

# Procjena utjecaja poljoprivredne proizvodnje na podzemne vode sliva Bokanjac-Poličnik korištenjem GIS analize

---

**Vedak, Denis**

**Master's thesis / Diplomski rad**

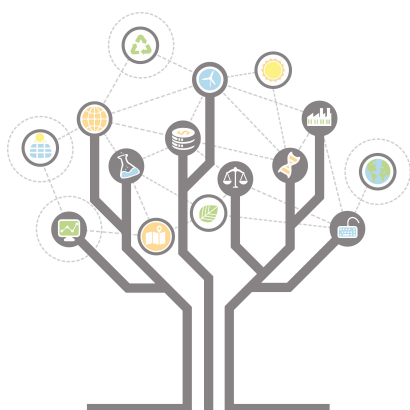
**2021**

*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:130:209392>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-24**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**DENIS VEDAK**

**PROCJENA UTJECAJA POLJOPRIVREDNE PROIZVODNJE**  
**NA PODZEMNE VODE SLIVA BOKANJAC-POLIČNIK**  
**KORIŠTENJEM GIS ANALIZE**

**DIPLOMSKI RAD**

VARAŽDIN, 2021.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva  
za 20. 09. 2021. u 9 sa  
Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred  
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu  
Varaždin, 06. 09. 2021.

Predsjednik  
ispitnog povjerenstva:

izr. prof. dr. sc. Saupa Korac

### Članovi povjerenstva

- 1) prof. dr. sc. Ranko Biondvić
- 2) doc. dr. sc. Jelena Labrec
- 3) izr. prof. dr. sc. Hrvoje Meaštitić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

DENIS VEDAK

PROCJENA UTJECAJA POLJOPRIVREDNE PROIZVODNJE NA  
PODZEMNE VODE SLIVA BOKANJAC-POLIČNIK  
KORIŠTENJEM GIS ANALIZE

DIPLOMSKI RAD

KANDIDAT:

DENIS VEDAK

MENTOR:

prof.dr.sc. Ranko Biondić

KOMENTOR:

doc.dr.sc. Jelena Loborec

VARAŽDIN, 2021.



## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: DENIS VEDAK  
Matični broj: 267 - 2019./2020.  
Smjer: UPRAVLJANJE VODAMA

### NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

PROCJENA UTJECAJA POLJOPRIVREDNE PROIZVODNJE NA PODZEMNE  
VODE SLIVA BOKANJAC-POLIČNIK KORIŠTENJEM GIS ANALIZE

Rad treba sadržati:

1. Uvod
2. Opis područja istraživanja
3. Općenito o procjeni ranjivosti, opasnosti i rizika krških vodonosnika
4. Ocjena prirodne ranjivosti TPV Bokanjac-Poličnik KAVA metodom
5. Utjecaj poljoprivredne proizvodnje u TPV Bokanjac-Poličnik
6. Rizik od onečišćenja podzemnih voda poljoprivrednim djelatnostima u TPV Bokanjac-Poličnik
7. Zaključak
8. Popis literature

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

Zadatak zadan: 19.03.2021.

Rok predaje: 06.09.2021.

Mentor:

Prof.dr.sc. Ranko Biondić

Drugi mentor/komentor:

Doc.dr.sc. Jelena Loborec

Predsjednik Odbora za nastavu:

IZV. prof.dr.sc. Sanja Kovač



## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom: **Procjena utjecaja poljoprivredne proizvodnje na podzemne vode sliva Bokanjac – Poličnik korištenjem GIS analize**, rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **prof.dr.sc. Ranka Biondića i doc.dr.sc. Jelene Loborec**.

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, 1.9.2021.

Denis Vedak  
(Ime i prezime)



---

(Vlastoručni potpis)

## **IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI ZAVRŠNOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA**

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom:

### **Procjena utjecaja poljoprivredne proizvodnje na podzemne vode sliva Bokanjac- Poličnik korištenjem GIS analize**

pregledan anti-plagijat programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog završnog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni postotak sličnosti završnog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5%.

U Varaždinu, 31.08.2021.

Prof.dr.sc. Ranko Biondić  
(Mentor)



---

(Vlastoručni potpis)

## SAŽETAK

IME I PREZIME AUTORA: Denis Vedak

NASLOV RADA: Procjena utjecaja poljoprivredne proizvodnje na podzemne vode sliva Bokanjac – Poličnik korištenjem GIS analize

Krški vodonosnici su spremnici podzemne vode vrlo visoke kakvoće. Zbog svoje hidrogeološke građe vrlo su osjetljivi na antropogene utjecaje. Zbog toga zahtijevaju mjere zaštite dobivene na temelju rezultata detaljnih istraživanja te korištenjem metoda procjene prirodne ranjivosti vodonosnika. Takve metode temelje se na pretpostavci da prirodna kemijska, biološka i fizikalna svojstva nekog područja mogu u određenoj mjeri doprinijeti zaštiti podzemnih voda od vanjskih utjecaja. Jedna od mnogih razvijenih metoda je KAVA metoda koja je predstavljena u radu i primijenjena na području sliva Bokanjac – Poličnik. Radi se o multiparametarskoj metodi koja služi za procjenu prirodne ranjivosti područja (vodonosnika i/ili izvorišta) a konačni rezultat su karte izrađene pomoću GIS alata. KAVA metoda koristi četiri parametra: pokrovne naslage (O), uvjeti vodonosnika (A), utjecaj infiltracije (I) i utjecaj oborina (P). Svaki od parametara procjenjuje se pomoću podfaktora. Također, uz kartu ranjivosti izrađene su karta opasnosti i karta rizika od onečišćenja podzemnih voda pod utjecajem poljoprivredne proizvodnje.

KLJUČNE RIJEČI: GIS, ranjivost, opasnost, rizik, krški vodonosnici, KAVA metoda



## ABSTRACT

NAME AND SURNAME of the AUTHOR: DENIS VEDAK

TITLE: Assessment of the impact of agricultural production on the groundwater of the Bokanjac-Poličnik catchment area

Karst aquifers are reservoirs of high quality groundwater. Due to their hydrogeological structure, they are very vulnerable to anthropogenic influences. Therefore, they require protection measures defined on the basis of the results of detailed research and using methods for assessing the natural vulnerability of aquifers. Such methods are based on the assumption that the natural chemical, biological and physical properties of an area may, to some extent, contribute to the protection of groundwater from external influences. One of the many developed methods is the KAVA method which is presented in the paper and applied in the Bokanjac - Poličnik basin. KAVA is multiparameter method used to assess the intrinsic vulnerability of the area (aquifers and /or springs) and the final result are maps made using GIS tools. The KAVA method uses four parameters: cover deposits (O), infiltration impact (I), aquifer conditions (A), and precipitation impact (P). Each of the parameters is estimated using subfactors. In addition to the vulnerability map, a hazard map and a groundwater pollution risk map under the influence of agricultural production were prepared.

KEYWORDS: GIS, vulnerability, hazard, risk, karst aquifers, KAVA method

## SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	OPIS PODRUČJA ISTRAŽIVANJA.....	2
2.1.	Geološka građa .....	2
2.2.	Hidrogeološke karakteristike .....	3
2.3.	Prikaz crpilišta u TPV Bokanjac – Poličnik .....	5
2.4.	Analiza korištenja podzemnih voda za navodnjavanje u TPV Bokanjac – Poličnik	8
3.	OPĆENITO O PROCJENI RANJIVOSTI, OPASNOSTI I RIZIKA KRŠKIH VODONOSNIKA .....	10
3.1.	Procjena prirodne ranjivosti pomoću KAVA metode .....	11
3.1.1.	Pokrovne naslage ( O parametar).....	12
3.1.2.	Utjecaj oborina ( P parametar) .....	15
3.1.3.	Područje sliva (eng. Surface Catchment Areas – SCA).....	17
3.1.4.	Utjecaj infiltracije ( I parametar) .....	18
3.1.5.	Uvjeti vodonosnika ( A parametar) .....	21
3.1.6.	Indeksi ranjivosti.....	23
3.2.	Procjena opasnosti (hazarda) .....	25
3.3.	Procjena rizika od onečišćenja podzemnih voda .....	27
4.	OCJENA PRIRODNJE RANJIVOSTI TPV BOKANJAC-POLIČNIK KAVA METODOM.....	30
4.1.	Priprema podataka za procjenu ranjivosti .....	30
4.2.	Određivanje pojedinih parametara ranjivosti.....	32
4.3.	Karta ranjivosti vodonosnika (RVI) .....	39
5.	UTJECAJ POLJOPRIVREDNE PROIZVODNJE U TPV BOKANJAC – POLIČNIK.....	40
6.	RIZIK OD ONEČIŠĆENJA PODZEMNIH VODA POLJOPRIVREDNIM DJELATNOSTIMA U TPV BOKANJAC-POLIČNIK.....	45
7.	ZAKLJUČAK .....	49
8.	POPIS LITERATURE.....	51

## 1. UVOD

Voda je jedinstven prirodni resurs.. Iako spada u obnovljive izvore, količine vode su ograničene i neracionalnim korištenjem može doći do ugrožavanja vodnih resursa. Svi oblici života, kao i sve antropogene aktivnosti vezane su uz vodu. Urbanizacija i gospodarski razvoj dovode do sve većih potreba za vodom što može dovesti do ugrožavanja vodnih resursa. Gospodarskim razvojem i urbanizacijom povećava se i poljoprivredna proizvodnja. Poljoprivreda jedna je od najčešćih aktivnosti koja dovodi do degradacije kakvoća podzemnih voda zbog nekontrolirane uporabe kemijskih sredstava (pesticida, herbicida) i umjetnih gnojiva. Upravo radi očuvanja kvalitete i količine podzemnih voda danas se sve više pažnje daje zaštiti vodnih resursa.

Krški vodonosnici izvori su podzemne vode izrazite kakvoće, ali neravnomjerne prostorne i vremenske raspodjele. Zbog specifičnih hidrogeoloških karakteristika vrlo su osjetljivi na antropogena onečišćenja. Imaju tanak i neujednačen sloj pokrovnih naslaga, mnogo krških geomorfoloških obilježja (ponori, vrtače, jame) koji omogućuju koncentriranu infiltraciju te velike brzine tečenja kroz sustav kanala i pukotina.

Kako bi se zaštitili krški vodni resursi sve se više koriste metode procjene prirodne ranjivosti vodonosnika, kojima je osnovna pretpostavka da kemijska, fizička i biološka svojstva nekog područja mogu doprinijeti stupnju zaštite podzemnih voda od ljudskog djelovanja. Na vrlo sličnom konceptu temelji se i KAVA metoda (eng. *Karst Aquifer Vulnerability Assessment*) (Biondić et al., 2015, 2021) koja se u ovom radu testira na području sliva Bokanjac – Poličnik kod Zadra. KAVA metoda multiparametarska je metoda namijenjena za procjenu prirodne ranjivosti krških izvorišta i vodonosnika gdje se prostorne analize te kartografski prikazi izrađuju pomoću GIS tehnologije. Da bi se ocijenio daljnji antropogeni utjecaj na kakvoću podzemne vode potrebno je napraviti kartu opasnosti identifikacijom prisutnih hazarda koji su mogući izvor štetnih tvari. To je izrađeno korištenjem metodologije razvijene kroz COST 620 projekt (Zwahlen, 2004).

Preklapanjem karata prirodne ranjivosti i opasnosti dolazi se do karte rizika. U ovom radu razvijena je metodologija za dobivanje karte rizika korištenjem karte prirodne ranjivosti (izrađene KAVA metodom) i karte opasnosti (izrađene metodologijom razvijenom kroz COST 620 projekt).

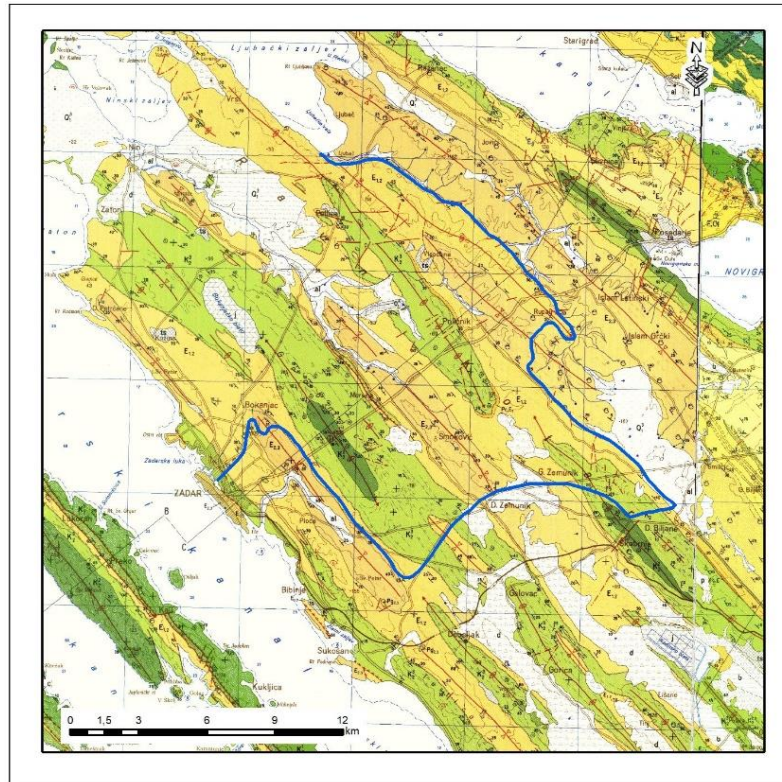
U radu je pomoću novo razvijene metode procjene rizika izrađena procjena rizika od onečišćenja podzemnih voda pod utjecajem poljoprivrednih aktivnosti u slivu Bokanjac – Poličnik.

## **2. OPIS PODRUČJA ISTRAŽIVANJA**

Tijelo podzemne vode (nadalje: TPV) Bokanjac – Poličnik nalazi se u Zadarskoj županiji, u zaleđu grada Zadra. Obuhvaća relativno ravnani dio Ravnih kotara na sjeverozapadu do Škabrnje, Gornjeg i Donjeg Zemunika te obalnodio od uvale Ljubač preko Nina do Zadra. Ukupna površina TPV iznosi 302 km<sup>2</sup>. Osnovna geografska značajka je blagi reljef, kojeg karakterizira izmjene niskih brda i dolina pravilnih paralelnih pružanja u smjeru sjeveroistok-jugozapad (tzv. Dinarski smjer pružanja). Na području Ravnih kotara teren je zaravnjen, tako da je najveći dio područja niži od 100 m n.m, a najviši „vrhovi“ nalaze se na 208 m n. m. Takva reljefna obilježja pogoduju poljoprivrednim djelatnostima koji su na ovom dijelu Dalmacije dosta karakteristični. Tokovi površinskih i podzemnih voda usmjereni su s viših predjela prema Bokanjačkom blatu te Ljubačkom i Ninskom zaljevu. Od posebnog značaja za lokalno stanovništvo su zdenci i izvori u Bokanjačkom blatu, jer su dugo godina bili jedini izvori pitke vode za grad Zadar i okolicu, međutim zbog širenja grada, povećanjem potreba i crpljenja vodoopskrbni objekti više nisu mogli zadovoljavati potrebe javne vodoopskrbe te se ostatak vode za vodoopskrbu grada Zadra dovodio s rijeke Zrmanje.

### **2.1. Geološka građa**

Tijelo podzemne vode formirano je u karbonatnim stijinama ljuskave strukture, gdje se izmjenjuju vodonepropusni klastiti i vodopropusne karbonatne stijene. Antiklinalne dijelove izgrađuju vapnenci gornjokredne starosti, a sinklinalne dijelove izgrađuju flišne naslage paleogenske starosti. Ljuskave forme prostiru se u smjeru sjeverozapad – jugoistok i to je ujedno i smjer prostiranja stijena različitih hidrogeoloških karakteristika (Biondić et al., 2019) Za opis geoloških značajki područja TPV Bokanjac-Poličnik korišteni su podaci s Osnovne geološke karte SFRJ – list Zadar (Majcen et al., 1969), prikazano na slici 1.



Slika 1. Dio OGK, list Zadar s označenom granicom TPV Bokanjac – Poličnik (Biondić et al., 2019.)

## 2.2. Hidrogeološke karakteristike

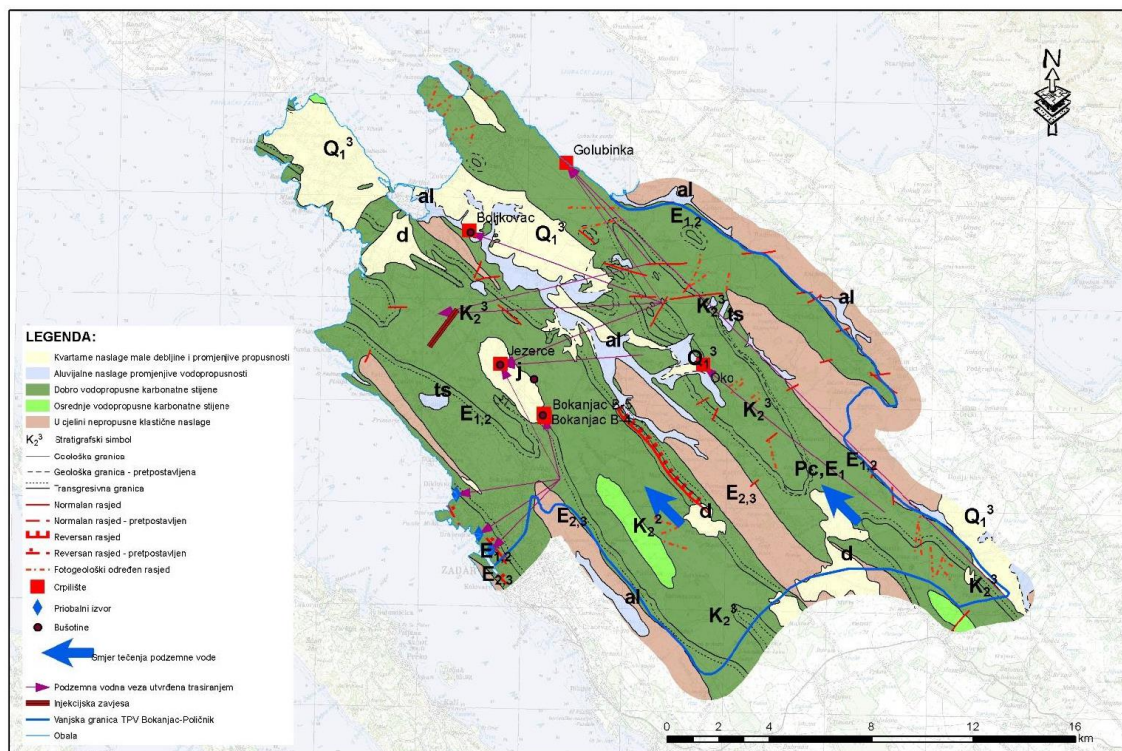
Na području Bokanjac – Poličnik nalaze se četiri osnovne vrste stijena različitih hidrogeoloških značajki (Slika 2):

1. Dobro vodopropusne karbonatne stijene ( vapnenci)
2. Srednje vodopropusne karbonatne stijene ( izmjenjuju se dolomiti i vapnenci)
3. Vodonepropusne stijene (fliš)
4. Naslage promjenjive vodopropusnosti relativno male debljine (kvartarne naslage)

Najveći dio područja prekrivaju dobro vodopropusne karbonatne stijene. Uglavnom vapnenci bez ili s vrlo malom količinom dolomita, sekundarne poroznosti i vrlo dobre vodopropusnosti. Srednje vodopropusne karbonatne stijene su vapnenci i dolomiti u izmjeni, također sekundarne, pukotinske poroznosti. Paleogenski klastiti koje karakterizira izmjena lapora, pješčenjaka i konglomerata (tzv. flišne naslage) pripadaju vodonepropusnim klastičnim stijenama i predstavljaju barijeru toka podzemne vode. Naslage promjenjive vodopropusnosti relativno male debljine obuhvaćaju kompleks naslaga kvartarne starosti. To su klastični sedimenti, nevezani ili poluvezani, uglavnom

različiti materijali poput pijeska, crvenice, jezerski i barski sedimenti, aluvijalni i deluvijalni sedimenti, međuzrnske, relativno niske poroznost. Barski i jezerski sedimenti, aluvijalni i deluvijalni sedimenti te pijesci imaju nisku vodopropusnost, dok crvenica zbog glinovitog sastava ima vrlo nisku vodopropusnost.

Podzemni tokovi za vodoopskrbu vezani su za vodopropusne karbonatne stijene koje su okršene puno dublje o trenutne razine mora zbog nižih razina mora tijekom kvartara. Podzemne vode u tijelu podzemne vode Bokanjac – Poličnik kreću se paralelno u odnosu na geološke strukture u smjeru jugoistok – sjeverozapad (Biondić et al., 2019).



**Slika 2. Pregledna hidrogeološka karta TPV Bokanjac – Poličnik (Biondić et al., 2019)**

Prirodni uvjeti dinamike podzemnih i površinskih voda djelomično su izmijenjeni izgradnjom tunela 1962. godine, pomoću kojeg se poplavne vode iz Bokanjačkog blata odvođe prema Miljušić jaruzi. Time je spriječeno formiranje povremenog ujezerenja na tom području. Prije izgradnje tunela, područje Bokanjačkog blata povremeno je bilo poplavljivo i praznilo se u povremene ponore na sjeverozapadnom dijelu polja. Izgradnjom tunela spriječilo se povremeno plavljenje područja i tako je omogućena stalna poljoprivreda na tom području. Za potrebe poljoprivrede izgrađeni su sustavi kanala za odvodnjavanje i navodnjavanje. No, to je dovelo do promjene uvjeta prihranjivanja podzemnih voda. Smanjio se pozitivan utjecaj površinskih voda koje su infiltracijom

dospijevale u vodonosnik na hidrogeološke uvjete u samom vodonosniku. Drugi značajan zahvat bio je izgradnja injekcijske zavjese do dubine od oko 40 metara, a izgrađena je nizvodno od Bokanjačkog blata kako bi se spriječila intruzija slane vode i zaslanjenje vodoopskrbnih objekata Bokanjačkog blata i dublji prodor morske vode u vodonosnik. Iskustva su pokazala da je zahvat bio preplitak, ako se uzme u obzir dinamika podzemne vode i prodor mora u krško podzemlje na većim dubinama od tadašnjeg objekta (Biondić et al., 2019).

### 2.3. Prikaz crpilišta u TPV Bokanjac – Poličnik

Na istraživanom području nalazi se više crpilišta javne vodoopskrbe: Bokanjac, Jezerce, Boljkovac, Golubinka i Oko.

**Vodocrpilište Bokanjac** najstarije je crpilište pitke vode, a smješteno je na istočnom rubu Bokanjačkog blata. Na vodocrpilištu nalaze se 5 zdenaca od kojih su danas dva u upotrebi (B-4 i B-5). Zdenac B-4 (Slika 3.a) dubok je 18,5 m, promjer zdenca iznosi 3 m, a kapacitet oko 100 l/s. Izgrađen je 1949. godine, a nalazi se između zdenaca B-2 i B-3. Tijekom ljetnog perioda kapacitet zdenca padne na 30 l/s. Zdenac B-5 (Slika 3.b) dubok je 17,6 m, promjer zdenca je 4,85 m, a maksimalna količina crpljenja iznosi 250 l/s. Izgrađen je 1961. godine. Tijekom ekstremno sušnih razdoblja zdenac B-5 može presušiti, a takav slučaj dogodio se 2012. godine.



Slika 3. Vodocrpilište Bokanjac a) zdenac B – 4, b) zdenac B - 5 (Biondić et al., 2019.)

**Vodozahvat Jezerce** (Slika 4.a) smješten na istoimenoj estaveli, u središnjem dijelu Bokanjačkog blata, u području Ninskih stanova. Od zdenaca na vodocrpilištu Bokanjac,

udaljen je svega 2,5 km. Dubina zdenca iznosi 14,5 m, a kaptiran je 1969. godine. Tijekom sušnih perioda izdašnost zdenca pada na oko 90 l/s. Na vodozahvatu Jezerce vrlo često dolazi do pojave zaslanjenja, a vezane su uz dugotrajna i sušna ljetna razdoblja. Zbog toga je 1974.-1975. godine izgrađena injekcijska zavjesa dužine 1.580 m, dubine između 25 i 45 m.

**Vodocrpilište Boljkovac** (slika 4.b.) izgrađeno je 1972. godine na istoimenom izvoru u donjem dijelu toka Miljašić jaruge. Dubina zdenca iznosi 5,75 m, a kapacitet je 100 l/s, koji se smanjuje na nekoliko desetaka l/s zbog zaslanjenja. Zdenac se nalazi na udaljenosti od oko 2,5 km od mora i na nadmorskoj visini od 3,25 m n.m. Od početka korištenja pojavljuju se povišene koncentracije klorida zbog mora, odnosno slane vode iz krškog podzemlja.



Slika 4. a) Vodocrpilište Jezerce, b) vodocrpilište Boljkovac (Biondić et al., 2019.)

**Izvor Golubinka** (slika 5.a.) kaptiran je 1993. godine tijekom ratnog razdoblja kada područje Zadra nije bilo u mogućnosti koristiti ranije izgrađene zahvate na rijeci Zrmanji. Izvor se nalazi u blizini naselja Vrsi. Kaptaža izvora je 1 m<sup>3</sup>/s, ali tijekom sušnih perioda kapacitet padne na svega 50 l/s te dolazi do zaslanjenja.

**Vodocrpilište Oko** (slika 5.b) izgrađeno je 1995. godine kao kopani zdenac. Dubina zdenca je 12 m, a nalazi se na izvoru Miljaško oko, u zoni Miljašić jaruge. Maksimalna kaptaža je 60 l/s, dok u sušnim razdobljima pada na oko 20 l/s. Crpilište nije u funkciji već dugi niz godina, zbog loše kvalitete vode i malog kapaciteta u sušnom razdoblju.





Slika 5. a) Izvorište Golubinka, b) vodocrpilište Oko (Biondić et al., 2019.)

## **2.4. Analiza korištenja podzemnih voda za navodnjavanje u TPV Bokanjac – Poličnik**

Područje Bokanjačkog blata bilo je povremeno plavljeno i nepogodno za poljoprivredu sve do izgradnje odvodnog tunela prema Miljašić jaruzi. Nakon ekstremnih oborina voda se zadržavala na području Bokanjačkog blata formirajući jezero iz kojeg je voda ponirala u podzemlje u nizvodnom dijelu polja. Izgradnjom tunela i kanala za navodnjavanje, na području Bokanjačkog blata ne dolazi više do plavljenja. Zadnjih desetak godina na području Bokanjačkog blata počela se razvijati poljoprivredna proizvodnja. Razlog tomu je izuzetno kvalitetno tlo i mala dubina do podzemnih voda što omogućuje izradu privatnih zdenaca za navodnjavanje. Budući da je već više puta istaknuto da TPV ima problem sa zaslanjenjem, dodatne količine crpljenja mogu poremetiti ionako nestabilan odnos slane i slatke vode u krškom podzemlju što može biti veliki problem i za vodoopskrbu i za ostale aktivnosti, kao npr. poljoprivredu (Biondić et al., 2019).

Negativni utjecaj korištenja bušotina na podzemne vode vrlo je teško kvantitativno procijeniti zbog toga što ponekad i mala količina crpljenja može imati presudan utjecaj na ravnotežu slane i slatke vode u podzemlju. Prema dostupnim podacima poznato je da su koncesije za crpljenje podzemne vode na području TPV Bokanjac – Poličnik izdane za 15 korisnika i lokacija. U tablici 1. pokazana su sva korištenja podzemnih voda osim za potrebe javne vodoopskrbe na TPV Bokanjac – Poličnik. Na cijelom području TPV Bokanjac – Poličnik maksimalne dozvoljene crpne količine prema dozvolama koncesije iznose oko 133.350 m<sup>3</sup>/god., odnosno prosječno oko 4,28 l/s. Takva količina je praktički zanemariva u odnosu na ukupnu vodnu bilancu tog područja.

**Tablica 1. Koncesijske dozvole za crpljenje podzemnih voda na TPV Bokanjac – Poličnik (Biondić et al., 2019.)**

R.Br.	KORIŠTENJE	NAZIV	VRSTA	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /god)	Q (l/s)	E	N
1	Navodnjavanje	Praonica automobila MAJK	Bušotina	3000	1,6	393143	4903358
2	Navodnjavanje	Danijel Peroš	Bušotina	100	1	394667	4899068
3	Navodnjavanje	Braniteljska zadruga Lovinac	Bušotina	500	0,5	411390	4896125
4	Navodnjavanje	Stjepan Strika	Bušotina	200	0,8	410124	4896749
5	Navodnjavanje	Stjepan Strika	Bušotina	1500	0,8	409750	4896304
6	Navodnjavanje	Grupa Nida d.o.o.	Bušotina MP - 1	25000	3	399071	4896000
7	Navodnjavanje	Dragan Pečnik	Bušotina	100	2	394849	4899679
8	Navodnjavanje	OPG Marinko Vukšević	Bušotina	450	0,7	395563	4897481
9	Navodnjavanje	VIGENS d.o.o.	Bušotina VG-1	80000	3,3	396838	4897034
10	Navodnjavanje	VIGENS d.o.o.	Bušotina VG-2	8000	0,46	396694	4897211
11	Navodnjavanje	MARASKA d.d.	Bušotina VL-1	1000	2	411043	4890416
12	Navodnjavanje	MARASKA d.d.	Bušotina VL-2	1000	2	411119	4890475
13	Navodnjavanje	Trešnja d.o.o.	Bušotina NS-1	6500	5,7	398846	4897084
14	Navodnjavanje	Trešnja d.o.o.	Bušotina NS-2	5500	5,7	398402	4897246
15	Tehnološka voda	PETROL d.o.o.	Bušotina	500	1	394513	4899409

Na sjeveroistočnoj strani Bokanjačkog blata prema Zadru nalazi se poljoprivredno zemljište na kojem su zasađene masline, ali ta površina nije navodnjavana. Prema crpilištu Jezerce, nizvodno od zdenaca B-4 i B-5 nalazi se farma goveda. To je površina koja je stalno navodnjavana melioracijskim kanalima, goveda slobodno pasu, ali nema uzgoja poljoprivrednih kultura. Nizvodno od Bokanjačkog blata analizom satelitskih snimaka izdvojene su poljoprivredne površine, ali je rekognosciranjem terena ustanovljeno da nema sustava navodnjavanja.

Problem bi nastao u slučaju kada bi došlo do navodnjavanja svih poljoprivrednih površina. To bi dovelo do potrebe znatnijih količina vode i moglo bi doći do negativnog utjecaja prilikom uvjeta labilne ravnoteže slatke i slane vode tijekom sušnih perioda što bi rezultiralo češćim i jačim zaslanjenjem samog vodonosnika. Također, može se pojaviti i negativan utjecaj kod korištenja podzemnih voda iz ilegalnih bušotina, pa je iz tog razloga nužno bušotine takvog tipa staviti pod nadzor i strogo kontrolirati (Biondić et al., 2019).

### 3. Općenito o procjeni ranjivosti, opasnosti i rizika krških vodonosnika

Krški vodonosnici posebno su osjetljivi na onečišćenje zbog tankog tla ili nedostatka pokrovnih naslaga, koncentracije protoka unutar epikrške zone i infiltracije kroz ponore. Onečišćivači mogu vrlo lagano dospjeti u podzemlje i transportirati se na velike udaljenosti kroz pukotinsku mrežu. Zbog toga vrlo je važno utvrditi razinu ranjivosti krških vodonosnika radi njihove zaštite i sanacije, ali i budućih aktivnosti, pogotovo prostornog planiranja.

Pojam ranjivosti koristi se od sedamdesetih godina prošlog stoljeća (Margat, 1968), a danas je u svijetu razvijeno i koristi se veliki broj različitih metoda za procjenu ranjivosti. Projekt Europske unije, COST 620 pod nazivom „Kartiranje ranjivosti i rizika u svrhu zaštite karbonatnih (krških) vodonosnika“ (Zwahlen, 2004) proveden je kako bi se ujednačila praksa korištenja analize ranjivosti i rizika u svrhu zaštite vodnih resursa. Konačni rezultati tog projekta producirali su generalne upute o provođenju analize rizika od onečišćenja podzemnih voda posebno u krškim vodonosnicima, poznate pod nazivom „Europski pristup“ procjene ranjivosti, opasnosti i rizik. Prema toj metodologiji rizik se procjenjuje u tri koraka, prvi je procjena ranjivosti, zatim analiza opasnosti ili hazarda te na kraju kombinacija rezultata ranjivosti i opasnosti u konačnu procjenu rizika od onečišćenja.

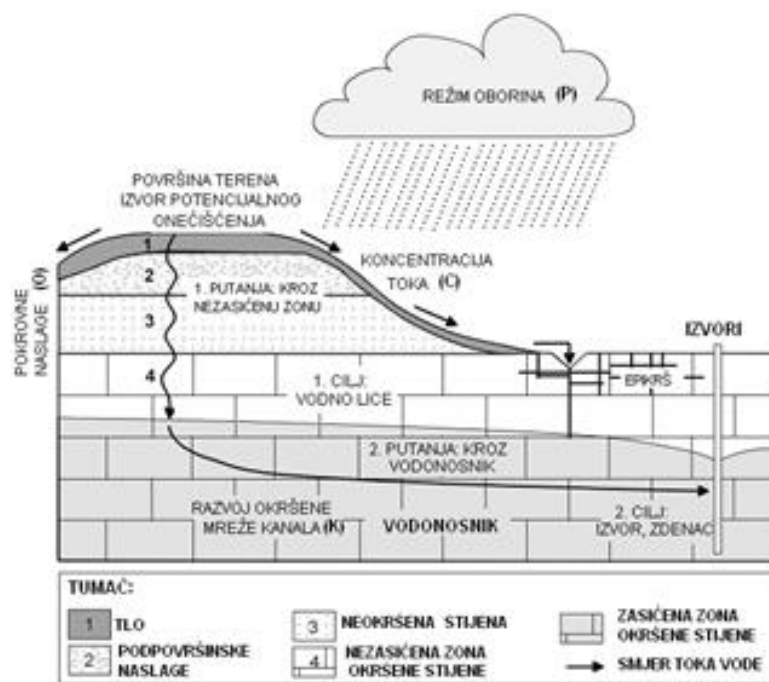
Ranjivost predstavlja relativno, nemjerljivo i bezdimenzijsko svojstvo nekog prirodnog sustava (Vrba & Zaporozec, 1994). Cjelokupan koncept ranjivosti temelji se na pretpostavci da prirodna obilježja okoliša pružaju određenu zaštitu podzemnim vodama od antropogenih utjecaja koji mogu napraviti štetu. Kako bi se ocijenila ranjivost ili ugroženost nekog sustava, važno je imati pouzdane ulazne podatke, što znači da treba provesti istraživanja prirodnih fizičkih svojstava, hidrogeoloških odnosa, hidrogeokemijski, geokemijskih, biokemijskih svojstava svih dijelova vodonosne cjeline. Kao rezultat takvih istraživanja dobije se karta ranjivosti koja se kasnije koristi za zaštitu i upravljanje zaliha podzemnih voda na nekom području i kao nezamjenjiva podloga pri odlukama o korištenju, upravljanju ili namijeni prostora.

Postupak procjene i kartiranja ranjivosti krških vodonosnika dijeli se na analizu specifične i prirodne ranjivosti. Procjena prirodne ranjivosti vodonosnika vezana je za prirodne hidrogeološke karakteristike sustava, a ne i na ponašanje specifičnih onečišćivača. Svaki onečišćivač ili skupina onečišćivača različito se ponašaju u drugačijim naslagama ili stijenama. Ovisno o kemijskim i fizičkim svojstvima zadržavaju

se ili degradiraju tijekom transporta kroz podzemlje, a to ponašanje opisuje se kroz procjenu specifične ranjivosti. Ranjivost se može procijeniti za čitavi vodonosnik (ako se u obzir uzmu samo vertikalni tokovi kroz nesaturiranu zonu od površine do vodnog lica) ili kao ugroženosti nekog izvora ili bušotine koji su uključeni u vodoopskrbu (u tom slučaju se promatra i horizontalni tok u saturiranom dijelu vodonosnika).

### 3.1. Procjena prirodne ranjivosti pomoću KAVA metode

KAVA metoda razvila se u Republici Hrvatskoj u skladu sa specifičnim karakteristikama dinarskog krškog vodonosnika (Biondić et al., 2015, 2021). Zasniva se na konceptualnom modelu „izvor-put-cilj“ (Slika 6) što znači da je prilagođena primjeni za procjenu prirodne ranjivosti kako krških vodonosnika tako i izvorišta vode u kršu ili zdenaca namijenjenih za eksploataciju vode iz podzemlja.



Slika 6. „porijeklo-put-cilj“ (prema: Zwahlen, 2004)

Konačna prostorna analiza i karte ranjivosti izrađuju se pomoću višeparametarske GIS tehnologije. Metoda je razvijena sa „GEF UNEP/MAP Medpartnership Project, UNESCO-IHP pod-komponentama 1.1 „Menadžment priobalnih vodonosnika i podzemne vode“. Krški vodonosnici predstavljaju većinu vodonosnika na mediteranskom području, stoga je ideja projekta bila razvoj nove metode za njihovu analizu koja bi

uvelike doprinijela hidrogeološkoj praksi tog područja. U tim uvjetima potrebno je uskladiti i poboljšati učinkovitost u zaštiti ovih vrijednih prirodnih resursa u različitim državama kako bi se osigurao trenutni i budući razvoj države. Nova KAVA metoda ispitana je na nekoliko različitih slivova u dinarskom kršku na području Republike Hrvatske (Biondić et al., 2014, 2015).

U metodi se koriste četiri temeljna parametra kako bi se odredila procjena prirodne ranjivosti, a to su: pokrovne naslage (O parametar), utjecaj oborina (P parametar), utjecaj infiltracije (I parametar) i karakteristike vodonosnika (A parametar). Svi parametri se koriste kod procjene ranjivosti izvorišta, dok se za procjenu ranjivosti vodonosnika koriste parametri O, P i I, te dio parametra A koji opisuje statičke uvjete unutar vodonosnika (Biondić et al., 2021).

Suprotno od smjernica Europskog pristupa i ostalih metoda kojima se procjenjuje prirodna ranjivosti, KAVA metodom se nesaturirani i saturirani dio krškog vodonosnika tretiraju zajedno. To se prvenstveno radi zbog pojednostavljenja cjelokupnog modela. S obzirom da je krški vodonosnik prilično anizotropan i heterogen medij, bez dovoljnog broja izrazito skupih i detaljnih bušotina, koje bi pružile dovoljnu sigurnost u određivanju razine podzemnih voda, odvajanje zasićenog i nezasićenog dijela krškog vodonosnika vrlo je teško izvedivo. Zbog toga se granica između zasićenih i nezasićenih zona kod krških vodonosnika određuje empirijski (Biondić et al., 2021).

### **3.1.1. Pokrovne naslage ( O parametar)**

Parametrom O definira se zaštitna uloga pokrovnih slojeva u krškim slivovima. Hidrogeološka zaštitna uloga može varirati od mjesta do mjesta zbog različitih karakteristika podpovršinske zone u uvjetima otvorenog krša. Stoga se pri određivanju vrijednosti parametra O koriste dva osnovna skupa podataka: podfaktor  $O_s$  (tla) i podfaktor  $O_{kf}$  (krška obilježja) (Biondić et al., 2021.).

Podfaktor  $O_s$  (tla) procjenjuje se kako bi predstavio zaštitnu ulogu pokrovnog tla. To je biološki aktivna zona vodonosnika u kojoj se može dogoditi zadržavanje ili djelomična razgradnja potencijalnih onečišćenja na površini ili pri površini terena. Zbog toga je pri izradi projekata prirodne ranjivosti krških terena uvijek potrebno procijeniti zaštitnu funkciju pokrovnog tla prema dostupnim pedološkim podacima. Ključni podaci potrebnih za procjenu zaštitne uloge pokrovnog tla su tekstura tla, debljina pokrovnog sloja i raspodjela veličina čestica.

Podfaktor  $O_s$  izvorno je predložen kao dio COP metode (Vias et al., 2002, 2006) gdje je prekriveno tlo podijeljeno u četiri osnovne skupine prema teksturi i raspodijeli veličine zrna (Tablica 2). Kod KAVA metode kategorije tla su dodatno pojednostavljene jer su slivovi dinarskog krša uglavnom bez pokrovnih naslaga. Parametar  $O$  prilagođen je dodatno procijenjenim karakteristikama epikrških zona.

**Tablica 2. Vrijednosti podfaktora  $O_s$  (Biondić et al., 2021)**

Vrsta tla	Dubina tla	Os	Dubina tla	Os	Dubina tla	Os	Dubina tla	Os
Glinovito	> 2 m	2	1-2 m	1,9	0,5-1 m	1,6	< 0,5 m	1,3
Glinovito-pjeskovito				1,8		1,5		1,2
Ilovasto				1,7		1,4		1,1
Golo	-	1						

Podfaktor  $O_{kf}$  predstavlja utjecaj okršenih i visoko propusnih površinskih i podzemnih zona krških vodonosnika na ukupnu prirodnu ranjivost krških slivova, tj. utjecaj epikrških zona. Debljina epikrške zone može se protezati do nekoliko desetaka metara, te se pojedinačno procjenjuje jer se zbog svog načina nastanka i različitih procesa koji se u njoj odvijaju strukturno može razlikovati od ostatka krškog vodonosnika.

Problem kod analize epikrških zona je taj što se one uglavnom ne vide na površini, a njihova debljina i raspored mogu se utvrditi samo detaljnim geofizičkim ispitivanjima i istražnim bušenjem. No, njihovo postojanje se češće utvrđuje neizravnom metodom – prostornom analizom krških geomorfoloških značajki na površini, koje ukazuju na podrijetlo epikrške zone i razvoj. Najčešće se koristi analiza gustoće vrtača na površini terena. Polazi se od pretpostavke da epikrška zona postoji i u uvjetima kada se ne nalazi na površini terena, ali postoje uvjeti koji su pogodni za njen razvoj – vapnenci s izraženim otvorenim pukotinskim sustavima, geomorfološki indikatori poput vrtača i slično (Biondić et al., 2021). Bodovanje podfaktora  $O_{kf}$  provode se koristeći kategorije prikazane u tablici 3.

Tablica 3. Vrijednosti podfaktora Okf

PODFAKTOR O <sub>kf</sub>	
Gustoća vrtača po 1 km <sup>2</sup>	O <sub>kf</sub>
5-25	0,2
25-50	0,4
50-75	0,6
75-100	0,8
>100	0,9

Vrijednost objedinjenog O parametra dobije se razlikom podfaktora O<sub>kf</sub> i O<sub>s</sub>:

$$O \text{ score} = O_s - O_{kf}$$

Vrijednosti pokrovnih naslaga (faktor O) kreću se u rasponu od 0,1 do 2. Vrlo male vrijednosti odgovaraju područjima sa vrlo slabo razvijenim tлом ili uopće nema tla te na kojemu ima vrlo mnogo vrtača. Male do umjerene vrijednosti kreću se u rasponu od (0,5-1) i odgovaraju područjima na kojima je tlo razvijeno do 1 metar dubine i na kojima je prisutno veliki broj vrtača. Umjerene do velike vrijednosti faktora O (1 do 1,5) odgovaraju područjima na kojima je tlo razvijeno do dubine od 2 metra i ima manje vrtača. Dok vrlo velike vrijednosti (>1,5) su karakteristične za područja dubine tla između 1 i 2 metra i na kojemu nema puno vrtača, kao i područja s vrlo dubokim tlima (preko 2 metra) i bez pojave vrtača. Kod izrade karata prirodne ranjivosti krškog vodonosnika i/ili izvora KAVA metodom koriste se neklasificirane vrijednosti O faktora (Biondić et. al, 2021).

Tablica 4. Kategorija i legenda za O kartu

O	Porast ranjivosti	Vrijednost	Boja
<0,4	Vrlo visoka	1	crvena
0,4 – 0,8	Visoka	2	narančasta
0,8 – 1,2	Srednja	3	žuta
1,2 – 1,6	Niska	4	zelena
> 1,6	Vrlo niska	5	plava

### 3.1.2. Utjecaj oborina ( P parametar)

Utjecaj oborina (P parametar) odnosi se na vanjski stres, koji utječe na sve ostale faktore koji su potrebni u KAVA metodi. Kod procjene P parametra uzimaju se u obzir efektivne količine oborina čiji se utjecaj iskazuje u obliku podfaktora  $P_e$ .  $P_e$  predstavlja dio oborina koje se mogu površinski infiltrirati ili dospjeti u dublje dijelove vodonosnika perkolacijom. Za bodovanje podfaktora  $P_e$  uzimaju se u obzir najkritičniji slučajevi u ocjeni ranjivosti krških vodonosnika, poput visokih intenziteta i količine oborina, koji dovode do brze infiltracije vode kao i brzi transport potencijalnih onečišćujućih tvari u dublje dijelove vodonosnika.

Ako se u obzir uzme činjenica da godišnja raspodjela ukupnih oborina može dodatno utjecati na ranjivost krških vodonosnika, kod određivanja ukupnog faktora P koristi se i dodatni podfaktor  $P_i$  (intenzitet oborina). Time je postignuto da se s vrijednosti intenziteta oborina po potrebi modificira i utjecaj efektivnih oborina. Kategorije vrijednosti za bodovanje  $P_e$  i  $P_i$  nalaze se u tablici 5 i 6.

Tablica 5. Vrijednosti podfaktora  $P_e$

Efektivne oborine	$P_e$
< 500 mm/god.	1,2
500-1.000	1,1
1.000-1.500	1
1.500-2.000	0,95
2.000-2.500	0,9
> 2.500 mm/god	0,85

Tablica 6. Vrijednosti podfaktora  $P_i$

Intenzitet oborina	$P_i$
< 10 mm/dan	1,25
10-30	1
> 30 mm/dan	0,75

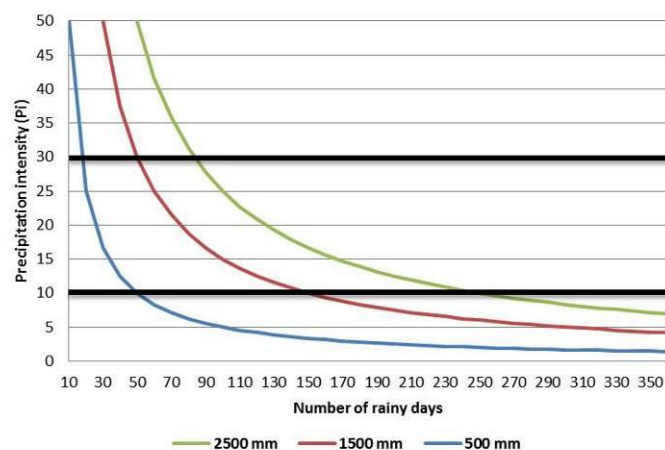
Vrijednosti efektivnih oborina (podfaktor  $P_e$ ) određuju se iz vrijednosti srednjih efektivnih oborina na slivnom području. Vrijednosti u rasponu od 1.000 do 1.500 mm/god uzimaju se kao neutralne, dok sve vrijednosti modificiraju ukupnu prirodnu ranjivost krških slivova. Podaci efektivnih oborina mogu se dobiti iz meteoroloških i oborinskih karata, prethodnim istraživanjima i izračunom dobivenim iz empirijskih formula. Empirijske formule u obzir uzimaju srednju količinu oborina, temperaturu zraka kao i druge parametre značajne za njihovu procjenu.



Podfaktor  $P_i$  određuje se iz vrijednosti srednjih godišnjih količina oborina i ukupnog broja kišnih dana na nekom slivu:

$$P_i = \frac{P \left( \frac{mm}{god} \right)}{\text{broj kišnih dana}}$$

Manje kišnih dana na tu količinu oborina uzrokuje veće intenzitete, što rezultira intenzivnijim prihranjivanjem i povećanjem prirodne ranjivosti. Također, veći intenzitet oborina dodatno pogoduje infiltraciji vode i ispiranju nesaturiranih dijelova vodonosnika. Suprotno tome, više kišnih dana smanjuje intenzitet oborina, kao i ravnomjerniju raspodjelu ukupnih oborina tijekom godine. To rezultira smanjenjem prirodne ranjivosti vodonosnika zbog sporije infiltracije vode u podzemlje. Da bi se procijenio ukupni utjecaj podfaktora  $P_i$  koriste se tri kategorije intenziteta oborina čiji je princip prikazan na slici 7 za tri vrijednosti srednjih godišnjih količina oborina.



Slika 7. Osnovne  $P_i$  kategorije ( Biondić, et al. 2021)

Vrijednost parametra  $P$  dobije se množenjem dvaju: podfaktora  $P_e$  i podfaktora  $P_i$ , a sam parametar  $P$  razvijen je na temelju smjernica predloženih projektom COST 620.

$$P \text{ score} = P_e \cdot P_i$$

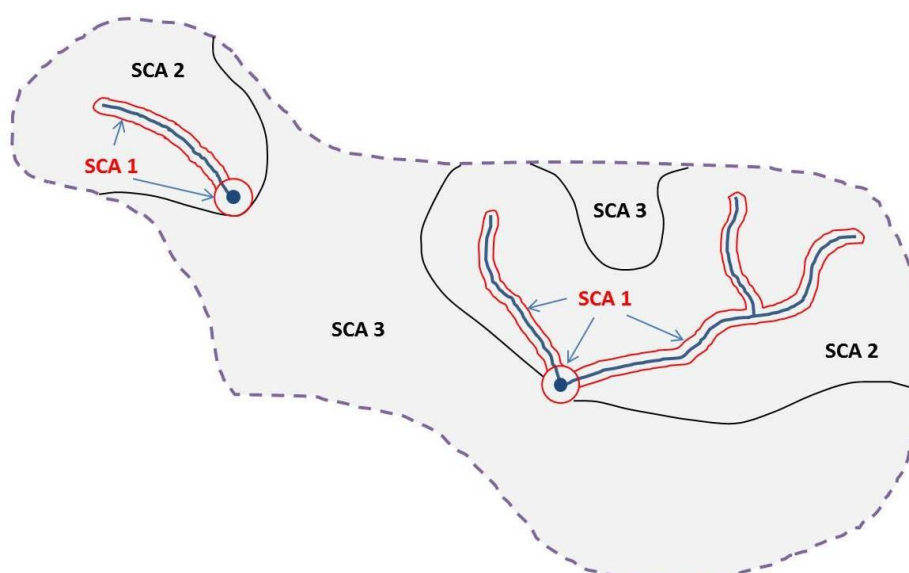
Vrijednosti se kreću između 0,6 i 1,5. Dobivene vrijednosti mogu se dodatno klasificirati za izradu  $P$  karte koja predstavlja prostorni utjecaj oborina na prirodnu ranjivost krškog sliva. Kod izrade karata KAVA metodom koriste se neklasificirane vrijednosti.

Tablica 7. Kategorija i legenda za P kartu

P	Porast ranjivosti	Kategorija	Boja
< 0,8	Vrlo visok	1	Crvena
0,8-1	Visok	2	Narančasta
1-1,2	Srednji	3	Žuta
1,2-1,4	Nizak	4	Zelena
> 1,4	Vrlo nizak	5	Plava

### 3.1.3. Područje površinskog sliva (eng. Surface Catchment Areas – SCA)

Parametar SCA dobiva se prostornim analizama hidroloških pojava na samoj površini krškog sliva. Osnova analize je izdvajanje površinskog sliva glavnih ponora, ponornih zona kao i vodotoka koji k njima gravitiraju. Krški sliv se dijeli u tri osnovna područja, kao što je prikazano na slici 8. Prostornim se analizama procjenjuju uvjeti koncentrirane ili difuzne infiltracije površinske vode u krško razdoblje (SCA 2 i SCA 3), a na konačnoj karti prirodne ranjivosti posebno se ističu područja najveće ranjivosti (SCA 1), koji obuhvaćaju ponore, ponorne zone i površinske vodotoke. Detalji definiranja pojedine kategorije prikazani su u tablici 8.



Slika 8. Shematski prikaz određivanja područja sliva (Biondić, et. al, 2021)

**Tablica 8. Definicija područja slivova**

SCA	OPIS
SCA 1	Područje 1: ponori s okolnim područjem, ovisno o mjerilu karte (Mjerilo 1:25.000=125m; Mjerilo 1: 50.000= 250 m; Mjerilo 1: 100.000= 500 m) kao i vodotoci koji se infiltriraju u ponore, uključujući 50 m područja s obje strane vodotoka
SCA 2	Područje 2: izravno površinsko područje ponora i površinskih tokova koji otječu prema ponorima
SCA 3	Područje 3: Ostatak slivnog područja koji nije direktno povezan sa ponorima, pomornim zonama ili vodotocima koji se infiltriraju u ponore

### 3.1.4. Utjecaj infiltracije ( I parametar)

Infiltracija površinske vode u krške vodonosnike ovisi o nizu parametara koji kontroliraju procese pripovršinskog i površinskog toka vode. Najznačajniji parametri su: nagib terena, svojstva pokrovnih naslaga, geomorfološki oblici (ponori, jame i vrtače, sl.) koji uzrokuju infiltracijske anomalije, te prisutnost vegetacije. Ako se u obzir uzme činjenica da se neki parametri već koriste za procjenu O parametra (geomorfološki oblici i pokrovne naslage), I parametar je razvijen tako da se njegov utjecaj na prirodnu ranjivost sliva procjenjuje kroz dva različita, ali povezana sloja: podfaktor  $I_{sv}$  (nagib i vegetacija) i podfaktor  $I_{gwd}$  (infiltracija podzemne vode).

Podfaktorom  $I_{sv}$  se na površini definiraju uvjeti koji utječu na prirodnu ranjivost nekog krškog sliva, kombinirajući utjecaje nagiba terene i vegetacije na infiltraciju površinskih voda. Kod procjene parametra vegetacije ( $v$ ) definiraju se područja koja su prekrivena oskudnom ili gustom vegetacijom. Područja prekrivena oskudnom vegetacijom su ona područja na kojima nema vegetacije ili je ona prirodno vrlo rijetka, nerazvijena. Područja koja se definiraju kao ona guste vegetacije predstavljaju dijelove sliva obrasle šumama, grmolikim biljem i grmolikim šumama. Ovi podaci dobivaju se prostornim analizama iz karti zemljišta (Landuse ili Corine land cover karata). Parametar nagiba terena ( $s$ ) dobije se prostornim analizama iz digitalnog modela terena, koristeći GIS softver, a nakon provedenih analiza dobivene vrijednosti mogu se dodatno klasificirati u predložene kategorije nagiba, kao što je prikazano u tablici 9.

**Tablica 9. Kategorizacija parametara nagiba i vegetacije**

SLOPE (s)	Vegetacija (v)
<8°	Svi tipovi vegetacije
8-31°	Gusta ili rijetka vegetacija
31-76°	Gusta ili rijetka vegetacija
>76°	Svi tipovi vegetacije

Uzimajući u obzir činjenicu da je podfaktor  $I_{sv}$  izravno uvjetovan i hidrološkim uvjetima na površini terena, prije njegove procjene potrebno ga je uskladiti sa SCA definiranim za određeni istraživani sliv.

Kod procjene  $I_{sv}$  na SCA 2 pretpostavljeni su uvjeti koncentrirane infiltracije vode u podzemlje, jer je na tom području dominantno površinsko otjecanje i otjecanje površinskih voda prema vodotocima i ponorima. Kod takvih uvjeta kombinacija vegetacije i nagiba terena osigurava vrijednost podfaktora  $I_{sv}$ , koji upućuje na veću ranjivost kod većih nagiba ili oskudnije vegetacije. To se u realnim uvjetima odnosi na kraće vrijeme transporta i bržu infiltraciju vode u podzemlje (tablica 10).

Kod procjene  $I_{sv}$  na SCV 3 pretpostavljeni su uvjeti difuzne infiltracije u krško podzemlje, jer je na ovom području karakteristično duže vrijeme zadržavanja vode na površini. Zbog toga se procjena utjecaja parametara vegetacije i nagiba određuje na obrnuti način nego kod područja 2. Veća ranjivost se javlja kod manjih nagiba i oskudnije vegetacije.

**Tablica 10. Vrijednosti podfaktora  $I_{sv}$  ovisno o definiranim područjima sliva**

NAGIB I VEGETACIJA ( $I_{sv}$ )	Područje 2	Područje 3
<8°	1	0,75
8-31° gusta/ rijetka vegetacija	0,95 – 0,9	0,8 – 0,85
31-76° gusta/rijetka vegetacija	0,85 – 0,8	0,9 – 0,95
>76°	0,75	1

Podfaktorom  $I_{gwd}$  se kroz procjenu dubine do podzemne vode ocjenjuje veličina utjecaja infiltrirane površinske vode na ukupnu ranjivost određenog krškog vodonosnika, gdje vrijednost faktora  $I_{gwd}$  nije vezan samo za nesaturirani dio vodonosnika već za cijeli vodonosnik. Iako se sam podfaktor teško određuje, ne smije se zanemariti, jer što je razina podzemne vode manja to će i utjecaj infiltrirane podzemne vode biti manji zbog duljeg vremena i duljeg transporta potencijalnog onečišćenja. Kako bi se  $I_{gwd}$  što bolje odredio potrebno je imati dobru mrežu istražnih piezometara kako bi se moglo odrediti prostiranje

vodnog lica u vodonosniku. S takvim podacima i dobrom prostornom analizom moguće je utvrditi položaj vodostaja u krškom vodonosniku i izraditi kartu dubine podzemne vode (GWDM). Zbog nedovoljne količine podataka u krškim područjima vrlo je teško izraditi precizne karte dubina do podzemnih voda, pa se zbog toga procjena podfaktora vrši na temelju dobrog poznavanja sliva i hidrogeoloških odnosa. Da bi se dobila konačna karta dubine podzemne vode, od digitalnog modela terena (karta prostorne raspodjele nadmorskih visina) oduzima se karta prostorne raspodjele potencijala podzemne vode. Na taj način dobivena razlika predstavlja debljinu nezasićene zone. Konačna karta dobiva se prostornim analizama podataka iz bušotina ili procjenom te kao takva predstavlja osnovu za bodovanje podfaktora  $I_{gwd}$ . Preporučljivo je koristiti zadane kategorije raspona dubina (tablica 11).

Tablica 11. Vrijednosti podfaktora  $I_{gwd}$

DEPTH TO GROUNDWATER	$I_{gwd}$	
	< 10 m	0,75
10 – 50	0,8	0,2
50 - 100	0,85	0,4
100 - 200	0,9	0,6
200 - 400	0,95	0,8
> 400 m	1	1

Vrijednosti konačnog parametra I dobije se zbrajanjem podfaktora  $I_{sv}$  i  $I_{gwd}$ , a svaki od podfaktora nadopunjuje utjecaj onog drugog:

$$I \text{ score} = I_{sv} + I_{gwd}$$

Vrijednosti se kreću u rasponu od 1,5 do 2, što ukazuje da ovaj faktor uvijek smanjuje ukupnu ranjivost krških vodonosnika, samo je pitanje u kojoj mjeri.

Dobivene vrijednosti moguće je dodatno klasificirati da bi se izradila zasebna I karta koja bi predstavila prostorni prikaz utjecaja infiltracijskih uvjeta na ukupnu ranjivost određenog krškog sliva (tablica 12). Za izradu karte prirodne ranjivosti KAVA metodom koriste se neklasificirane vrijednosti parametra I.

Tablica 12. Kategorija i legenda za I kartu

I	Porast ranjivosti	Kategorija	Boja
1,5-1,6	Vrlo visok	1	Crvena
1,6-1,7	Visok	2	Narančasta
1,7-1,8	Srednji	3	Žuta
1,8-1,9	Nizak	4	Zelena
1,9-2	Vrlo nizak	5	Plava

### 3.1.5. Uvjeti vodonosnika (A parametar)

Uvjeti u krškim vodonosnicima izrazito su bitni dio procjene prirodne ranjivosti vodonosnika. Takvi uvjeti definirani su parametrom A. Ukupni utjecaj tog parametra procjenjuje se podfaktorom  $A_{hg}$  (hidrogeološki opis), koji opisuje statičke uvjete u vodonosniku te podfaktorom  $A_{tt}$  (testovi trasiranja) kojim se određuju dinamički uvjeti krških vodonosnika.

Kod određivanja podfaktora  $A_{hg}$  statički uvjeti se procjenjuju temeljem dostupnih litoloških, geoloških, hidrogeoloških podataka, pri čemu su osnovni uvjeti stupanj okršenosti i litološki sastav. Ostali podaci bitni za procjenu ovog podfaktora su razne geomorfološke analize, rezultati pokusnih crpljenja, speleoloških istraživanja, analize hidrograma na izvorima, hidrokemijske analize i geofizička istraživanja, koji mogu precizno iskazati svojstva stijena u krškom podzemlju.

Bodovanje  $A_{hg}$  podfaktora prilagođeno je ukupnoj metodologiji te predstavlja relativne i nemjerljive vrijednosti s kojima se ukazuje da su jedne hidrogeološke formacije veće ili manje prirodne ranjivosti u odnosu na druge (tablica 13).

Tablica 13. Vrijednosti podfaktora  $A_{hg}$

Hidrogeološki opis i opis lomljenja	$A_{hg}$	
	1	2
Nema vodonosnika	1	2
Slabo vodopropusne intergranularne naslage	0,7	1,5
Srednje vodopropusne intergranularne naslage	0,4	0,9
Slabo vodopropusne okršene stijene	0,5	0,6
Umjereno vodopropusne okršene stijene	0,3	0,3
Dobro vodopropusne okršene stijene	0,2	0,1

Podfaktor  $A_{tt}$  određuje dinamičke uvjete u krškim vodonosnicima na temelju rezultata trasiranja podzemnih tokova.

Obradom rezultata trasiranja moguće je iz vrijednosti prividnih brzina tokova podzemne vode i udaljenosti mjesta ubacivanja trasera od mjesta pojavljivanja trasera dobiti prividne vremenske vrijednosti vezane za svako pojedino trasiranje. Prostornom analizom diskretnih podataka i upotrebom prikladne interpolacijske metode, putem GIS softvera, moguće je dobiti kontinuiranu prostornu raspodjelu vrijednosti trasiranja bitnih za istraživano područje. Kvaliteta prostorne interpolacije rezultata trasiranja biti će pouzdanije što je prostorna distribucija veća i što su i što su vrijednosti trasiranja na slivu ujednačenije.

Bodovanje i rasponi vrijednosti podfaktora  $A_{tt}$  prilagođeni su ukupnoj metodi (tablica 14). Manje vrijednosti pokazuju bolju povezanost određenog slivnog područja s izvorom i/ili izvorišnom zonom, čime se povećava ukupna ranjivost tog dijela prostora obzirom na ostatak sliva.

Tablica 14. Vrijednosti podfaktora  $A_{tt}$

Rezultati trasiranja	$A_{tt}$
0 dan	0
▲	▲
▼	▼
> 25 dana	1

Kod procjene podfaktora  $A_{hg}$  i  $A_{tt}$  treba se u obzir uzeti pretpostavka da su u relativno kratkom vremenu ove vrijednosti nepromjenjive, odnosno njihova moguća promjenjivost ne može drastično utjecati na ukupnu procjenu prirodne ranjivosti nekog krškog sustava. To je vrlo važno napomenuti iz razloga što su krški vodonosnici vrlo dinamični hidrogeološki sustavi, poput krškog područja Dinarida u Hrvatskoj. Pojedini dijelovi krškog vodonosnika mogu prostorno (oscilacije vodnog lica) kao i vremenski (pojava stalnih i povremenih izvora) mijenjati hidrogeološku funkciju. Kako bi se model pojednostavio ove promjene treba uzeti u obzir samo kada postoje opravdani razlozi ili točne i precizne spoznaje (novi rezultati trasiranja, nova hidrogeološka istraživanja, itd.). Kod takvih slučajeva oba podfaktora potrebno je ponovno bodovati i procijeniti, kao i ponovno procijeniti njihov utjecaj na samu ranjivost krškog sustava.

Ukupna vrijednost parametra A dobije se zbrojem dvaju podfaktora:  $A_{hg}$  i  $A_{tt}$ , jer se utjecaji međusobno nadopunjuju

$$A \text{ score} = A_{hg} + A_{tt}$$

Vrijednosti se kreću u rasponu od 0 do 2. Manje vrijednosti predstavljaju veću ranjivost zbog veće okršenosti i bolje vodopropusnosti stijena, kao i rezultatima trasiranja koji pokazuju bolju povezanost s izvorom. Veće vrijednosti parametra A ukazuju na dijelove sliva koji nisu izravno povezani s izvorištem ili dijelove sliva čija je vodopropusnost ograničena. Uglavnom su to mjesta izgrađena od nekarbonatnih stijena.

Dobivene vrijednosti moguće je dodatno klasificirati za izradu A karte koja predstavlja prostorni prikaz uvjeta u vodonosniku i njihov utjecaj na ukupnu ranjivost krškog sustava (tablica 15). Kod izrade karte prirodne ranjivost KAVA metodom koriste se neklasificirane vrijednosti.

Tablica 15. Kategorija i legenda za A kartu

A	Porast ranjivosti	Kategorija	Boja
< 0,4	Vrlo visok	1	Crvena
0,4 - 0,8	Visok	2	Narančasta
0,8 - 1,2	Srednji	3	Žuta
1,2 - 1,6	Nizak	4	Zelena
> 1,6	Vrlo nizak	5	Plava

### 3.1.6. Indeksi ranjivosti

Ukupni rezultat analize ranjivosti sliva daju dva indeksa ranjivosti. Indeks ranjivosti izvora (SV indeks) koji se odnosi na procjenu prirodne ranjivosti krškog izvora i indeks ranjivosti resursa (RV indeks) koji se odnosi na procjenu prirodne ranjivosti vodonosnika. Za izračun oba indeksa presudan je A parametar. Kada se u procjeni prirodne ranjivosti koristi ukupan A parametar tada se ukupna procjena odnosi na ranjivost krškog izvorišta, je su uzeti u obzir dinamički i statički uvjeti u vodonosniku. Podjela A faktora na podfaktore  $A_{hg}$  i  $A_{tt}$  i praćenjem samo podfaktora  $A_{hg}$  dobije se procjena prirodne ranjivosti, jer se u obzir uzimaju statički uvjeti.

$$SVI \text{ score} = (O \text{ score} + I \text{ score} + A \text{ score}) \cdot P \text{ score}$$

$$RVI \text{ score} = (O \text{ score} + I \text{ score} + A_{hg} \text{ score}) \cdot P \text{ score}$$



Izračun dvaju indeksa napravljen je tako da se rezultati izračuna svakog pojedinog parametra ( O, I, A) zbrajaju i množe sa rezultatima P parametra koji predstavljaju vanjski stres. Zatim je potrebno izdvojiti najranjivije dijelove područja (ponori, površinski tokovi i ponorne zone) na način da se području SCA 1 dodjeljuje vrijednost 0,1.

Konačne vrijednosti indeksa ranjivosti izvora kreću se u rasponu od 0,1 do 9 bodova, dok se konačne vrijednosti indeksa ranjivosti resursa kreću u rasponu od 0,1 do 7,5 bodova.

Vrijednosti su prikazane u tablicama 16. i 17.

**Tablica 16. Shema procjene ranjivosti resursa**

RVI bodovi	RV indeks	Klase ranjivosti
0,1 – 2,5	1	Ekstremno
2,5 – 3	2	Vrlo visoko
3 – 3,5	3	Visoko
3,5 – 4	4	Srednje
4 – 4,5	5	Nisko
4,5 – 7,5	6	Vrlo nisko

**Tablica 17. Shema procjene ranjivosti izvora**

SVI bodovi	SV indeks	Klase ranjivosti
0,1 - 3	1	Ekstremno
3 – 3,5	2	Vrlo visoko
3,5 – 4,5	3	Visoko
4,5 – 5,5	4	Srednje
5,5 -6,5	5	Nisko
6,5 - 9	6	Vrlo nisko

Prostorne raspodjele indeksa ranjivosti izvorišta i indeksa ranjivosti resursa se prikazuju kartografski u obliku karte ranjivosti izvora, odnosno karte ranjivosti resursa gdje raspon indeksa definira klasu ranjivosti kao što je prikazano u tablici 18.

Tablica 18. Legenda karte ranjivosti resursa i izvora

SV indeks	RV indeks	Klase ranjivosti	Boje
1	1	Ekstremna	Crvena
2	2	Vrlo visoka	Narančasta
3	3	Visoka	Žuta
4	4	Srednja	Svijetlo zelena
5	5	Niska	Tamno zelena
6	6	Vrlo niska	Plava

### 3.2. Procjena opasnosti (hazarda)

Kako bi se ocijenila razina opasnosti koja prijete podzemnim vodama od prisutnih antropogenih aktivnosti na području istraživanja izrađuju se karte opasnosti ili hazarda. Opasnost ili hazard za podzemne vode može biti bilo kakav objekt ili područje s namjenom (poljoprivredno, industrijsko, sportsko...), koje uslijed svoje djelatnosti može emitirati ili imitirati štetne tvari koje bi mogle dospjeti u podzemnu vodu i narušiti joj kvalitetu. Za dobru analizu opasnosti potrebno je prikupiti dovoljan broj relevantnih podataka kojima se detaljno opisuju prisutni izvori opasnosti na istraživanom području, što je dosta složen zadatak i nije jednoznačno metodološki određen. Osnovni podaci za izradu analize opasnosti podrazumijevaju izdvajanje lokacije i vrste djelatnosti iz različitih izvora podataka. Najčešće korišten izvor su topografske karte na kojima je moguće izdvojiti lokacije nekih osnovnih izvora opasnosti (naselja, prometnice, industrijske zone, groblja...), ali nije moguće odrediti vrstu ili količinu onečišćivala iz nekog pojedinog izvora. Iz tog razloga je potrebno kombinirati različite izvore podataka. Dodatni podaci mogu se dobiti iz raznih izvješća i arhiva bilo industrija ili jedinica lokalne samouprave, avio i satelitskih snimaka, na temelju terenskog obilaska, razgovora s lokalnim stanovništvom itd... (Zwahlen, 2004).

Nakon prikupljanja potrebnih podataka, izrađuje se karta neklasificiranih opasnosti, koja prikazuje prostorni raspored potencijalnih onečišćivača. Koristi se kao prikaz lokacije prisutnih izvora opasnosti i kao temeljna podloga za klasifikaciju mogućih onečišćivača (Biondić et al, 2009).

Nakon prostornog smještaja potencijalnih onečišćivača te provedene analize pristupa se klasifikaciji onečišćivala prema stupnju opasnosti za podzemne vode i izradi karte

klasificiranih opasnosti. Kako bi se kvalitetno ocijenila razina opasnosti potrebno je uz podatke o vrsti onečišćivala i lokacije prikupiti i podatke o količini ispusta otpadnih voda, njenu tokčisnost, itd. Opasnost se prema smjernicama projekta COST 620 vrednuje s tri zasebna faktora. Realne vrijednosti procjene hazarda dobivaju se iz formule (Zwahlen, 2004).

$$\text{OPASNOST} = H \cdot Q_n \cdot R_f$$

Gdje je:

OPASNOST	-indeks opasnosti
H	-težinska vrijednost opasnosti
$Q_n$	-faktor ocjene stvarne opasnosti
$R_f$	-faktor redukcije

Težinska vrijednost (H) ima raspon od 0-100 i iščitava se iz tablica (Tablica 19), faktor ocjene stvarne opasnosti ( $Q_n$ ) kreće se u rasponu od 0.8-1.2 i prikazuje odnos između prosječne vrijednosti ovisno o vrsti onečišćivača i stvarne opasnosti. Raspon vrijednost od 0,8 do 1,2 ustvari ne radi velike raspone od početne težinske vrijednosti jer prevelike razlike nisu ni poželjne, budući da bi velika odstupanja od srednje vrijednosti nerealno izdvojila jednu djelatnost od drugih, njoj srodnih (Loborec, 2013). Faktor redukcije ( $R_f$ ) kreće se u intervalu od 0-1 i prikazuje vjerojatnost pojavljivanja onečišćenja iz svakog potencijalnog onečišćivača. Ukoliko je vrijednost faktora 0, nema rizika od onečišćenja, a ukoliko je faktor 1 nema poznatih razloga za smanjenje stvarne opasnosti za potencijalno onečišćenje. Potrebno je vrlo pažljivo koristiti faktor redukcije, samo kad postoje dobri dokazi da postoje realni uvjeti smanjenja opasnosti.

Ovakav način procjene opasnosti predstavlja metodologiju kojom bi se olakšala ocjena stvarne opasnosti koja prijeti podzemnoj vodi od različitih izvora onečišćenja te za usporedbu stvarne prijetnje podzemnoj vodi od različitih opasnosti na različitim područjima (Loborec et al, 2015).

Tablica 19. Sustav bodovanja težinskih vrijednosti prema COST 620 projektu (Zwahlen, 2004)

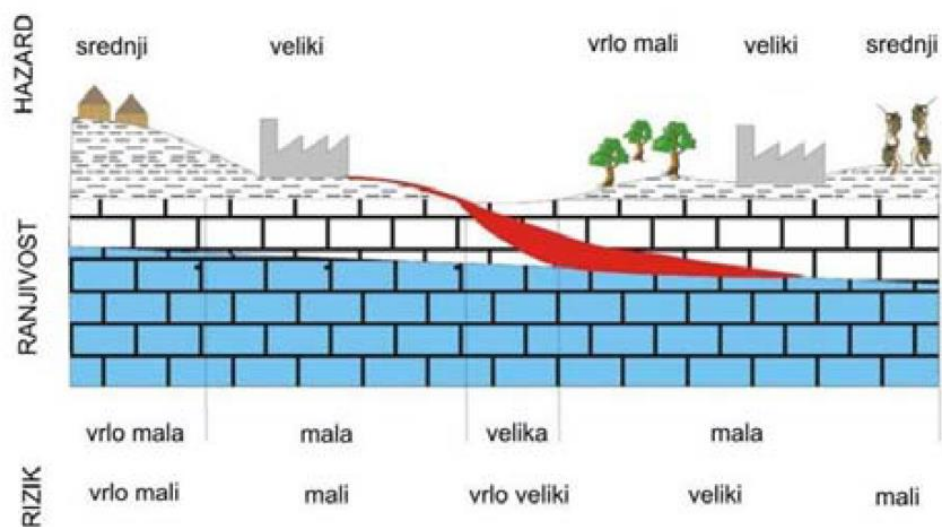
Onečišćivač	Težinska vrijednost
Upojni zdenac za otpadne vode	85
Rafinerija nafte	85
Urbanizacija bez kanalizacijskog sustava	70
Rudnik ugljena	70
Kožarska industrija	70
Kemijska tvornica	65
Benzinska pumpa	60
Plinara	60
Naftovodi	55
Elektro industrija	55
Uređene deponije otpada	50
Obrada metala i završni radovi obrade metala	50
Elektrana na kruta goriva	50
Ispust otpadne vode u vodotoke	45
Prehrambena industrija	45
Divlje odlagalište otpada, kontejner za otpad i smeće	40
Cesta, nesigurna	40
Talionice	40
Željezare i čeličane	40
Gumarska industrija	40
Papirna industrija	40
Urbanizacija (s kanalizacijskim sustavom)	35
Ispusti iz zastarjelih postrojenja za obradu otpadnih voda	35
Autocesta	35
Golf teren	35
Vojne instalacije i incidenti	35
Farma	30
Željeznička pruga	30
Turistička urbanizacija	30
Područje kampiranja	30
Skijalište	25
Kamenolom	25
Staklenik	20
Rasadnik	15

### 3.3. Procjena rizika od onečišćenja podzemnih voda

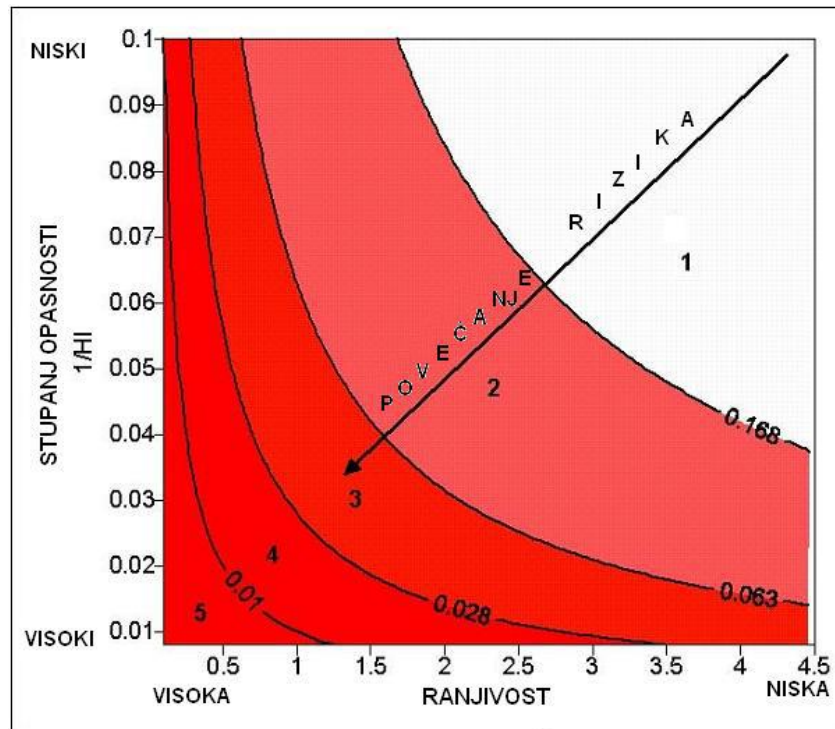
Procjena rizika je treći korak i završna faza u cjelokupnoj analizi rizika od onečišćenja podzemnih voda. Iako je informacijski zahtjevna, jer je jako puno podataka potrebno obraditi prije krajnje procjene rizika, dobivanja karte rizika je vrlo važan za vizualizaciju informacija donositeljima odluka, stručnjacima, vodnim agencijama, tvrtkama, itd. Stoga su velike prednosti u korištenju tematskih karata za predstavljanje informacija na sažet i jasan način (Zwahlen, 2004).

Procjena rizika svodi se na prostornu analizu u kojoj se preklapanjem slojeva opasnosti i prirodne ranjivosti izdvajaju dijelovi s različitom razinom rizika od onečišćenja. Rizik predstavlja stvarnu opasnost od onečišćenja podzemnih voda, ovisi o prirodnim uvjetima, ali je uvjetovan i rasporedom te vrstom potencijalnih onečišćivača. Veličina i vjerojatnost pojedinog onečišćivača na podzemne vode dobiva se analizom opasnosti, gdje veliku ulogu imaju dodatni faktori poput faktora redukcije i faktor ocjene stvarne opasnosti (Biondić et al., 2009).

Veličina rizika ne ovisi samo o prirodnoj ranjivosti već i o koncentraciji mogućih štetnih tvari, ovisno o zatečenom stanju postojećih izvora opasnosti s jasnim utjecajem na podzemne vode. U kršu postoje ogromni prostori visoke prirodne ranjivosti, ali niskog rizika zbog nepostojanja velikih onečišćivača. Isto tako moguća je visoka razina rizika u područjima male prirodne ranjivosti, ako se tamo nalaze onečišćivači sa velikim utjecajem na podzemne vode. Rizik se može procijeniti kvalitativno (kombiniranjem klasa ranjivosti i opasnosti) ili pak kvantitativno (korištenjem numeričkih vrijednosti indeksa opasnosti i ranjivosti u matematičkoj formuli), a neke od postojećih shema kombinacija prikazane su na slikama 9 i 10.



Slika 9. Procjena rizika podzemne vode (Zwahlen, 2004)



Slika 10. Dijagram procjene rizika (Zwahlen, 2004)

Iz dijagrama koji je prikazan na slici 10, vidljivo je da je rizik kombinacija opasnosti i ranjivosti te se najčešće za njegovo izračunavanje koristi relacija:

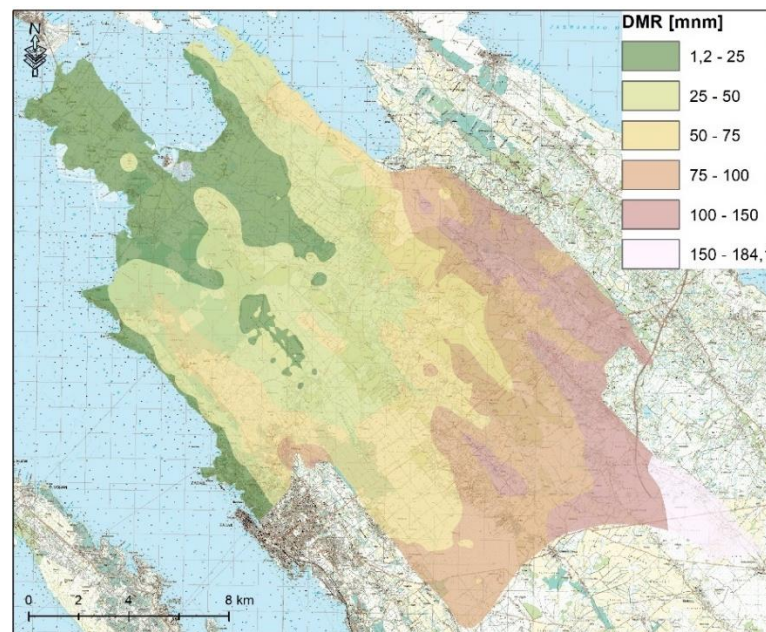
$$\text{RIZIK} = \text{RANJIVOST} \times \text{OPASNOST}$$

## 4. OCJENA PRIRODNE RANJIVOSTI TPV BOKANJAC-POLIČNIK KAVA METODOM

Osnovni preduvjet za procjenu ranjivosti je određivanje značajki krških sustava. Potrebno je poznavanje hidrogeoloških odnosa na nekom slivnom području, stoga hidrogeološka karta područja s označenim smjerovima tečenja podzemne vode predstavlja osnovnu podlogu za procjenu ranjivosti. Hidrogeološka karta područja istraživanja prikazana je na slici 2.

### 4.1. Priprema podataka za procjenu ranjivosti

U daljnjoj analizi korištena je i topografska karta mjerila 1:25 000 za digitalizaciju kota, hidrografske mreže i vrtača koji su bitni za analizu prirodne ranjivosti u slivu. Elementi su pretvoreni u vektorski format procesom digitalizacije, te su poslužili kao parametar za izradu digitalnog modela reljefa, kartu nagiba te karte prostorne distribucije vrtača. Upotrebom GIS tehnologije, ESRI ArcGis softvera, izrađene su podloge, prostorne analize i kartografski prikazi. Upotrebom interpolacije iz ESRI ArcGIS Spatial Analyst ekstenzije iz digitaliziranih kota, vodotoka i vrtača, izrađen je digitalni model reljefa rezolucije 25 metara (slika 11).

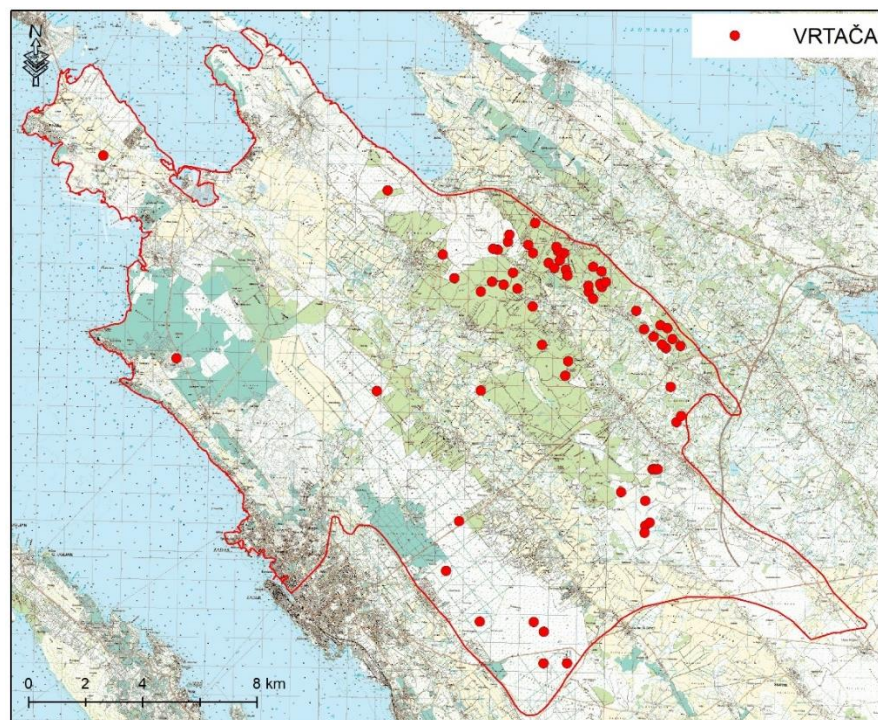


Slika 11. Digitalni model terena sliva Bokanjac - Poličnik

Na temelju DMR-a dobivena je karta nagiba terena, također rezolucije 25 metara s rasponom vrijednosti od 0 – 13,82 %. Dobiveni nagib terena reklasificiran je u dvije klase

prema uputi KAVA metode: prva u rasponu od 0-8°, a druga za nagibe veće od 8°. Nagib terena kombiniran je s podacima o vegetaciji i opisuje utjecaj infiltracije na ranjivost podzemnih voda.

Vrtače su čimbenik koji ukazuju na stupanj okršnosti nekog prostora, postojanje epikrške zone i izrazito ranjive dijelove terena. Vrtače su jedan od najvažniji čimbenika za određivanje podfaktora okršnosti Okf u KAVA metodi. Na topografskoj podlozi izdigitalizirano je 73 vrtače na području sliva Bokanjac – Poličnik (slika 12). Bokanjačko područje nema veliki broj vrtača, a uglavnom su smještene na sjevernom dijelu područja. Nakon toga pomoću alata za gustoću (eng. Density) u programu ESRI ArcGIS, ekstenzije Spatial Analyst izrađena je karta prostorne gustoće vrtača, veličine ćelija 1.000x1.000 metara. Karta je reklasificirana u dvije kategorije: I=0-5; II=5-7.



Slika 12. Prostorna raspodjela vrtača na slivu Bokanjac - Poličnik

Kod metoda procjene ranjivosti, važnu ulogu imaju podaci o tlu i vegetacijskom pokrovu. Tlo predstavlja najvažnije prirodno zaštitno obilježje nekog područja. Podaci o tlu uzeti su iz Hidropedološke karte Republike Hrvatske, u mjerilu 1:300.000 (Vidaček et al., 2004). Na području sliva Bokanjac – Poličnik izdvojeno je 17 klasa tala, a za svaku klasu



definirane su tekstura tla, dubina i hidropedološke jedinice, što je kasnije korišteno za ocjenu utjecaja tla na ranjivost.

Vegetacija ima veliki utjecaj kod površinskog otjecanja i uvjeta infiltracije. Uobičajeno se dijeli na: šume, livade i pašnjake, obradivo tlo. Više vegetacije znači i veća infiltracija, dok manje vegetacije znači više površinskog otjecanja. Obradene površine zbog manje vegetacije pogoduju formiranju površinskog otjecanja, dok su travnate površine zajedno sa šumama pogodnije za infiltraciju. Šume su najprikladnije za infiltraciju zbog šumskog tla koje je rahlo, sadrži puno humusa, zbog prepreka i ublažavanja intenziteta oborina (Werz & Hotzl, 2007). Kako bi se pripremili podaci o vegetaciji na području sliva korišteni su podaci „Corine LandCovera 2012“. Na karti pokrova izdvojeno je 17 klasa CLC kartografskih jedinica, koje su razvrstane u dvije kategorije - gusta i rijetka vegetacija te bodovane sukladno zahtjevima KAVA metode.

Podaci srednjih godišnjih oborina na području TPV Bokanjac – Poličnik preuzeti su iz Klimatskog atlasa Hrvatske (Zaninović et al., 2007), a podaci o broju kišnih dana za područje Zadra za razdoblje 1961.-2019. godine preuzeti su iz DHMZ-a ([https://meteo.hr/klima.php?section=klima\\_podaci&param=k1&Grad=zadar](https://meteo.hr/klima.php?section=klima_podaci&param=k1&Grad=zadar)).

Kombinacijom karte godišnjih oborina Republike Hrvatske i broja kišnih dana dobivaju se vrijednosti parametara koji opisuju utjecaj oborina.

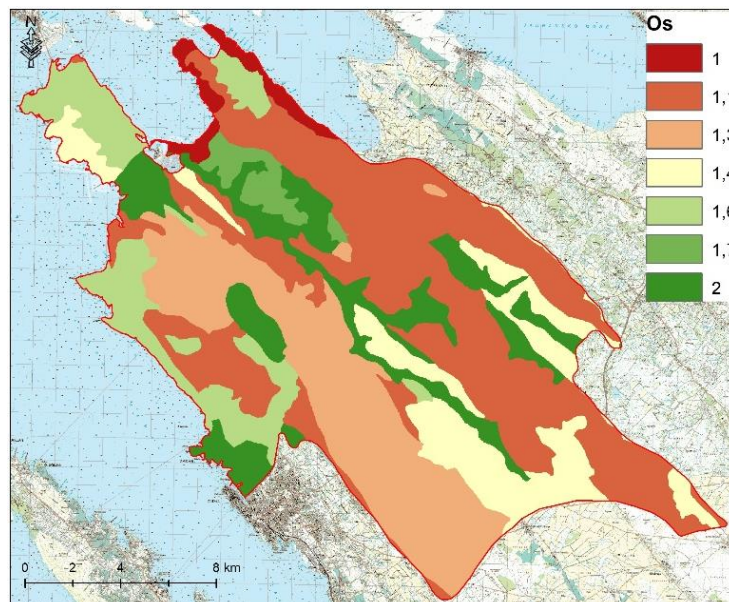
Za procjenu ranjivosti vodnog sustava vrlo često je potrebno odrediti razinu podzemnih voda, zbog određivanja debljine nesaturirane zone. Krš je vrlo kompleksno područje, te je zbog malog broja mjerenih podataka, nepredvidivosti podzemnih tokova i akumulacija komplicirano odrediti točnu razinu podzemnih voda. Ipak, gradijent podzemne vode izrađen je aproksimacijama iz rezultata do sada provedenih hidrogeoloških istraživanja, konkretno mjerene razine na nekoliko lokacije unutar slivnog područja te su ekstrapolirane na područje čitavog vodnog tijela.

Karta razine podzemne vode s apsolutnim koordinatama dobivena je preko DMR-a, dok je pomoću „raster calculatora“, ESRI ArcGIS alata, dobivena razlika dobivena razlika koordinata dobivenih digitalnim modelom reljefa i razine podzemne vode. Tako je dobivena debljina nesaturirane zone.

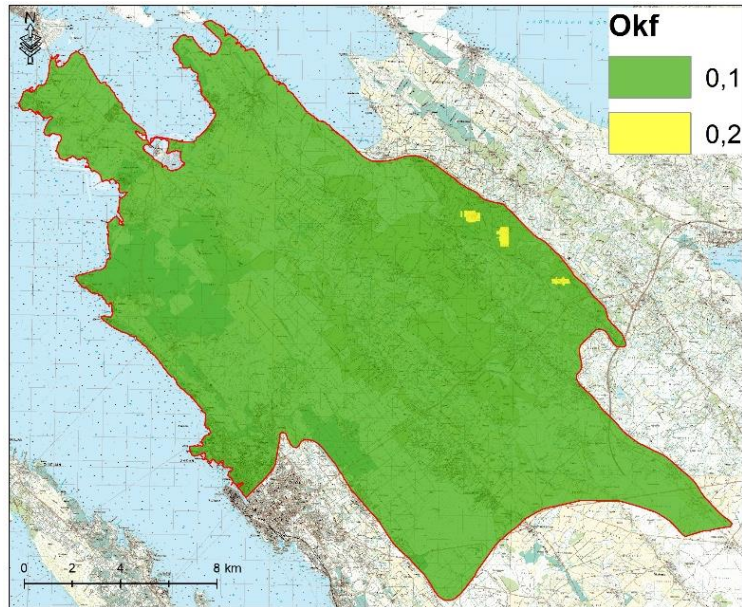
## **4.2. Određivanje pojedinih parametara ranjivosti**

Podaci iz prethodnog poglavlja, upotrijebljeni su kako bi se odredila procjena ranjivosti vodonosnika KAVA metodom. Svaki parametar je pojedinačno obrađen i nadopunjen prostornim preklapanjima te klasificiran za svaki od četiri navedena parametra O, P, I i A, s tim da se kod ranjivosti vodonosnika - resursa (kao što je ovdje slučaj) koristi samo dio parametra A, odnosno podfaktor  $A_{hg}$ , jer on opisuje statičke odnose unutar samog vodonosnika. U nastavku je opisano na koji su način dobivene vrijednosti parametara prema KAVA metodi.

**Parametar O** – Parametar O je određen na osnovi podfaktora  $O_s$  koji se odnosi na tlo i podfaktora  $O_{kf}$  koji predstavlja značajke krša. Kako bi se odredio podfaktor  $O_s$  (slika 13), potrebni su podaci za opis tla i debljine tla koji su uzeti iz Hidropedološke karte, mjerila 1:300.000 (Vidaček et al, 2004), gdje je nakon konverzije ulaznih podataka dobiven raster  $O_s$  podijeljen u 7 kategorija s bodovnim vrijednostima. Crvena boja prikazuje dijelove slivnog područja sa slabo razvijenim tlom, dok zelena pokazuje dijelove područja sa dobro razvijenim tlom ( $>2$  m). Podfaktor  $O_{kf}$  (slika 14) predstavlja epikršku zonu koja utječe na prirodnu ranjivost vodonosnika, a procijenjen je na temelju prostorne gustoće vrtača. Vrtače su se digitalizirale na topografskoj karti mjerila 1: 25.000 za cijelo slivno područje. Koristeći se alatom ArcGIS, dobio se raster temeljen na gustoći vrtača po 1 km<sup>2</sup>. Slivno područje ima mali broj vrtača, tako da zelena boja prikazuje područje s malim brojem vrtača, dok žuta prikazuje područje s većim brojem vrtača.

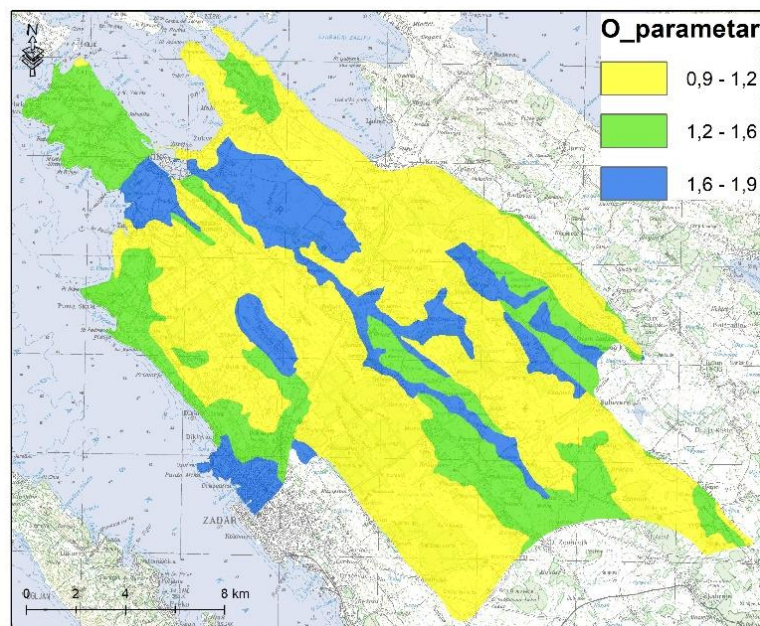


Slika 13. Podfaktor  $O_s$  određen za sliv Bokanjac - Poličnik



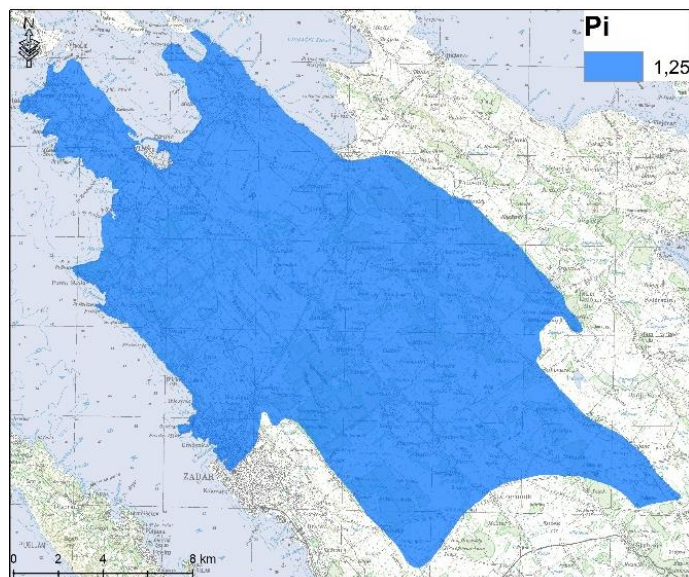
Slika 14. Podfaktor  $O_{kf}$  određen za sliv Bokanjac - Poličnik

Parametar O (slika 15) dobiven je oduzimanjem podfaktora  $O_{kf}$  od podfaktora  $O_s$  u alatu ArcGIS, naredbom „Minus“ u ekstenziji „Math Algebra“. Vrijednosti parametra O kreću se u rasponu od 0,9 do 1,9 boda. Sukladno KAVA metodi napravljene su tri klase faktora O. Iz O karte vidljivo je da područje sliva „Bokanjac-Poličnik“ prekriva slabo do umjereno razvijeno tlo što je u skladu s hidrogeologijom samog područja.

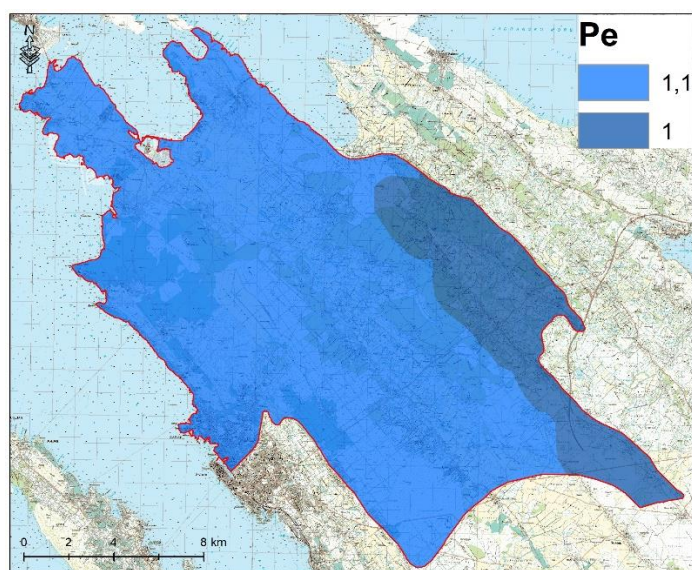


Slika 15. Parametar O određen za sliv Bokanjac - Poličnik

**Parametar P** – Da bi se procijenio parametar P, korišteni su efektivna količina oborina ( $P_e$ ) i intenzitet oborina ( $P_i$ ). Efektivne količine oborina preuzete su iz Klimatskog atlasa Hrvatske, dok je broj kišnih dana potreban za dobivanje intenziteta oborina uzet sa stranica DHMZ-a. Intenzitet oborina je za cijelo područje isti, a iznosi 1,25 (slika 16), dok je efektivna količina oborina veća u unutrašnjem dijelu slivnog područja (slika 17).

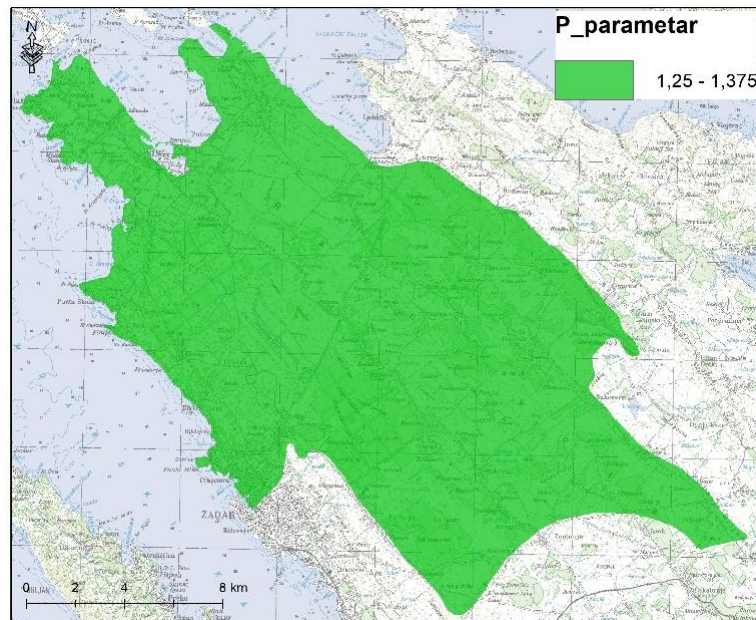


Slika 16. Podfaktor  $P_i$  određen za sliv Bokanjac – Poličnik



Slika 17. Podfaktor  $P_e$  određen za sliv Bokanjac - Poličnik

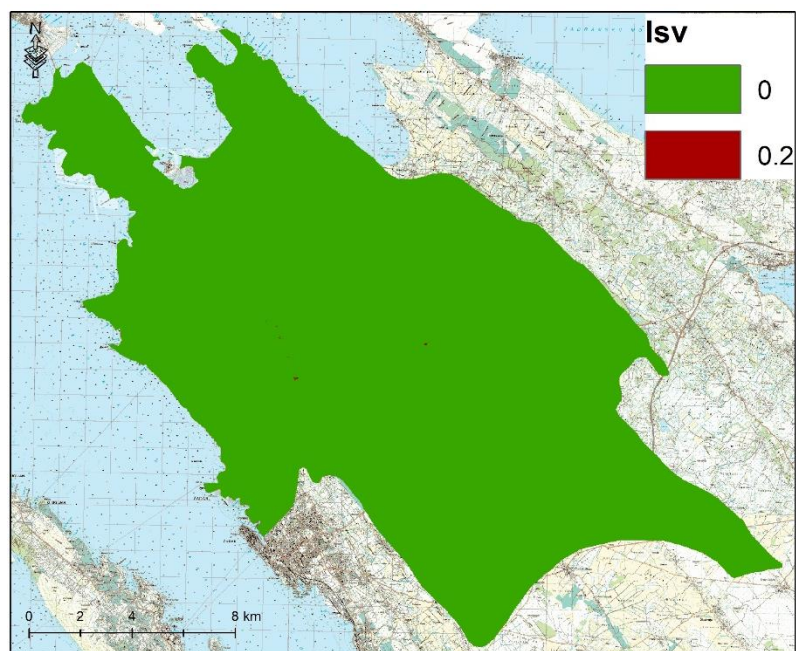
P parametar (slika 18) dobiven je množenjem podfaktora  $P_e$  i  $P_i$  u programskom alatu ArcGIS, naredbom „Times“ u ekstenziji „Math Algebra“. Vrijednosti parametra P kreću se u rasponu od 1,25 do 1,375 boda, odnosno unutar jedne klase. Iz P karte vidljivo je da je utjecaj oborina nizak na čitavom području promatranog TPV.



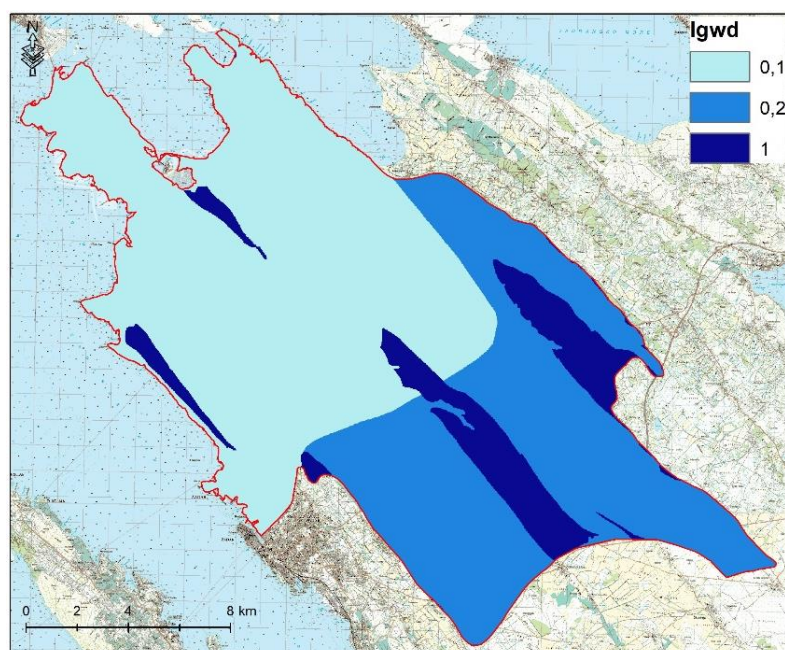
Slika 18. Parametar P određen za sliv Bokanjac - Poličnik

**I parametar**- vrijednosti I parametra, odnosno utjecaja infiltracije vode u dublje dijelove vodonosnika dobivene su na temelju  $I_{gwd}$  i  $I_{sv}$  podfaktora. Kako bi se odredio utjecaj vegetacije na ranjivost vodonosnika korišteni su podaci o upotrebi zemljišta CorineLand Cover 2012 iz digitalne baze podataka. Vrijednosti utjecaja vegetacije i nagiba usklađeni su sa SCA parametrom. Čitavo područje sliva promatra se kao SCA 3 parametar, odnosno kao područje koji nije direktno povezano sa ponorima, vodotocima i ponornim zonama. Razlog promatranja područja kao SCA 3 parametar je zbog toga što se ne procjenjuje ranjivost pojedinog izvora već cijelog vodonosnika. Nakon reklasifikacije dobio se  $I_{sv}$  raster (slika 19) koji prikazuje prostornu raspodjelu nagiba i vegetacije na promatranom području.

$I_{gwd}$  podfaktor (slika 20) dobije se pomoću hidrogeoloških odnosa u slivu Bokanjac – Poličnik, kao i korištenjem znanja o razini vode u samom vodonosniku. Kako bi se dobila karta podzemne vode potrebno je iz digitalnog modela terena oduzeti karte apsolutne razine podzemne vode kako bi se dobio  $I_{gwd}$  raster. Nakon reklasifikacije  $I_{gwd}$  raster predstavlja prostorni raspored dubina podzemnih voda na području sliva.

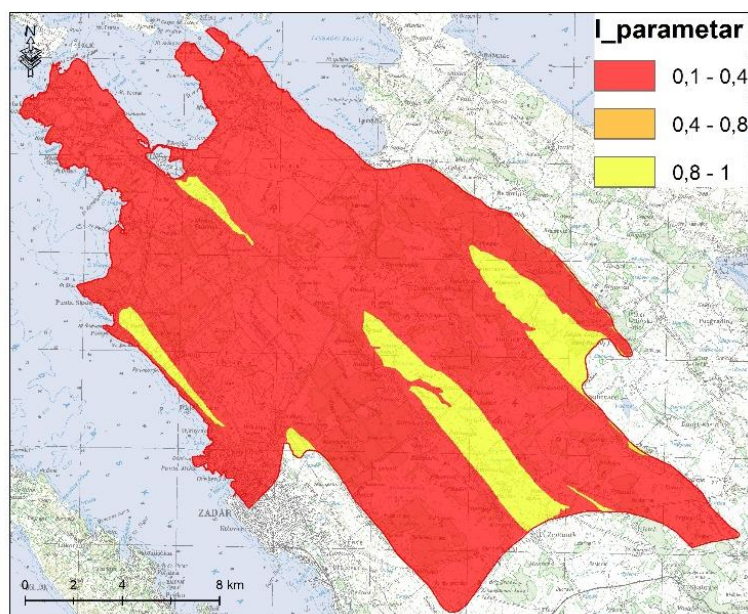


Slika 19. Podfaktor  $I_{sv}$  određen za sliv Bokanjac - Poličnik



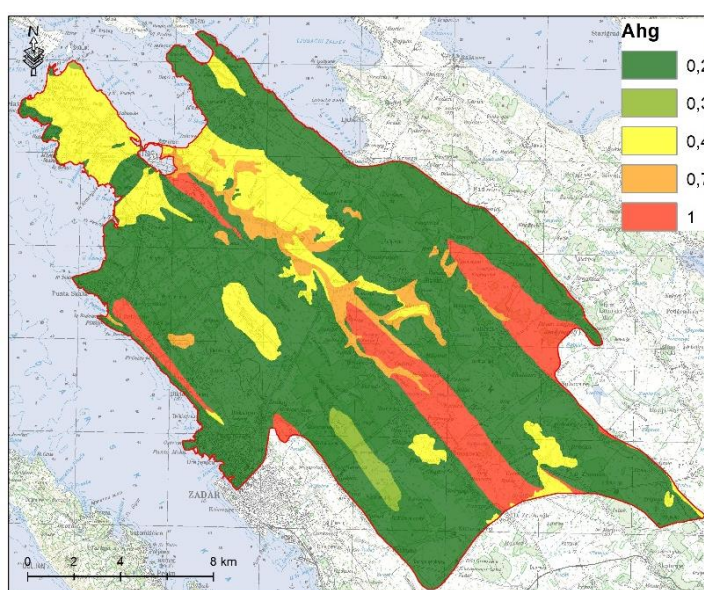
Slika 20. Podfaktor  $I_{gwd}$  određen za sliv Bokanjac - Poličnik

Ukupni I parametar (slika 21) dobiven je zbrajanjem dvaju podfaktora u alatu ArcGIS, naredbom „Plus“ u ekstenziji „Math Algebra“. Vrijednosti I parametra kreću se u rasponu od 0,1 – 1, odnosno sukladno KAVA metodi svrstane su u 3 klase.



Slika 21. Parametar I određen za sliv Bokanjac - Poličnik

**Parametar A-** Hidrogeološka obilježja saturiranog dijela vodonosnika ovise o hidrogeološkim karakteristikama stijena u kojima se nalazi. Da bi se dobio hidrogeološki opis slivnog područja korišteni su podaci litoloških jedinica iz prijašnjih istraživanja. Podfaktor  $A_{hg}$  (slika 22) ukazuje na različite ranjivosti pojedinih hidrogeoloških formacija. Kako se u ovom diplomskom radu gleda ranjivost čitavog sliva, a ne izvora nije potrebno uzimati u obzir podfaktor  $A_{tt}$ , odnosno dinamičke uvjete. Vrijednosti podfaktora  $A_{hg}$ , dodijeljene su sukladno KAVA metodi.



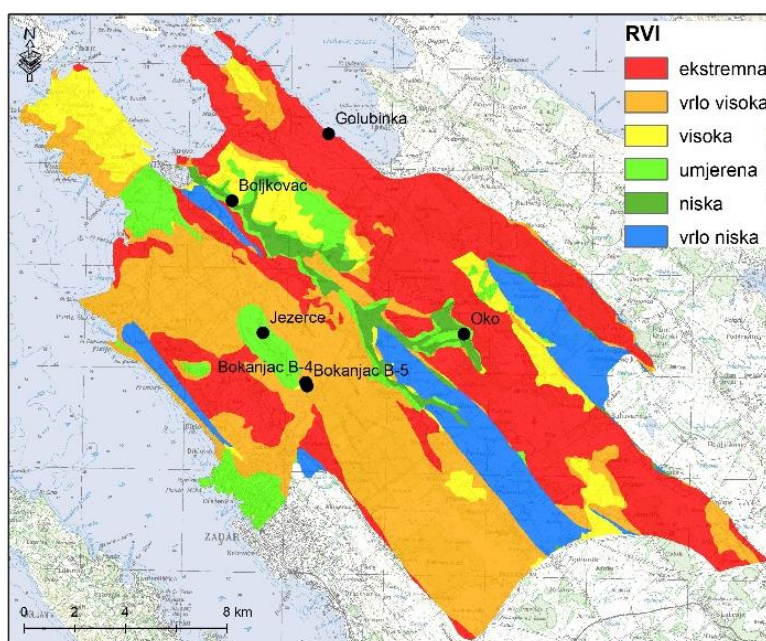
Slika 22. Podfaktor  $A_{hg}$  određen za sliv Bokanjac - Poličnik

### 4.3. Karta ranjivosti vodonosnika (RVI)

Konačna karta prirodne ranjivosti dobije se zbrajanjem parametara O,  $A_{hg}$  i I, te množenjem zbroja sa parametrom P koji u KAVA metodi predstavlja vanjski stres.

$$RVI\ score = (O\ score + I\ score + A_{hg}\ score) \cdot P\ score$$

Karta ranjivosti (slika 23) dobila se u programu ArcGIS pomoću „Raster Calculatora“, a vrijednosti se kreću u rasponu od 1.6-5.4, odnosno unutar svih 6 klasa metode (slika 11). Kod ranjivosti vodonosnika, koristi se samo  $A_{hg}$  podfaktor jer se on odnosi na statičke uvjete u vodonosniku.



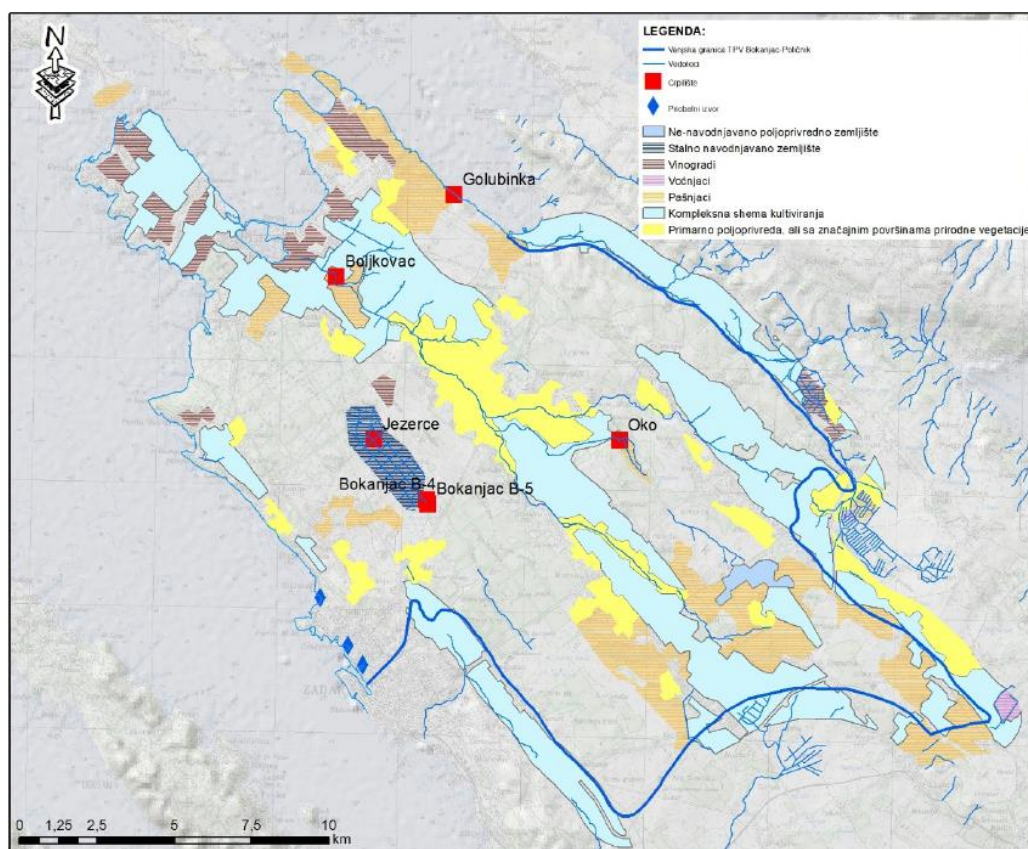
Slika 23. Karta ranjivosti vodonosnika.

Iz karte se vidi da je veći dio vodonosnika Bokanjac – Poličnik visoko do ekstremno ranjiv i to upravo dijelovi vodonosnika građeni od vapnenaca visoke propusnosti. Dijelovi vrlo niske ranjivosti su flišna područja. Budući da su fliš naslage koje se smatraju gotovo nepropusnima, razumljivo je da je i ranjivost takvih dijelova minimalna. Dijelovima dobro vodopropusnih vapnenaca koji su prekriveni naslagama tla smanjila se ranjivost u klasu umjerene ranjivosti, što je potvrdilo pretpostavku da tlo može zadržati onečišćenje prije prodora do podzemne vode. Također, na konačnoj karti ranjivosti vidljivo je da su područja prekrivena gušćom vegetacijom manje ranjiva od područja bez vegetacije.



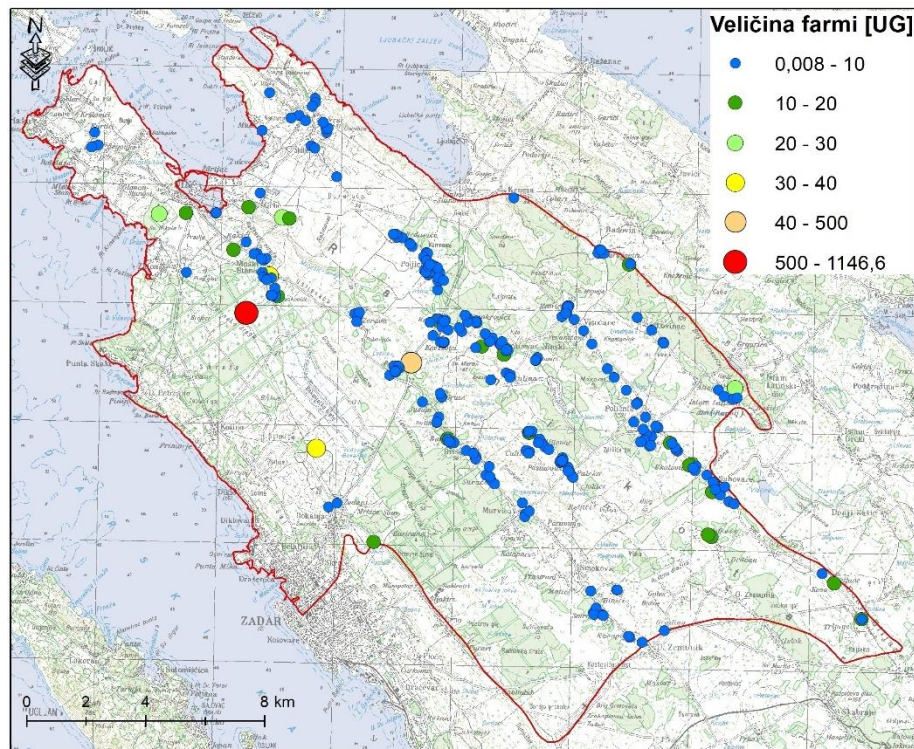
## 5. UTJECAJ POLJOPRIVREDNE PROIZVODNJE U TPV BOKANJAC – POLIČNIK

Kad se govori o utjecaju poljoprivredne proizvodnje na podzemne vode u slivu Bokanjac – Poličnik važno je razlikovati dva glavna izvora potencijalnog onečišćenja. Prvo je poljoprivredna proizvodnja kroz zemljoradnju. Već je spomenuto da se na ovom području zbog zaravnjenog terena, kao i prisutnosti tla u nešto većoj mjeri nego u ostatku Dalmacije, lokalno stanovništvo bavi poljoprivredom u određenoj mjeri. Cijeli su Ravni kotari poznati kao poljoprivredni kraj. Kartom pokrova zemljišta CLC2012 izdvojeno je 7 glavnih klasa poljoprivrednog zemljišta: nenavodnjavano poljoprivredno zemljište, stalno navodnjavano poljoprivredno zemljište, vinogradi, voćnjaci, pašnjaci, kompleksna shema kultiviranja te primarno poljoprivredno zemljište ali sa značajnim udjelom prirodne vegetacije (slika 24).



Slika 24. Poljoprivredna zemljišta prema CLC2012 (Biondić et. al, 2019)

Drugi dio poljoprivredne proizvodnje su stočarske farme, a ujedno predstavljaju i najveće proizvođače prirodnih gnojiva. Utjecaji farme na podzemne vode su različiti, a ovise o položaju i veličini farme kao i geološkoj građi područja na kojem se farma nalazi. Negativan utjecaj predstavljaju nusprodukti poput fosfornih i dušičnih spojeva koji nastaju tijekom stočarske proizvodnje.



Slika 25. Položaj farmi

Zbog različitih vrste domaćih životinja koje se uzgajaju na farmama, kao i zbog njihove usporedivosti uvodi se pojam „uvjetno grlo“, a označava grlo stoke težine 500 kg. Sve ostale vrste stoke se preračunavaju na uvjetna grla, umnoškom broja grla i odabranih koeficijenata (tablica 20). Ukoliko neke domaće životinje nisu uvedene u tablici koeficijent se određuje ovisno o stručnom mišljenju Poljoprivredno-savjetodavne službe. Na krškom području u Republici Hrvatskoj izdvojeno je ukupno 17.383 farmi. Od toga, na području TPV Bokanjac-Poličnik nalazi se ukupno 43 farme, s time da se između Bokanjačkog blata i crpilišta Boljkovac nalazi druga po veličini farma goveda s ukupno 1146,6 uvjetnih grla. Farma je smještena na vrlo propusnim rudistnim vapnencima gornjokredne starosti. Predstavlja utjecaj na izvor u Zatonu, ali također ima i veliki utjecaj na zdence Bokanjac i Jezerce u Bokanjačkom Blatu uslijed sniženih razina podzemnih

voda prilikom crpljenja. Gledajući područje čitavog krškog područja Republike Hrvatske, najveća gustoća stočarske proizvodnje, tj. najveći broj uvjetnih grla po km<sup>2</sup> upravo je na području Ravnih kotara, a iznosi 8,61. (Biondić et al, 2009).

Tablica 20. Koeficijenti za izračun „uvjetnog grla“ (Biondić et al, 2019.)

VRSTA STOKE	KOEFICIJENT
krava, steona junica	1,00
bik	1,50
vol	1,20
junad 1-2 godine	0,70
junad 6-12 mjeseci	0,50
telad	0,25
krmača + prasad	0,3
tovne svinje do 6 mjeseci	0,25
mlade svinje 2-6 mjeseci	0,13
prasad do 2 mjeseca	0,02
teški konji	1,20
srednje teški konji	1,00
laki konji	0,80
ždrebad	0,75
ovce, koze i jarci	0,10
janjad, kozlići i jarad	0,05
nojevi	0,3
kunići	0,02
pure	0,02
tovna perad	0,0055
konzumne nesilice	0,0020
rasplodne nesilice	0,0033

Poljoprivredna djelatnost predstavlja najveći negativan utjecaj na podzemne vode i jedan od tri osnovna izvora raspršenog onečišćenja. Druga dva izvora su promet i urbane sredine. Poljoprivredna djelatnost kao difuzni onečišćivač (poljoprivredne površine) i točkasti onečišćivač (farme) glavni je izvor povišenih koncentracija nitrata u podzemnim vodama. Iz tog razloga provedena je posebna analiza utjecaja ratarske djelatnosti korištenjem poljoprivrednih površina iz podloge Corine LandCover 2000 i karata opasnosti te je izračunat udio poljoprivrednih zemljišta po cjelinama podzemnih voda u kršu. 33,73% krškog područja je poljoprivredno zemljište, a od toga 10,96% otpada na pašnjake, dok 10,57% otpada na poljoprivredna područja s većim dijelom prirodne vegetacije. 2,69% otpada na nenavodnjavana poljoprivredna zemljišta, a 0,15 % područja na navodnjavana poljoprivredna zemljišta (Biondić et al, 2009).

Klasifikacija izvora opasnosti napravljena je prema metodologiji opisanoj u poglavlju 3.3, ali je prilagođena specifičnim uvjetima područja. Budući da u tablici 19 nema opisanih

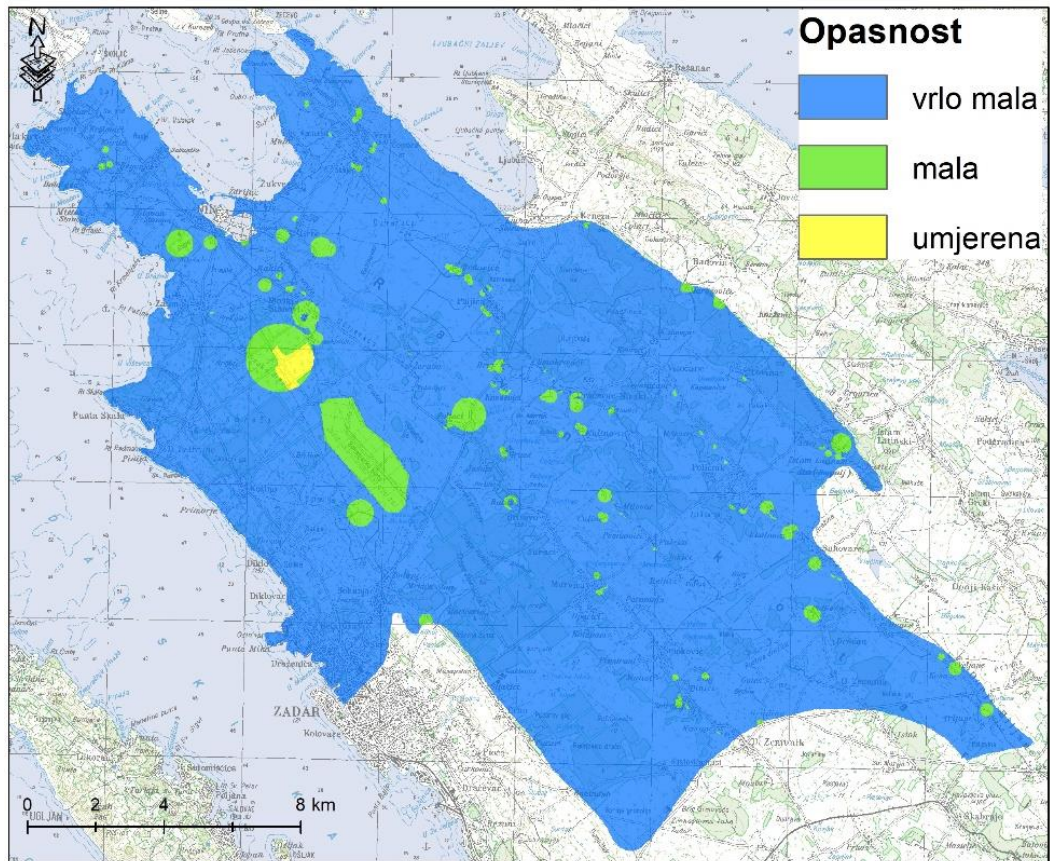
vrsta korištena zemlje u poljoprivredne svrhe, područja sa slike 24 su razvrstana prema utjecaju na podzemne vode, kao što je prikazano u tablici 21.

**Tablica 21. Težinska vrijednost opasnosti za poljoprivredna zemljišta**

VRSTA POLJOPRIVREDNOG ZEMLJIŠTA PREMA CLC2000	TEŽINSKA VRIJEDNOST
211 - Nenavodnjavano obradivo zemljište	15
212 - Stalno navodnjavano zemljište	25
221 - Vinogradi	15
222 - Voćnjaci	15
223 - Maslinici	15
231 - Pašnjaci	5
242 - Kompleks kultiviranih parcela	10
243 - Pretežno poljodjelska zemljišta s većim područjima prirodne vegetacije	8

Težinske vrijednosti stočarske proizvodnje dodijeljene su prema tablici, ali su one množene faktorom rangiranja te se dobio raspon od 24-36, ovisno o veličini farme, odnosno broju uvjetnih grla. Farme s brojem UG manjim od ( $UG < 10$ ) imaju težinski faktor 24, dok farma Petrčane sa više od 1.000 UG ( $UG > 1.000$ ) ima težinski faktor 36. Na temelju težinskih faktora dodijeljene su i zone utjecaja (Buffer), pa stoga farme sa brojem UG manjih od 10 ( $UG < 10$ ) imaju zonu utjecaja 100 m, dok Petrčane sa brojem UG većih od 1.000 ( $UG > 1.000$ ) imaju zonu utjecaja 1.000 m. Konačna karta opasnosti dobivena je zbrajanjem oba utjecaja.

Slika 27 prikazuje kartu klasificiranih opasnosti od poljoprivredne proizvodnje na slivu Bokanjac-Poličnik. Opasnosti su klasificirane u 3 klase: vrlo mala opasnost, koja zauzima najveći dio područja (čak 287,05 km<sup>2</sup>), zatim mala opasnost (13,24 km<sup>2</sup>) i umjerena opasnost (1 km<sup>2</sup>). Područja s vrlo malom opasnosti od onečišćenja podzemne vode od utjecaja poljoprivredne proizvodnje predstavlja područja na kojima uopće nema poljoprivredne proizvodnje ili je ona zanemarivog utjecaja (nenavodnjavane parcele, pašnjaci, voćnjaci, maslinici). Dijelovi područja na kojima se nalaze farme, kao i Bokanjačko blato imaju malu opasnost (zeleno). Jedino gdje je opasnost umjerena (žuto) je na području preklapanja utjecaja najveće farme goveda Petrčane (1.146,6 UG) i vinograda.



Slika 26. Karta opasnosti sliva Bokanjac – Poličnik

## 6. RIZIK OD ONEČIŠĆENJA PODZEMNIH VODA POLJOPRIVREDNIM DJELATNOSTIMA U TPV BOKANJAC-POLIČNIK

Završni korak cjelokupne analize rizika je kombiniranje rezultata procjene prirodne ranjivosti i procjene opasnosti od onečišćenja pod utjecajem poljoprivredne djelatnosti. Budući da su dobiveni rezultati analiza provedenih na TPV Bokanjac-Poličnik, tj. vrijednosti indeksa ranjivosti i opasnosti, u recipročnom odnosu, bilo je potrebno dodatno prilagoditi metodu procjene rizika. Naime, indeks ranjivosti dobiven KAVA metodom ustvari predstavlja stupanj zaštite, jer se ranjivost prema KAVA metodi kreće u rasponu od 0,75 do 7,5, a veći broj predstavlja manju ranjivost. Za razliku od toga, prema smjernicama procjene opasnosti propisane projektom COST 620 vrijednost indeksa opasnosti se kreće u rasponu od 0 – 120, a veći broj predstavlja veću opasnost. Osim recipročnog odnosa, problem su i vrlo velike razlike u vrijednostima, stoga je potrebno formulom normalizirati vrijednosti da bi se dobile jednake težine pojedinog utjecaja u konačnoj procjeni rizika.

Korištena formula je:

$$R = \frac{25}{RVI} * HI$$

R = rizik

RVI = indeks ranjivosti

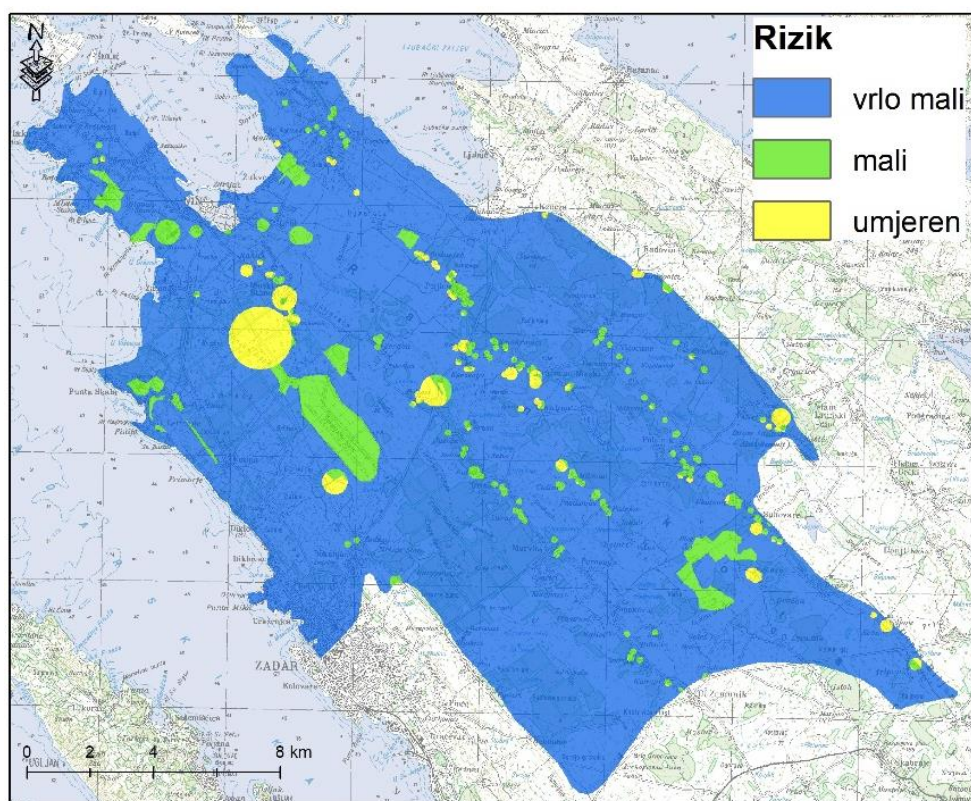
HI = indeks opasnosti

Prema rasponu mogućih vrijednosti napravljene su kategorije dobivenog indeksa intenziteta rizika koji definira klase rizika, kao što je prikazano u tablici 21.

Tablica 22. Kategorije rizika

Indeks rizika	Klasa rizika
12.000 – 1.200	Vrlo veliki rizik
1.200 – 650	Veliki rizik
650 – 350	Umjeren rizik
350 – 150	Mali rizik
150 – 0	Vrlo mali rizik ili ga nema

Dobivena formula korištena je u GIS prostornoj analizi koristeći naredbu *Raster calculator*. Rezultantni raster reklasificiran je prema kategorijama iz tablice 21. Na slici 28 prikazana je konačna karta rizika od onečišćenja podzemnih voda na TPV Bokanjac – Poličnik od utjecaja poljoprivrednih djelatnosti.



Slika 27. Karta rizika sliva Bokanjac – Poličnik

Dobivene su tri klase rizika: vrlo mali rizik (koji zauzima najveći dio površine TPV - 275,64 km<sup>2</sup>), zatim mali rizik (16.2 km<sup>2</sup>) i umjeren rizik (7 km<sup>2</sup>). Iz karte rizika istraživanog područja vidljivo je da na većem dijelu područja prevladava vrlo mali rizik (plava boja na karti), što odgovara svim dijelovima na kojima uopće ne postoji poljoprivredna djelatnost ili je izrazito malena (samo pašnjaci ili prirodna vegetacija). Tu naravno mogu spadati i urbana, industrijska ili asfaltirana (prometna) područja, ali budući da prikazana karta registrira samo poljoprivrednu djelatnost, navedeno ovdje nema nikakav utjecaj. Mali rizik (zeleno) se javlja na području koje ima visoku do ekstremnu ranjivost, a također je značajan utjecaj stočarskih farmi ili navodnjavanog poljoprivrednog područja (npr. Bokanjačko blato). Raspon ovisi o tome da li se stočarske farme ili poljoprivredno zemljište nalaze na dobro vodopropusnim vapnencima, sa ili bez

pokrovnih naslaga, tako se i rizik povećava. Umjeren rizik (žuto) javlja se na područjima veliki stočnih farmi ili na područjima gdje se preklapa utjecaj stočne farme i poljoprivredne proizvodnje (npr. područje stočne farme Petrčane), i to sve skupa se javlja na području izražene ranjivosti.

Iako rezultati procjene rizika na istraživanom području govore u prilog sigurnosti, tj. da na području TPV Bokanjac-Poličnik 91% područja uopće nema rizik od onečišćenja podzemne vode pod utjecajem poljoprivrede ili je on izrazito malen, ipak, potrebno je sagledati navedeni rezultat iz drugačijeg aspekta. Već je ranije spomenuto da je najveći problem poljoprivredne proizvodnje pojava dušikovih spojeva u podzemnoj vodi.

Naime, na području istraživanja već se dugi niz godina prati pojava određenih pokazatelja kakvoće vode, između ostalih i nitrata. Nitrati u čitavom tom periodu ne prelaze MDK, potrebno je spomenuti da nakon 2008. godine vrijednosti nitrata povremeno postaju povišene i mora se pratiti trend njihove prisutnosti u vodonosniku. U periodu od 2009. - 2013. prosječne koncentracije u promatranju od pola godine ne prelaze propisanu graničnu vrijednost niti su zabilježeni značajni skokovi koncentracija nitrata. Jedino je na zdencu Boljkovac u 2012. godini zabilježena maksimalna koncentracija nitrata ( $44,75 \text{ mg/l NO}_3^-$ ) (Biondić et al., 2016). Prosječne polugodišnje koncentracije nitrata prikazane su u tablici 22.

**Tablica 23. Prosječne koncentracije nitrata u razdoblju od 2009. – 2013. (Biondić et al., 2016)**

Razdoblja	Nitrati ( $\text{mg NO}_3^-/\text{l}$ )
2009 (1-6)	5,36
2009 (7-12)	5,80
2010 (1-6)	5,74
2010 (7-12)	8,64
2011 (1-6)	6,43
2011 (7-12)	6,95
2012 (1-6)	7,47
2012 (7-12)	17,25
2013 (1-6)	9,62
2013 (7-12)	4,60



Iako ne prelaze MDK propisan Okvirnom direktivom o vodama ( $50 \text{ mg/l NO}_3^-$ ), treba to promatrati s velikim oprezom jer je to vrlo toksičan spoj i opasan po ljudsko zdravlje, a jednom kad dospije u podzemne vode vrlo ga je teško eliminirati. Glavni izvori nitrata su umjetna gnojiva na poljoprivrednim površinama, kao i farme sa velikim brojem uvjetnih grla koje trebaju na odgovarajući način zbrinuti otpad. Hrvatska se nalazi među prvima u Europi po korištenju umjetnih gnojiva, što predstavlja veliki pritisak na podzemne vode i ukazuje koliko je bitno prepoznati problem i pravovremeno reagirati (Terzić et al., 2013). Povećane količine nitrata posljedica su poljoprivredne proizvodnje, a jače su izražene u slučajevima oskudne vegetacije na nekim dijelovima područja, dobro vodopropusnih naslaga, kao i povremenih obilnih kiša koje ispiru nezasićenu zonu vodonosnika. Ako se takvo povećanje može desiti na tako maloj površini zahvaćenoj malim ili mjenim rizikom, što bi se tek moglo desiti u slučaju da se poveća broj izvora opasnosti ili u slučaju da se oni smjeste na područje visoke ili ekstremne ranjivosti vodonosnika. Iako koncentracije u ovom trenutku nisu zabrinjavajuće, vrlo je bitno pratiti trend nitrata i poduzeti potrebne mjere da se taj trend promijeni i zaustavi naredno onečišćenje.

## 7. Zaključak

Krški vodonosnici bogati su podzemnom vodom vrlo visoke kakvoće. Budući da je poznato da su krški vodonosnici vrlo ranjivi zbog specifične hidrogeološke građe, može vrlo lako doći do onečišćenja podzemnih voda koje se može transportirati na velike udaljenosti. Poljoprivreda je jedan od najvećih izvora onečišćenja podzemnih voda zbog nekontrolirane upotrebe kemijskih sredstava (herbicida i pesticida) te prekomjerne upotrebe prirodnih i umjetnih gnojiva. Na krškom području takva djelatnost može biti iznimno opasna jer zbog hidroloških, hidrogeoloških i hidrogeokemijskih svojstava može vrlo brzo doći do onečišćenja podzemnih voda koje se može brzo proširiti na velike udaljenosti.

U radu je prikazano korištenje KAVA (Karst Aquifer Vulnerability Assessment) metode (Biondić et al., 2015, 2021) za procjenu prirodne ranjivosti krških vodonosnika na primjeru TPV Bokanjac-Poličnik. To područje ima specifičan zaravnjen teren, netipičan za ostatak Dinarskog krša te je područje na kojem je raširena poljoprivredna djelatnost. Zbog toga je procijenjen rizik od onečišćenja podzemne vode uslijed poljoprivrednih djelatnosti. KAVA metoda za procjenu ranjivosti koristi četiri osnovna parametra: utjecaj oborina (P), utjecaj infiltracije (I), utjecaj pokrovnih naslaga (O) i uvjete vodonosnika (A). Parametri su dobiveni na temelju svih dostupnih podataka dobivenih prethodnim istraživanjima. Pomoću tih parametara dobivena je karte ranjivosti vodonosnika za istraživano područje iz koje je vidljivo da se na području sliva ranjivost kreće od vrlo male pa sve do ekstremne ranjivosti. Vrlo mala ranjivost karakteristična je za područja prekrivena flišnim naslagama, odnosno nepropusna područja, dok je ekstremna ranjivost karakteristična za dobro vodopropusne vapnence bez pokrovnih naslaga tla i vegetacije. Utvrđeno je također da nagib terena i prostorna raspodjela oborina nemaju utjecaj na diferencijaciju klasa ranjivosti jer je njihova prostorna distribucija ujednačena.

Uz kartu ranjivosti u ovom području napravljena je i karta opasnosti te karta rizika koja predstavlja kombinaciju rizika i opasnosti, ali samo za poljoprivrednu proizvodnju. Iz karata opasnosti i rizika vidljivo je da veći dio područja ima vrlo malu opasnosti i vrlo mali rizik od utjecaja poljoprivredne proizvodnje. To se odnosi na sva ona područja na kojima nema poljoprivrednih površina ni stočnih farmi. Mali do umjeren rizik se nalazi na područjima gdje ima poljoprivredne proizvodnje, gdje se preklapaju poljoprivredne površine i stočne farme smještene na dobro vodopropusnim karbonatnim stijenama.

Iako je najveća ocijenjena klasa rizika na području sliva umjereni rizik, što samo po sebi nije zabrinjavajuće, potrebno je raditi dodatna istraživanja i pratiti trendove povećanja nitrata na tom području, da ne bi došlo do onečišćenja podzemnih voda. Područje TPV Bokanjac-Poličnik već ima izraženi problem sa zaslanjenjem podzemnih voda pod utjecajem mora. Porast količine nitrata u podzemnoj vodi dodatno bi ugrozio vodoopskrbu ovoga područja.

Također, važno je istaknuti da se dobiveni rizik odnosi samo na identifikaciju izvora opasnosti od poljoprivrede. Za ukupnu razinu rizika potrebno je odrediti sve izvore opasnosti prisutne na istraživanom području i klasificirati ih po unaprijed određenom protokolu (prikazanom i u ovom radu). Dobivena karta rizika vrijedi samo u ovoj situaciji prisutnih onečišćivača. U slučaju da se promijeni broj, vrsta ili lokacija izvora opasnosti potrebno je napraviti novu kartu opasnosti i na temelju nje novu kartu rizika. Dobivena karta rizika ne može poslužiti za bilo kakva buduća planiranja. Za to se koristi karta prirodne ranjivosti, koja je obilježje vodonosne sredine i ne ovisi o situaciji s prisutnim izvorima opasnosti. Stoga, može se zaključiti da karte ranjivosti vodonosnika mogu biti izrazito korisne kad se koriste u izradi prostornih planova i kod određivanja zaštite podzemnih voda, dok karte opasnosti i rizika dalje mogu poslužiti za definiranje mjera zaštite zaliha podzemnih voda te kod određivanja bitnih sanacijskih zahvata na istraživanom području.

## 8. POPIS LITERATURE

Biondić R., Biondić B., Rubinić J., Meaški H., Kapelj S. & Tepeš P. (2009): Ocjena stanja i rizika podzemnih voda na krškom području u Republici Hrvatskoj.- Arhiv Geotehničkog fakulteta, Sveučilište u Zagrebu, Varaždin.

Biondić, R., Meaški, H., Biondić, B. & Loborec, J. (2014): Vulnerability mapping of Novljanska Žrnovnica karstic spring catchment area in Croatia. Završno izvješće.- Arhiv Geotehničkog fakulteta, Sveučilište u Zagrebu, Varaždin.

Biondić, R., Meaški, H., Biondić, B. & Loborec, J. (2015): Karst Aquifers Vulnerability Assessment (KAVA) method applied to the Bakar Bay catchment area in Croatia. Završno izvješće.- Arhiv Geotehničkog fakulteta, Sveučilište u Zagrebu, Varaždin.

Biondić R., Rubinić J., Meaški H., Biondić B. & Radišić M. (2016): Definiranje trendova i ocjena stanja podzemnih voda na području krša u Hrvatskoj.- Arhiv Geotehničkog fakulteta, Sveučilište u Zagrebu, Varaždin.

Biondić R., Rubinić J., Meaški H., Biondić B. & Radišić M. (2019): Definiranje kriterija za utvrđivanje stanja tijela podzemne vode kod pojave zaslanjenja.- Arhiv Geotehničkog fakulteta, Sveučilište u Zagrebu, Varaždin.

Biondić, R., Meaški, H., Biondić, B. & Loborec, J. (2021): Karst Aquifer Vulnerability Assessment (KAVA) Method—A Novel GIS-Based Method for Deep Karst Aquifers.- Sustainability 2021, 13, 3325.

Loborec, J. (2013): Procjena rizika od onečišćenja podzemnih voda u kršu na području sliva izvora Jadra i Žrnovice.- Doktorska disertacija. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.

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

Majcen, Ž., Korolija, B., Sokač, B. & Nikler, L. (1969): List Osnovne geološke karte M 1:100.000 – list Zadar – Tumač i List karte.- Arhiv Hrvatski geološki institut, Zagreb.

Margat, J. (1968): Vulnérabilitié des nappes d'eau souterraine à la pollution.- BRGM Publication 68 SGL 198 HYD, Orléans

Terzić, J., Lukač-Reberski J. & Burić H. (2013): Hidrogeološki elaborat zona sanitarne zaštite crpilišta zadarskog vodovoda (Zdenci B-4 i B-5, Jezerce, Oko, Boljkovac, Golubinka) u sklopu hidrogeološkog sustava Bokanjac – Poličnik.- Arhiv Hrvatski geološki institut, Zagreb.

Vías, J. M., Andreo, B., Perles, M.J., Carrasco, F., Vadillo, I. & Jiménez, P. (2002): Preliminary proposal of a method for vulnerability mapping i carbonate aquifers.- In: Karst and Environment (F. Carrasco, J.J. Duran & B. Andreo, Eds.), 75-83.

Vías, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., Carrasco, F., Vadillo, I. & Jiménez, P. (2006): Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method.- Hydrogeology Journal, 14, 912-925.

Vidaček, Ž., Bogunović, M., Husnjak, S., Sraka, M., Bensa, A. & Petošić D. (2004): Tumač hidropedološke karte Republike Hrvatske, M 1:300 000.- Zavod za pedologiju, Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.

Vrba J. & Zaporozec A. (1994.): Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerabilty.- International Contributions to Hydrology. IAH, Hannover.

Wertz, H. & Hötzel, H. (2007): Groundwater risk intensity mapping in semi-arid regions using optical remote sensing data as an additional tool.- Hydrogeology Journal, Volume 15, Issue 6, pp.1031-1049.

Zaninović, K., Gajić-Čapka, M. & Perčec Tadić, M. (2008): Klimatski atlas Hrvatske (Climate atlas of Croatia) 1961-1990, 1971-2000.- Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ), Zagreb.

Zwahlen, F. (2004) (ed.): Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers.- European Commission, Directorate – General for Research, European research area: structural aspects – COST 620

## 9. Dodaci

### 9.1. Popis slika

Slika 1. Dio OGK, list Zadar s označenom granicom TPV Bokanjac – Poličnik (Biondić et al., 2019.).....	3
Slika 2. Pregledna hidrogeološka karta TPV Bokanjac – Poličnik (Biondić et al., 2019) .....	4
Slika 3. Vodocrpilište Bokanjac a) zdenac B – 4, b) zdenac B - 5 (Biondić et al., 2019.).....	5
Slika 4. a) Vodocrpilište Jezerce, b) vodocrpilište Boljkovac (Biondić et al., 2019.) .....	7
Slika 5. a) Izvorište Golubinka, b) vodocrpilište Oko (Biondić et al., 2019.).....	8
Slika 6. „porijeklo-put-cilj“ (prema: Zwahlen, 2004) .....	11
Slika 7. Osnovne Pi kategorije ( Biondić, et al. 2021) .....	16
Slika 8. Shematski prikaz određivanja područja sliva (Biondić, et. al, 2021) ....	17
Slika 9. Procjena rizika podzemne vode (Zwahlen, 2004) .....	28
Slika 10. Dijagram procjene rizika (Zwahlen, 2004).....	29
Slika 11. Digitalni model terena sliva Bokanjac - Poličnik.....	30
Slika 12. Prostorna raspodjela vrtača na slivu Bokanjac - Poličnik.....	31
Slika 13. Podfaktor $O_s$ određen za sliv Bokanjac - Poličnik.....	33
Slika 14. Podfaktor $O_{kf}$ određen za sliv Bokanjac - Poličnik .....	34
Slika 15. Parametar $O$ određen za sliv Bokanjac - Poličnik.....	34
Slika 16. Podfaktor $P_i$ određen za sliv Bokanjac – Poličnik .....	35
Slika 17. Podfaktor $P_e$ određen za sliv Bokanjac - Poličnik.....	35
Slika 18. Parametar $P$ određen za sliv Bokanjac - Poličnik .....	36
Slika 19. Podfaktor $I_{sv}$ određen za sliv Bokanjac - Poličnik.....	37
Slika 20. Podfaktor $I_{gwd}$ određen za sliv Bokanjac - Poličnik .....	37
Slika 21. Parametar $I$ određen za sliv Bokanjac - Poličnik .....	38
Slika 22. Podfaktor $A_{ng}$ određen za sliv Bokanjac - Poličnik.....	38
Slika 23. Karta ranjivosti vodonosnika. ....	39
Slika 24. Poljoprivredna zemljišta prema CLC2012 (Biondić et. al, 2019) .....	40
Slika 25. Položaj farmi.....	41

<b>Slika 26. Karta opasnosti sliva Bokanjac – Poličnik</b> .....	44
<b>Slika 27. Karta rizika sliva Bokanjac – Poličnik</b> .....	46

## **9.2. Popis tablica**

<b>Tablica 1. Koncesijske dozvole za crpljenje podzemnih voda na TPV Bokanjac – Poličnik (Biondić et al., 2019.)</b> .....	9
<b>Tablica 2. Vrijednosti podfaktora Os (Biondić et al., 2021)</b> .....	13
<b>Tablica 3. Vrijednosti podfaktora Okf</b> .....	14
<b>Tablica 4. Kategorija i legenda za O kartu</b> .....	14
<b>Tablica 5. Vrijednosti podfaktora Pe</b> .....	15
<b>Tablica 6. Vrijednosti podfaktora Pi</b> .....	15
<b>Tablica 7. Kategorija i legenda za P kartu</b> .....	17
<b>Tablica 8. Definicija područja slivova</b> .....	18
<b>Tablica 9. Kategorizacija parametara nagiba i vegetacije</b> .....	19
<b>Tablica 10. Vrijednosti podfaktora Isv ovisno o definiranim područjima sliva</b>	19
<b>Tablica 11. Vrijednosti podfaktora I<sub>gwd</sub></b> .....	20
<b>Tablica 12. Kategorija i legenda za I kartu</b> .....	21
<b>Tablica 13. Vrijednosti podfaktora A<sub>hg</sub></b> .....	21
<b>Tablica 14. Vrijednosti podfaktora A<sub>tt</sub></b> .....	22
<b>Tablica 15. Kategorija i legenda za A kartu</b> .....	23
<b>Tablica 16. Shema procjene ranjivosti resursa</b> .....	24
<b>Tablica 17. Shema procjene ranjivosti izvora</b> .....	24
<b>Tablica 18. Legenda karte ranjivosti resursa i izvora</b> .....	25
<b>Tablica 19. Sustav bodovanja težinskih vrijednosti prema COST 620 projektu (Zwahlen, 2004)</b> .....	27
<b>Tablica 20. Koeficijenti za izračun „uvjetnog grla“ (Biondić et al, 2019.)</b> .....	42
<b>Tablica 21. Težinska vrijednost opasnosti za poljoprivredna zemljišta</b> .....	43
<b>Tablica 22. Kategorije rizika</b> .....	45
<b>Tablica 23. Prosječne koncentracije nitrata u razdoblju od 2009. – 2013. (Biondić et al., 2016)</b> .....	47