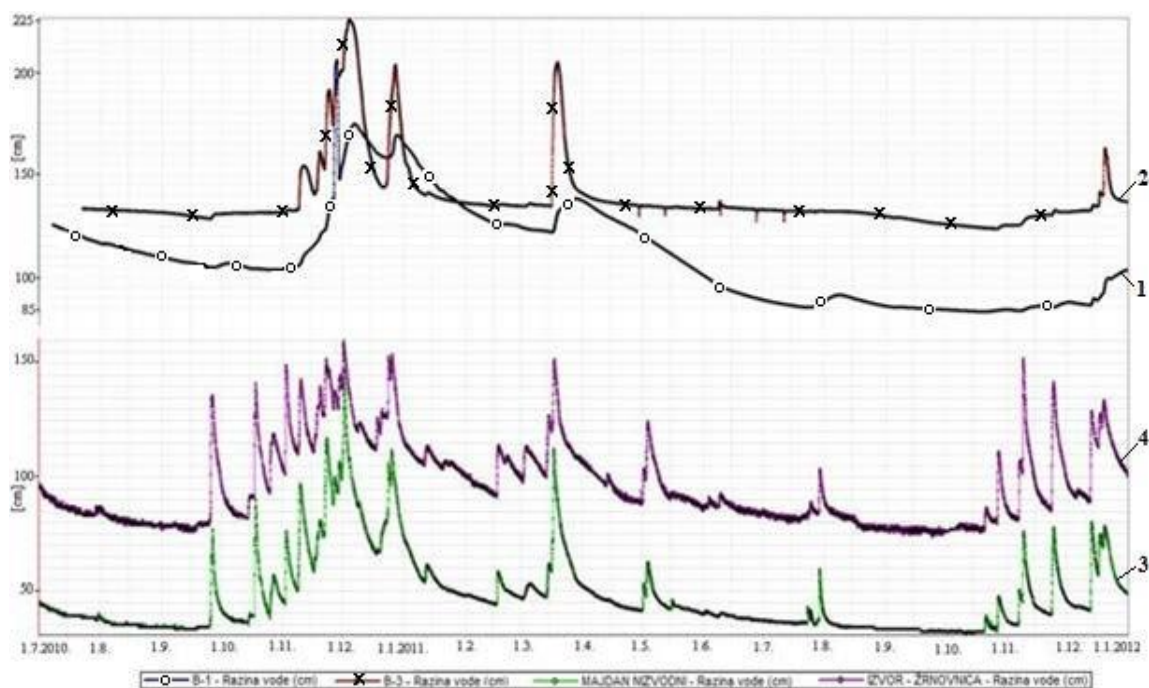
Predviđena mjerna oprema:

- Sonda sa senzorima : razina vode, temperature vode, elektrovodljivost, mutnoća vode,
- Višekanalni prikupljač podataka (logger) sa GMS/GPRS modemom,
- Stup solarnog kolektora,
- Solarni kolektor snage 50 W,
- Regulator punjenja akumulatora,
- Akumulator 60 Ah,
- Pribor za montažu [25].

Nakon toga bila je izvedena bušotina B-4 na lokaciji Bisko. Bušenje je prošlo bez značajnijih problema. Nakon izvedbe, bušotinaje opremljena sondom sa sensorima za mjerenje razina vode, temperature vode, elektrovodljivosti i mutnoće vode, zatim višekanalnim prikupljačem podataka (logger) s GSM/GPRS modemom te akumulatorom. Nakon početnog upuštanja u rad uočeni su neki nedostaci senzora, mjernih sondi te napajanja koji su u toku rada ispravljani [26].

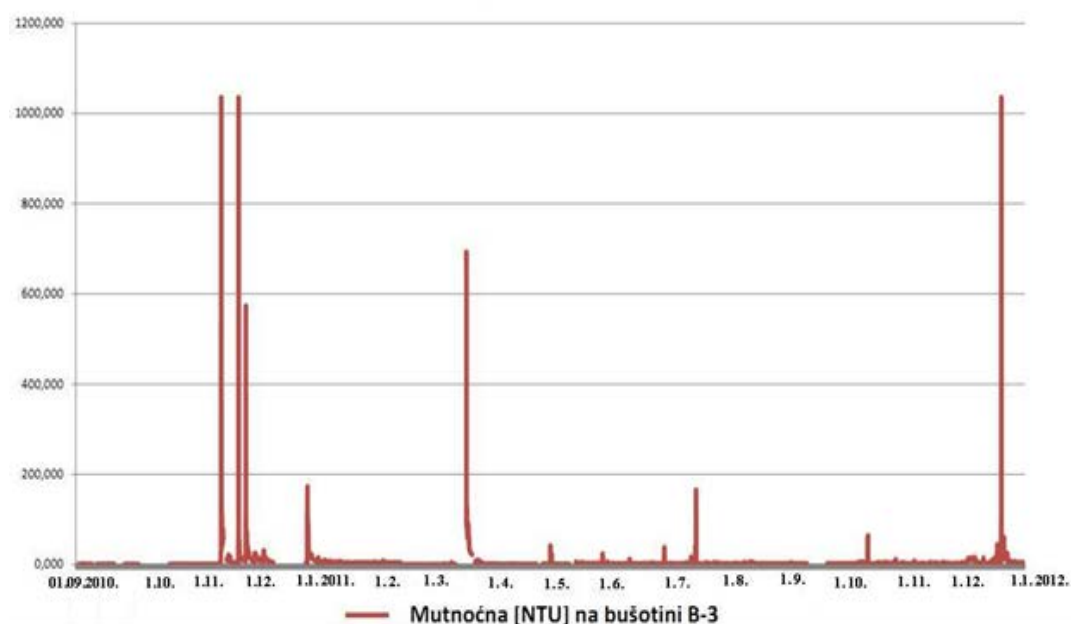
## 8. RASPRAVA

Primjer dostupnih rezultata provedenog monitoringa razina podzemnih voda prikazani su na slici 23. Na dijagramu su paralelno prikazane razine podzemnih voda u bušotinama (gornje dvije krivulje – Dugopolje na slici linija 1, a Gizdavac linija 2) i mjereni vodostaji na rijekama Jadro i Žrnovnica (Jadro linija 3, Žrnovnica linija 4). Razine u bušotinama prikazane su u apsolutnim kotama, a vodostaji u centimetrima. Iz dijagrama je vidljivo kako postoji veliko kolebanje podzemnih voda ovisno o hidrološkim uvjetima na slivu. Također je vidljivo kako izdašnosti izvora rastu u isto vrijeme kao i razine podzemnih voda (porast se vidi malo ranije što može biti posljedica površinskog otjecanja s izravnog sliva kanala na kojima su postavljeni limnigrafi za motrenje) i amplitude kolebanja su im gotovo jednakih veličina (pogotovo Jadro i Gizdavac) što potvrđuje brzu podzemnu vodnu vezu i podjednaku količinu dotoka.



Slika 23. Dijagram mjerenih razina podzemnih voda u bušotinama B-1 i B-3 i mjereni vodostaji na rijekama Jadro i Žrnovnica [29]

Kod bušotine na Dugopolju izmjerene minimalne razine podzemne vode iznose 85 m n.m., a maksimalne 205 m n.m., što ukazuje na veliku amplitudu kolebanja podzemnih voda, a ujedno ukazuje da je u vrijeme visokih voda podzemna voda na samo 30 metara dubine od površine terena. Kod bušotine na Gizdavcu situacija je slična, minimalna kota razine podzemne vode je na 125 m n.m., a maksimalna na 225 m n.m., odnosno minimalna dubina do vode je 35 metara. U oba slučaja, za vrijeme obilnih oborina razina podzemne vode se nalazi bliže površini terena i ispire veliku debljinu nesaturirane zone, što je vrlo važno radi procjene ranjivosti i rizika od onečišćenja podzemnih voda te prognoze pojave mutnoće u izvorskim vodama. Osim podataka o razinama podzemne vode u ovom radu korišteni su i podaci monitoringa mutnoće podzemne vode u dubokim istražnim bušotinama. Smatra se kako je to jedan od važnih pokazatelja kakvoće jer ukazuje na odnos količine oborina i kakvoće podzemnih voda (slika 24.) [18].



Slika 24. Dijagram mjerenja mutnoće u bušotini B-3 [29]

Iako je većinu vremena u periodu koji je obrađen vrijednost mutnoće ispod 4 NTU jedinica, koliko je propisano tada važećim Pravilnikom o parametrima sukladnosti i metodama analize vode za ljudsku potrošnju (NN 125/13) (najčešće između 1 i 2 NTU), graf prikazan na slici 4. prikazuje promjene mutnoće koje ukazuju na drastično povećanje mutnoće u vrijeme podizanja razina podzemnih voda (uslijed obilnih padalina), a javlja se kao posljedica ispiranja tla i nakupljenih sedimenata iz nezasićene zone vodonosnika.

Izvedba istražnih bušotina osim monitoringa omogućuje dobivanje informacija za procjenu ranjivosti vodonosnog sustava kao i verifikaciju geokemijskog modela. Izvedene duboke istražne bušotine osim za kontinuirano mjerenje razine podzemnih voda, namijenjene su i za povremeno uzimanje uzoraka za ispitivanje kakvoće podzemnih voda u slivu, kao i za specifične analize za određene potrebe poput motrenja pronosa trasera na određenim lokacijama ili za npr. izotopne analize. Osim razine podzemne vode, mjerni instrumenti prilagođeni monitoringu kakvoće vode u dubokim bušotinama vrlo uspješno mjere temperaturu vode, el. vodljivost i ukupno otopljenu krutu tvar u podzemnoj vodi, što su sve vrlo korisne informacije za pravovremeno reagiranje u svrhu zaštite podzemnih voda.

## 9. ZAKLJUČAK

Značaj podzemne vode je danas jako veliki, te ona ujedno omogućuje postojanje života. Voda je osnovica prirode i kriterij gospodarskog i ekonomskog razvoja. Porastom broja stanovnika i porastom industrije rastu potrebe za vodom, a samim time dolazi i do većih količina otpadnih voda. Kako ne bi došlo do zagađivanja i prekomjernog crpljenja vode potrebno ju je zaštititi i planski iskorištavati.

Na temelju litostratigrafskih, strukturnih i hidrogeoloških elemenata dobivenih kartiranjem na površini terena i geofizičkim istraživanjima lociraju se bušotine pomoću kojih se dobije položaj diskontinuiteta i okršenih zona u podzemlju za koje se smatra da postoji prihranjivanje i tečenje podzemnih voda u podzemnim tokovima. Kako bi se dodatno pratilo stanje količine i kakvoće podzemne vode u slivu izvora Jadra i Žrnovnice, planom motrenja predviđena je izrada četiri duboke istražno opažačke bušotine. Odabrane su četiri lokacije za izradu bušotine Dugopolje, Gizdavac, Bisko, Konjsko polje, na njima su provedena geofizička istraživanja pomoću metode plitke seizmičke refleksije, metode električnog sondiranja i metode geoelektrične tomografije. Bušotine na Dugopolju, Gizdavcu i Biskom polju su izbušene i opremljene, a bušotina na Konjskom je izmještena za potrebe bušenja te nažalost nije uspjela obuhvatiti predviđeni okršeni dio podzemlja već je nakon pedesetak metara završila u flišu.

Kod istraživanja krša važna je primjena geoelektričnih metoda, kao što je geoelektrična tomografija koja daje vrlo dobre rezultate istraživanja. Refleksijska seizmika se koristi za određivanje dubokih litoloških granica i kontakta klastičnih i karbonatnih naslaga te mogućih rasjednih zona. Geofizičke tehnike nisu nove i koriste se već desetljećima za istraživanja nafte i plina, istraživanje minerala, vodnih resursa, te u ostale geotehničke svrhe. Podaci dobiveni istražnim bušenjem općenito predstavljaju uvjete prisutne u samo vrlo uskom području.

U slivu izvora Jadro i Žrnovnice proveden je monitoring podzemnih voda za praćenje količinskog i kemijskog stanja vode, te pronalaženje bilo kakvih rastućih ili padajućih trenova koncentracije onečišćenja. Dugogodišnjim praćenjem ustanovilo se je da dolazi do čestog bakteriološkog onečišćenja kao posljedica nepostojanja kanalizacijske infrastrukture, iako je predviđena njena izgradnja.

Pristup motrenja podzemnih voda kakav je prikazan u ovome radu kao i odabir pokazatelja koji se trebaju pratiti unutar cjelina podzemnih voda prema zahtjevima implementacije ODV-a predstavlja temelj upravljanja vodnim resursima krških vodonosnika. Bila bi stoga velika šteta da se izvedene bušotine ne koriste u namijenjenu svrhu, budući da je područje sliva izvora Jadra i Žrnovnice prvo u Hrvatskoj dobilo sustav bušotina koji omogućavaju motrenje količine i kakvoće vode u dubokom krškom podzemlju, a takav vid praćenja podzemnih voda omogućava dobivanje pravovremenih informacija o količini i kakvoći podzemnih voda važnih za vodoopskrbu grada Splita i šire okolice.

## 10. POPIS LITERATURE:

- [1]. *Površinska i podzemna voda, 2. dio, D. Aljinović i B. Tomljenović*, „Dostupno na“ [https://rudar.rgn.hr/~brunton/nids\\_brunton/PDF%20Sumarstvo/4\\_Povr%20i%20podzem-voda-\(2\).pdf](https://rudar.rgn.hr/~brunton/nids_brunton/PDF%20Sumarstvo/4_Povr%20i%20podzem-voda-(2).pdf), „Datum pristupa“: 5.04.2019.
- [2]. Dostupno na: <http://speleologija.eu/znanost/sige/sige-okolis.html>, „Datum pristupa“: 6.04.2014
- [3]. Biondić B., Biondić R., *Hidrogeologija Dinarskog krša u Hrvatskoj*. Sveučilišni udžbenik. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu Geotehnički fakultet. 2014.
- [4]. *Hidraulika podzemnih voda u kršu*, „Dostupno na“: [https://www.grad.unizg.hr/download/repository/PREDAVANJA\\_1/PREDAVANJA/h06-osnove\\_hidraulike\\_krsa.pdf](https://www.grad.unizg.hr/download/repository/PREDAVANJA_1/PREDAVANJA/h06-osnove_hidraulike_krsa.pdf), „Datum pristupa“: 5.04.2019.
- [5]. *Dinarski krš*, „Dostupno na“ <https://www.dinarskogorje.com/dinarski-krscaron.html>, „Datum pristupa“: 6.04.2019.
- [6]. Dostupno na : <https://denissinger.files.wordpress.com/2015/02/c5bec5bec487c5bec48dc487c5be.jpg> Datum pristupa: 6.04.2019.
- [7]. Dostupno na: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/51/Stalactites\\_-\\_Treak\\_Cliff\\_Cavern.jpg/250px-Stalactites\\_-\\_Treak\\_Cliff\\_Cavern.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/51/Stalactites_-_Treak_Cliff_Cavern.jpg/250px-Stalactites_-_Treak_Cliff_Cavern.jpg)  
Datum pristupa: 8.04.2019.
- [8]. *Dinarski krš*, „Dostupno na“ <https://www.dinarskogorje.com/dinarski-krscaron.html>, Datum pristupa: 6.04.2019.
- [9]. *Priroda Hrvatske*, „Dostupno na“ <http://priodahrvatske.com/sedra/>, Datum pristupa: 26.5.2019.
- [10]. *Izvori u kršu*, „Dostupno na“ [https://hr.wikipedia.org/wiki/Izvori\\_u\\_kr%C5%A1u](https://hr.wikipedia.org/wiki/Izvori_u_kr%C5%A1u), Datum pristupa: 26.5.2019.



- [11]. *Pojava i utjecaj podzemne vode*, „Dostupno na“ [http://rudar.rgn.hr/~smihalic/nids\\_snjezanamihalic/11\\_poglavlje.pdf](http://rudar.rgn.hr/~smihalic/nids_snjezanamihalic/11_poglavlje.pdf), Datum pristupa: 6.04.2019.
- [12.] O. Bonacci i T. Roje-Bonacci, *Utjecajinjekcijske zavjese izvedene ispod brane i akumulacije Đale na ponašanje podzemne vode u kršu*, 2011., „Dostupno na“ [https://www.voda.hr/sites/default/files/pdf\\_clanka/hv\\_78\\_2011\\_259-270\\_bonacci\\_rojebonacci.pdf](https://www.voda.hr/sites/default/files/pdf_clanka/hv_78_2011_259-270_bonacci_rojebonacci.pdf), Datum pristupa: 6.04.2019.
- [13]. Dostupno na: <https://www.slideserve.com/kalil/za-tita-kr-kog-vodonosnika-u-istarskoj-upaniji-i-o-ekivani-rezultati-projekta-drinkadria> ,Datum pristupa: 6.04.2019.
- [14]. ZAJEDNIČKA STRATEGIJA PROVEDBE OKVIRNE DIREKTIVE O VODAMA (2000/60/EC) ,Vodič br. 15, Vodič o praćenju podzemnih voda, Dostupno na : [https://www.voda.hr/sites/default/files/15\\_-\\_vodici\\_o\\_monitoringu\\_podzemnih\\_voda\\_-\\_hrv.pdf](https://www.voda.hr/sites/default/files/15_-_vodici_o_monitoringu_podzemnih_voda_-_hrv.pdf) ,Datum pristupa: 6.4.2019.
- [15]. Dostupno na:[http://os-zrnovnicast.skole.hr/nastava/terenska?news\\_id=32](http://os-zrnovnicast.skole.hr/nastava/terenska?news_id=32), Datum pristupa: 26.05.2019.
- [16]. Kapelj S., Kapelj J., Švonja M.,*Hidrogeloška obilježja sliva Jadra i Žrnovnice*, 2011.
- [17]. Dostupno na: <http://matejeres.from.hr/rijeka-zrnovnica/>,Datum pristupa: 10.04.2019.
- [18]. Loborec, J. (2013):*Procjena rizika od onečišćenja podzemnih voda u kršu na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice*, Doktorski rad, RGN fakultet SuZg, Zagreb
- [19]. Kapelj, S., Kapelj, J., Biondić, R., Biondić, B., Kovač, I., Tušar, B., Prelogović, E., Marjanac, T., Andrić, M., Kovačić, D., Strelec, S. &Gazdek, M. (2006):*Studija upravljanja vodama sliva Jadra i Žrnovnice – Prva faza studijsko istraživačkih radova* EVV:1/2005, Hrvatske vode, Split.

[20].Loborec J.,KapeljS.,Novak H., *Analiza opasnosti od onečišćenja podzemnih voda u kršu na primjeru sliva izvora Jadro i Žrnovnice*, 2015. Datum pristupa: 26.5.2019.

[21].*Elaborat izvorišta Jadra i Žrnovnice Split,Zone sanitarne zaštite, Zagreb 2010.*„Dostupno na“ <http://rcco.hr/wp-content/uploads/dokumenti/elaborat-izvorista-jadra-i-zrnovnice-zone-sanitarne-zastite-2010.pdf>, Datum pristupa : 27.5.2019.

[22]. Dostupno na:<http://hotspots.net.hr/2014/02/zasto-je-dugopolje-idealno-za-rekreaciju-i-aktivni-turizam/>,Datum pristupa: 11.04.2019.

[23]. Dostupno na: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Konjsko\\_\(Klis\).jpg](https://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Konjsko_(Klis).jpg)

Datum pristupa: 11.04.2019.

[24]. Dostupno na:<http://www.proprius-orbis.hr/hr/lokacija.html> , Datum pristupa: 11.04.2019.

[25].Kapelj, S., Kapelj, J., Marjanac, T., Prelogović, E., Cvetko-Tešović, B., Biondić, B., Ivanković, T., Jukić, D. &Denić-Jukić, V. (2008):*Studija upravljanja vodama sliva Jadra i Žrnovnice – Druga faza studijsko istraživačkih radova* EVV:9/2007, Hrvatske vode, Split.

[26]. Kapelj, S., Kapelj, J., Dogančić, D., Loborec, J., Ivanković, T., Cvetko-Tešović, B. & Milanović, D. (2009):*Studija upravljanja vodama sliva Jadra i Žrnovnice – Treća faza studijsko istraživačkih radova* EVV:21/2008, Hrvatske vode, Split.

[27]. Dostupno na:

[https://www.geotech.hr/wpcontent/uploads/2018/08/istraživačko\\_bušenje\\_1.jpg](https://www.geotech.hr/wpcontent/uploads/2018/08/istraživačko_bušenje_1.jpg)  
,Datum pristupa: 15.04.02019

[28]. Strelec S., *Podpovršinski istražni radovi, Interna skripta*, Geotehnički fakultet Varaždin ,2012., Dostupno na:

<https://docslide.net/documents/podpovrsinski-istrazni-radovi.html>, Datum pristupa: 15.04.2019.

[29]. Loborec J., Dogančić D., Kapelj S.(2019): *Monitoring podzemnih voda u krškom vodonosniku izradom istražnih bušotina*, 7th Croatian Water Conference with international participation - Croatian Waters in Environmental and Nature Protection, Opatija, Croatia.

## 11. POPIS SLIKA:

Slika 1. Krško područje u Hrvatskoj [2].....	2
Slika 2. Podzemni i površinski krški geomorfološki oblici [6] .....	5
Slika 3. Stalaktiti [7].....	6
Slika 4. Krški vodonosnik [13] .....	8
Slika 5. Izvor Jadra [15].....	14
Slika 6. Rijeka Žrnovnica [17].....	16
Slika 7. Shematska hidrogeološka karta sliva izvora Jadro i Žrnovnice [18].....	18
Slika 8. Duboku usječena dolina kod izvora Žrnovnice [19].....	19
Slika 9. Trend koncentracije nitrata [20] .....	22
Slika 10. Područje lokacije Dugopolje [22].....	25
Slika 11. Područje lokacije Konjsko [23].....	25
Slika 12. Područje lokacije Gizdavac [19].....	26
Slika 13. Područje lokacije Bisko [24].....	27
Slika 14. Raspored geofona [28] .....	28
Slika 15. Princip mjerenja plitkom seizmičkom refrakcijom [28].....	29
Slika 16. Schlumbergerov elektroodni raspored [19].....	31
Slika 17. Prognozirani hidrološki profil projektirane istražno opažачke bušotine a) B-1 Dugopolje, b) B-2 Konjsko, c) B-3 Gizdavac, d) B-4 Bisko [19] .....	33
Slika 18. Istražno udarno bušenje [27] .....	34
Slika 19. Sanduk za odlaganje jezgre iz bušotine [28].....	37
Slika 20. Primjer izvađene jezgre [25] .....	37
Slika 21. Lokacija bušotine B-1 [25] .....	39
Slika 22. Lokacija bušotine B-3 [26] .....	41
Slika 23. Dijagram mjerenih razina podzemnih voda u bušotinama B-1 i B-3 i mjereni vodostaji na rijekama Jadro i Žrnovnica [29].....	44
Slika 24. Dijagram mjerenja mutnoće u bušotini B-3 [29] .....	45

## **12. POPIS TABLICA:**

Tablica 1. Trend porasta bakteriološkog onečišćenja u razdoblju od 1975. do 2014.