

# Antropogeni utjecaj na zaštitu podzemnih voda u pukotinsko-kavernoznim vodonosnicima

---

Skuhala, Blanka

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:130:058895>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-05**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

BLANKA SKUHALA

ANTROPOGENI UTJECAJ NA ZAŠTITU PODZEMNIH  
VODA U PUKOTINSKO-KAVERNOZNIM  
VODONOSNICIMA

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2020.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva  
za \_\_\_\_\_ u \_\_\_\_\_ sa  
Obranu ovog rada kandidat će izvršiti i pred  
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu  
Varaždin, \_\_\_\_\_

Predsjednik  
ispitnog povjerenstva

Izv. prof. dr. sc. Igor Petronić

### Članovi povjerenstva

- 1) Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Meaški
- 2) Doc. dr. sc. Jelena Lohmec
- 3) Prof. dr. sc. Ranko Brundić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

ANTROPOGENI UTJECAJ NA ZAŠTITU PODZEMNIH  
VODA U PUKOTINSKO-KAVERNOZNIM  
VODONOSNICIMA

KANDIDAT:

Blanka Skuhala

*Blanka Skuhala*

MENTOR:

izv.prof.dr.sc. Hrvoje Meaški

*Hrvoje Meaški*

VARAŽDIN, 2020.



Sveučilište u Zagrebu  
Geotehnički fakultet



## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnica: BLANKA SKUHALA  
Matični broj: 237 - 2018./2019.  
Smjer: UPRAVLJANJE VODAMA

### NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

ANTROPOGENI UTJECAJ NA ZAŠTITU PODZEMNIH VODA  
U PUKOTINSKO-KAVERNOZNIM VODONOSNICIMA

Rad treba sadržati:


1. Uvod
2. Pukotinsko-kavernozni vodonosnici
3. Antropogeni utjecaji
4. Procjena rizika
5. Primjeri i posljedice
6. Zaključak
7. Literatura

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

Zadatak zadan: 30.06.2020.


Rok predaje: 07.09.2020.

Mentor:

  
Izv.prof.dr.sc. Hrvoje Meaški



Predsjednik Odbora za nastavu:

  
Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom **Antropogeni utjecaj na zaštitu podzemnih voda u pukotinsko-kavernoznim vodonosnicima** rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom izv.prof.dr.sc Hrvoja Meaškog.

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, 7. rujna 2020.

Blanka Skuhala




(Vlastoručni potpis)

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

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom  
**Antropogeni utjecaj na zaštitu podzemnih voda u pukotinsko-kavernoznim  
vodonosnicima**  
pregledan anti-plagijat programskim paketom Plagscan te da postotak sličnosti cjelovitog  
diplomskeg rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni  
postotak sličnosti diplomskeg rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne  
prelazi 5%.

U Varaždinu, 7. rujna 2020.

Izv.prof.dr.sc. Hrvoje Meaški, mentor

  
\_\_\_\_\_  
(Vlastoručni potpis)

## **SAŽETAK**

**Ime i prezime: Blanka Skuhala**

**Naslov rada: Antropogeni utjecaj na zaštitu podzemnih voda u pukotinsko-kavernoznim vodonosnicima**

Pukotinsko-kavernozni (krški) vodonosnici imaju specifična hidrogeološka obilježja zbog kojih su vrlo osjetljivi na onečišćenje od strane ljudskih aktivnosti. Kako raste populacija ljudi u svijetu, rastu i ljudski utjecaji na podzemnu vodu. Mnoge ljudske aktivnosti mogu pridonijeti promjenama u kvaliteti vode, uključujući poljoprivredu, urbanizaciju, industriju, odlagališta otpada, navodnjavanje i mnoge druge. U ovom radu, obrađena su 4 različitih primjera onečišćenja u krškim vodonosnicima, za svaki od primjera napravljena je analiza rizika. Analiza rizika, na temelju koje su ponuđena rješenja, dobivena je kombiniranjem prirodne ranjivosti i procjene opasnosti.

### **KLJUČNE RIJEČI:**

Antropogeni utjecaj, pukotinsko-kavernozni vodonosnik, onečišćenje, podzemna voda



## **ABSTRACT**

**Name and surname: Blanka Skuhala**

**Title: Anthropogenic impact on the protection of groundwater in fracture-cavernous aquifers**

Fracture-cavernous (karst) aquifers have specific hydrogeologic characteristics that makes them highly vulnerable to pollution from human activities. As the world's population grows, so do human impacts on groundwater. Many human activities can contribute to changes in water quality, including agriculture, urbanization, industry, landfills, irrigation and many others. In this paper, 4 different examples of pollution in karst aquifers are treated, for each of the examples risk analysis was performed. The risk analysis, upon which then the solutions are offered, is made by combining intrinsic vulnerability and hazard assessment

### **KEYWORDS:**

Anthropogenic impact, fracture-cavernous aquifer, pollution, groundwater

## SADRŽAJ

1	UVOD.....	1
2	PUKOTINSKO-KAVERNOZNI VODONOSNICI.....	2
2.1	Stijene podložne razvoju krških vodonosnika.....	4
2.2	Tipovi krških vodonosnika .....	5
2.3	Prirodna ranjivost .....	7
2.4	Specifična ranjivost .....	10
3	ANTROPOGENI UTJECAJI.....	12
3.1	Antropogeni utjecaj u krškim vodonosnicima .....	12
3.2	Procjena opasnosti .....	17
4	PROCJENA RIZIKA.....	22
4.1	Model procjene rizika .....	22
4.2	Koncept procjene rizika.....	23
5	PRIMJERI I POSLJEDICE .....	26
5.1	Utjecaj poljoprivrede na vodonosnik u Portugalu .....	26
5.2	Utjecaj otpadnih voda na vodonosnik u Jordanu.....	31
5.3	Utjecaj odlagališta otpada "Sovjak" na vodonosnik područja Riječkog zaljeva .....	38
5.4	Utjecaj rudarstva na vodonosnike jugozapadne Kine .....	43
6	ZAKLJUČAK .....	47
7	LITERATURA.....	48

## 1 UVOD

Voda je jedan od osnovnih prirodnih resursa koji omogućava život na zemlji. U svrhu svog opstanka, čovjek bi održavanje razine kvalitete vode trebao smatrati jednim od svojih primarnih ciljeva.

Pukotinsko-kavernozni vodonosnici predstavljaju visokokvalitetan izvor vode za ljudsku upotrebu stoga potencijalni i stvarni izvori onečišćenja podzemnih voda u krškim područjima predstavljaju izvor zabrinutosti u cijelom svijetu. Za pukotinsko-kavernozne vodonosnike, odnosno vodonosnike uglavnom razvijene u karbonatnim stijenama tj. kršu, karakteristične su jedinstvene površinske i podzemne značajke te složena interakcija atmosfere, hidrosfere i biosfere. Krški vodonosni sustavi osjetljiviji su na onečišćenje u usporedbi s drugim vrstama vodonosnika. Zbog brze infiltracije oborina i prihranjivanja vodonosnika, velikih brzina protoka i kratkog vremena zadržavanja vode, prirodna zaštita od onečišćenja unesenih u krške vodonosnike je veoma mala. Krška područja imaju još jedno svojstvo koje ih čini veoma ranjivima, a to su velike količine udubljenja, kanala, vrtača, dolina i sl. Takve strukture čovjeku su se oduvijek činile kao prikladno mjesto za odlaganje otpada koji nerijetko sadrži opasni materijal. Izuzevši činjenicu da ljudi zbog nemara i ne znanja ugrožavaju kvalitetu podzemne vode takvim načinom odlaganja otpada, postoji još niz ljudskih aktivnosti koji mogu biti uzrok onečišćenja vodonosnika.

U ovom radu dan je pregled nekih od osnovnih antropoloških utjecaja na krške vodonosnike, odnosno vodonosnike općenito, a to su poljoprivreda, industrija, urbanizacija, rudarstvo, itd.

S obzirom da ljudska populacija svakodnevno raste, utjecaj koji ljudske aktivnosti imaju na podzemnu vodu također je sve intenzivniji.

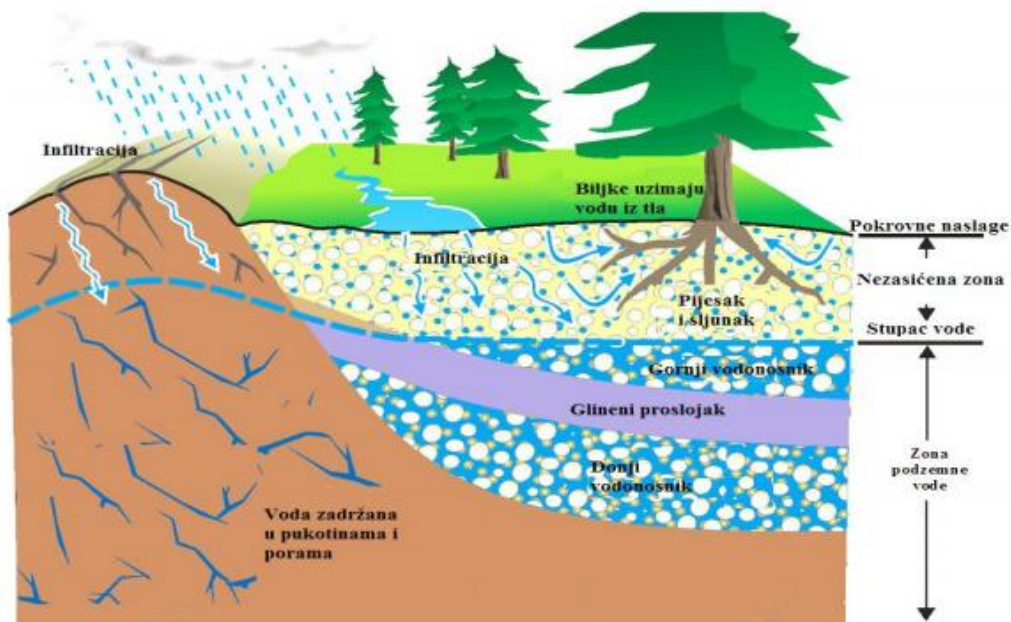
Cilj ovog rada je dati pregled najčešćih antropogenih utjecaja i specifičnih mjera koje se poduzimaju u svrhu zaštite podzemne vode kao što su kartiranje ranjivosti, procjena opasnosti (hazarda) i procjena rizika.

Kroz obradu konkretnih primjera antropogenih utjecaja na pukotinsko-kavernozne vodonosnike iz svijeta i iz RH, u radu su ponuđena rješenja istih.

## 2 PUKOTINSKO-KAVERNOZNI VODONOSNICI

Podzemna voda je voda koja ispunjava šupljine ispod Zemljine površine i prema porijeklu dijeli se na vadoznu, juvenilnu i konatnu vodu. Vadozna voda potječe od atmosferilija, juvenilna voda nastaje kondenzacijom vodene pare iz unutrašnjosti Zemlje, a konatna voda se nalazi "zarobljena" u stijenama od njihovog postanka. Podzemnu vodu nalazimo u raznim geološkim formacijama, a sposobnost geološke formacije da skladišti vodu ovisi o njezinoj teksturi.

Poroznost i propusnost geoloških formacija, odnosno stijena, jedne su od njihovih najvažnijih značajki po pitanju zadržavanja i propuštanja podzemne vode. Vodonosnik je stijena značajne propusnosti pogodna za uskladištenje podzemne vode (Biondić, 2006) (slika 1). Gornja granica podzemne vode u vodonosniku naziva se vodno lice. Dubina na kojoj se nalazi vodno lice ovisi o sastavu i debljini propusnih i nepropusnih slojeva te o količini vode koja isparava i istječe na površinu. Prihranjivanje vodonosnika vrši se putem oborina ili rijeka, a ovisi o njihovoj količini, nagibu terena, vegetaciji, propusnosti stijena i količini vode u tlu.



Slika 1. Vodonosnik

(preuzeto sa [www.cgenarchive.org](http://www.cgenarchive.org))

Vodonosnici su formirani u stijenama kao što su pješčenjaci, konglomerati, lomljeni vapnenci i u nekonsolidiranim pijescima, šljuncima i raspucanim vulkanskim stijenama. Neki vodonosnici imaju veliku poroznost i malu propusnost, a drugi imaju veliku pozornost i veliku propusnost. Vodonosnici velike poroznosti i male propusnosti nazivaju se lošima i uključuju stijene ili geološke formacije poput granita i škriljca, dok se vodonosnici velike poroznosti i velike propusnost smatraju izvrsnim vodonosnicima i čine ih stijene poput razlomljenih vulkanskih stijena.

S obzirom na vrstu poroznosti vodonosnike dijelimo na intergranularne, pukotinske i pukotinsko – kavernoze (krške vodonosnike) (slika 2).

Intergranularni tip vodonosnika sastoji se od klastičnih sedimentnih stijena za koje je karakteristična intergranularna ili međuzrska poroznost te je najrasprostranjeniji tip vodonosnika u svijetu. Neke stijene, poput magmatskih i metamorfnih, izrađene su od minerala koji su srasli vrlo čvrsto i za njih je karakteristična pukotinska poroznost. Za razliku od intergranularne poroznosti koja je prisutna u stijeni od njezinog nastanka, pukotinska poroznost nastaje u stijeni naknadno djelovanjem vanjskih sila, stoga se i naziva sekundarna. Pukotinski vodonosnik, dakle, građen je od razlomljenih stijena čije brojne pukotine čine porni prostor koji omogućava skladištenje i kretanje podzemne vode, ako su međusobno povezane. Treća vrsta vodonosnika, pukotinsko-kavernozna (krška), građena je od stijena kod kojih je duž sekundarnih pukotina došlo do naknadnih procesa otapanja.



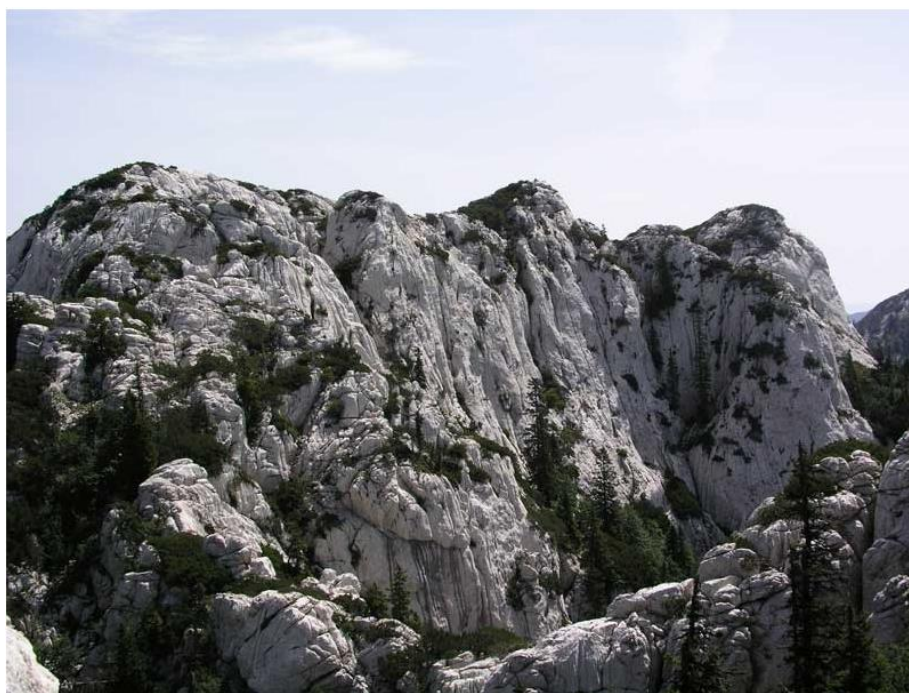
Slika 2. Tipovi poroznosti: intergranularna, pukotinska i pukotinsko-kavernozna

(preuzeto sa [www.gfosweb.gfos.hr](http://www.gfosweb.gfos.hr) )

## 2.1 STIJENE PODLOŽNE RAZVOJU KRŠKIH VODONOSNIKA

Karbonatne stijene imaju relativno jednostavan mineraloški sastav u kojem dominiraju karbonatni minerali u kombinaciji s dvovalentnim kationima karbonatnih radikala (slika 3).

Aragonit, kalcit i dolomit tri su glavna sastojka karbonatnih stijena. Aragonit je relativno čist kalcijev karbonat s malim udjelom magnezija i tragovima Sr, Ba, Pb i K. Uglavnom je nestabilan na površini terena i brzo se otapa ili transformira. Kalcit je kao kalcijev karbonat daleko podložniji ionskoj razmjeni od aragonita i sadrži veći udio Mg u sastavu. Nastanku aragonita pogoduju uvjeti više temperature vode i visokog pH, a kalcit nastaje na nižim temperaturama vode, pri niskom pH i uz prisutnost sulfatnih iona. Treći glavni sastojak je dolomit koji je u pravilu mineral sekundarnog podrijetla nastao istiskivanjem  $\text{CaCO}_3$  u vapnenačkim muljevima ili očvrslim vapnencima.



Slika 3. Karbonatne stijene u NP Sjeverni Velebit

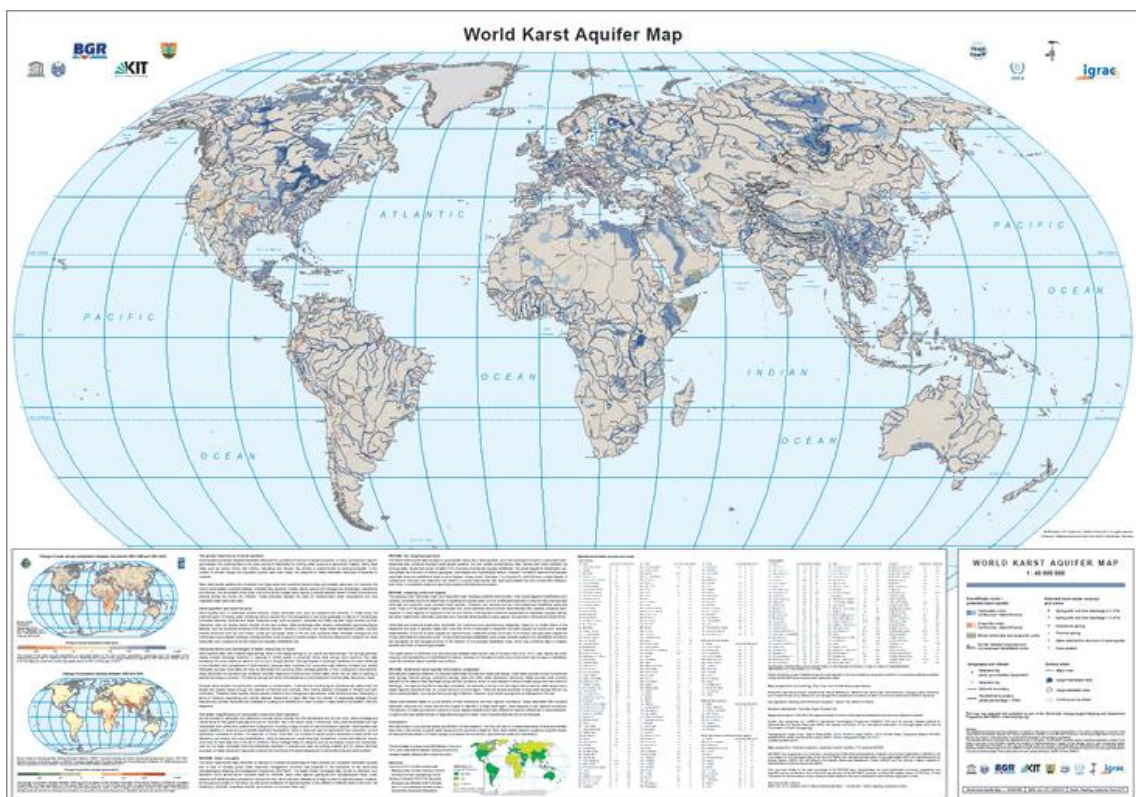
(preuzeto sa [www.np-sjeverni-velebit.hr](http://www.np-sjeverni-velebit.hr))

Nekarbonatni materijal, kao što su detritus i druge dijagenetske komponente, također je sastojak karbonatnih stijena. Iako se veći dio karbonatnih stijena sastoji samo od karbonatnih minerala, one se označuju kao sedimenti koji sadrže više od 50% karbonatnih minerala. Stijenu koja sadrži više od 90% kalcijeva karbonata zovemo vapnenac, a sve su ostalo varijacije naziva koje ovise o sadržaju nekarbonatnih komponenta. Dolomit je

također učestala U mineralnom sastavu karbonatnih stijena često pronalazimo i dolomit, komponentu nastalu uglavnom dijagenozom. Fosilni ostaci organizama također imaju važnu ulogu u litološkom sastavu karbonatnih stijena (Biondić i Biondić, 2014).

## 2.2 TIPOVI KRŠKIH VODONOSNIKA

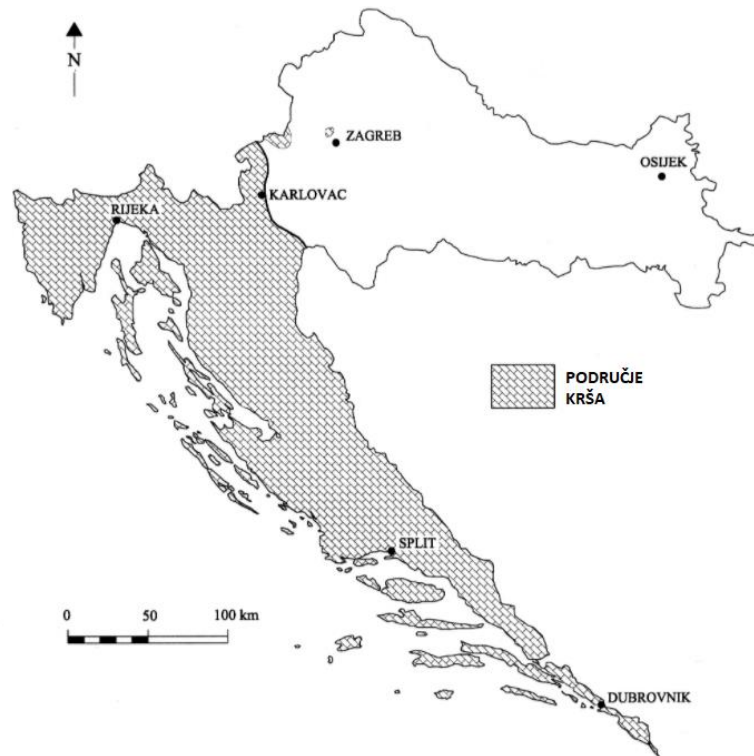
Krški vodonosnici važan su izvori pitke vode za mnoge regije svijeta, poput Dinarske visoravni (Slovenija, Hrvatska, Srbija itd.) u Europi, u različitim regijama Sjedinjenih Američkih Država i velikom dijelu jugozapadne Kine, itd. (slika 4). U nabrojanim područjima okvirmo 50% pitke vode dolazi iz krških vodonosnika. Primjeri urbanih područja koja se pretežno napajaju krškim vodonosnicima su Miami (Florida, Sjedinjene Države), gdje 5,5 milijuna ljudi koristi vodu pumpanu iz vodonosnika Biscayne i opskrba vodom za 6-7 milijuna stanovnika Damaska u Siriji koja dolazi iz planinskog krško vodonosnika. Jedan od najvažnijih krških vodonosnika u Sjedinjenim Državama je vodonosnik Edwards u središnjem Teksasu, u koji se nalazi 6.710 m<sup>3</sup> vode (Onac i Beynen, 2020).



Slika 4. Rasprostranjenost krških vodonosnika u svijetu

(preuzeto sa [www.whymap.org](http://www.whymap.org) )

Geosinklinalni tip krša veže se uz glavne geosinklinalne vrlo pokretne prostore na rubovima kontinentalnih ploča (Herak i Stringfield, 1972). Karakteriziraju ga brojne bočne i vertikalne litološke promjene te višestruki orogenetski pokreti karbonatnih masa. Krš u RH proteže se na prostoru Dinarskog gorja (slika 5).



Slika 5. Pojednostavljeni prikaz područja krša u RH

(preuzeto sa [www.speleologija.hr](http://www.speleologija.hr))

Za današnji izgled geološke strukture područja Dinarida zaslužna je alpska orogeneza koja se desila krajem eocena i početkom oligocena (slika 6). Stijene Dinarida su borane, rasjedane i tangencijalno pokretane te je tako stvorena podloga za razvoj krških formi tijekom kvartara.

Postoje dvije varijante geosinklinalnog tipa krša (Herak i Stringfield, 1972). Prvi se odnosi na razlomljene geosinklinalne pojaseve u kojima se izmjenjuju vodopropusni i vodonepropusni slojevi stijena, često bez potpunog razvoja krša i njegovih karakterističnih obilježja kao što su npr. krška polja. Takve vodonosnike nalazimo na području Alpa, Pirineja, Karpata, Atlasa i Urala. Druga varijanta odnosi se na ekstremni tip geosinklinalnog krša kojeg nalazimo na području Dinarida, Helenida i planine Toros



u Maloj Aziji. Za taj tip krša karakteristične su velike mase jako razlomljenih karbonatnih stijena, veliki planinski lanci, prostrana krška polja s izviranjem i poniranjem vodotoka, vrulje i čitav niz drugih krških formi vezanih uz dubinsko okršavanje.



Slika 6. Dinarsko gorje

(preuzeto na [www.dinaridetrails.org](http://www.dinaridetrails.org))

Epikontinentalni tip krša nalazimo na tektonski relativno stabilnim područjima. Nastao je taloženjem karbonatnih stijena u plitkim morima koje obično prekrivaju prekambrijske, kaledonske, hercinske i alpske strukture. Kod ovog tipa krša često se izmjenjuju slojevi vodopropusnih karbonatnih i vodonepropusnih klastičnih stijena. Primjere takvog krša s ograničenim razvojem krških formi nalazimo na Bliskom istoku, Libiji, SAD-u, Jamajci, Kini te u Pariškom karbonatnom bazenu. Iako se ovaj tip krša veže uz mirnije forme, postoje iznimke kao što je krš na Jamajci koji ima dobro razvijena krška polja i ostale tipične forme geosinklinalnog krša (Herak i Stringfield, 1972).

### 2.3 PRIRODNA RANJIVOST

Ranjivost podzemne vode je izraz koji se koristi za predstavljanje prirodnih karakteristika područja na temelju kojih se može predvidjeti hoće li neko onečišćenje od strane ljudske aktivnosti, i s kojom lakoćom, s površine dospjeti u podzemne vode.

Vrba i Zaporozec (1994) ističu da je ranjivost relativna, nemjerljiva i bezdimenzionalna veličina te predlažu razlikovanje prirodne i specifične ranjivosti. Prirodna ranjivost bi trebala ovisiti samo o prirodnim svojstvima područja, dok je za procjenu specifične ranjivosti potrebno uzeti u obzir svojstva onečišćivala. Prema projektu COST 620 prirodna ranjivost definirana je kao ranjivost koja u obzir uzima samo geološke, hidrološke i hidrogeološke karakteristike područja jer ne ovisi o svojstvima onečišćivala, ni scenariju onečišćenja (COST 620, 2004). Koncept ranjivosti podzemne vode može se primijeniti kod sva tri tipa vodonosnika - intergranularnih, pukotinskih i pukotinsko-kavernoznih.

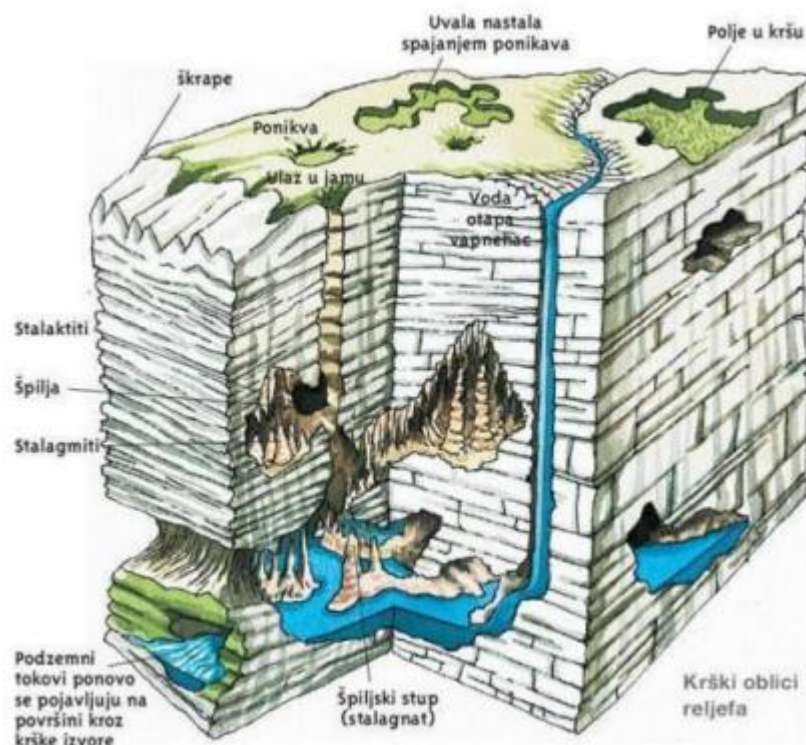
Kod pukotinsko-kavernoznih vodonosnika zbog specifičnih svojstva krša potrebno je razviti individualan koncept koji uzima u obzir prirodu krša (slika 7). Do danas su razvijene generalno dva pristupa:

- pristup koji podrazumijeva metode posebno posvećene kršu (npr. EPIK metoda);
- pristup koji podrazumijeva metode primjenjive za sve vrste vodonosnika, ali koje nude dodatne metodološke alate za krš (npr. PI metoda).

Pri procjeni prirodne ranjivosti podzemnih voda u krškim sustavima relevantne su slijedeće karakteristike te ih stoga treba uzeti u obzir (COST 620, 2004):

- svaki krški sustav ima svoje individualne karakteristike, stoga je detaljno hidrogeološko istraživanje preduvjet za kartiranje ranjivosti
- krški sustavi visoko su heterogeni i anizotropni. Interpolacija i ekstrapolacija terenskih podataka složenija je za krška, nego za druga područja
- podzemna voda u kršu prihranjuje se sporijom difuznom infiltracijom kroz tlo i brzim koncentriranim putem (kaverne, vrtače, itd.)
- prisutnost pokrova važna je prirodna zaštita krških vodonosnika. Mnoga onečišćenja mogu se kontrolirati fizičkim procesima kao što su filtracija i biogeokemijski procesi, uključujući redoks reakcije, sorpciju, itd. Iako te naslage imaju zaštitnu funkciju, put kroz njih onečišćenje često zaobiđe s obzirom na brojne kaverne
- prisutnost zone epikrša mora se očekivati. Funkcije epikrša su skladištenje vode i koncentracija protoka. Skladištenje vode povećava prirodnu zaštitu sustava, a koncentracije protoka povećava njegovu ranjivost. Veliki dio zone epikrša nije vidljiv na površini te je teško procijeniti njegovu strukturu i funkciju

- za krške vodonosnike karakteristična je dvostruka poroznost zbog pukotina i kaverna, često i trostruka zbog dodatne prisutnosti intergranularnih pora (matrica). Skladištenje podzemne vode odvija se u porama i pukotinama, dok kaverne djeluju kao odvodi. Unutar krša postoje vrlo brzi i spori tokovi stoga se onečišćivala mogu transportirati vrlo brzo ili skladištiti vrlo dugo.
- krški sustavi karakteriziraju brze i snažne hidrauličke reakcije na hidrološke događanja, dubina na kojoj se nalazi vodno lice često vremenski varira nekoliko desetaka metara, u mnogim krškim sustavima vodno lice je prekinuto i teško ga je odrediti
- krški slivovi su često izuzetno veliki i hidraulički povezani na velikim udaljenostima te ih je teško odrediti jer ovise o hidrološkim uvjetima promjenjivi su u vremenu i često se međusobno preklapaju te im se tokovi označeni traserima međusobno ukrštavaju.



Slika 7. Konceptualni model krškog vodonosnika

(Božičević, 1991)

## 2.4 SPECIFIČNA RANJIVOST

Prema projektu COST 620 specifična ranjivost definirana je kao ranjivost koja uz prirodnu ranjivost, u obzir uzima i svojstva određenog onečišćivala ili skupine onečišćivala. S obzirom na glavne karakteristike krškog okoliša relevantne za specifičnu ranjivost, svojstva koja igraju značajnu ulogu možemo razvrstati u dvije skupine – hidraulička i mineraloško-geokemijska svojstva. U kombinaciji, ova svojstva povezana su s pokretljivošću i postojanošću onečišćivača unutar krškog sustava.

U krškom sustavu slijedeća hidraulička svojstva igraju značajnu ulogu u migraciji onečišćenja:

- Postoje tri različita sloja, s tri hidraulička ponašanja. Epikrš je medij velike vodljivosti, s vodoravno dominantnim dvofaznim tokovima, koja sakuplja infiltraciju i vodi je u vertikalne kaverne nezasićene zone. Ovaj medij doprinosi brzom transportu slabo postojanih onečišćenja do vodnog lica.
- Postojanje dvostruke propusnosti, koja čine razliku kod vremena zadržavanja vode u podzemlju. Transport u kavernama može se odvijati veoma brzo ili pak veoma sporo u ispucanim blokovima. Posljedica toga je da kaverne mogu brzo prenijeti onečišćenje, dok blokovi omogućuju autopurifikaciju ili smanjenje onečišćenja.
- Stoga će postotak difuzne infiltracije biti značajan parametar specifične ranjivosti

Pri procjeni specifične ranjivosti također su važna mineraloška i geokemijska svojstva. Prisutnost različitih minerala stvara specifične uvjete zadržavanja:

- Karbonatne stijene ograničavaju pokretljivost reaktivnih onečišćenja kao što su fosfati i teški metali. Vodikov ion  $H^+$ , koji može proizaći iz kiselih kiša i pedogenetskih procesa, vrlo brzo reagira s karbonatnim medijem i omogućava proizvodnju  $Ca^{2+}$  i  $HCO_3^-$ . Karbonatni medij karakterističan je za podzemlje i epikrš, dok u pokrivnim tlima nije prisutan. PH vrijednost unatoč niskoj varijabilnosti u kršu, zbog puferskog učinka karbonatne sredine, može zajedno s redoks reakcijama igrati ulogu u topljivosti anorganskih metala.
- Specifična površina glina omogućuje adsorpciju ne ionskih tvari (organske tvari, bakterije) i njihove kationske izmjene (CEC). Gline su prisutne u pokrovnim tlima, nekrškim pokrovnim formacijama, također i u sedimentu prisutnom u krškoj mreži.

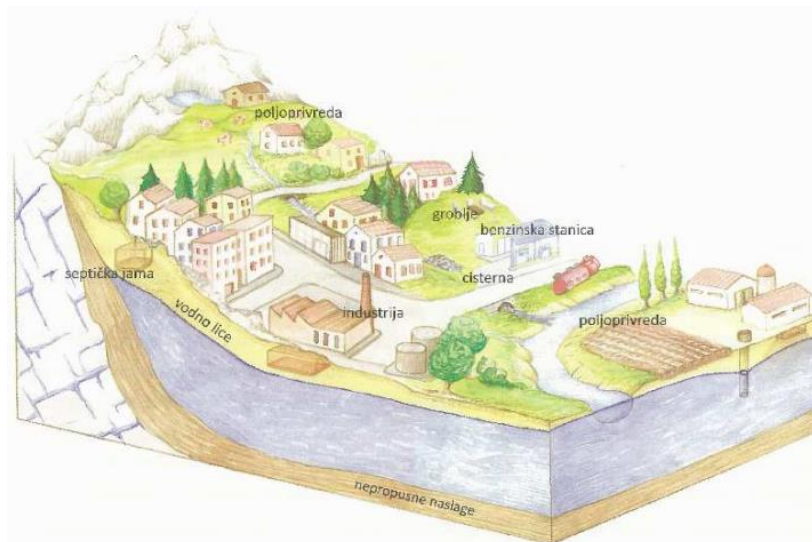
- Organska tvar koju nalazimo u tankom i oskudnom sloju pokrova te u ispunama krša, ima funkciju adsorpcije organskih onečišćenja i stvaranje liganda s metalima.
- Krška sredina (epikrš) je u kontaktu s atmosferom i kao posljedica toga njen elektronički potencijal je visok. U takvim uvjetima otopljeni teški metali mogu istaložiti (oksidi, hidroksidi), a organska tvari i dušikovi spojevi oksidirati. U karbonatnoj sredini prisutni su i redukcijski uvjeti: u tlu koje može biti hidromorfno i anoksično i u saturiranoj zoni koja je prekrivena nepropusnim slojem. Oksidacijski ili redukcijski uvjeti mogu omogućiti razvoj aerobnih i anaerobnih bakterija, čija uloga može poboljšati ili pogoršati kvalitetu vode.
- Temperatura, također može imati utjecaj na kemijske procese u krškom podzemlju (COST 620, 2004)

### 3 ANTROPOGENI UTJECAJI

#### 3.1 ANTROPOGENI UTJECAJ U KRŠKIM VODONOSNICIMA

Ljudske aktivnosti obično utječu na raspodjelu, količinu i kemijsku kvalitetu vodnih resursa. Urbanizacija, industrijski razvoj, poljoprivredne djelatnosti, rudnici i mnoge druge ljudske aktivnosti uzrokovale su onečišćenje vodonosnika širom svijeta. S obzirom da podzemna voda predstavlja izvor pitke vode za stanovništvo mnogih regija, čovjek počinje uviđati potrebu zaštite tog vrijednog resursa. Mnoge antropogene utjecaje nemoguće je u potpunosti otkloniti, stoga je potrebno poduzeti sve moguće mjere kako bi se oni minimalizirali. Prema principu održivog razvoja čovjekova dužnost trebala bi biti da svoje potrebe zadovoljava na način da ne ugrožava potrebe budućih generacija. U skladu s time, zaštititi posebno ranjivih krških vodonosnika, kao i zaštita svih vodnih resursa općenito, potrebno je posvetiti posebnu pažnju.

U ovom poglavlju napravljen je pregled glavnih antropoloških utjecaja koji ugrožavaju podzemne vode krških vodonosnika.



Slika 8. Najčešći onečišćivači podzemne vode

(Bačani i Vlahović, 2012)

##### 3.1.1. Urbana otpadna voda

Čovjek nastanjuje gotovo sva područja na Zemlji, a gradovi i naselja u kojima živi predstavljaju potencijalan izvor onečišćenja (slika 9). Otpadne vode koje potječu iz naselja dijelimo na kućanske otpadne vode i oborinske otpadne vode. Kućanske otpadne vode nastaju kao produkt zadovoljavanja higijenskih i fizioloških potreba čovjeka, a

oborinske otpadne vode su oborine koje se onečiste u kontaktu s površinama koje su za svoje različite potrebe izgradili ili koriste ljudi.



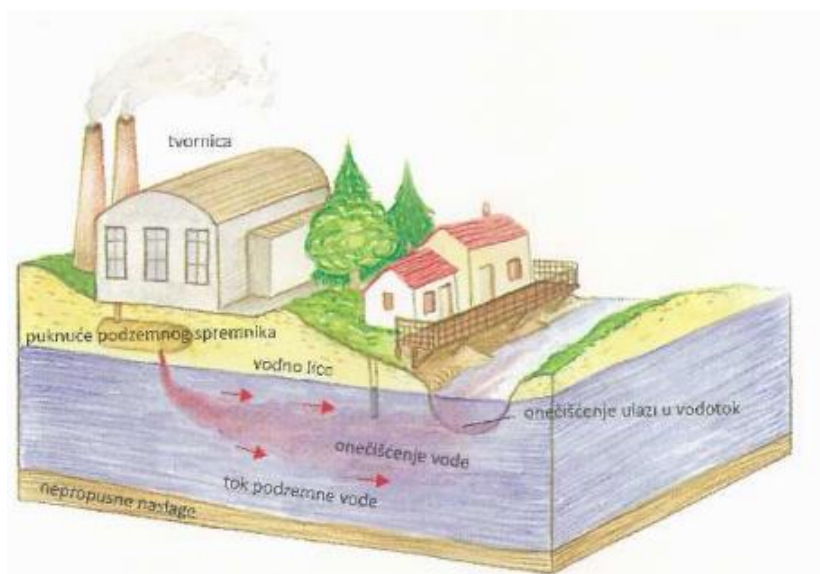
Slika 9. Urbana otpadna voda

(preuzeto na [www.scitechdaily.com](http://www.scitechdaily.com))

Najveći problem predstavljaju naselja koje nemaju postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda i kanalizaciju te gdje se otpad odlaže na površinu, u vodotoke, krške depresije i vrtače. Onečišćenje koje potiče iz ove vrste izvora sastoji se uglavnom od metabolita organskih spojeva, fosfata, bora, amonijaka, nitrita, nitrata, bakterija i virusa te deterdženata. Mogu se naći i teški metali, posebno kada se industrijska kanalizacija miješa s gradskom kanalizacijom. Oborinske otpadne vode kao važan izvor onečišćenja, često je zanemaren. Otjecanje u gradu sadrži onečišćivala kao što su ugljikovodici i ulja koji potiču od emisija i ispuštanja vozila, gnojiva, pesticida, fekalija kućnih ljubimaca itd. Otjecanje kišnice s krovova može stvoriti znatne količine bakra i cinka zbog kiselog karaktera kiše.

### **Industrijska otpadna voda**

U zemljama gdje se otpadne vode pročišćavaju, industrijsko onečišćenje ne predstavlja veliku brigu. Sastav industrijske otpadne vode vrlo je teško definirati jer se on uvelike razlikuje od jedne do druge vrste industrije. Veliki broj industrija, poput proizvodnje alkoholnih pića, prehrambenih pogona i klaonica, proizvodi organska onečišćenja (slika 10). U nekim regijama dolazi do bitnog sezonskog izvora onečišćenja kao što je npr. postrojenja za preradu maslinovog ulja. Biljke koje su karakteristične za krška područja u otpadnim vodama, također, povećaju koncentraciju kroma, KPK, krutog otpada, itd.



Slika 10. Disperzija onečišćenja iz industrije  
(Bačani i Vlahović, 2012)

### Ostali specifični otpad

Iz crpnih stanica koje se nalaze u krškim područjima može doći do istjecanje iz benzinskih spremnika i kanalizacije. Onečišćenje uzrokovano mineralnim uljima i ugljikovodicima koji tim putem dospijevaju u podzemnu vodu predstavlja velik problem stoga je potrebno poduzeti posebne mjere kako da njega ne bi došlo. U Irskoj izvor onečišćenja predstavljaju izolirane septičke jame (slika 11), a u zemljama poput Austrije i Švicarske – kanalizacija iz lovačkih domova i skijališta.

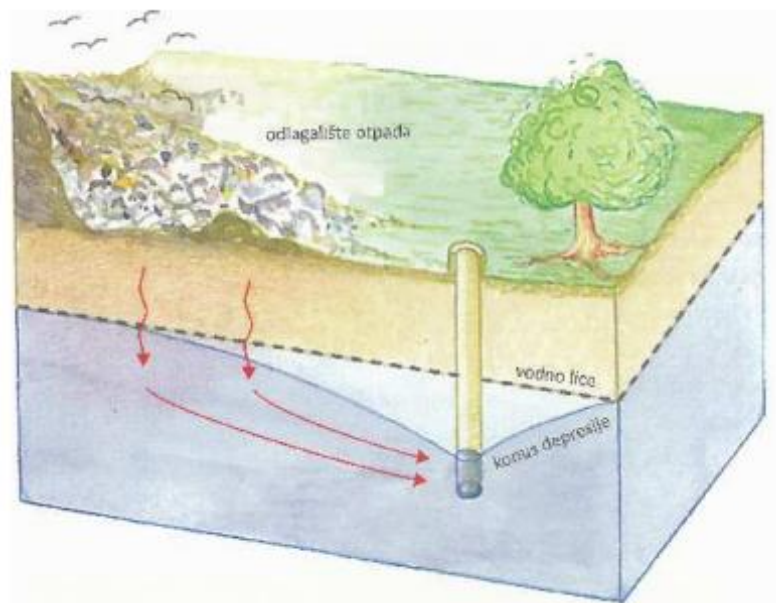


Slika 11. Širenje onečišćenja uslijed puknuća septičke jame  
(Bačani i Vlahović, 2012)



## Odlagališta otpada

Za razliku od ostalih terena, karbonatne stijene imaju općenito veliku vertikalnu propusnost pa procjeđivanje koje potiče s mjesta odlaganja otpada može brzo doći do zasićene zone. S obzirom da su mnogi krški krajevi slabo naseljeni, često budu odabrani za lokaciju odlagališta otpada. Općenito nerazumijevanje krške ranjivosti povećava rizik od onečišćenja iz ove vrste izvora. Procjeđivanje koje potiče s odlagališta otpada može imati vrlo veliki alkalitet i KPK te povećane koncentracije organskog dušika i amonijaka (slika 12). Koncentracije anorganskih spojeva (npr. Cl i Na) može prelaziti jedan gram po litri. Snažni redukcijski uvjeti, prisutni ispod odlagališta otpada, mogu pogodovati prijenosu nekih metala - posebno Fe i Mn. Ti su uvjeti također odgovorni za prisutnost plinova poput dušika, metana i H<sub>2</sub>S. Prisutnost sulfida može zadržavati visoke koncentracije teških metala ispod odlagališta.



Slika 12. Procjeđivanje s odlagališta otpada

(Bačani i Vlahović, 2012)

## Autoceste

Onečišćenje koje potiče iz ovog izvora može biti rezultat primjene soli za odleđivanje autocesta (slika 13), ispiranja autoputa (ugljikovodici, ulja, teški metali), slučajnih izlivanja itd. Analiza vode koja odvodi dio autoceste kod Postojne (SLO) pokazuje izuzetno visok udio klorida (do 19,3 g/L Cl<sup>-</sup>) zbog primjene soli. Na istom je području ustanovljeno do 1,1 ml / l Pb i 0,034 mg/L Cd.



Slika 13. Soljenje autoceste  
(preuzeto sa [www.vancourier.com](http://www.vancourier.com))

### Poljoprivreda

Utjecaj koji poljoprivredne aktivnosti imaju na podzemnu vodu posljedica je upotrebe gnojiva i pesticida te držanje stoke i peradi i odlaganje otpada nastalog držanjem životinja. Većina korištenih gnojiva proizvodi se kemijski, međutim, životinjski i ljudski otpad se također koriste kao organska gnojiva. Najčešći rezultat poljoprivrednih aktivnosti je povećanje nitrata u podzemnim vodama. Ostale komponente gnojiva poput fosfata i kalija manje su mobilne. Kontaminacija koja dolazi iz otpada stoke i peradi sastoji se uglavnom od dušičnih spojeva, organskih tvari i mikroorganizama. Druga bitna posljedica poljoprivrednih aktivnosti može biti opće povećanje koncentracije otopljenih soli zbog recikliranja vode navodnjavanjem (Almeida et al. 1995).



Slika 14. Upotreba pesticida u poljoprivredi  
(preuzeto sa [www.uciliste-umag.hr](http://www.uciliste-umag.hr))

## 3.2 PROCJENA OPASNOSTI

Prema protokolu koji je propisan projektom COST 620 (COST 620, 2004), procjena opasnosti (hazarda) drugi je korak u analizi rizika od onečišćenja podzemnih voda. Opasnost (hazard) je definirana kao mogući izvor onečišćenja od ljudskoga djelovanja i pritom se prvenstveno misli na onečišćenje s površine ili pripovršinske zone terena. Postupak procjene opasnosti obuhvaća definiranje mjere u kojoj potencijalna opasnost može biti štetna za podzemne vode, pritom se u obzir uzimaju svojstva same opasnosti i vanjski čimbenici koji mogu smanjiti mogućnost pojave opasnosti. Sam postupak odvija se u 7 koraka:

- definiranje i inventarizacija opasnosti
- prikupljanje podataka o opasnostima
- rangiranje opasnosti tj. određivanje težinskih vrijednosti za svaku opasnost
- grafička interpretacija
- tehnike kartiranja
- evaluacija podataka
- izrada karte opasnosti

### 1. korak: Definiranje i inventarizacija opasnosti

Mnoge antropogene aktivnosti izravno utječu na podzemnu vodu, a glavnim utjecajem se smatra rukovanje, proizvodnja, transport, skladištenje, zbrinjavanje i primjena opasnih tvari. Procjena opasnosti predviđa stupanj štetnosti za svaku vrstu opasnosti tako da uzima u obzir otrovnost i količinu štetnih tvari koje mogu biti ispuštene kao rezultat onečišćenja. Opasnost za podzemne vode može biti djelatnost, objekt, instalacija pa čak i prostor po svojoj namjeni, stoga je važno sustavnu registraciju različitih opasnosti temeljiti na jasnim kriterijima. Mogući kriteriji mogu biti vrijeme i trajanje opasnosti, vrsta ljudske aktivnosti ili priroda štetnih tvari. Iz aspekta zaštite podzemnih voda važnije je znati gdje postoji vjerojatnost od opasnosti nego kada dolazi do aktivnosti koje predstavljaju prijetnju. Važno je imati precizne informacije o lokaciji ili područjima povezanim s aktivnostima koje predstavljaju opasnost za podzemne vode. Postoje tri glavne kategorije korištenja zemljišta - infrastruktura, industrija i poljoprivredne djelatnosti i one su predložene kao prvi stupanj kategorizacije hazarda. U drugom i trećem

stupnju kategorizacije koriste se dodatni kriteriji i detaljnija razrada potencijalnih opasnosti. Glavni cilj inventarizacije opasnosti je obuhvatiti sve vrste opasnosti koje su relevantne za podzemnu vodu te omogućiti kartiranje, analizu i procjenu opasnosti na financijsko prihvatljiv i praktičan način.

## **2. korak: Prikupljanje podataka o opasnostima**

Procjena potencijalnog stupnja opasnosti (za svaku vrstu pojedino) zahtijeva slijedeće podatke:

- proces ili priroda aktivnosti (proizvodnja, skladištenje, itd.)
- vrste opasnih tvari
- količina tvari koje mogu biti otpuštene
- starost i stanje instalacije ili postrojenja

Prikupljanje podataka o raznim vrstama opasnosti radi se kombinacijom:

- izdvajanje iz topografskih karata
- obrada avionskih snimaka
- prikupljanje podataka iz arhiva i agencija
- terenska istraživanja
- izravni upiti tvrtkama, itd.

Različiti podaci potrebni za detaljnu procjenu opasnosti grupirani su u tzv. karticu prikupljanja podataka. Takve su kartice razrađene za svaku od petnaest vrsta opasnosti iz kategorizacije drugog stupnja.

## **3. korak: Rangiranje i procjena težina hazarda**

Utjecaj koji određeni hazard ima na kvalitetu podzemne vode može jako varirati. Za realnu procjenu opasnosti potrebno je proučiti i istražiti sve relevantne faktore utjecaja. Prilikom prikupljanja podataka često se nailazi na poteškoće, stoga je važno poduzeti sve mjere kako bi prikupljeni podaci bili što realniji i točniji. Kako bi se procijenila težina opasnosti potrebni su slijedeći koraci:

- uspostava težinskog sustava koji omogućava usporedbu različitih vrsta opasnosti i koji je prikladan za uspostavu različitih mjera zaštite i za određivanje zona zaštita podzemnih voda
- uspostavljanje postupka rangiranja za opasnosti iste vrste

- razvoj sustava procjene kojom se utvrđuje vjerojatnosti nastanka hazarda
- definiranje matematičkog algoritma za proračun potencijalnog stupnja štetnosti za svaku opasnost, uzimajući u obzir koeficijente težine i ranga, kao i vjerojatnost događaja

### **Procedura težinske ocjene**

Gotovo je nemoguće uspostaviti kvantitativne metode pomoću kojih bi se odredila apsolutna ocjena stupnja štetnosti. Glavni kriteriji za težinsku procjenu različitih opasnosti odnosi se na toksičnost relevantnih tvari povezanih sa svakom vrstom opasnosti, kao i njihova svojstva koja se odnose na topljivost i pokretljivost. Ti kriteriji određuju težinsku vrijednost svakog hazarda (H). Na temelju tri predloženih pristupa procjene stupnja štetnosti različitih hazarda, COST 620 kroz svoj Europski pristup sugerira metodu procjene prikazanu u tablici, čije vrijednosti variraju od 10 do 100.

### **Procedura rangiranja**

Za usporedbe između opasnosti iste vrste, potrebno je uzeti u obzir sve različite faktore koji utječu na stupanj štetnosti. Prema općoj klasifikaciji hazarda, opasne tvari vezane za svaku individualnu kategoriju su manje-više iste ili pripadaju istoj skupini. Razlike u štetnosti unutar svake kategorije opasnosti stoga će uglavnom biti posljedica variranja količine štetnih tvari, koje se mogu ispuštati i dalje prodirati u podzemlje. Variranje količine štetnih tvari definiramo kao faktor ocjene stvarne opasnosti ( $Q_n$ ).

### **Vjerojatnost onečišćenja podzemne vode**

Osim vrste i količine štetnih tvari povezanih s hazardom, tehničko stanje, razina održavanja, okolišni uvjeti i mjere sigurnosti važni su čimbenici prilikom procjene vjerojatnosti onečišćenje podzemnih voda. Vjerojatnost se mora uzeti u obzir kad god se procjenjuje ukupna razina opasnosti koju nazivamo indeks opasnosti (HI). Kvantitativno određivanje vjerojatnosti onečišćenja jako se razlikuju za različite vrste opasnosti. Pravu kvantitativnu procjenu veoma je teško postići, posebno za opasnosti koje potječu od industrije i infrastrukture. Za uspješniji izračun preporuča se uvođenje faktora redukcije ( $R_f$ ). Taj koeficijent daje procjenu vjerojatnosti događanja onečišćenja. Teoretski, faktor redukcije može biti od 1 do 0. U situaciji gdje je vrijednost postavljena na nulu smatra se da nema rizika od onečišćenja podzemnih voda, dok faktor 1 znači da ne postoje poznati razlozi za reduciranje vjerojatnosti pojave onečišćenja.

## Izračun indeksa hazarda (HI)

Označava stupanj opasnosti svakog hazarda i dobiva su putem slijedeće formule:

$$HI = H \cdot Q_n \cdot R_f$$

Gdje je HI indeks opasnosti, H težinska vrijednost svakog hazarda,  $Q_n$  je faktor ocjene stvarne opasnosti (0,8-1,2) i  $R_f$  je faktor redukcije.

Stupnjevanje indeksa opasnosti kreće se od 0 do 120 (tablica 1).

Tablica 1. Kategorije opasnosti od mogućeg onečišćenja i njihov način prikaza na karti (Loborec, Kapelj, Novak 2015)

Indeks opasnosti (HI)	Kategorija opasnosti	Razina opasnosti	Boja na karti
0 - 24	2	nema ili vrlo mala	plava
24 - 48	3	niska	zelena
48 - 72	4	srednja	žuta
72 - 96	5	visoka	narančasta
96 - 120	6	vrlo visoka	crvena

## 4. korak: Grafička interpretacija

Grafička interpretacija podataka o opasnostima obično se dobiva s karte koja sadrži prostorne informacije kao što su lokacija i prostiranje (dimenzije, oblik), zajedno s opisnim informacijama. U nekim slučajevima stvarna veličina opasnosti ne može se predstaviti zbog svojih malih dimenzija, tada se oblik kao prostorna informacije gubi, a samo opisni podatak ostaje kao atribut prikazan na karti. Karta opasnosti stoga prikazuje raspodjelu i lokaciju različitih vrsta opasnosti sa zajedničkim definiranim atributom. Preporuča se korištenje GIS sustava. Opasnosti se na karti prikazuju pomoću simbola ili boje kako bi se označio njihov potencijalni stupanj štetnosti dobiven izračunom indeksa opasnosti. Za izračun indeksa opasnosti (HI), preporučuje se unos svih potrebnih koeficijenata u zasebnim stupcima u atributnim tablicama.

## **5. korak: Tehnike kartiranja**

Prikupljanje podataka potrebnih za kartiranje opasnosti kako je prikazano u koraku 2, može se dobiti ne samo iz terenskih mjerenja, već i iz zračnih snimka i satelitskih slika. Preporuka je da se takvi podaci integriraju u svrhu kartiranja opasnosti pomoću Geografsko-informacijskog sustava (GIS).

## **6. korak: Evaluacija podataka**

Ne postoji jedinstvena interpretacija termina "evaluacija podataka", nego se on zapravo može povezati s nekoliko različitih zadataka:

- ocjena kvalitete podataka
- integracija podataka
- izlazna analiza
- osjetljivost podataka.

Prilikom obavljanja ovih zadataka u obzir treba uzeti karte ranjivosti i rizika, a ne samo karte opasnosti. Kvaliteta karte ovisi o kvaliteti podataka koji su korišteni za njenu izradu. Kako bi se izbjegle pogreške preporuča se uvođenje atributa opasnosti koji će omogućiti strogu kontrolu i sigurnost podataka. Osobito korisni mogu biti atributi koji dopuštaju razliku između izmjerenih, statističkih, ekstrapoliranih i procijenjenih podataka o opasnostima, kao i atributi koji će pomoći u procjeni prostorne i vremenske varijabilnosti svake opasnosti.

## **7. korak: Izrada karte hazarda**

Posljednji korak procjene opasnosti odnosi se na stvarnu izradu karte opasnosti. Završni čin sadrži neklasificirane geografske podatke i one klasificirane dobivene izračunom indeksa opasnosti. U ovom koraku veliku ulogu igra mjerilo karte stoga je uobičajena praksa započeti s manje detaljnim mjerilima (COST 620, 2004).

## 4 PROCJENA RIZIKA

Procjene rizika i tehnike upravljanja rizikom, kao termini, danas se sve više koriste prilikom hidrogeoloških aktivnosti koje su odnose na upravljanje podzemnim vodama i njihovom kvalitetom. Kako bi se steklo jasno razumijevanje specifične primjene procjene rizika za podzemne voda, u sklopu EU COST-a 620 rizik je definiran kao termin koji se koristi za označavanje mogućnosti onečišćenja kao rezultat događaja hazarda.

Termin obuhvaća vjerojatnost i posljedice, definirane kao vjerojatnost ili očekivanu frekventnost negativnih posljedica na podzemne vode. Rizik nije zamišljen kao apsolutna mjera već kao sredstvo relativne mjere ili usporedbe. Ta se relativna mjera može definirati kao produkt vjerojatnosti nekog događaja i posljedične štete.

### 4.1 MODEL PROCJENE RIZIKA

Temeljem modela "porijeklo-podzemna mreža tokova-cilj" (slika 15) rizik onečišćenja podzemnih voda ovisi o tri elementa (COST 620, 2004):

- opasnost koju predstavlja potencijalno onečišćenje (jednako porijeklu)
- prirodna ranjivost podzemnih voda na onečišćenje (jednako podzemnoj mreži tokova)
- potencijalne posljedice onečišćenja (cilj)



Slika 15. Model "porijeklo-podzemna mreža tokova-cilj"

(modificirano prema COST 620, 2004 )



Procjena rizika ili analiza rizika identificira postojeće ili potencijalne opasnosti te puteve kojima su podzemne vode izložene onečišćenju koje je potrebno riješiti u cilju pružanja osnove za poduzimanje mjera zaštite. Prilikom procjene u obzir se moraju uzeti slijedeće činjenice:

- vjerojatnost događaja
- intenzitet potencijalnog utjecaja, koji se manifestira na podzemne vode
- osjetljivost podzemnih voda na utjecaj

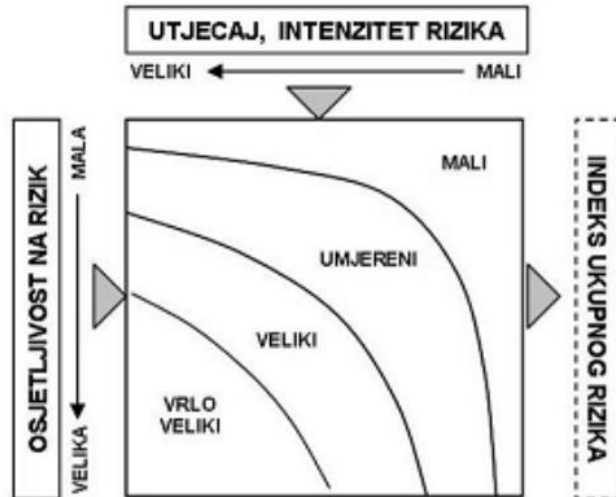
Upravljanje rizikom temelji se na analizi korištenja zemljišta i analizi opterećenja potpovršinskim onečišćenjem, kao i na prirodnoj ranjivosti vodonosnika i zaštitnim mjerama za smanjenje rizika. Mjere za smanjenje rizika uključuju procjenu i odabir mogućnosti te provedbu mjera za sprečavanje ili minimaliziranjem vjerojatnosti događaja onečišćenja i njegovih posljedica. Primjer bi bili prostorni planovi koji usmjeravaju razvoj prema područjima nižeg rizika, prikladni građevinski radovi koji uzimaju u obzir ranjivost i vrijednost podzemne vode, uspostava monitoringa i neke druge specijalne mjere korištenja prostora (COST 620, 2004).

## **4.2 KONCEPT PROCJENE RIZIKA**

Za procjenu rizika koristi se već spomenuti tradicionalni model "porijeklo-podzemna mreža tokova-cilj".

Procjena se odvija u dvije faze. U prvoj fazi se procjenjuje intenzitet opasnosti na određeni cilj (intenzitet utjecaja) uzimajući u obzir sve moguće štetne čimbenike vezane uz hazard i duž puta do cilja. Druga faza obuhvaća procjenu posljedice takvog utjecaja na cilj s obzirom na njegovu osjetljivost na promjene koje dolaze izvana (procjena rizika osjetljivosti).

Na kraju se rezultati oba dvije faze procjene mogu kombinirati prema određenom matematičkom postupku za kompletiranje procjene rizika. Cjelovita procjena rizika trebala bi uključivati obje faze, međutim u mnogim slučajevima temelji se samo na prvoj fazi, odnosno procjeni intenziteta rizika (COST 620, 2004).



Slika 16. Shematski prikaz procjene ukupnog rizika  
(COST 620, 2004)

Procjena intenziteta rizika određuje se korištenjem dvaju osnovnih pristupa:

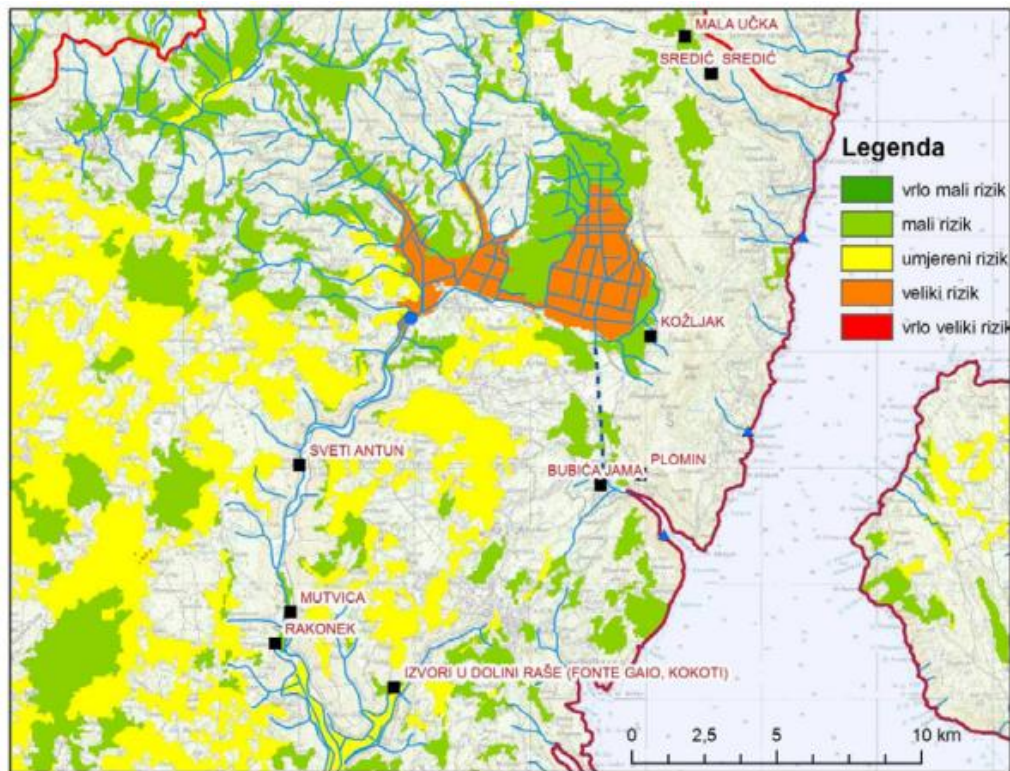
- procjenom porijekla onečišćenja i vjerojatnost da će se onečišćenje dogoditi
- procjenom svih procesa koji mogu dovesti do smanjenja onečišćenja prije njegovog dospijeca do vodnog resursa.

Rezultat procjene može biti kvantitativna vrijednost kada se koristi algoritam odnosa ranjivosti i opasnosti te semikvantitativna vrijednost kada se intenzitet dobiva na temelju uspostavljanja odnosa između klasa ranjivosti i opasnosti. Procjena osjetljivosti na rizik odnosi na posljedice do kojih može doći uslijed pojave neke štete te se procjenjuje temeljem ekološke i socijalno-ekonomske vrijednosti promatranog vodonosnog sustava. Ukupni rizik, odnosno krajnji cilj analize, predstavlja matematički algoritam nastao kombinacijom intenziteta rizika i osjetljivosti na rizik (slika 16).

Karta rizika predstavlja metoda sumiranja rezultata ukupne procjene rizika s obzirom na prostornu raspodjela rizika (slika 17). Služi kao osnovna podloga pri donošenja odluka po pitanju upravljanja i zaštite voda. S obzirom na višekomponentni postupak procjene, pojedine karte prikazuju samo djelomične rezultate cijelog postupka:

- karta intenziteta rizika - kombinacija karte opasnosti i karte ranjivosti
- karta osjetljivosti na rizik - prikazuje osjetljivost podzemne vode na određeni utjecaja

- karta rizika ili karta ukupnog rizika - predstavlja sve aspekte postupaka procjene (COST 620, 2004).



Slika 17. Primjer karte rizika

(Biondić et al. 2009)

## 5 PRIMJERI I POSLJEDICE

Za bolje razumijevanje antropološkog utjecaja na zaštitu pukotinsko-kavernoznih vodonosnika, u ovom poglavlju obrađeni su neki od konkretnih primjera iz svijeta i Hrvatske. Kroz obradu podataka o prirodnoj ranjivosti i procjenu opasnosti, napravljena je analiza rizika temeljem koje su ponuđena rješenja za problematiku pojedinog područja.

### 5.1 UTJECAJ POLJOPRIVREDE NA VODONOSNIK U PORTUGALU

Promatrano područje, Campina de Faro, nalazi se sjeverno od glavnog grada najjužnije provincije Portugala – Fara (slika 18). Omeđeno je s Atlantskim oceanom na jugu, rijekama Ribeira de Colmeal na zapadu i Rio Seco na istoku. Topografski promatrano područje je uglavnom prilično ravno, izuzetak je brdo na kojem se nalazi grad Faro. Prevladava topla mediteranska klimu, sa srednjim godišnjim vrijednostima temperature zraka i oborine od 17,3 ° C i 531 mm (Bocanegra et al. 2005).



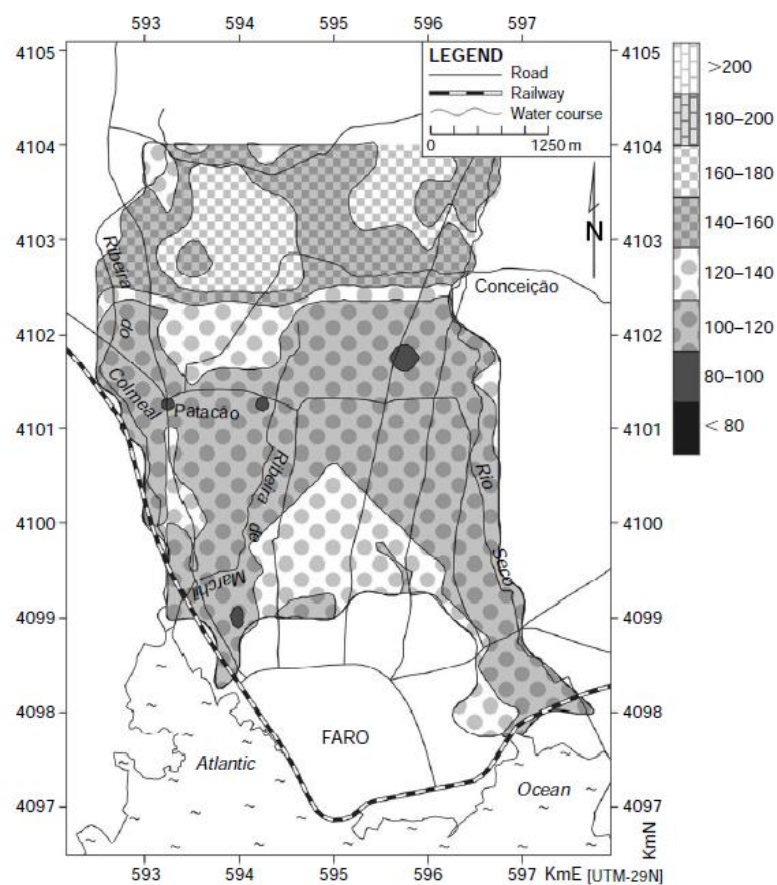
Slika 18. Campina de Faro  
(Bocanegra et al. 2005)

#### Prirodna ranjivost

Na promatranom području postoje tri vodonosnika. Prvi vodonosnik izgrađen je od vapnenca iz doba krede, nalazi se na sjevernom dijelu područja na dubinama od 200 m dok mu maksimalna debljina iznosi 1000 m. Drugi vodonosnik tvore vapnenački sedimenti bogati fosilima koji potječu iz doba miocena čija se debljina povećava od sjevera prema

jugu i prelazi 200 m. Zbog krških karakteristika propusnost ovih vodonosnika je visoka. Sama površina terena prekrivena je finim pijescima. Treći vodonosnik građen je od pijeska i šljunka (Bocanegra et al. 2005).

Prirodna ranjivost područja procijenjena je DRASTIC metodom (Bocanegra et al. 2005). Vapnenački vodonosnici relevantni za tematiku ovog rada imaju veliku hidrauličku vodljivost, vodno lice im se nalazi na relativno plitkim dubinama te im je prihranjivanje visoko kao posljedica navodnjavanja. S obzirom na navedene karakteristike DRASIC metodom izračunat je visok indeks koji upućuje na veliku osjetljivost podzemnih voda na onečišćenje (slika 19).



Slika 19. Karta ranjivosti promatranog područja izrađena DRASTIC metodom (Bocanegra et al. 2005)

### Opasnosti (hazardi)

Poljoprivredne aktivnosti stoljećima dominiraju kao glavna namjena promatranog područja (Bocanegra et al. 2005). U početku su uzgajane kulture koje imaju malu potražnju za vodom (bademi, masline, vinogradi) te su stoga prikladne za toplu i suhu

klimu. S vremenom je poljoprivredna djelatnost ušla u novu fazu razvojem tehnike navodnjavanja. Izgradnjom od preko 200 plitkih ručno kopanih zdenaca u svrhu navodnjavanja, omogućen je uzgoj povrća (krumpir, grah, kukuruz) i stabala naranče (Bocanegra et al. 2005). Danas se područje većim dijelom koristi za uzgoj stabala citrusa i uzgoj u staklenicima. Uzgoj u staklenicima zahtjeva primjenu velike količine vode, pesticida i gnojiva koji omogućuju intenzivnu proizvodnju.

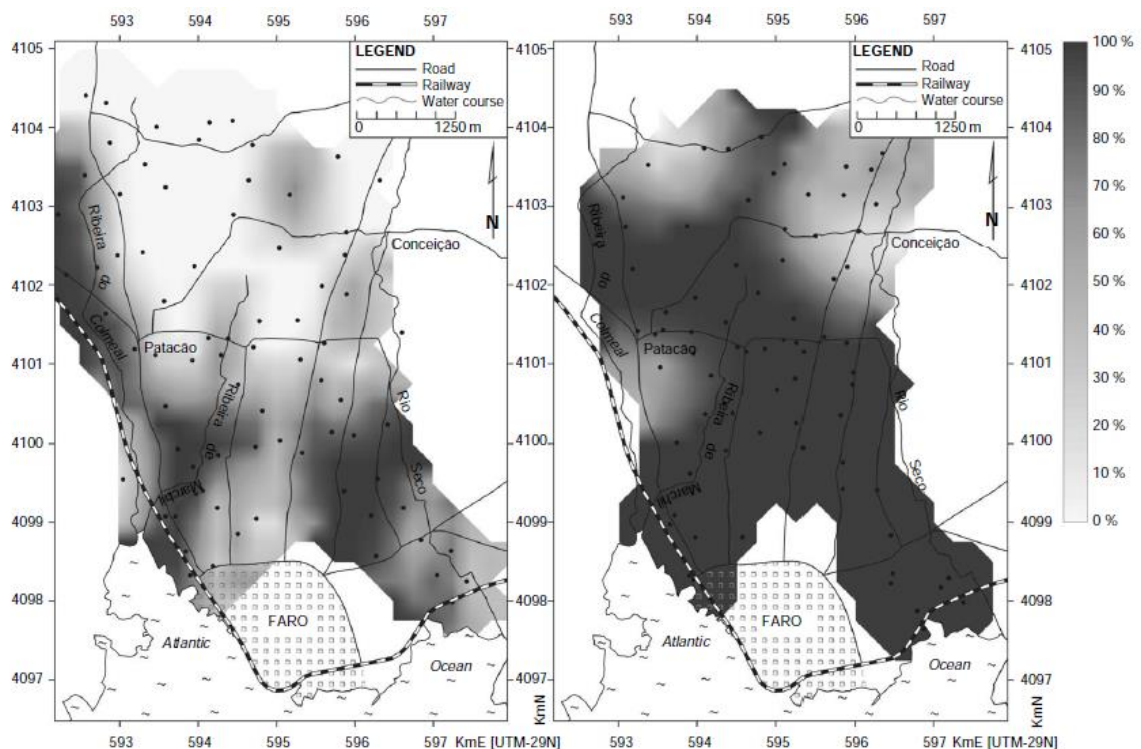
Što se tiče primjene dušika, kultura agruma je podjednako zahtjevna kao i staklenički uzgoj. Na ispitivanom području na jugu Portugala uslijed poljoprivrednih aktivnosti uočen je značajan porast koncentracije nitrata u podzemnoj vodi (Bocanegra et al. 2005). Iako je prekomjerna upotreba dušičnih gnojiva glavni izvor onečišćenja nitratima, navodnjavanje lokalnom podzemnom vodom bogatom nitratima značajno doprinosi problemu. Ovaj dodatni izvor dušika uglavnom se ne uzima obzir kod planova gnojidbe. Povratni protok navodnjavanja zahvaćen jakim utjecajem evapotranspiracije također postepeno povećava razinu nitrata i ukupne slanosti u vodonosnicima (Bocanegra et al. 2005).

### **Rizici i rješenja**

Onečišćenje podzemne vode nitratima u Campina de Faro praćeno je s obzirom na njegovu vremensku evoluciju kao i današnju prostornu raspodjelu. U svrhu procjene utjecaja nitrata na podzemne vode istraživači su prikupili sve dostupne podatke o koncentraciji nitrata u podzemnoj vodi tog područja. U sljedećoj fazi odabrali su indikatorske varijable za izradu karte rizika. Kao granična vrijednost odabrana je najveća dopuštena koncentracija nitrata u vodi za piće (Bocanegra et al. 2005). Prostorna rasprostranjenost onečišćenja prikazana je izrađenim kartama za dva perioda (slika 20).

Ono na što ove karte zapravo ukazuju jest vjerojatnost da koncentracije nitrata u uzorcima podzemnih voda u gornjim vodonosnicima premašuje najveću dopuštenu koncentraciju u pitkoj vodi (50 mg / l). Karta koja se odnosi na raniji period jasno ukazuje na postojanje nekoliko područja gdje će gornje koncentracije nitrata u vodonosnicima vjerojatno premašiti graničnu vrijednost. Veća koncentracija onečišćenja u središtu i na jugu područja mogla bi biti rezultat intenzivnije poljoprivredne aktivnosti ili specifičnih hidrogeoloških karakteristika. Na sjeveru se nalazi, za ovaj rad relevantan, vodonosnik čiji su slojevi vapnenca, iako razdvojeni lesom, zahvaćeni visokim stupnjem okršavanja

te uslijed toga dolazi do brzog odgovora vodnog lica na onečišćenje. Kao posljedica toga vrijeme zadržavanja podzemne vode je malo i uvjeti za kontinuirano recikliranje podzemne vode ne postoje. S obzirom na kontinuirani razvoj poljoprivrede, bušenje novih zdenaca i intenzivnija upotreba gnojiva dovode do povećanja rizika od onečišćenja što možemo vidjeti na karti kasnijeg razdoblja. S vremenom je, dakle, gotovo cijelo istraživano područje zahvaćeno vjerojatnošću da će koncentracija nitrata, u postotku od 90-100%, preći dozvoljenu granicu (Bocanegra et al. 2005).



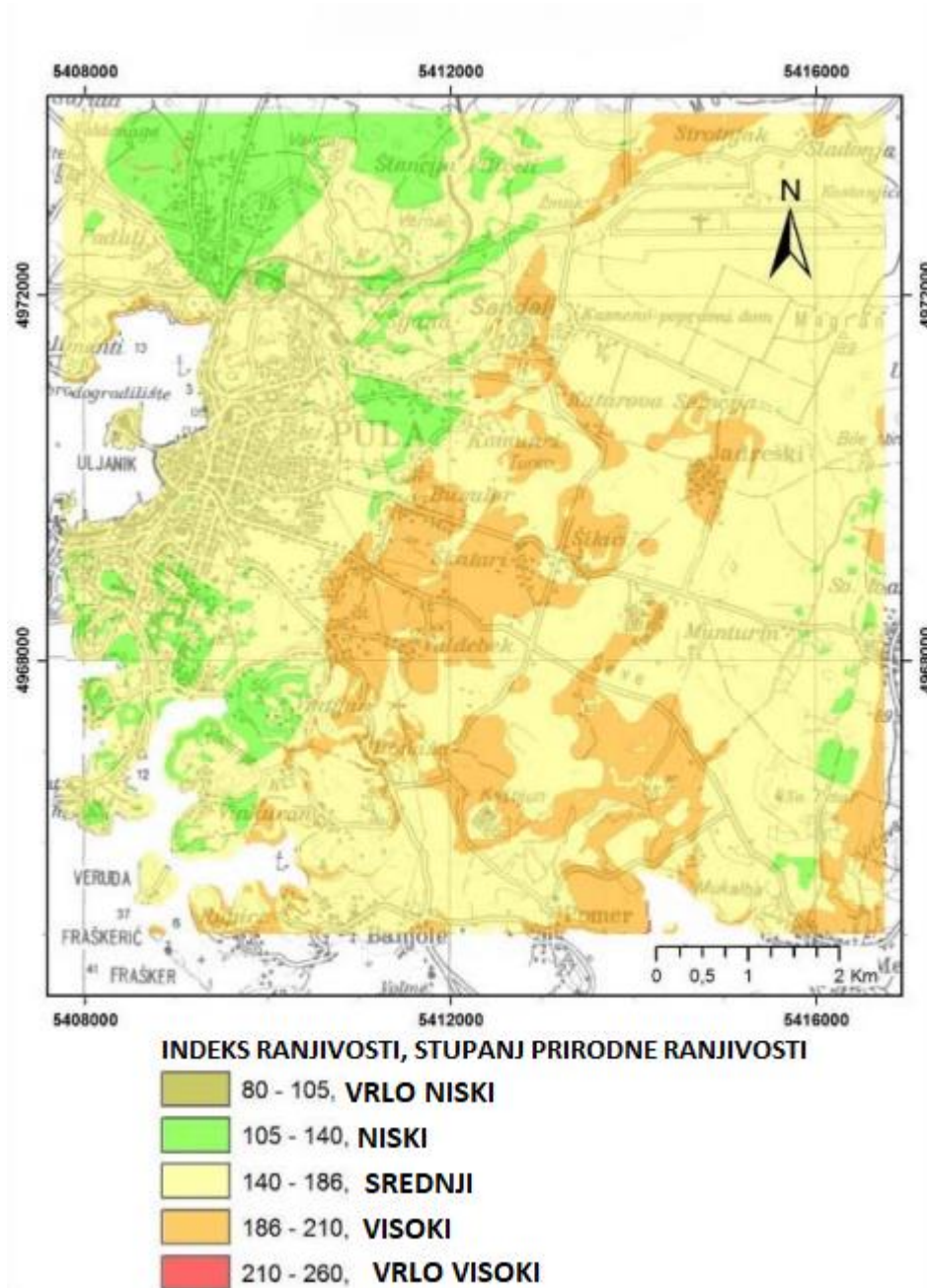
Slika 20. Karte rizika za period od 1978.-1981. (lijevo) i 1996.-1998. (desno)  
(Bocanegra et al. 2005)

### Usporedba s primjerom iz Hrvatske

TPV (tijelo podzemne vode) Južna Istra primjer je onečišćenja podzemnih voda uslijed poljoprivrednih aktivnosti u Hrvatskoj (Biondić et al. 2009) Na većini vodenih objekta tog područja kemijsko stanje vode, kao i rizik podzemnih voda ocijenjeni su lošim stanjem.

Povišene koncentracije nitrata u podzemnoj vodi kontinuirani je problem ovog dijela Istre već više godina. Kao glavni izvori onečišćenja, koji se nalaze uzvodno od onečišćene zone, navode se Kazneno-popravni dom u Valturi u sklopu kojeg se nalazi stočna farma

i poljoprivredno gospodarstvo, pulski aerodrom i dvije veće farme. Nedovršeni kanalizacijski sustav grada Pule i odlagalište otpada Kaštijun, također, mogu imati negativan utjecaj na kvalitetu podzemne vode. S obzirom da je povišena koncentracija nitrata pokazatelj utjecaja poljoprivrednih aktivnosti, kao glavni izvor onečišćenja smatra se kaznionica u Valturi i spomenute farme (Biondić et al. 2009) Ovi izvori onečišćenja su prema karti prirodne ranjivosti šireg pulskog područja smješteni upravo u najranjivijem centralnom dijelu TPV Južna Istra (slika 21).



Slika 21. Karta prirodne ranjivosti metodom SINTACS širega pulskoga područja (Kuhta, 2014)



Kako bi se u budućnosti poboljšalo kemijsko stanje vode, predložene su neke mjere. Glavna mjera se odnosi na smanjen unos nitrata u podzemne vode putem poljoprivrednih površina na način da se provode kvalitetnije kontrole gnojiva koje se primjenjuje. Također, poželjno je provoditi mjere zaštite prema Akcijskom programu zaštite voda od onečišćenja uzrokovanog nitratima poljoprivrednog podrijetla (NN 15/13; 22/15) sukladno Nitratnoj direktivi (1991) iako TPV Južna Istra nije proglašena kao ranjiva na nitrate. Kao nadopuna nadzornom monitoringu, predlaže se i operativni monitoring koji bi se odnosio na uspostavu šire mreže praćenja na dodatnim vodoopskrbnim zdencima koji nisu uključeni u nadzorni monitoring. Mjerenja koja se provode četiri puta godišnje potrebno je vršiti u mjesečnim intervalima te se uvode nove bušotine.

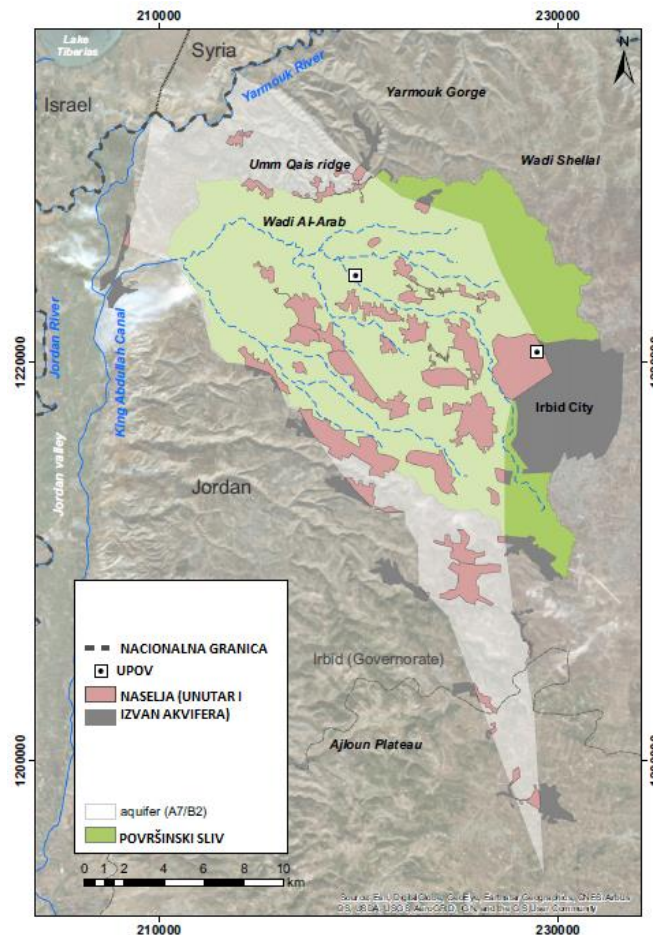
### **Zaključna razmišljanja**

Smatram da bi za krške vodonosnike ovog područja trebalo uspostaviti detaljan i kontinuirani monitoring koncentracije nitrata. Prilikom planiranja upotrebe pesticida i gnojiva trebalo bi uzeti u obzir koncentraciju nitrata koja se povećava uslijed navodnjavanja vodom iz plitkih zdenaca. Poljoprivreda bi se, također, trebala usmjeravati ka ekološkom uzgoju. Za potrebe navodnjavanja trebalo bi razmotriti kopanje dubljih zdenaca koji bi osiguravali vodu bolje kvalitete. Također bi trebalo provoditi aktivnu i pasivnu zaštitu izvora. Pasivna zaštita provodi se u vidu zabrane obavljanje određenih djelatnosti, a aktivna putem monitoringa kakvoće vode i aktivnosti za poboljšanje kakvoće vode. S obzirom da je u literaturi navedeno da stanovništvo promatranog područja nema javnu vodoopskrbu, jedna od mjera bi bila i izgradnja iste.

## **5.2 UTJECAJ OTPADNIH VODA NA VODONOSNIK U JORDANU**

Proučavano područje, sliv Wadi al Arab, dio je provincije Irbid na sjeverozapadu Jordana i nalazi se na granici sa Sirijom i Izraelom. Wadi al Arab zauzima površinu od 200 km<sup>2</sup> i primjer je mnogih vodom oskudnih područja kojima je podzemna voda glavni izvor vode za piće (slika 22).

Omeđeno je metropolitanskim područjem Irbid na istoku, grebenom Umm Qais na sjeveru te dolinom Jordan na zapadu. Vodonosnik promatranog područja zauzima površinu od 300 km<sup>2</sup> i proteže se južno u smjeru visoravni Ajloun (Clemens et al. 2019).

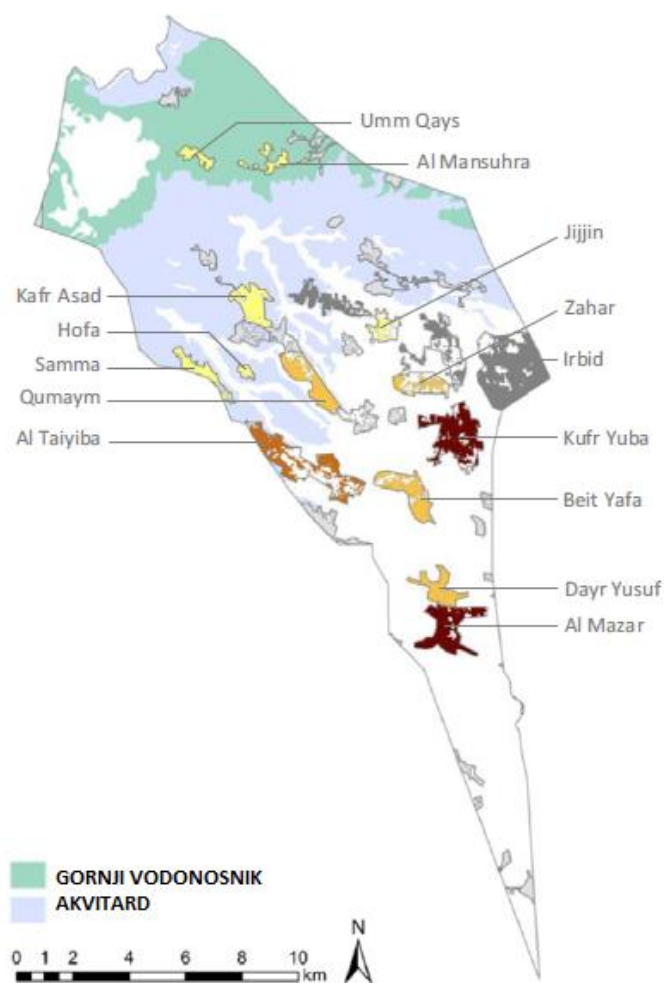


Slika 22. Wadi al Arab lokacija  
(Clemens et al. 2019)

### Prirodna ranjivost

Promatrani sustav vodonosnika izgrađen je od vapnenačkih i dolomitskih stijena. Glavni vodonosnik na sjeverozapadu prekriven je slabo propusnim vodozadržnikom i još jednim vodonosnikom (slika 23). Prirodna ranjivost promatranog područja procijenjena je COP metodom (Clemens et al. 2019).

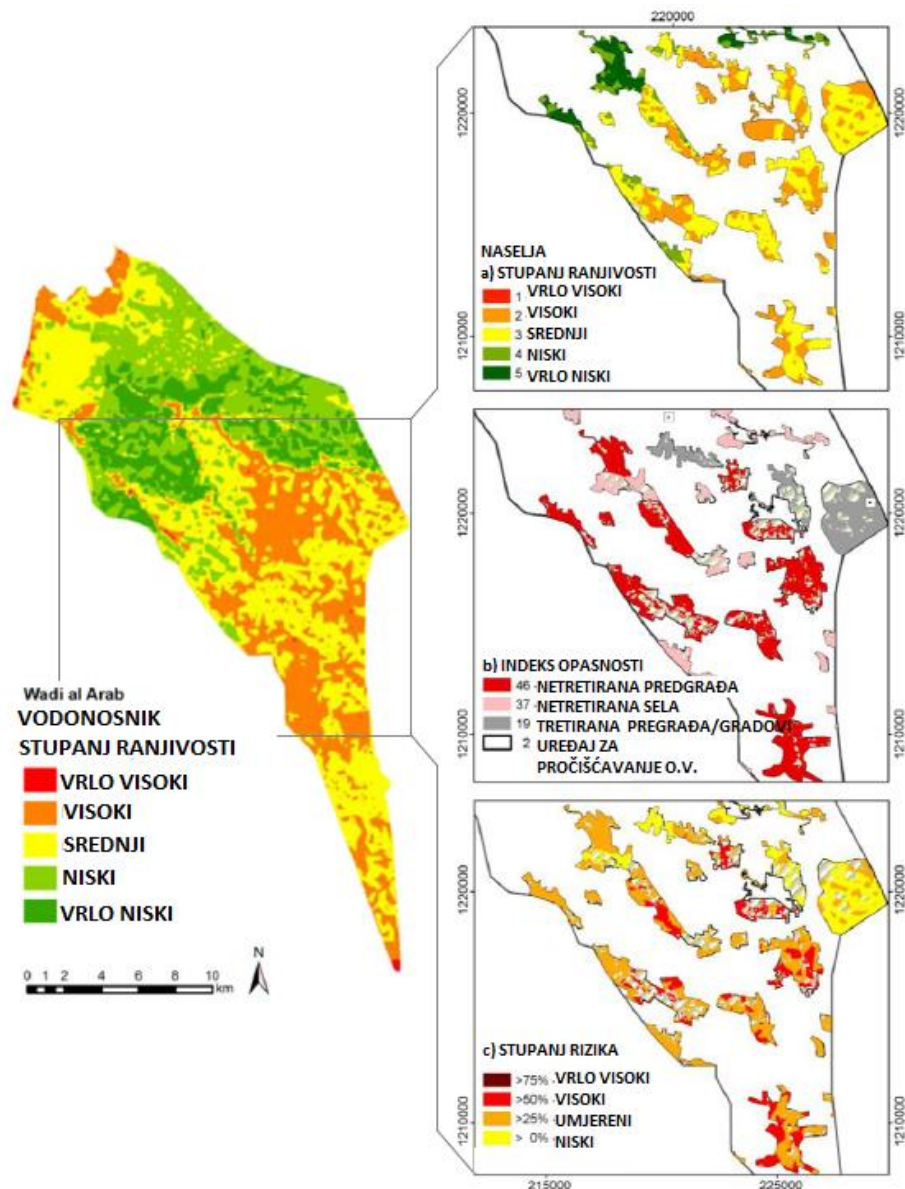
Izrađena karta prirodne ranjivosti ukazuje na to da je manje od 1% područja vrlo visoko ranjivo, 25% područja visoko ranjivo, a dominantnih 43% područja je srednje ranjivo (slika 24). Ranjiva područja nalaze se na jugu i sjeveru lokacije. Veliko područje ocijenjeno srednjom ranjivosti na sjeveru može se pripisati postojanju nepropusne stijene – akvikluda u slojevima (Clemens et al. 2019). Niska ranjivost procijenjena je za 22% područja, a vrlo niska za 9% na području preklapanja glavnog vodonosnika s vodozadržnikom i drugim vodonosnikom.



Slika 23. Položaj gornjeg vodonosnika i vodozadržnika u odnosu na glavni vodonosnik i naselja (Clemens et al. 2019)

### Opasnosti (hazardi)

Dok većina urbanih područja imaju postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda, opasnost predstavljaju prigradska i ruralna naselja koja nisu povezana na takve sustave. Visoki troškovi takvog tretmana glavni su razlog nedostatka istog. Otpadna voda predstavlja izvor mnogih onečišćivala kao što su: nutrijenti, bakterije, organska onečišćivala, itd. Nedostatak uređenog saniteta i ispuštanje nepročišćenih otpadnih voda u okoliš uzrokuje zagađenje površinske vode, tla i podzemne vode.



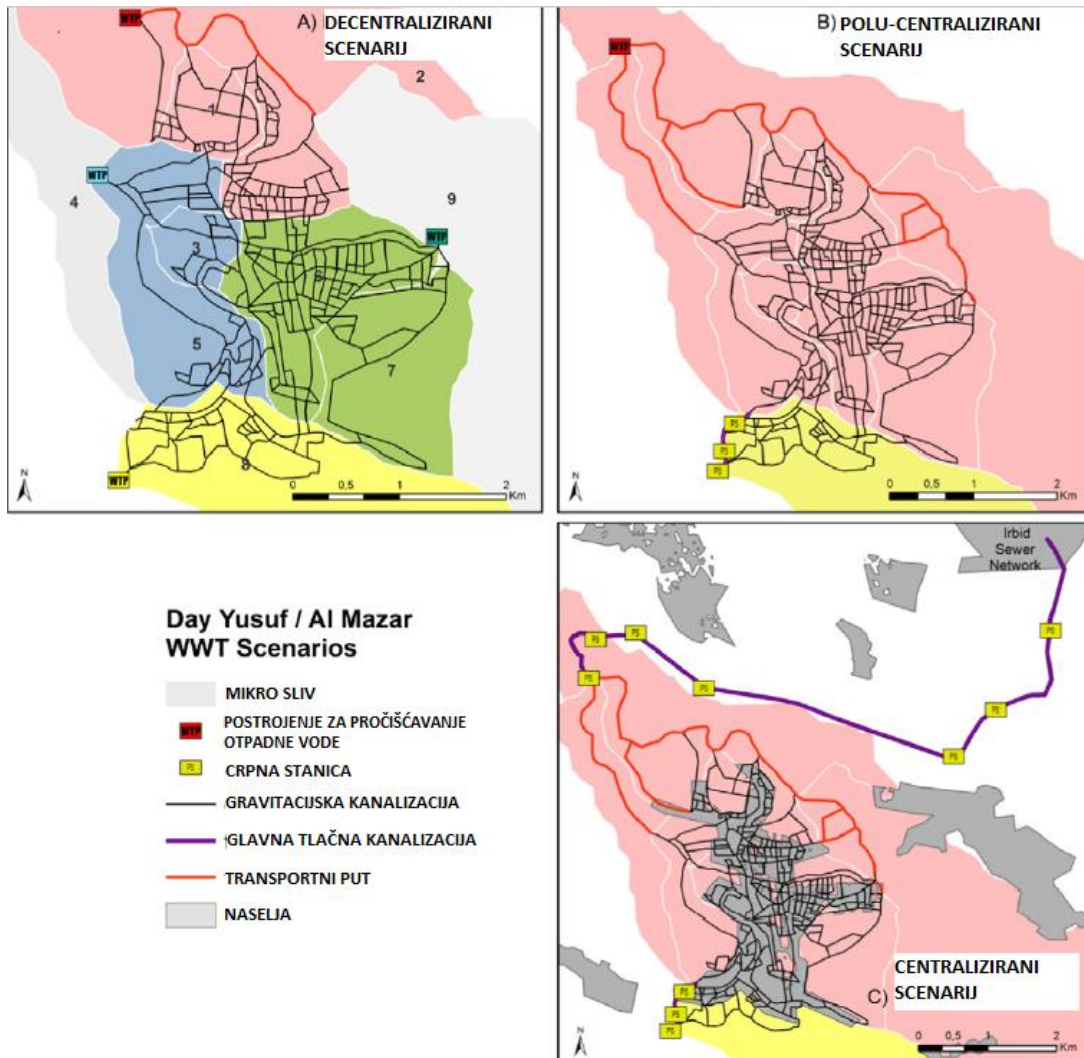
Slika 24. Karta ranjivosti područja Wadi al Arab; a) stupanj ranjivosti za naselja b) indeks opasnosti za naselja c) stupanj rizika

(Clemens et al. 2019)

## Rizik i rješenja

Rezultati procjene rizika ukazuju na lokacije za koje je potrebno uspostaviti monitoring septičkih jama i njihovog istjecanja. Prema rezultatima glavna prijetnja na promatranom području je naselje Al Mazar (Clemens et al. 2019). S obzirom da se naselje nalazi iznad područja prihranjivanja vodonosnika te je vrijeme zadržavanje onečišćenja nisko uslijed velike količine protočnih puteva, ovo naselje je prioritarno za izgradnju sustava za pročišćavanje otpadnih voda. Naselje Al Mazar je spojeno s naseljem Dayr Yusuf i njihova kombinirana infrastruktura može se optimalno koristiti za daljnje rješenje

tretmana otpadnih voda koje će uključivati oba naselja. Oba potencijalno proizvode 25% onečišćenja svih predgrađa, što je 12% ukupnog infiltriranog onečišćenja svih klasa opasnosti. Predloženo je više scenarija za rješavanje ovog problema (slika 25).



Slika 25. a) decentralizirani scenarij; b) polu-centralizirani scenarij; c) centralizirani scenarij tretmana otpadnih voda za naselja Day Yusuf/Al Mazar

(Clemens et al. 2019)

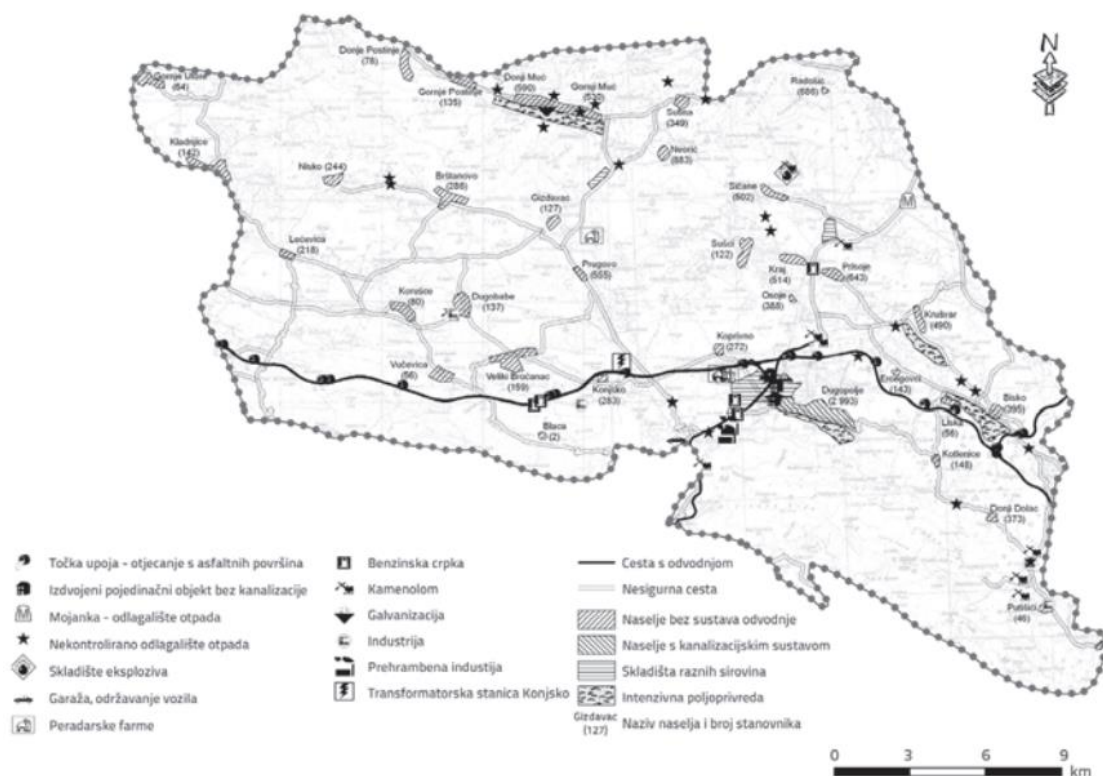
Prvi scenarij odnosi se na izgradnju novih spremnika za svako kućanstvo čiji bi se sadržaj praznio pomoću cisterna i odvezio na udaljene postojeće uređaje za pročišćavanje otpadnih voda. Drugi scenarij temelji se na decentralizaciji otpadnih voda pomoću četiri mala postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda oko naselja. Na taj način se ispunjavaju standardni zahtjevi blizine naselja kao i udaljenost od stambenih područja Broj postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda se smanjuje što je više moguće kako bi se osiguralo da se pojedino postrojenje ne nalazi uzvodno od prirodne površine dreniranja

drugog postrojenja. Treći scenarij, polu-centralizacija, uključuje tri stanice za crpljenje i tlačnu kanalizaciju na jugu pomoću kojih se otpadna voda transportira iz mikro-slivova do glavne kanalizacijske mreže. Mali decentralizirana postrojenja bila bi zamijenjena s jednim velikim glavnim postrojenjem te bi mreža uključivala tri transportne linije kojima bi otpadna voda gravitacijski stizala do postrojenja. Četvrti scenarij je centralizirani, međutim umjesto jednog glavnog postrojenja uključuje sedam dodatnih crpnih stanica koje isporučuju otpadne vode do postojeće kanalizacijske mreže grada Irbid (Clemens et al. 2019).

### **Usporedba s primjerom iz Hrvatske**

Sliv izvora Jadro i Žrnovnica nalazi se u širem zaleđu grada Splita te se njegove izvorske vode koriste za vodoopskrbu grada Splita i šire okolice tj. za populaciju od oko 300.000 stanovnika. Zbog slabe naseljenosti područja, odnosno relativno male potrošnje vode, količine otpadnih voda u prošlosti nisu predstavljale prijetnju. Razvoj koji se posljednjih desetljeća desio u tom dijelu Hrvatske, rezultirao je pogoršanjem kvalitete izvorskih voda Jadra i Žrnovnice.

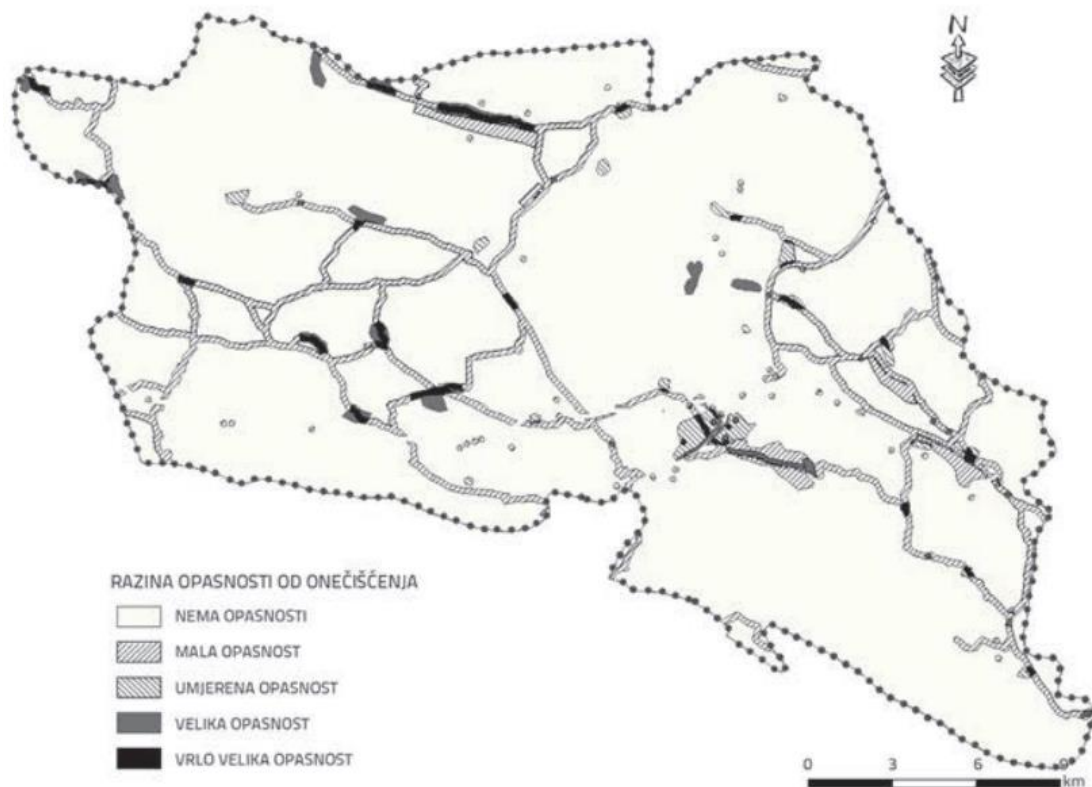
Usporedno s porastom životnog standarda povećala se i količina otpadnih voda, posebno u područjima krških polja. Ispuštanje otpadne vode u vrtače i ponore uobičajena je nezahvalna praksa, s obzirom da je u kršu pročišćavanje prirodnim putem onemogućeno. Stoga, nije neobično da se otpadna tvar pojavi na krškim izvorima. Na temelju rezultata monitoringa kakvoće vode Zavoda za javno zdravstvo Splitsko-dalmatinske županije, za razdoblje od 1975. do 2005. godine (izvor Jadra), odnosno od 1975. do 2004. godine (izvor Žrnovnice), vidljivo je povremeno bakteriološko onečišćenje izvorske vode i povišena koncentracija nitrata. Također, maksimalne vrijednosti kemijske potrošnje kisika ukazuju na čestu pojavu oksidativnih tvari u izvorskoj vodi (vjerojatno organskog porijekla). Na temelju provedene identifikacije izvora opasnosti, naselja bez kanalizacijske infrastrukture koja su zaslužna za povremeno bakteriološko onečišćenje izvorske vode, ocijenjena su najvećom težinskom vrijednošću.



Slika 26. Karta neklasificiranih opasnosti na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice (Loborec, 2013)

Od značajnijih izvora opasnosti izdvojene su još benzinske postaje, skladišta raznih sirovina, divlja odlagališta otpada i industrijsko postrojenje za preradu metala i galvanizaciju. Prostornim smještajem onečišćivača na području sliva izrađena je neklasificirana karta opasnosti (slika 26), a konačni rezultat analize opasnosti predstavlja karta klasificiranih opasnosti (slika 27) (Loborec, Kapelj, Novak 2015).

Iako stanje na području sliva nije alarmantno, glavno rješenje postojećeg povremenog onečišćenja izvorske vode bila bi izgradnja kanalizacijskog sustava u naseljima, tj. prikupljanje, odvođenje i pročišćavanje otpadnih voda. Na ovom slučaju mogao bi se primijeniti i jedan od triju predloženih scenarija tretmana otpadne vode iz Jordana. Generalno poboljšanje stanja kvalitete podzemne vode postiže se jedino postupnim smanjenjem ili kontrolom djelovanja svih onečišćivača (Loborec, Kapelj, Novak, 2015)

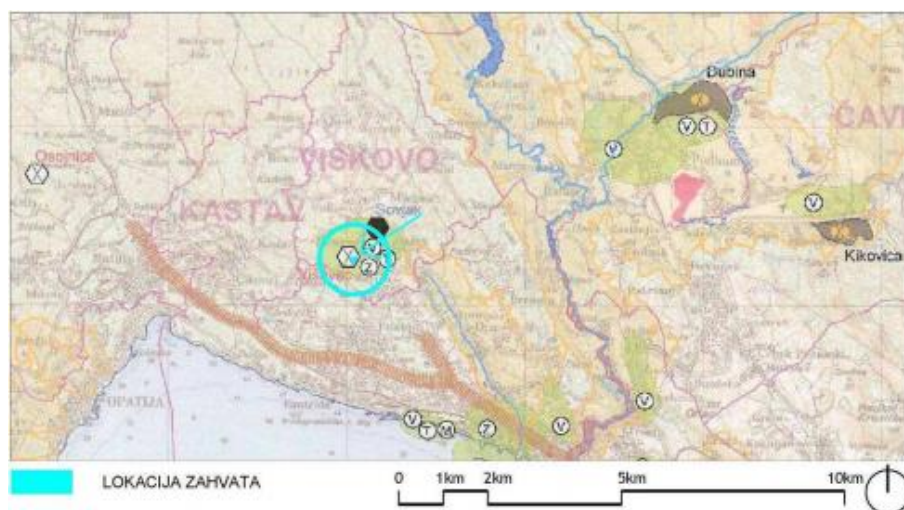


Slika 27. Karta klasificiranih izvora opasnosti na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice (Loborec, 2013)

### 5.3 UTJECAJ ODLAGALIŠTA OTPADA "SOVJAK" NA VODONOSNIK PODRUČJA RIJEČKOG ZALJEVA

Odlagalište opasnog otpada jama Sovjak nalazi se na širem području Grada Rijeke u Općini Viškovo, u naselju Marinići (slika 28). U neposrednoj blizini lokacije nalazi se zatvoreno odlagalište komunalnog otpada Viševac. Oba odlagališta nastala su na mjestu vrtača. Jama Sovjak korištena je kao odlagalište opasnog otpada od 1956. do 1990. godine, kada je zabranjeno daljnje odlaganje.





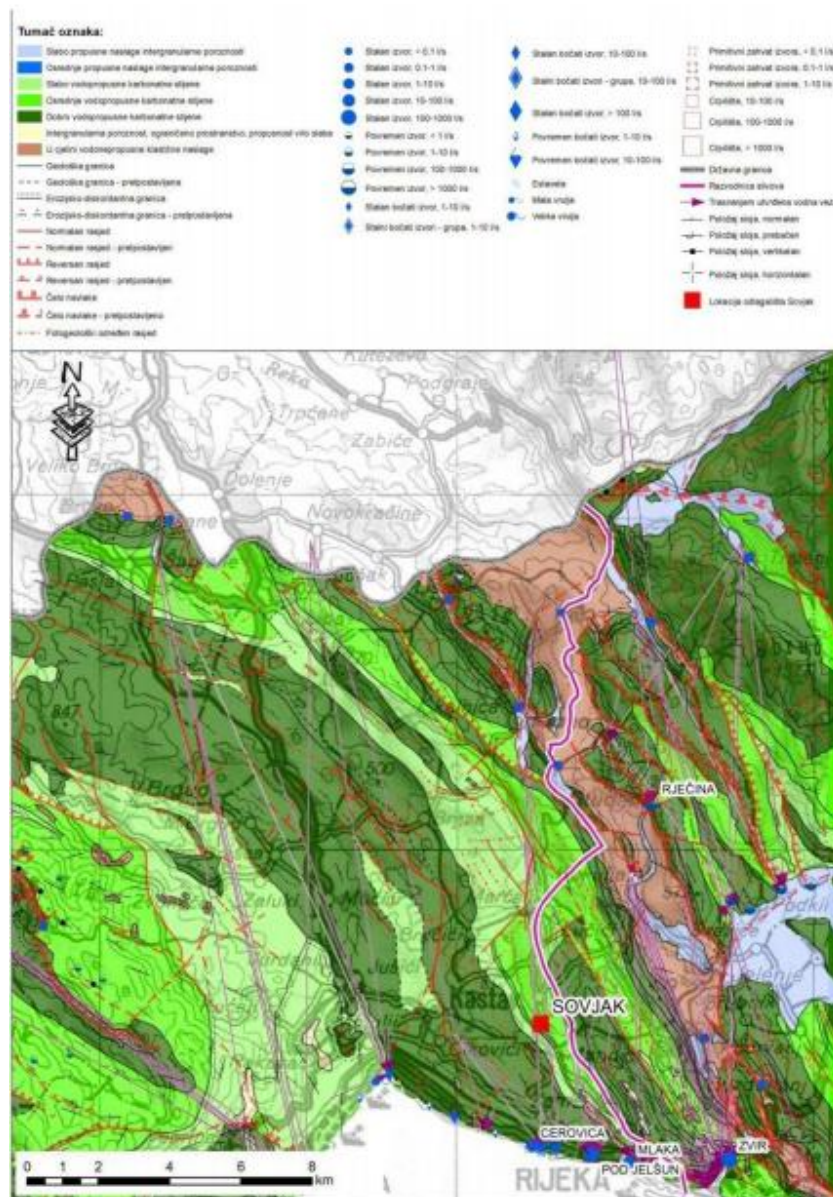
Slika 28. Lokacija odlagališta Sovjak i dijelovi ugroženog okoliša, Izvod iz kartografskog prikaza Prostornog plana Primorsko-goranske županije

(Službene novine PGŽ 32/13), s ucrtanim zahvatom)

### Prirodna ranjivost

Ispod jugozapadne strane odlagališta prostire se zona slabo vodopropusnih dolomitnih breča, a na sjeveroistočnoj strani nalaze se također slabije vodopropusni dolomiti i vapnenci (slika 29). Takva podloga utječe na tokove podzemne vode, ali i na mogući smjer infiltracije tekućeg dijela opasnog otpada u krško podzemlje. Razine podzemne vode na lokaciji odlagališta teško je definirati s obzirom da sama lokacije nikada nije detaljno hidrogeološki istraživano (Fundurulja et al, 2015).

Poznata je razina istjecanja na ili nešto iznad razine mora u obalnom području (oko 314 m n. m.) i glavni smjerovi podzemnih tokova u širem području grada Rijeke. S obzirom da su ujednačene razine podzemne vode u kršu rijetkost, mala je vjerojatnost da je to slučaj na lokaciji odlagališta (Fundurulja et al, 2015). Vodonosnik ovog područja bočno je otvoren prema utjecaju mora te ima prekogranični status jer mu dijelovi prelaze na teritorij Slovenije. Prihranjivanje vodonosnika vrši se uglavnom putem oborina. Jama "Sovjak" nalazi se unutar sliva priobalnih izvora vršnog dijela Riječkog zaljeva u graničnom području prema slivu izvora u gradu Rijeci.

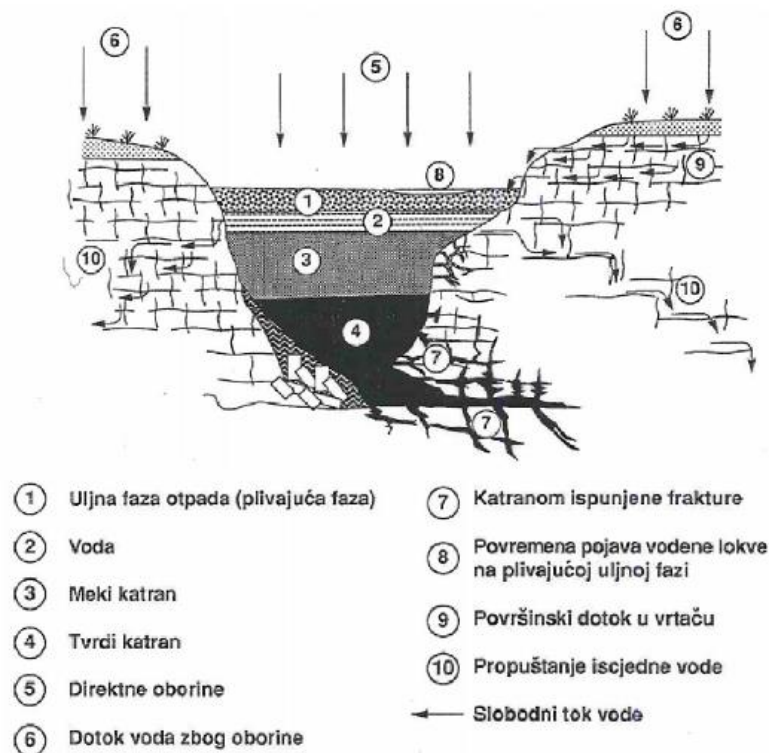


Slika 29. Hidrogeološka karta šireg područja odlagališta (Biondić, B. & Biondić, R. u Fundurulja et al, 2015)

## Opasnosti ( hazardi )

Prema istraživanjima provedenima 1997. te 2002., 2003. i 2007. godine, procijenjeno je da je u jamu Sovjak bilo odloženo oko 250.000 m<sup>3</sup> različitog opasnog otpada (Ribić, 2008). U početku je jama služila prvenstveno za odlaganje kiselog katrana koji je nastajao kao nusprodukt tijekom proizvodnje maziva, motornih ulja i asfalta u lokalnoj rafineriji. Kasnije je jama poslužila za odlaganje i drugih vrsta opasnog otpada kao što su: acetilenski mulj iz brodogradilišta, katran iz koksare, otpadna ulja, sirovu naftu i naftne proizvode iz spremnika, razna otapala, otpadne vode, itd.

Na odlagalištu otpada Sovjak nikad nije primijenjen sustav praćenja odlaganja otpada te odlagani industrijski otpad nikad nije bio podvrgnut prethodnoj obradi. Vizualni pregled jame otkriva da se volumen otpada mijenjao tijekom godina. Na rubovima jame vidljiv je pad razine otpada što dovodi do zaključka da se je dio tekućih ugljikovodika s površine procijedio u zemlju kroz pukotine u stjenkama jame. Može se pretpostaviti da je oko 100 000 m<sup>3</sup> opasnog otpada iscurilo u zemlju. Ispitivanjem odlagališta utvrđeno je da je odloženi otpad formirao četiri odvojena sloja (slika 30).



Slika 30. Konceptualni model otpadne jame i različite faze razdiobe otpada

(Fundurulja et al, 2015)

Površinski sloj ulja bio je debljine oko 1 m i lebdio je na sloju otpadnih voda debljine oko 2 m. Ispod vode nalazio se sloj mekog katrana dubine od otprilike 8 m, a na dnu jame istaložio se tvrdi katran. Četiri odvojena sloja mogu se razlikovati po fizikalnim i kemijskim svojstvima stoga se trebaju smatrati odvojenim jedinicama. Dokazano je da odlagalište zbog krškog terena na kojem se nalazi, kemijskog sastava otpada i njegove razgradnje, neosporno utječe na okoliš (slika 31) (Ribić, 2008).



Slika 31. Jama Sovjak

(preuzeto iz [www.opzo-opkk.hr](http://www.opzo-opkk.hr))

### Rizici i rješenja

S obzirom na prirodnu ranjivost krškog područja u kojem je odlagalište otpada smješteno u samu vrtaču, rizik koji ono predstavlja za podzemne vode je neupitan.

Sanacija odlagališta opasnog otpada Sovjak predviđena je Strategijom gospodarenja otpadom (NN 130/05) i Planom gospodarenja otpadom (NN 85/07, 126/10, 31/11) te prostorno-planskom dokumentacijom. Predložene su dvije varijante sanacije. Obje varijante obuhvaćaju vađenje i transport plutajućih ugljikovodika na mjesto spaljivanja izvan Hrvatske. Nakon iskopa katrana, u prvoj varijanti isti bi prošao pred obradu gašenim vapnom te si se nakon toga transportirao na spaljivanje izvan Hrvatske. U drugoj varijanti katran bi se spaljivao na licu mjesta u privremenom postrojenju.

Crpljenje otpadnih voda bi se u oba scenarija vršilo pomoću daljinski upravljene splavi i prošle bi pred obradu sa separatorom ulja i masti i pješčanim filterom. Završna faza prvog scenarija uključuje potpuno zatrpavanje vrtače obrađenim materijalom i inertnim

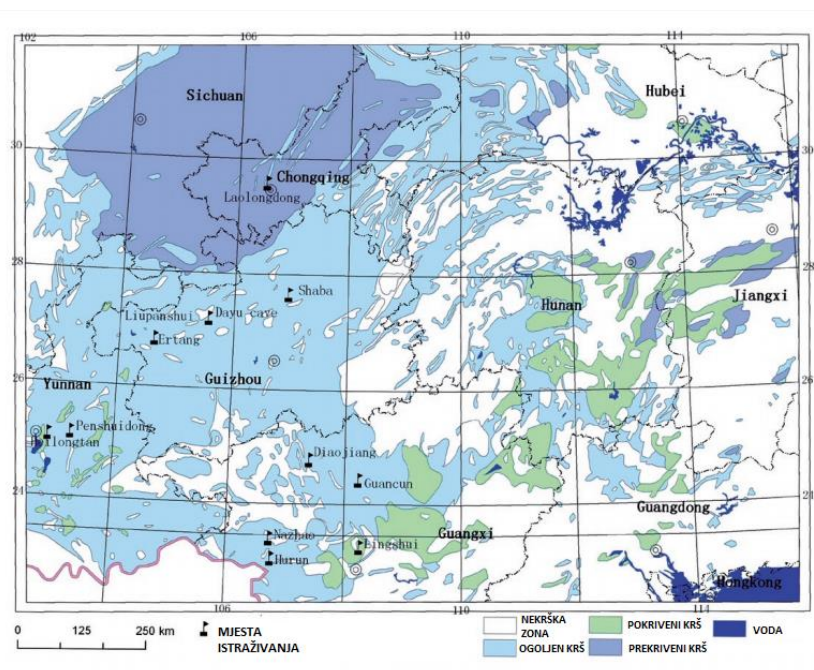
materijalom iz Hrvatske te zatvaranje iste gornjim brtvenim slojem sa sustavom odvodnje. U drugoj varijanti u jamu bi se prije zatrpavanja ugradio donji brtveni sloj (Ribić, 2008).

#### 5.4 UTJECAJ RUDARSTVA NA VODONOSNIKE JUGOZAPADNE KINE

Područje krških vodonosnika u jugozapadnoj Kini obuhvaća veliku površinu od 7,8 milijuna km<sup>2</sup> koje se proteže kroz mnoge regije kao što su Guizhou, Guangxi, Yunnan, Hunan, Guangdong, itd. Otkriveno je da samo u Guangxiju postoji 3066 podzemnih tokova. Područje nastanjuje oko 80 milijuna stanovnika koji svojim aktivnostima ugrožavaju kvalitetu podzemne vode (Guo, Jiang, Yuan, 2007).

##### Prirodna ranjivost

Krš regije Guangxi široko je distribuiran, ima složenu litološku strukturu te su mu hidrogeološke i geomorfološke značajke jako promjenjive (slika 32).



Slika 32. Distribucija krša i mjesta istraživanja u jugozapadnoj Kini

(Guo, Yuan, Qin, 2010)

Vapnenac koji je karakterističan za područje ima mnogo pukotina i kanala što ga čini veoma propusnim. Izložene formacije stijena, disolucijski kanali, jame, vrtače i drugi krški otvori čine golemi mrežni sustav kojim se površinsko onečišćenje velikom brzinom infiltrira u podzemlje. Ovo stanje upućuje na lošu sposobnost krškog vodonosnika za

skladištenjem i zaštitom podzemne vode. Površinska mreža vodotoka slabo je razvijena i podložna poplavama. U sezonama poplave preopterećeni sustav podzemnih voda poplavljuje površinu (Rui et al. 2012).

### Opasnosti (hazardi)

U jugozapadnom dijelu Kine, degradacija površinskih i podzemnih voda kao rezultat rudarskih aktivnosti predstavlja veliki problem. Glavne onečišćivače uglavnom predstavljaju teški metali poput zlata, željeza, bakara, olova, cinka itd. Jugozapadna Kina bogata je mineralnim sirovinama pa se porastom industrijskog razvoja rudarstvo postupno širilo.

Brojna mala, raspršena i neselektivna rudarska poduzeća s lošim upravljanjem i nedostatkom obnove rudnika svoje otpadne vode ispuštaju izravno u površinsku odvodnju koje zatim preko krških otvora dopijevaju u podzemne vode (slika 33). Onečišćenje prelazi velike udaljenosti putem dobro razvijene podzemne mreže tokova uzrokujući široko rasprostranjenu kontaminaciju podzemne vode. Konkretni primjer je zona rudnika mangana koja se nalazi u gradu Hurun i jedan je od najvećih proizvođača mangana u Kini.



Slika 33. Primjer rudnika

(preuzeto sa [www.sadcnews.org](http://www.sadcnews.org))

Brojni rudnici, razvijeni na stijenama iz doba devona, rudarskim otpadom uzrokuju onečišćenje izvora pitke vode grada Hurun. Uz povišene koncentracije mangana, sulfata,

klorida i nitrata u vodi je zabilježena prisutnost teških metala poput bakra, olova i cinka (Guo, Yuan, Qin, 2010).

### **Rizici i rješenja**

Prema preporukama mjera za suzbijanje onečišćenja podzemne vode u jugozapadnoj Kine potrebno je provesti detaljna istraživanja krških vodonosnika, financiranih od strane ministarstva. Ta preporuka je usvojena i rezultirala je projektom pod naslovom "Glavni okolišni geološki problemi i protumjere u krškim planinskim područjima jugozapadne Kine".

Jedna od provedenih mjera su također bila i hidrogeološka istraživanja važnih slivova krških podzemnih voda, koja uključuju trasiranje podzemnih tokova i procjenu ranjivosti. Paket mjera uključuje i uspostavu sustav monitoringa putem automatiziranih stanica te iznošenje rezultata ispitivanja u javnost u svrhu promicanja važnosti zaštite podzemnih voda od strane cijelog društva.

Posebna pažnja je posvećena znanstvenim i tehnološkim studijama te terenskim i laboratorijskim ispitivanjima po pitanju sudbine i transporta onečišćivala te po pitanju autopurifikacije podzemne vode. Ključna mjera je i provedba važećih i novih propisa koji se odnose na jedinstvene hidrogeološke karakteristike krških vodonosnika i njihovu ranjivost. Vladajuća tijela na raznim razinama trebaju formirati posebna pravila i propise za rješavanje problema onečišćenja te ojačati sprečavanje i kontrolu onečišćenje podzemne vode (Guo, Yuan, Qin, 2010).

### **Usporedba s primjerom iz Hrvatske**

Iako u Hrvatskoj ne postoji aktualan primjer utjecaja rudarstva na krški vodonosnik, u prošlosti su Istarski ugljenokopi imali jako veliki značaj za razvoj gospodarstva (slika 34).

Danas su davno zatvoreni rudnici predmet međunarodnih istraživanja. Znanstveno je potvrđeno da podzemne vode ispiru raški ugljen i kontaminiraju lokalni okoliš nizom potencijalno toksičnih elemenata u tragovima: selen, barij, vanadij, uran i stroncij. Preostale naslage otpuštaju potencijalne toksične elemente pod utjecajem djelovanja

podzemnih voda. S obzirom da se zatvoreni rudnici nalaze na području krškog vodonosnika ranjivog prema onečišćenjima, potreba za daljnjim detaljnim istraživanja područja je neupitna.



Slika 34. Okno rudnika Tupljak - posljednjeg ugljenokopa u Hrvatskoj  
(preuzeto sa Wikipedije; autor: Ifpo at Croatian Wikipedia)



## 6 ZAKLJUČAK

Kako raste ljudska populacija na zemlji, raste i količina utjecaja koje njihove aktivnosti imaju na podzemnu vodu.

Pukotinsko-kavernozni vodonosnici predstavljaju dragocjeni slatkovodni resurs stotina milijuna ljudi širom svijeta. U mnogim zemljama i regijama podzemne vode iz krških vodonosnika glavni su izvor pitke vode za vodoopskrbu i navodnjavanje poljoprivrede. Tamo gdje su potrebe za pitkom vodom najveće, vodonosnici su u pravilu najugroženiji

Zbog svojih karakteristika krški vodonosnici posebno su osjetljivi na onečišćenje. Razne onečišćujuće tvari nastale kao produkt antropoloških aktivnosti mogu lako ući u vodonosnik i brzo se proširiti mrežom pukotina i cjevovoda, često bez učinkovitih procesa filtracije i autopurifikacije. Stoga krški vodonosnici zahtijevaju posebne pristupe prilikom zaštite i upravljanja.

U diplomskom radu je dati pregled osnovnih informacija o pukotinsko-kavernoznim vodonosnicima i glavnim antropogenim utjecajima koji predstavljaju prijetnju podzemnoj vodi.

Obrađeni su konkretni primjeri, iz svijeta i RH, gdje je uslijed ljudskog djelovanja narušena kvaliteta podzemne vode. Za svaki od primjera napravljena je analiza rizika do koje se dolazi kombiniranje podataka o prirodnoj ranjivosti i procjene opasnosti. Na temelju rezultata analize ponuđena se rješenja za pojedine primjere.

S obzirom da je sanacija nastala štete kod pukotinsko-kavernoznih vodonosnika veoma kompleksna, znanstvenici ulažu velike napore kako bi se pomoću pojedinih metoda predvidio, izbjegao ili minimalizirao mogući negativan utjecaj na podzemne vode. Zakonska regulativa, također bi trebala biti snažno sredstvo u zaštiti jednog od osnovnih resursa potrebnog za čovjekov opstanak.

Širenje svijesti o ranjivosti krških vodonosnika među ljudima nije ništa manje vrijedan alat kojim se nastoji spriječiti onečišćenje podzemne vode.

## 7 LITERATURA

Biondić, B., Biondić, R. (2014) Hidrogeologija dinarskog krša u Hrvatskoj, Varaždin, Geotehnički fakultet, obrazovni materijal

Biondić, R., Biondić, B., Rubinić, J., Meaški, H., Kapelj, S., Tepeš, P. (2009) Ocjena stanja i rizika cjelina podzemnih voda na krškom području u Republici Hrvatskoj, Geotehnički fakultet, Sveučilište u Zagrebu

Biondić, B. (2006): Interna skripta iz Hidrogeologije

Bocanegra, E.M., Hernandez, M.A., Usunoff, E. (2005) Groundwater and Human Development, Leiden, The Netherlands, a member of Taylor & Francis Group plc.

Bogdan P. Onac, Philip van Beynen, in Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, 2020

Clemens, M., Khurelbaatar, G., Merz, R., Siebert, C., van Afferden, M., & Rödiger, T. (2019). Groundwater protection under water scarcity; from regional risk assessment to local wastewater treatment solutions in Jordan. Science of The Total Environment, 136066.

COST action 620 (2004): Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. Final report (COST action 620), Zwahlen, F.(ed), European Commission, 297 str., Brussels

Fundurulja, D., Šorgić, B., Satinović, V., Birov, T., Posavec, M., Horvat, I., Borić, B., Botinčan, B., Bakšić, N., Čučković, Ž., Đanić, A., Čukušić, A., Peternel, H., Biondić, B., Biondić, R., Gašparac, G., Tudor, T. (2015) Studija utjecaja na okoliš zahvata sanacije lokacije visoko onečišćene opasnim otpadom (crna točka) "Sovjak", Zagreb, Oikon d.o.o. Institut za primijenjenu ekologiju

Guo F, Jiang G, Yuan D (2007) Major ions in typical subterranean rivers and their anthropogenic impacts in southwest karst areas, China. Environ Geol 53:533–541

Herak, M. Stringfield, V.T. (1792) Important Karst Regions of the Northern Hemisphere, Eds. Elsevier, New York. Vol. 176, Issue 4035, pp. 664

Loborec, J., Kapelj, S., Novak, H. (2015) Stručni rad Analiza opasnosti od onečišćenja podzemnih voda u kršu na primjeru sliva izvora Jadro i Žrnovnica, Građevinar, 67 (11.), 1093-1103.

Onac, B.P., Beynen, P. (2020) Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences

Ribić, I. (2008). Sustainable redevelopment of hazardous waste landfills – the hazardous waste landfill of Sovjak (Rijeka, Croatia) as case study. *Natura Croatica*, 17 (4), 375-384.

Rui, Z., Chun-qing, G., Qiu-ju, F., & Lin-yan Pan. (2012). Study on the Drought and Flood Disasters Formation Mechanism in Karst Regions of Middle Guangxi. *Procedia Engineering*, 28, 277–281

Vrba, J. and Zaporozec, A. (1994) Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability—IAH International Contributions to Hydrogeology, 16. FRG, Heise Publication, Hannover, 131 p.

## POPIS SLIKA

Slika 1. Vodonosnik.....	2
Slika 2. Tipovi poroznosti: intergranularna, pukotinska i pukotinsko-kavernozna .....	3
Slika 3. Karbonatne stijene u NP Sjeverni Velebit .....	4
Slika 4. Rasprostranjenost krških vodonosnika u svijetu .....	5
Slika 5. Pojednostavljeni prikaz područja krša u RH .....	6
Slika 6. Dinarsko gorje .....	7
Slika 7. Konceptualni model krškog vodonosnika .....	9
Slika 8. Najčešći onečišćivači podzemne vode .....	12
Slika 9. Urbana otpadna voda .....	13
Slika 10. Disperzija onečišćenja iz industrije .....	14
Slika 11. Širenje onečišćenja uslijed puknuća septičke jame .....	14
Slika 12. Procjeđivanje s odlagališta otpada.....	15
Slika 13. Soljenje autoceste .....	16
Slika 15. Model "porijeklo-podzemna mreža tokova-cilj" .....	22
Slika 16. Shematski prikaz procjene ukupnog rizika.....	24
Slika 17. Primjer karte rizika .....	25
Slika 18. Campina de Faro.....	26
Slika 19. Karta ranjivosti promatranog područja izrađena DRASTIC metodom .....	27
Slika 20. Karte rizika za period od 1978.-1981. (lijevo) i 1996.-1998. (desno).....	29
Slika 21. Karta prirodne ranjivosti metodom SINTACS širega pulskoga područja.....	30
Slika 22. Wadi al Arab lokacija .....	32
Slika 23. Položaj gornjeg vodonosnika i vodozadržnika u odnosu na glavni vodonosnik i naselja .....	33
Slika 24. Karta ranjivosti područja Wadi al Arab; a) stupanj ranjivosti za naselja b) indeks opasnosti za naselja c) stupanj rizika .....	34
Slika 25. a) decentralizirani scenarij; b) polu-centralizirani scenarij; c) centralizirani scenarij tretmana otpadnih voda za naselja Day Yusuf/Al Mazar .....	35
Slika 26. Karta neklasificiranih opasnosti na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice..	37
Slika 27. Karta klasificiranih izvora opasnosti na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice .....	38
Slika 28. Lokacija odlagališta Sovjak i dijelovi ugroženog okoliša, Izvod iz kartografskog prikaza Prostornog plana Primorsko-goranske županije .....	39

Slika 29. Hidrogeološka karta šireg područja odlagališta.....	40
Slika 30. Konceptualni model otpadne jame i različite faze razdiobe otpada .....	41
Slika 31. Jama Sovjak.....	42
Slika 33. Primjer rudnika .....	44
Slika 34. Okno rudnika Tupljak - posljednjeg ugljenokopa u Hrvatskoj .....	46

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Kategorije opasnosti od mogućeg onečišćenja i njihov način prikaza na karti (Loborec, Kapelj, Novak 2015) .....	20
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----