

# Procjena rizika od onečišćenja podzemnih voda u kršu na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice

---

**Loborec, Jelena**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2013**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:812029>

*Rights / Prava:* [Attribution-NoDerivs 3.0 Unported/Imenovanje-Bez prerada 3.0](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-06**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Jelena Loborec

**PROCJENA RIZIKA OD ONEČIŠĆENJA  
PODZEMNIH VODA U KRŠU NA PODRUČJU  
SLIVA IZVORA JADRA I ŽRNOVNICE**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2013.



University of Zagreb

FACULTY OF MINING, GEOLOGY AND  
PETROLEUM ENGINEERING

Jelena Loborec

**RISK ASSESSMENT OF CONTAMINATION  
OF GROUNDWATER IN KARST  
IN THE RECHARGE AREA OF  
THE JADRO AND ŽRNOVNICA SPRINGS**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2013 .



Sveučilište u Zagrebu

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Jelena Loborec

**PROCJENA RIZIKA OD ONEČIŠĆENJA  
PODZEMNIH VODA U KRŠU NA PODRUČJU  
SLIVA IZVORA JADRA I ŽRNOVNICE**

DOKTORSKI RAD

Mentori:

Dr.sc. Sanja Kapelj,

izvanredna profesorica Geotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Dr. sc. Zoran Nakić,

izvanredni profesor Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Zagreb, 2013.





University of Zagreb

FACULTY OF MINING, GEOLOGY AND  
PETROLEUM ENGINEERING

Jelena Loborec

**RISK ASSESSMENT OF CONTAMINATION  
OF GROUNDWATER IN KARST  
IN THE RECHARGE AREA OF  
THE JADRO AND ŽRNOVNICA SPRINGS**

DOCTORAL THESIS

Supervisors:

Dr. Sc. Sanja Kapelj, associate professor

Faculty of Geotechnical Engineering, University of Zagreb

Dr. Sc. Zoran Nakić, associate professor

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

Zagreb, 2013

~ ZAHVALA ~

Željela bih zahvaliti svima koji su mi pomogli u izradi moje doktorskog disertacije. U prvom redu zahvalna sam svojoj mentorici prof. dr. sc. Sanji Kapelj koja mi je dala priliku da se iskazem, predložila temu, ustupila podatke i pružala mi podršku za čitavog trajanja mog doktorskog studija, te pomagala u svim fazama izrade ovoga rada. Zahvalna sam i svom drugom mentoru, prof. dr. sc. Zoranu Načiću na svakoj pomoći, sugestiji, diskusiji i konstruktivnom komentaru koji su u velikoj mjeri zaslužni za dovršetak ovoga rada. Hvala i ostalim članovima povjerenstva: prof.dr.sc. Ranku Biondiću, doc.dr.sc. Jeleni Parlov i prof.dr.sc. Andrei Bačani, koji su strpljivo čitali, pronalazili i ispravljali greške, te svojim savjetima, napomenama i preporukama doprinjeli kvaliteti ovog rada.

Posebnu zahvalnost iskazujem djelatnicima Geotehničkog fakulteta koji su me na različite načine bodrili i motivirali u toku izrade ove doktorskog disertacije. Posebno se to odnosi na moje drage kolege i prijatelje na radnom mjestu - Sašu, Hrvoja, Štefaniju i Draganu. Zahvaljujem na svakoj pomoći, bilo u ispravljanju grešaka, biranju detalja tehničkog oblikovanja, rješavanju mojih malih dvojbi ili jednostavno slušanju žalopojki, sve je jednako vrijedno. Ovdje bih rado zahvalila i našem dragom Predragu koji više nije s nama, ali čiji doprinos time nije umanjen jer uspomena na njega živi.

Veliko hvala mojim roditeljima, sestrama i njihovim obiteljima koji su vjerovali u mene od početka, pružali mi bezgraničnu potporu i servisnu podršku kad god je bilo potrebno. Hvala i mojim dragim prijateljima na strpljenju, razumijevanju i riječima podrške kojih nikad nije nedostajalo.

*Svima koji su mi pomogli, a ovdje nisu navedeni, od srca zahvaljujem!*

I na kraju, ali najvažnije, želim zahvaliti svojoj obitelji, mojim dečkima - suprugu Zoranu i sinovima Mihaelu i Borni. Bez njih ne bi ni bilo ovog rada jer su moja snaga i moja inspiracija. Hvala za neizmerno strpljenje, razumijevanje, pomoć i odricanje.. Ovaj rad posvećujem njima.

Jelena Loborec

## **SAŽETAK:**

U posljednje vrijeme sve se više ističe neprocjenjiva vrijednost zaliha podzemnih voda visoke kakvoće koje se nalaze u krškim područjima Republike Hrvatske. Zajedno s tim dolazi i spoznaja o iznimnoj ranjivosti krških vodonosnih sustava koji su zbog svojih karakterističnih obilježja jako podložni negativnim antropogenim utjecajima. U ovom radu predložen je pristup zaštite krškog vodonosnog sustava od istraživanja njegovih geoloških, hidrogeoloških i hidroloških značajki do korištenja rezultata tih istraživanja u multiparametarskim metodama procjene ranjivosti, opasnosti i rizika od onečišćenja podzemnih voda.

Područje istraživanja obuhvaćeno ovim radom je sliv izvora Jadra i Žrnovnice. Izvori Jadro i Žrnovnica predstavljaju nezamjenjive izvore pitke vode za stanovništvo grada Splita i njegove šire okolice, kao i osnovni uvjet socio-ekonomskog razvoja tog područja. Na temelju do sada provedenih istraživanja uočen je trend narušenja kakvoće izvorskih voda u uvjetima naglašenog gospodarskog razvoja, kao i neodgovarajuće zaštite izvorišta pitke vode. Koncept prirodne ranjivosti podzemnih voda temelji se na pretpostavci da fizikalna, kemijska i biološka svojstva okoliša mogu, do nekog stupnja, pridonijeti zaštiti podzemnih voda od antropogenih utjecaja. Analizom rizika od onečišćenja podzemnih voda izdvajaju se dijelovi sliva koji su zbog svojih prirodnih značajki ranjiviji na vanjske utjecaje i dijelovi sliva koji su već ugroženi zbog postojećih izvora onečišćenja. Istraživanje rizika provodi se u tri faze: izrada karte prirodne ranjivosti, zatim izrada karte opasnosti, te na kraju njihovo integriranje u kartu rizika podzemnih voda od različitih vrsta izvora onečišćenja. U ovom radu prirodna ranjivost procijenjena je pomoću četiri postojeće metode SINTACS, EPIK, PI i COP. Svaka od tih metoda modificirana je i testirana na temelju karakterističnih pokazatelja područja i na kraju je predložen najprihvatljiviji pristup procjene prirodne ranjivosti prilagođen dinarskom kršku Republike Hrvatske. Izrađena je karta klasificiranih opasnosti u slivu Jadra i Žrnovnice, te je na kraju predstavljena karta rizika od onečišćenja podzemnih voda u slivu Jadra i Žrnovnice. Sve tri karte predlaže se koristiti za upravljanje i zaštitu zaliha podzemnih voda na području sliva, pri određivanju prioriternih sanacijskih zahvata, te pri odlukama o korištenju i namjeni prostora.

## **KLJUČNE RIJEČI:**

Jadro i Žrnovnica, izvori pitke vode u kršu, prirodna ranjivost, izvor opasnosti (hazard), rizik od onečišćenja, zaštita podzemnih voda

## **EXTENDED ABSTRACT:**

It is well known that groundwater is the main source of potable water in the Republic of Croatia. Approximately half of the country's territory is covered by karstified carbonate rocks, the so-called Dinaric type of karst, which are famous by the priceless supplies high quality groundwater. This is why the utmost caution must be paid explicitly to groundwater protection in karst aquifers. Karstified carbonate rocks are typically covered by a thin, irregularly distributed soil layer, and are intersected by a multitude of interconnected fractures facilitating the rapid infiltration of surface water. Groundwater flows through the conduits and fissures with high velocity and with a relatively short retention time, allowing the quick and far-reaching spread of potential contamination from the surface. This is why karst aquifer systems are thought to be extremely vulnerable and easily threatened by each and every human activity. This doctoral thesis proposes approach to the protection of the karst aquifer system from exploration of its geological, hydrogeological and hydrological features to the use of these studies results in the methods of vulnerability, hazard and risk of groundwater contamination assessment.

Study area encompasses the catchment area of the Jadro and Žrnovnica springs of approximately 560 km<sup>2</sup> located in the wider hinterland of the city of Split. It is part of the Cetina river basin. The springs are located in the foothills of the Mosor and Kozjak Mts. in the contact zone between permeable carbonate sedimentary rocks and the coastal flysch belt. Jadro is situated at an altitude of 35 m a.s.l., while Žrnovnica lies at the altitude of 90 m a.s.l. According to the available hydrological data, the minimum discharge of the Jadro spring ranges between 3.60 m<sup>3</sup>/s (August 1995) and 3.90 m<sup>3</sup>/s (September 1997, August and September 2003). Žrnovnica joins several smaller springs upwelling in the broader area. The minimum measured discharge of this spring area is up to 250 l/s (September 1993) while the maximum discharge is up to 19.1 m<sup>3</sup>/s (December 2004). The Jadro spring is used for the water supply of Split, surrounding settlements and the towns of Solin, Kaštela and Trogir. Žrnovnica is used for the water supply of the village of Žrnovnica and irrigation of agricultural areas. The catchment area is predominantly composed of carbonate rocks, limestone and dolomite, and flysch sediments, while other rocks occur more rarely. Three quarters of the catchment area are composed of permeable carbonate rocks and because of that it is even more difficult to protect groundwater resources.

Jadro and Žrnovnica springs are irreplaceable sources of drinking water for the population of the city of Split and its surroundings as well as the basic requirement of socio-economic development of the area. Data from an earlier conducted researches shows an increasing trend in the quantity of a number of contaminants in the spring water due to economic expansion in the catchment area and lack of appropriate protection of drinking water sources. The concept of groundwater intrinsic vulnerability is based on the premise that the physical, chemical and biological properties of the environment provide a certain degree of protection to the groundwater from human influence. Risk assessment of groundwater contamination identifies parts of the catchment area that are, because of its natural features, more vulnerable to external influences than those parts of the basin that are already at risk because of existing contamination sources. Risk assessment is carried out in three phases: assessment of intrinsic vulnerability, hazard mapping and integrateing these two maps into the groundwater risk map.

In this paper, intrinsic vulnerability was assessed by four methods: SINTACS, EPIK, PI i COP. Each of these methods were modified and tested based on the characteristic parameters of the study area. Results of the applied methods (corresponding vulnerability maps) were compared and finally it is proposed the most suitable approach for evaluation intrinsic vulnerability adjusted to Croatian Dinaric karst. Furthermore, a map of classified hazards in the catchment of Jadro and Žrnovnica springs was created. The final result of this analysis is the risk of groundwater contamination map in the catchment area of Jadro and Žrnovnica springs. All three maps are utilized primarily for groundwater management and protection in the particular area and as an irreplaceable background for decision making in management and land use.

**KEYWORDS:**

Jadro and Žrnovnica, karst springs of potable water, intrinsic vulnerability, contamination source (hazard), contamination risk, groundwater protection

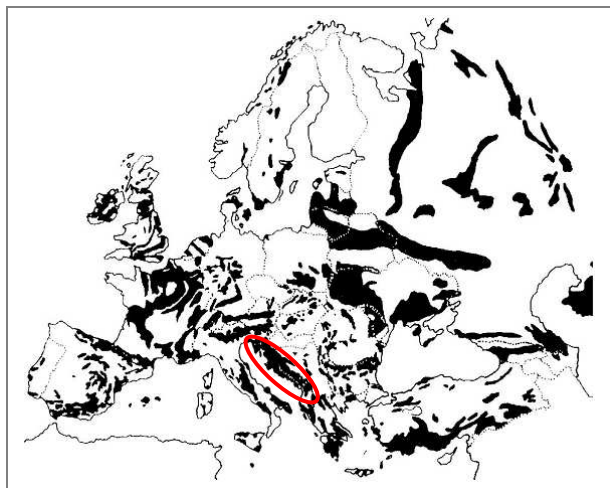
# SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
2. Pregled dosadašnjih istraživanja sliva izvora Jadra i Žrnovnice.....	4
2.1. Geološka i hidrogeološka istraživanja .....	4
2.2. Određivanje granice sliva.....	6
2.3. Istraživanja hidroloških značajki sliva .....	7
2.4. Hidrokemijska i izotopna istraživanja.....	8
3. Geografske i klimatološke značajke istraživnog područja .....	9
4. Geološke značajke istraživnog područja .....	12
4.1. Geološka građa terena .....	12
4.1.1. Perm .....	12
4.1.2. Trijas .....	13
4.1.3. Jura .....	14
4.1.4. Kreda .....	15
4.1.5. Paleogen .....	16
4.1.6. Neogen .....	17
4.1.7. Kvartar.....	18
4.2. Strukturni sklop i tektonika .....	19
4.3. Geomorfološka obilježja sliva .....	23
5. Hidrogeološki odnosi i kakvoća izvorske vode u slivu.....	25
5.1. Hidrogeološka obilježja stijena .....	25
5.2. Hidrogeološka funkcija stijena.....	28
5.3. Provedena trasiranja i ustanovljene podzemne vodne veze .....	29
5.4. Vodne pojave na području sliva .....	33
5.5. Kakvoća vode.....	36
6. Procjena prirodne ranjivosti, opasnosti i rizika podzemne vode .....	42
6.1. Povijesni pregled .....	42
6.2. Osnovni koncept Europskog pristupa .....	44
6.3. Dosadašnja istraživanja ranjivosti, opasnosti i rizika .....	46
6.4. Osnove SINTACS metode .....	49
6.5. Osnove EPIK metode .....	57
6.6. Osnove PI metode .....	62
6.7. Osnove COP metode .....	67

6.8. Teorijska osnova analize opasnosti za podzemne vode .....	73
6.9. Pojam rizika, postupak procjene rizika podzemnih voda .....	78
6.9.1. Postupak procjene intenziteta rizika .....	80
6.9.2. Postupak procjene osjetljivosti na rizik .....	81
6.9.3. Postupak procjene ukupnog rizika od onečišćenja podzemnih voda .....	83
7. Analiza prirodne ranjivosti podzemnih voda u slivu Jadra i Žrnovnice.....	84
7.1. Izrada podloga za ocjenu prirodne ranjivosti vodonosnika .....	84
7.1.1. Prostorno modeliranje .....	85
7.1.2. Prostorno preklapanje.....	89
7.1.3. Priprema podataka o tlu i vegetaciji.....	91
7.1.4. Priprema podataka o oborinama .....	95
7.1.5. Modeliranje razina podzemne vode .....	96
7.2. Ocjena prirodne ranjivosti vodonosnika SINTACS metodom.....	98
7.2.1. Određivanje SINTACS parametara za sliv Jadra i Žrnovnice .....	98
7.2.2. Analiza ranjivosti vodonosnika pomoću metode SINTACS .....	106
7.3. Ocjena prirodne ranjivosti vodonosnika EPIK metodom .....	111
7.4. Ocjena prirodne ranjivosti vodonosnika PI metodom.....	118
7.5. Ocjena prirodne ranjivosti vodonosnika COP metodom.....	130
7.6. Usporedba rezultata provedenih analiza ranjivosti .....	140
7.7. Prijedlog hrvatskog pristupa procjene prirodne ranjivosti u kršu .....	144
7.8. Validacija dobivene karte ranjivosti.....	153
8. Analiza opasnosti, izrada karata potencijalnih onečišćivača.....	156
8.1. Identifikacija izvora opasnosti za kakvoću podzemne vode u slivu .....	157
8.1.1. Onečišćivači prema vrsti i sastavu ispuštene tvari .....	157
8.1.2. Onečišćivači prema gospodarskim djelatnostima .....	159
8.2. Izrada karata neklasificirane i klasificirane opasnosti .....	168
9. Analiza rizika od onečišćenja podzemnih voda u slivu .....	171
10. Zaključak.....	176
11. Popis literature .....	181

## 1. Uvod

Podzemna voda je glavni izvor pitke vode u mnogim dijelovima svijeta, pa tako i u Hrvatskoj gdje se 90% javne vodoopskrbe ostvaruje preko zaliha podzemne vode. Kako u Hrvatskoj skoro polovicu državnog teritorija pokrivaju okršene karbonatne stijene, veliku pažnju treba posvetiti upravo krškim vodonosnicima u kojima su podzemne vode iznimne kakvoće i dovoljnih količina, iako su količine neravnomjerno raspodjeljene tijekom hidrološke godine (*Biondić et al., 1998*). Krški vodonosnici su u posljednje vrijeme područje interesa mnogih znanstvenih i stručnih istraživanja, jer je prepoznata njihova vrijednost za različite aspekte korištenja za ljudsku upotrebu, kao i izrazita osjetljivost na antropogene utjecaje.



Slika 1.1. Rasprostranjenost karbonatnih stijena u Europi s posebno označenim područjem krša u Hrvatskoj (prema: *Zwahlen, 2004*)

*Božičević (1992, 2000)*, vrlo lijepo, pomalo umjetnički, opisuje i dočarava sve posebnosti krških reljefnih formi na području Republike Hrvatske, oblikovanih radom vode na kamenjoj karbonatnoj podlozi nazvanoj "dinarski krš", koji je usko vezan uz prostrano planinsko područje Dinarida. Tom prilikom ističe karakteristične izmjene blagih valovitih zelenih brežuljaka (Lika) i visokih, gustih šuma (Gorski kotar), s bogatstvom površinskih i podzemnih voda i svih prirodnih ljepota vezanim uz to. Krško je područje bez stalnih površinskih vodenih tokova, a opet je toliko bogato različitim formama, oblicima i značajkama. Upravo takvom kršu pripadaju vodonosnici proučavani u ovom radu.



Karbonatne okršene stijene zbog svojih karakterističnih obilježja zahtjevaju specifičan pristup u upravljanju i zaštiti vodnih resursa. Krški vodonosnici obično imaju tanak sloj tla, nekontinuiranog rasprostiranja na površini, i mnoštvo međusobno povezanih pukotina što omogućava brzu infiltraciju vode u podzemlje. U podzemlju voda teče kroz kanale i pukotine velikom brzinom i zadržava se kratko vrijeme. Sve to omogućuje širenje potencijalnog onečišćenja s površine u kratkom vremenu na velike udaljenosti. Zato se krški vodonosni sustavi smatraju iznimno ranjivim područjima i gotovo svaka ljudska aktivnost u određenoj ih mjeri ugrožava.

Za ocjenu u kojoj mjeri je neki hidrogeološki sustav u kršu ranjiv, a u kojoj već ugrožen, nužno je provesti složena istraživanja svih dijelova hidrogeološke cjeline. Pristup koji je predstavljen u ovom radu omogućuje analizu podataka dobivenih različitim hidrogeološkim metodama istraživanja, prilagođenim tipičnim obilježjima istraživanog područja. Ova složena analiza prikazana je postupno kroz pojedine segmente koji obuhvaćaju: procjenu prirodne ranjivosti, procjenu opasnosti koja prijeti podzemnoj vodi, te na kraju procjenu rizika od onečišćenja podzemnih voda uzrokovanog ljudskim djelovanjem. Konačni rezultat te složene analize predstavlja karta rizika za podzemne vode od različitih izvora onečišćenja dobivena integriranjem karte prirodne ranjivosti i karte opasnosti (hazarda). Kartom ranjivosti izdvajaju se dijelovi sliva, koji su prirodnim obilježjima manje ili više zaštićeni od potencijalnog štetnog djelovanja s površine terena, a kartom rizika se izdvajaju i područja sliva s povećanim rizikom od onečišćenja za podzemne vode uslijed već postojećih izvora opasnosti.

Područje ovog istraživanja obuhvaća slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice. Ono je smješteno u središnjem dijelu Dalmacije, u širem zaleđu grada Splita, na obroncima Mosora i Kozjaka, odvojeno od obalnog dijela (srednja Dalmatinska Zagora). Izvor Jadro glavni je vodoopskrbni objekt grada Splita i okolice te kao takav predstavlja vodni objekt od neizmjerne važnosti. *Bonnacci (1987)* napominje da izvor Jadro opskrbljuje vodom ovaj kraj još od rimskog doba (150 g. pr. Kr.). Grad Split i njegova šira okolica, prema posljednjem popisu stanovništva, broji preko 200 000 stanovnika (*DZS, 2011*), najveći je grad Dalmacije, drugi po veličini grad u Hrvatskoj, druga po veličini hrvatska luka i treća luka na Sredozemlju po broju putnika ([www.split.hr](http://www.split.hr)). Sve je izraženija i njegova uloga kao značajnog turističkog središta, što iziskuje dodatne potrebe za kvalitetnom pitkom vodom u razdoblju kad su njene zalihe najmanje (ljetni mjeseci). I izvor Žrnovnice je zahvaćen za vodoopskrbu istoimenog mjesta i za potrebe navodnjavanja okolnih poljoprivrednih površina, a planira ga se uključiti u

vodoopskrbni sustav grada Splita, posebno u sušnom ljetnom periodu ([www.vodovod.st.hr](http://www.vodovod.st.hr)). Dosadašnja hidrogeološka istraživanja ukazala su da se slivno područje ova dva izvora u velikoj mjeri preklapa i uvelike ovisi o hidrološkim prilikama. Područje sliva izgrađeno je uglavnom od propusnih karbonatnih stijena, prisutno je mnoštvo krških geomorfoloških oblika, utvrđene su velike prividne brzine podzemnih tokova, kao i povezanost dijelova sliva na velikim udaljenostima, što znatno otežava zaštitu podzemnih voda.

Na temelju rezultata do sada provedenih istraživanja, uočena je sve veća ugroženost i trend pogoršanja kakvoće voda izvora Jadra i Žrnovnice u uvjetima naglašenog razvoja kakvi trenutno vladaju na određenim dijelovima slivnog područja. Gradnjom Jadranske autoceste i prateće infrastrukture ovo je područje postalo prometno povezano s ostalim regijama, što uvjetuje veće antropogeno opterećenje na vodne zalihe. Osim toga, uz širenje naselja veliki problem predstavlja i nepostojanje kanalizacijskih sustava (zasad samo Dugopolje i Klis imaju sustave javne odvodnje otpadnih voda), te izgradnja proizvodno-poslovnih zona na nekoliko područja u slivu (Dugopolje, Dicmo, Muć, Kukuzovac-Sinj). Iako takve aktivnosti djeluju pozitivno na razvoj ovog kraja i uvjete življenja za okolno stanovništvo, one dovode do veće razine opasnosti za kakvoću vode promatranih izvora od dosadašnje.

Važan problem također predstavlja i nepostojanje odgovarajućih zona zaštite izvorišta Jadra i Žrnovnice. Naime, postojeće zone zaštite datiraju još iz 1988. godine, stoga ne postoji pravni okvir provođenja aktivne i pasivne zaštite pitke vode ovog sliva. Već nekoliko godina postoji prijedlog novih zona zaštite usklađenih s Pravilnikom o utvrđivanju zona zaštite izvorišta pitke vode (*NN, 2011; NN 2013a*), no one još uvijek službeno nisu prihvaćene. Zbog svega toga, sve je jače izražena potreba za utvrđivanjem dijelova sliva koji su ranjiviji i podložniji antropogenom utjecaju, kako bi se na taj način olakšalo gospodarenje prostorom, tj. odvojili dijelovi s manjim stupnjem ranjivosti pogodni za razvoj područja, a ranjiviji dijelovi odgovarajuće zaštitili. Pošto su podzemne vode sliva neprocjenjiva prirodna i gospodarska vrijednost za Split i okolnicu, potrebno ih je učinkovito štititi, uz istovremeni razvoj područja.

Iz svega navedenog proizašla je temeljna hipoteza ovog rada: postojeći modeli procjene prirodne ranjivosti podzemnih voda samo su u određenoj mjeri primjenjivi na vodonosnicima u području s posebnim obilježjima krša Dinarida. Cilj ovog rada je ustanoviti u kojoj mjeri i na koji način je potrebno postojeće modele prilagoditi karakterističnim hidrogeološkim i hidrološkim obilježjima naših krških terena.

## 2. Pregled dosadašnjih istraživanja sliva izvora Jadra i Žrnovnice

Širi prostor sliva izvora Jadra i Žrnovnice dosad je pretežno istraživana na razini klasičnog geološkog i hidrogeološkog pristupa, o čemu svjedoči povećani broj izrađenih regionalnih studija i izvješća za različite potrebe te objavljenih znanstvenih i stručnih radova. U razdoblju od šezdesetih do devedesetih godina prošlog stoljeća, istraživanja su bila usmjerena uglavnom na pronalaženje novih zaliha podzemnih voda. Novija hidrogeološka istraživanja provedena od 2000. godine do danas bila su usmjerena najvećim dijelom na istraživanje različitih aspekata zaštite podzemnih voda. Najviše se to odnosi na studije utjecaja na okoliš, s obzirom na brojne gospodarske objekte i prometnu infrastrukturu koji su izgrađeni ili se planiraju izgraditi na području sliva, te kroz izradu Studije upravljanja vodama sliva Jadra i Žrnovnice, u četiri faze, u razdoblju od 2005. do 2012. godine (*Kapelj et al., 2006, 2008, 2009, 2012*).

### 2.1. Geološka i hidrogeološka istraživanja

Najstarije studije datiraju iz šezdesetih godina prošlog stoljeća, a vezane su uz izradu osnovne geološke, hidrogeološke i inženjersko-geološke karte ovog područja (*Magdalenić & Fritz, 1959; Fritz & Bahun, 1960; Komatina, 1961, 1975; Fritz, 1979a, 1981; Fritz et al., 1984, 1988; Fritz & Kapelj, 1998*) i u njima je naglasak stavljen na definiranje razvodnice između pojedinih slivova, te priljevnog područja pojedinih izvora u ovom području. Nakon toga veliki broj izrađenih studija i publiciranih znanstvenih radova bavio se problematikom istraživanja pojedinačnih perspektivnih vodonosnih područja kao i istraživanja utjecaja mora na količinu i kvalitetu voda priobalnih izvora. Iako je istraživano više izvora i vrulja Kaštelanskog zaljeva, to se posebno odnosi na bočati izvor Pantan kod Trogira čiji sliv graniči sa slivom Jadra i Žrnovnice, pa su u sklopu tih istraživanja opisani hidrogeološki odnosi tog područja kao i položaj razvodnice (*Fritz, 1970; Bagarić, 1973; Fritz et al., 1990; Fritz et al., 1991; Fritz & Bahun, 1997*).

Nakon toga glavnina istraživanja bila je vezana uz izgradnju brojnih poslovnih, prometnih i ostalih gospodarskih objekata u promatranom slivu. Ovdje je u prvom redu potrebno istaknuti istraživanja provedena za potrebe izgradnje Jadranske autoceste koja prolazi zaštitnim zonama izvora Jadra i Žrnovnice. Za potrebe projektiranja odvodnje oborinskih voda izrađeno je više studija utjecaja na podzemne vode s prijedlozima dispozicije, pročišćavanja i upoja

otpadnih voda s prometnice. Uz svaki je priložen i prijedlog monitoringa za ispitivanje kakvoće okolnog tla, otpadnih voda u separatorima ulja, materijala i vode u lagunama i izvorskim vodama (*Fritz et al., 1992; Fritz, 1994; Kapelj, 1997; Kapelj et al., 1999, 2001, 2004b*).

Nadalje, u zapadnom dijelu sliva Jadra i Žrnovnice provedena su složena geološka istraživanja na lokaciji "Kladnjice" – Lećevica za potrebe izgradnje "Centra za gospodaranje komunalnim i neopasnim otpadom Splitsko-dalmatinske županije u Lećevici", nakon kojih je lokacija Kladnjice proglašena pogodnom za izgradnju Centra, uz uvažavanje svih mjera zaštite, poglavito uz neophodnu izvedbu potpunog izoliranja odlagališta od podzemlja (*Oluić et al., 2004.; Oluić et al., 2005*). Nakon toga, izrađena je Studija o utjecaju na okoliš Centra za gospodarenje otpadom Splitsko-dalmatinske županije u Lećevici (*Fundurulja et al., 2005*), a hidrogeološka istraživanja predmetne lokacije Centra za gospodarenje otpadom nastavljena su i tijekom 2006. godine od strane Hrvatskog geološkog instituta (*Korbar et al., 2006*).

Najopsežniji hidrogeološki radovi, koji su obuhvaćali područje cijelog sliva izvora Jadra i Žrnovnice s izradom hidrogeološkog informacijskog sustava, bili su načinjeni za potrebe Vodovoda i kanalizacije, iz Splita. Svi do tada raspoloživi podaci, kao i rezultati provedenih istraživanja, prikazani su u digitalnom obliku na podlozi mjerila 1: 25 000 i na temelju te baze podataka izrađena je kompilacijska hidrogeološka karta područja sliva mjerila 1:100 000, uz odgovarajući tumač (*Kapelj et al., 2001, 2002*).

Od 2005. godine traje sustavno istraživanje sliva, kroz izradu Studije upravljanja vodama sliva Jadra i Žrnovnice, koja se provodila u nekoliko faza. Prva faza studijsko-istraživačkih radova obuhvaćala je: istraživanja geoloških i hidrogeoloških obilježja područja sliva tj. geomorfološku analizu stupnja okršenosti, reinterpetaciju geološke karte s litofacijalnom i strukturnom razradom, izradu hidrogeološke karte dijela sliva i izradu detaljnih karata sliva za lociranje istražno-opažaćkih bušotina (*Kapelj et al., 2006*). U drugoj fazi istraživanja proučavan je odnos sliva sa susjednim slivovima, kroz definiranje prostornog i vremenskog položaja razvodnice, posebno zapadne i istočne granice sliva. Vršena su hidrogeokemijska i izotopna istraživanja, te je izrađena mreža dodatnih meteoroloških postaja. Također je uspostavljen stalni nadzorni monitoring kakvoće voda, u skladu s preporukama Okvirne direktive o vodama Europske unije (*2000/60/EZ*). Sliv Jadra i Žrnovnice je prvi sliv u Republici Hrvatskoj u kome je uspostavljen takav vid praćenja podzemnih voda, što omogućava dobivanje pravovremenih informacija o količini i kakvoći podzemnih voda važnih za vodoopskrbu grada

Splita i šire okolice (*Kapelj et al., 2008*). U trećoj i četvrtoj fazi istraživanja naglasak je stavljen na modeliranje ranjivosti podzemnih voda kao i na analizu rizika od antropogenih utjecaja u prostoru sliva (*Kapelj et al., 2009, 2012*).

## 2.2. Određivanje granice sliva

Određivanje granice sliva velikih krških slivova zahtijeva složena i detaljna istraživanja. Razgraničenje sliva izvora Jadra i Žrnovnice prema susjednim slivovima ima različit stupanj pouzdanosti zbog nedovoljnog poznavanja hidrogeološkog karaktera razvodnice. Može se reći da je razvodnica s visokim stupnjem pouzdanosti određena samo na sjevernoj i južnoj granici sliva gdje ona ima pretežito topografski karakter. Sjeverno od Mučkog polja razvodnica prolazi nepropusnim trijaskim naslagama i sve oborine koje padnu na trijasko naslage stvaraju više povremenih bujičnih vodotoka koji na kontaktu s propusnim karbonatnim stijenama poniru u podzemlje. Južna granica sliva definirana je navlačnim kontaktom propusnog terena Zagore i nepropusnog priobalnog područja izgrađenog od naslaga fliša. Samo na dijelu od Klisa do Žrnovnice, gdje je taj kontakt poremećen navlačnom tektonikom i poprečnim rasjedom, granica ima karakter podzemne linijske razvodnice. Zapadna granica sliva određena je na osnovi manje značajnih hidrogeoloških pokazatelja, kao što su pružanje struktura, rasjeda, pukotina i morfoloških cjelina. Prije se pretpostavljalo da se zapadna granica sliva proteže sve do nepropusnih naslaga u Petrovu polju (*Fritz, 1979b; Komatina, 1975*). Trasiranjem podzemnih voda u blizini Petrova polja, u ponor Čulina mlinica nedaleko Kljaka 1980. godine, ustanovljeno je da iz tog područja krajem sušnog razdoblja podzemne vode otječu prema izvorima u slivu Krke, Torku i Jarugi. Međutim, u kišnom razdoblju moguće je da dio vode podzemno teče prema Gizdavcu i dalje prema Jadru i Žrnovnici. Nastavak zapadne granice sliva prema jugu ima karakter podzemne zonarne razvodnice. Trasiranje iz prirodne jame na području Kladnjice dijelom je riješilo neke dvojbe barem za manji dio sliva, kada se boja pojavila na izvoru Jadra, dva mjeseca nakon ubacivanja trasera (*Korbar et al., 2006*). Nedostatak tog podatka je što je ponovno trasiranje obavljeno u hidrološki nepovoljnom razdoblju za pouzdanu odredbu zapadne granice sliva. Istočna granica sliva određena je na zadovoljavajućoj razini do područja doline rijeke Cetine. Za potrebe izgradnje HE Đale provedena su vrlo opsežna istraživanja (*Magdalenić, 1971*). Na osnovi dobivenih podataka zaključeno je da u ovom dijelu terena granica sliva također ima karakter podzemne zonarne razvodnice. Otvorena pitanja u ovom dijelu sliva odnose se na određivanje udjela

miješanja vode iz susjednog sliva rijeke Cetine. Trasiranjem iz ponora Ponikva 1992. godine dokazana je veza ovog dijela terena s izvorima Jadro i Žrnovnica te je korigirana istočna granica sliva. Na temelju rezultata provedenih hidroloških mjerenja i obrade podataka *Bonacci & Roje-Bonacci (1996)* očekuju prihranjivanje izvora Jadra i Žrnovnice iz smjera Cetine. Trasiranjem ponora u istočnom dijelu Biskog polja 2010. godine također je potvrđena podzemna vodna veza i granica sliva je ostala na rijeci Cetini.

### 2.3. Istraživanja hidroloških značajki sliva

Hidrološkim istraživanjima i analizom bilance voda određivano je područje prihranjivanja izvora Jadra i Žrnovnice. Rezultati tako provedenih istraživanja često su se dosta razlikovali, pa je prema različitim autorima područje sliva zauzimalo površinu između 300 i 500 km<sup>2</sup>. Prema *Bonacciju (1978)* procijenjena hidrološko-hidrogeološka površina sliva Jadra i Žrnovnice iznosi između 250 i 274 km<sup>2</sup>. Prema istom autoru na površinu sliva padne godišnje prosječno 1400 mm oborina, od čega 75% u razdoblju od rujna do ožujka. Međutim, hidrogeološka procjena veličine sliva koju su dali *Fritz et al. (1988)* nešto je veća i iznosi između 310 i 370 km<sup>2</sup>. Kasnije je *Bonacci (1987)* izračunao da hidrološki sliv Jadra iznosi 260 km<sup>2</sup>, a Žrnovnice 40 km<sup>2</sup>.

Nakon izgradnje niza akumulacija na rijeci Cetini: Peruča – 1960., Prančevići – 1962., Buško Blato – 1973. i Đale – 1989., prirodni uvjeti istjecanja na izvorima Jadra i Žrnovnice su se izmijenili tj. uočeno je povećanje minimalnih protoka u sušnom razdoblju. Posebno se to odnosi na režim istjecanja izvora Žrnovnice koji je prije toga, tijekom hidroloških minimuma, gotovo redovito presušivao. Konkretno procjene mogućih promjena hidrološkog režima izvora Jadra, do kojih je došlo nakon izgradnje akumulacije Prančevići, Buškog Blata i Đale dao je *Bonacci (1987)*. Navodi egzaktno podatke o srednjem protoku na postaji Vidović most, koja je iznosila 5,4 m<sup>3</sup>/s prije izgradnje hidroenergetskog sustava na slivu Cetine, dok je nakon izgradnje srednja protoka povećana na 8,8 m<sup>3</sup>/s.

*Bonacci & Roje-Bonacci (1996)* utvrđuju blagi porast minimalnih, srednjih i maksimalnih vodostaja Jadra na mjernom profilu kod Vidović mosta u razdoblju od 1950. do 1985. godine. Nažalost, za isto razdoblje ne postoje opažanja na Žrnovnici. Srednje mjesečne protoke za razdoblje opažanja od jedne godine (1981. godina) iznosile su od 25,9 m<sup>3</sup>/s za izvor Jadra i

5,9 m<sup>3</sup>/s za izvor Žrnovnice. Autori pretpostavljaju da se tijekom razdoblja viših razina podzemnih voda dio voda iz sliva Jadra prelijeva u sliv Žrnovnice preko neke geološke barijere.

## 2.4. Hidrokemijska i izotopna istraživanja

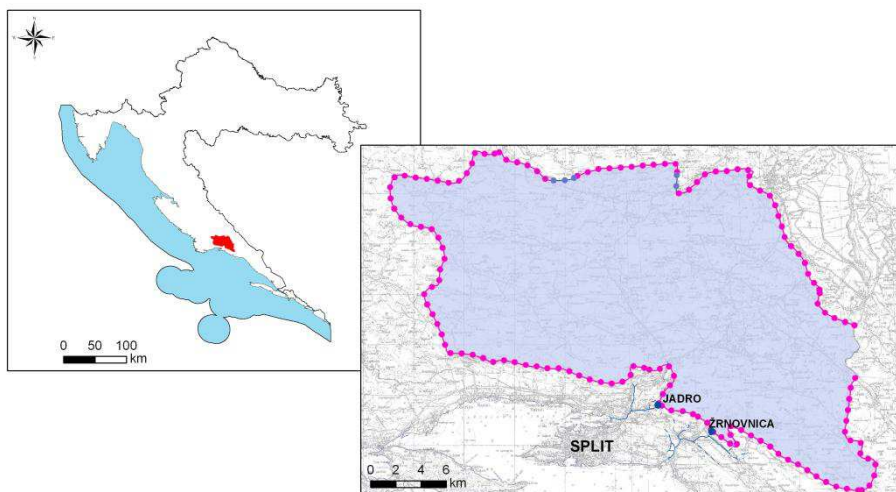
U svrhu određivanja pretežitog mjesta napajanja izvora i odjeljivanja slivova, tijekom dvije godine u mjesečnim intervalima prikupljeni su uzorci izvorskih voda Jadra i Žrnovnice. Istovremeno su uzorkovane i vode iz devet izvora susjednih slivova rijeke Krke, Cetine i priobalnog bočatog izvora Pantan. Prikupljeni su i kompozitni mjesečni uzorci na meteorološkoj stanici Dugopolje. Određivan je hidrokemijski sastav u uzorkovanoj vodi kao i sastav stabilnih izotopa. Rezultati provedenih analiza ukazali su da vode Jadra i Žrnovnice, te vode izvora Studenci, Ruda i Grab (sliv Cetine) pripadaju Ca-HCO<sub>3</sub> do CaMg-HCO<sub>3</sub> hidrogeokemijskom facijesu vode, dok vode izvora Jaruge (sliv Krke) i Pantana odstupaju od tog facijesa. Jaruga u svom sastavu ima povišene koncentracije sulfata, zbog naslaga gipsa i anhidrita u stijenama vodonosnika, a Pantan zbog utjecaja mora ima naglašenu natrijsko-klornu komponentu.

Izotopnim istraživanjima moguće je pomoću omjera stabilnih izotopa kisika i vodika utvrditi područje prihranjivanja vodonosnika, porijeklo voda kao i vrijeme zadržavanja voda u vodonosniku. U ovom slučaju, rezultati provedenih izotopnih istraživanja na prikupljenim uzorcima vode ukazali su na veliku sličnost sadržaja vodikovih i kisikovih izotopa između voda iz Jadra i Žrnovnice i voda iz izvora Ruda i Grab. Na taj način utvrđeno je da navedeni izvori dijele isto priljevno područje, odnosno da sliv izvora Jadra i Žrnovnice čini dio sliva rijeke Cetine, a kako izvori Ruda i Grab imaju veliki dio sliva u susjednoj državi Republici Bosni i Hercegovini, sliv Jadra i Žrnovnice može se smatrati prekograničnim vodonosnikom (*Kapelj et al., 2011*).

Rezultati provedenih izotopnih istraživanja također su ukazali na postojanje dvije komponente podzemnog toka: kratko-zadržavajuće i dugo-zadržavajuće (*Kapelj et al., 2009*).

### 3. Geografske i klimatološke značajke istraživanog područja

Područje istraživanja obuhvaća slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice. Ono je smješteno u području srednje Dalmacije, u širem zaleđu grada Splita, između Kaštelanskog zaljeva i Trogira te niza priobalnih mjesta, duž obronaka Mosora od Stobreča, Podstrane do gotovo samog ušća Cetine u Omišu (slika 3.1).



Slika 3.1. Položaj sliva izvora Jadra i Žrnovnice

Sliv se gotovo cijelom svojom površinom nalazi u Splitsko – dalmatinskoj županiji (samo cca. 2% ili 12 km<sup>2</sup> ukupne površine zadire u susjednu Šibensko – kninsku županiju) i to u njenom zaobalju ili Zagori, a planinskim masivima Mosora i Kozjaka odvojen je od priobalnog područja. Izvori Jadro i Žrnovnica smješteni su u podnožju planina Mosor (1300 m n.m.) i Kozjak (600 m n.m.), u zoni dodira karbonatnih naslaga splitske Zagore i obalnog fliškog pojasa. Izvor Jadro se nalazi na oko 35, a izvor Žrnovnica na 90 metara iznad razine mora.

Klima ovog područja spada u jadranski tip mediteranske klime čije su osobine suha i vruća ljeta te blage i vlažne zime. Udaljavanjem od obalnog područja srednje godišnje temperature opadaju (u jesenskim i zimskim mjesecima često padaju ispod nule), a povećava se ukupna količina oborina. Razlog tome su planinske barijere koje sprječavaju značajniji utjecaj mediteranske klime, tako da se na području Dalmatinske zagore mogu uočiti elementi kontinentalne klime (PPSDŽ, 2002).



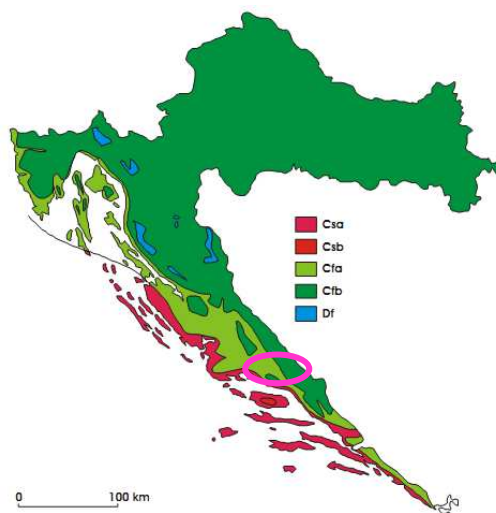
*Penzar et al. (2001)* u svojoj knjizi *Vrijeme i klima hrvatskog Jadrana* ističu glavne značajke jadranske klime: "obilje sunca i vjetra i ljetna oskudica pitke vode". Drugim riječima, istaknuto je da je Jadran najvedriji dio Republike Hrvatske, kojim dominiraju karakteristični vjetrovi i da ima specifičnu raspodjelu oborina prema kojoj su ljeta sušna, a najviše oborina padne upravo u studenom i prosincu "i mnoga su krška polja u tom dijelu godine pretvorena u jezera".

Najčešća podjela klima je ona prema Köppenovoj klasifikaciji po kojoj se klime ne dijele prema kopnenosti i maritimnosti, već prema srednjim mjesečnim temperaturama i količini oborina. Prva takva raspodjela za područje Hrvatske napravljena je još 1942. godine, (*Šegota & Filipčić, 1996; Šegota & Filipčić, 2003*). Na području sliva Jadrana i Žrnovnice utvrđena su tri tipa klime:

- C<sub>sa</sub> – sredozemna klima s vrućim ljetom (samo priobalni pojas);
- C<sub>fa</sub> – umjereno topla vlažna klima s vrućim ljetom (ostatak sliva);
- C<sub>fb</sub> – umjereno topla vlažna klima s toplim ljetom (područje Mosora).

(Objašnjenje oznaka: "C" znači da se radi o umjereno toplim kišnim klimama gdje srednja temperatura najhladnijeg mjeseca nije manja od -3°C, a barem jedan mjesec ima srednju temperaturu višu od 10°C. Indeks "s" znači da je sušno razdoblje ljeti, a "f" da nema sušnog razdoblja. Oznaka "a" znači da je srednja temperatura u najtoplijem mjesecu ≥22°C, a oznaka "b" znači da je srednja temperatura najtoplijeg mjeseca <22°C).

Prema ovom prikazu (**slika 3.2**) jasno se vidi da samo priobalni pojas ima tipičnu sredozemnu klimu koju karakterizira sušni period ljeti, a ostatak sliva ima umjereno toplu vlažnu klimu s izdvojenim dijelom Mosora kojem visoki planinski vrhovi dodatno snižuju ljetne temperature.



Slika 3.2. Geografska raspodjela Köppenovih klimatskih tipova u Hrvatskoj za razdoblje 1961. – 1990. s označenim područjem sliva (prema: *Filipčić, 1998*)

Kod modeliranja prirodne ranjivosti i rizika od onečišćenja podzemnih voda izuzetno su važni podaci o oborinama na području istraživanja. Na području sliva Jadra i Žrnovnice i užeg okolnog područja nalazi se veći broj kišomjera koji su u vlasništvu DHMZ-a na kojima se registriraju dnevne oborine (Dugopolje, Lećevecica, Dicmo, Muć, Klis, Bisko, Gornje Sitno, Prančević Brana, Trilj, Vedrine, Dubrava-Gata, Kaštel-Sućurac, Trogir, Pribude i Zelovo) i premda nisu ravnomjerno raspoređeni, mogu pružiti relativno dobar uvid u prostorni raspored srednjih godišnjih količina oborina. Problem je što na području sliva nema niti jedne glavne meteorološke-klimatološke postaje (tri su u neposrednoj blizini: Sinj, Split-Marjan i Split-Aerodrom), pa nema ni podataka o osnovnim klimatološkim parametrima. Stoga su svi podaci (srednje količine oborina, srednje vrijednosti temperature zraka, evapotranspiracija, broj kišnih dana), koji su potrebni za ove analize i modeliranja, preuzeti iz Klimatskog atlasa Hrvatske (*Zaninović et al., 2008*). Podaci, koji se odnose na razdoblje od 1961. – 1990. godine prilagođeni su promatranom području i provjereni su s mjerenim podacima koji su dostupni. Detaljnije o pripremi klimatskih podataka za procjenu ranjivosti nalazi se u poglavlju 7.1.4.

## 4. Geološke značajke istraživanog područja

Svi podaci vezani uz detaljan prikaz geološke građe terena, strukturnog sklopa, tektonske aktivnosti te geomorfologije područja prikupljeni su kombinacijom različitih metoda istraživanja. U prvom redu detaljnom analizom postojećih podataka, i to iz Osnovne geološke karte mjerila 1:100 000 i priparadajućih tumača, listovi: Drniš (*Ivanović et al., 1977, 1978*); Sinj (*Papeš et al., 1984; Raić et al., 1984*); Omiš (*Marinčić et al., 1977; Marinčić et al., 1976*); te Split (*Marinčić et al., 1971; Marinčić et al., 1973*). Istraženi prostor prikazan je i na geološkoj karti Austro-Ugarske monarhije Sinj-Split 1:75.000 (*Kerner, 1914*), te preglednoj tektonskoj karti Dalmacije (*Komatina, 1967*). Prikupljeni su i podaci iz objavljenih i važnih znanstvenih i stručnih radova o istraženom terenu. Načinjena je i fotogeološka obrada područja, a svi ostali podaci pribavljeni su terenskim istraživanjima.

### 4.1. Geološka građa terena

U sklopu navedenih istraživanja na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice izdvojene su litostratigrafske jedinice od permske do kvartarne starosti. Jedinice su grupirane prema razdobljima kojem pripadaju i detaljnije su rasčlanjene. Na kraju odlomka u **tablici 4.1.** dan je odnos udjela površine pojedine litostratigrafske jedinice i pojedinog razdoblja u slivu. Na **sluci 4.1.** prikazan je prostorni raspored litostratigrafskih jedinica kao i tektonika istraživanog područja.

#### 4.1.1. Perm

Na istraživanom terenu moglo se izdvojiti dva litofacijelna člana permotrijaske starosti: **šupljikave vapnenačke breče ( $^1P_3$ )** (poznate i po starom nazivu "rauchwacke") i **glinovite vapnence ( $^2P_3$ )**. Oni zauzimaju vrlo mali dio površine sliva (**tablica 4.1**) i nalaze se na sjevernom dijelu, uz sam rub sliva. Stratigrafska pripadnost "permotrijasu" određena je po superpoziciji jer u stijenama nije nađena karakteristična fauna niti flora. Ipak, u potopljenoj dolini Cetine kod Peruče nalaze se istovjetne naslage u kojima su nađeni tragovi kretanja trilobita što upućuje na njihovu permsku starost. Uz ove članove, sjeverno od Muća, nađeni su izdanci dijabaza koji je također permske starosti.

#### 4.1.2. Trijas

Na promatranom terenu izdvojene su sljedeće naslage trijaske starosti: Sajske naslage, Kampilske naslage, te naslage anizičke starosti, koje obuhvaćaju dolomite, dolomitne breče vapnence i piroklastite (*Ivanović et al., 1978; Raić et al., 1984*). Starost trijaskih naslaga dobro je dokumentirana fosilima. Ove su stijene izdvojene u krovinskom krilu regionalnog reversnog rasjeda Knin-Muč-Sinj i zauzimaju mali dio površine sliva (tek 3,4 %).

**Sajske naslage ( $T_1^1$ )** izdvojene su na listu OGK Drniš do dubine od 370 metara (*Ivanović et al., 1977, 1978*), i na listu OGK Sinj gdje im je procijenjena debljina 380 m (*Papeš et al., 1984; Raić et al., 1984*). Izdanci se protežu duž južnih padina Svilaje i tektonski nisu jako poremećeni. U Sajskim naslagama dominiraju pješčenjaci s više ili manje tinjaca koje razdvajaju šejlovi, i u manjoj mjeri lapori, te ooliti. Pješčenjaci su smeđe-crvene boje, vrlo sitnozrnati do sitnozrnati, nerijetko graduirani samo u najnižem dijelu sloja. U njima se nalaze raspršeni tinjci, čija količina jako varira, ponegdje su prisutni i slojevi bez tinjaca. Debljina slojeva je različita, u rasponu od nekoliko centimetara do 1 m. Šejlovi su u istraženom prostoru masivni, ali su često i paralelno laminirani i sadrže više ili manje raspršenih tinjaca. Debljina im varira u rasponu od nekoliko centimetara do 0,5 m, a boja je karakteristična smeđe-crvena.

**Kampilske naslage ( $T_1^2$ )** izdvojene su na listu OGK Drniš (*Ivanović et al., 1977; 1978*), i na listu OGK Sinj (*Papeš et al., 1984; Raić et al., 1984*). Izdanci su dobro otkriveni i tektonski nisu jako poremećeni, pa je moguće lateralno praćenje na udaljenostima i više kilometara. Na navedenim listovima OGK debljina Kampilskih naslaga iznosi 420 m, odnosno 460 m, a na promatranom terenu je rekonstruirana njihova debljina od oko 400 m. Na istraživanom terenu Kampilske naslage slijede kontinuirano na Sajskima što se vidi na cesti Neorić - Beare, a kontakt je dobro izražen i markiran 1,5 m debelim zelenim šejlom. Osnovni sastav Kampilskih naslaga čine laporoviti vapnenci i klastiti. Laporoviti vapnenci se pojavljuju samostalno u njihovom najnižem dijelu. Debljina slojeva je promjenljiva, od 20 do 35 cm, no lokalno je i veća. U višem dijelu stupa, gotovo u najvećoj debljini prevladavaju karbonatni klastiti i tvore slojeve koji su debeli od 5 cm do 70 cm.

**Anizičke naslage ( $T_2^1$ )** izdvojene su na listu OGK Drniš (*Ivanović et al., 1977, 1978*) i na listu OGK Sinj, zajedno s pridruženim vapnencima (*Papeš et al., 1984, Raić et al., 1984*). Prema

*Papeš et al. (1984)* debljina anizičkih naslaga iznosi 600 m. U kompleksu anizičkih naslaga mogu se izdvojiti 2 grupe litofacijesa koji se pojavljuju u izmjeni: dolomiti i vapnenci s proslojcima klastita, te breče. Dolomiti i vapnenci s proslojcima klastita se nalaze kako u podini tako i u izmjeni s vapnenačkim brečama. U najnižem dijelu slijeda sedimenata, između slojeva dolomita pojavljuje se nekoliko vapnenačkih slojeva koji su debeli od 5 cm do 35 cm. Dolomiti su tamnosivi do sivi, a debljina im je u rasponu od 10 cm do 85 cm, uglavnom su masivni, vrlo sitnozrnati, s veličinom kristala oko 1 cm, ali su mjestimično i šećerasti. Breče su zastupljene Otarnik-naslagama koje predstavljaju transgresivne breče srednjeg trijasa (*Komatina, 1967; Ivanović et al., 1978*). Njihov najniži i najviši dio je potpuno dolomitiziran, a srednji je dolomitiziran samo u gornjoj trećini. Debljina slojeva je u rasponu od 30 cm do 4,3 m. U krovini Otarnik-naslaga nalaze se vapnenci u izmjeni s dolomitima. Otarnik-breče razvijene su samo lokalno i dosežu debljinu od 25 m (*Papeš et al., 1984*).

#### 4.1.3. Jura

Od naslaga jurske starosti na promatranom terenu izdvojeni su samo malmski vapnenci u jezgri Mosorske antiklinale (list OGK Omiš), označeni kao "debelo uslojeni oolitični vapnenci malma ( $J_3$ )", te na sjevernom rubnom dijelu sliva (list OGK Drniš) lijaski vapnenci, označeni kao "pločasti vapnenci i dolomiti lijasa ( $J_1$ )".

**Malmski vapnenci ( $J_3$ )** se nalaze u jezgri Mosorske strukture, na južnoj stani vršnog dijela Mosora. Zastupljeni su slabo uslojenim, gromadastim i klastičnim vapnencima, te oolitičnim vapnencima. Često su otkriveni i "grebenski" i prigrebenski facijesi s obilnom mikrofaunom i mikroflorom. Mjestimično se unutar ove jedinice mogu izdvojiti tanje uslojeni vapnenci, ali je njihov udio podređen u odnosu na debelo uslojene – gromadaste varijetete. Debljina malmskih vapnenaca je u rasponu od 700 m do 1800 m (*Marinčić et al., 1977*).

**Pločasti vapnenci i dolomiti lijasa ( $J_1$ )** izdvojeni su na sjeveru sliva, na samom rubnom dijelu i čine vrlo mali udio površine.

#### 4.1.4. Kreda

Zbirno sa sva četiri lista OGK (Drniš, Sinj, Omiš i Split) kredne naslage su najzastupljenije litostratigrafske jedinice. Općenito se sve izdvojene jedinice mogu grupirati u: a) donjokredne naslage, b) cenomanske naslage, c) turonske i d) senonske naslage, a mjestimično su izdvojene i pripadajuće breče odnosno prostraniji paketi pločastih i tanko uslojenih naslaga.

**Donjokredne naslage ( $K_1$ )** zastupljene su najviše vapnencima i vapnenačkim brečama, a na istraživanom prostoru otkrivene su na bokovima Mosorske antiklinale, gdje se nalaze u transgresivnom odnosu s podinom. U najnižem dijelu slijeda nalazi se 20 m debela zona vapnenačkih breča koje su izdvojene u vršnom dijelu zapadne padine Mosora, a sadrže fragmente različitih podinskih vapnenaca, promjera 3-4 cm, koji su povezani karbonatnim cementom. Unutar zone breča uočavaju se leće dolomita i dolomitnih breča, a u njihovoj krovini slijede svijetlosivi do svijetlosmeđi srednje do debelo uslojeni, lokalno gromadasti vapnenci, unutar kojih se mjestimično nalaze i tanko uslojeni vapnenci. Donjokredni vapnenci pretežito imaju muljnu osnovu, pa strukturno odgovaraju nizu od mudstona do wackestona. Debljina donjokrednih naslaga u Dinaridima doseže 600 m (*Marinčić et al., 1977*), odnosno 1000 m (*Komatina, 1967*).

**Cenomanske naslage ( $K_2^1$ )** su zastupljene svijetlosivim do svijetlosmeđim, debelo uslojenim, sitnozrnatim do srednjezrnatim (šećerastim) dolomitima s ulošcima vapnenaca i slabo uslojenim, gromadastim, svijetlosivim do bijelim vapnencima. Dolomiti su lokalno laminirani/stromatolitski i jako bituminozni. Lokalno se pojavljuju i dobro uslojeni smeđi vapnenci. U donjem dijelu slijeda prevladavaju dolomiti, a u gornjem vapnenci. Mjestimično, cenomanski bijeli vapnenci su jako okršeni. Debljina cenomanskih naslaga na listu OGK Omiš (*Marinčić et al., 1976, 1977*) doseže 600 m. Na listu OGK Split (*Marinčić et al., 1971, 1973*) cenomanske su naslage zastupljene vapnencima, dolomitima i pločastim vapnencima. Strukturno izgrađuju antiklinalne strukture u području Marine, Primorskog Dolca, Prgometa, Brštanova i Lečevica. Prema istom izvoru, debljina ovog člana procijenjena je na 500 m.

**Turonske naslage ( $K_2^2$ )** slijede u kontinuitetu iznad cenomanskih, a obuhvaćaju dobro uslojene do pločaste, svijetlo sive do svijetlo smeđe vapnence, kojima debljina slojeva varira od 5 cm do 40 cm, ali mjestimično i do 2 m, te bijele šećeraste dolomite. Vapnenci su često laminirani, ponekad dolomitizirani, rijetko s vidljivom makrofaunom. Dolomiti su češći u

donjem dijelu slijeda turonskih naslaga, u srednjem dijelu slijeda zastupljena je izmjena svjetlosivih dolomita i bijelih dolomitičnih vapnanca s hondrodontama, koje *Komatina (1967)* smatra karakterističnima za turon, a u gornjem se nalaze smeđi tankouslojeni vapnenci. Debljina turonskih naslaga na listu OGK Omiš iznosi 500 m (*Marinčić et al., 1976, 1977*), dok je na listu OGK Split (*Marinčić et al., 1971*) debljina procijenjena na 700 m.

**Senonske naslage ( $K_2^3$ )** najrasprostranjenije su naslage na istraživanom terenu, a zastupljene su bijelim, svijetložućkastim do svijetlosivim, pretežito gromadastim, kristalastim, jedrim vapnencima s rudistima, koji se litofacijelno izdvajaju kao "rudistni vapnenci", i mjestimičnim ulošcima dolomita. Lokalno se mogu naći bijele vapnenačke breče, a pojavljuju se i leće smeđih vapnenaca s rožnjacima. Uz grebenske vapnence pojavljuju se lokalno i tanko uslojeni vapnenci s pelagičkom foraminiferskom faunom. Debljina senonskih vapnenaca na istraživanom području, prema podacima iz OGK, procjenjuje se na 500 - 600 metara.

#### 4.1.5. Paleogen

Naslage paleogenske starosti zauzimaju svega 8,34% sliva i rasprostranjene su u manjim grupama po površini sliva. Zastupljene su tri glavne grupe: liburnijske naslage ili tzv. Kozina slojevi, zatim foraminiferski vapnenci, te gornjoeocenski fliš.

**Paleocensko-eocenske liburnijske naslage – "Kozina-slojevi" (Pc,E)** se na području istraživanja mogu vidjeti u uskim, najčešće isprekidanim zonama na kontaktu gornje krede i tercijara. Kozina slojevi izgrađeni su od jako laporovitih, tamnosmeđih do crvenkastih, tankouslojenih bituminoznih vapnenaca sa slatkovodnom do brakičnom gastropodnom faunom i haracejama (*Komatina, 1967*). Debljina tih naslaga je jako varijabilna i u rasponu je od 1 m do 20 m (30 m) (*Šušnjara et al., 1990*).

**Foraminiferski vapnenci ( $E_{1,2}$ )** je asocijacija facijesa koji se izdvajaju prema dominantnoj foraminiferskoj fauni, a obuhvaća miliolidne vapnence, alveolinske vapnence, numulitne vapnence i diskociklinske vapnence. Granice pojedinih tipova vapnenaca nisu oštre, pa postoje brojni prijelazni oblici. Miliolidni vapnenci su smeđi, uslojeni, bogati miliolidama, rijetko sadrže po koju alveolinu. Debljina im je u rasponu od 5 m do 40 m (*Komatina, 1967*). Alveolinski vapnenci su svjetlosmeđe boje i deblje uslojeni. Sadrže bogatu mikrofoslinu

zajednicu u kojoj prevladavaju alveoline, ali se pojavljuju i miliolide, te numuliti. Debljina alveolinskih vapnenaca je u rasponu od 50 m do preko 100 m. Numulitni vapnenci su svijetlosmeđe do smeđe boje i još deblje uslojeni. Glaukonitski vapnenci su najmlađi litofacijelni član foraminiferskih vapnenaca, a ponekad se zajedno s globigerinskim laporima izdvajaju kao posebna jedinica tzv. "prijelazne naslage". Glaukonitski vapnenci su sive boje, laporoviti do pjeskoviti, često gomoljasti i debelouslojeni. Debljina im je varijabilna, ali doseže do 30 m (*Komatina, 1967*).

**Gornjoeocenski fliš (E<sub>3</sub>)** čini južnu granicu sliva, stoga samo jedan mali dio naslaga (na južnim i istočnim padinama Mosora) zadire u sliv i ulazi u ovu analizu.

#### 4.1.6. Neogen

**Eocensko – miocenski klastiti** obuhvaćaju klastite gornjo eocenske do miocenske starosti, a genetski pripadaju Gornjoj fliškoj zoni i to u skupinu krupnozrnatih sedimenata. Sastav detritusa ovih stijena je vrlo sličan i veličine zrna u njima su približno iste. Prikazane naslage su na listu OGK Omiš izdvojene kao *Prominski lapori s lećama brečokonglomerata* (<sup>2</sup>E<sub>3</sub>) (*Marinčić et al., 1976, 1977*). Slijed naslaga je stratigrafski nepotpun jer su navedene naslage bile taložene u vrijeme učestalih spuštanja razine mora i lokalnog okopnjavanja, što dokazuje progradacija konglomeratnih tijela na zapadnim padinama Mosora. Na listu OGK Omiš debljina ove stratigrafske jedinice iznosi oko 200 m (*Marinčić et al., 1976, 1977*), ali detaljno sedimentološko mjerenje ukazuje na debljinu od oko 860 m (*Marjanac, 1994*).

**Breče Mosora, Prominske naslage** – uz padine Kozjaka i Klisa nalaze se debele breče kojima je starost po superpoziciji bila pripisivana gornjem eocenu (*Marinčić et al., 1976*), a uvrštavane su u Prominske naslage (*Marinčić et al., 1976, 1977*), odnosno Promina-breče. Na jugozapadnoj padini Mosora nalaze se debele "breče Mosora" kojima je bila pripisana oligocenska starost (*Marinčić et al., 1977*), ali koje *Kerner (1914)* nije razlikovao od "breča Klisa". Novijim istraživanjima (*Marjanac, 1994*) potvrđena je njihova oligocenska starost, ali je navedena i mogućnost da je jedan njihov dio bio taložen i u miocenu.



## 4.1.7. Kvartar

Od kvartarnih litofacijesa, na istraženom dijelu terena izdvojeni su sljedeći članovi: *aluvijalne naslage (al)*, *prašinstva glina s ulomcima i kršjem okolnih stijena (Q)* i *terra rosa (ts)*. Naslage kvartarne starosti na istraženom prostoru zastupljene su također lokalnim koluvijalnim zasipima i crvenicom koja ispunjava doline i manja krška polja, iako je dominantni facijes na krškim poljima ustvari Q – prašinstva glina s ulomcima i kršjem okolnih stijena. Debljina kvartarnih naslaga je mjestimično neznatna, pa ispod njih na mnogo mjesta izviruje vapnenačka podloga, primjerice u Dicmu. U crvenici se mjestimično može uočiti subkotalno korodirane vapnenačke blokove.

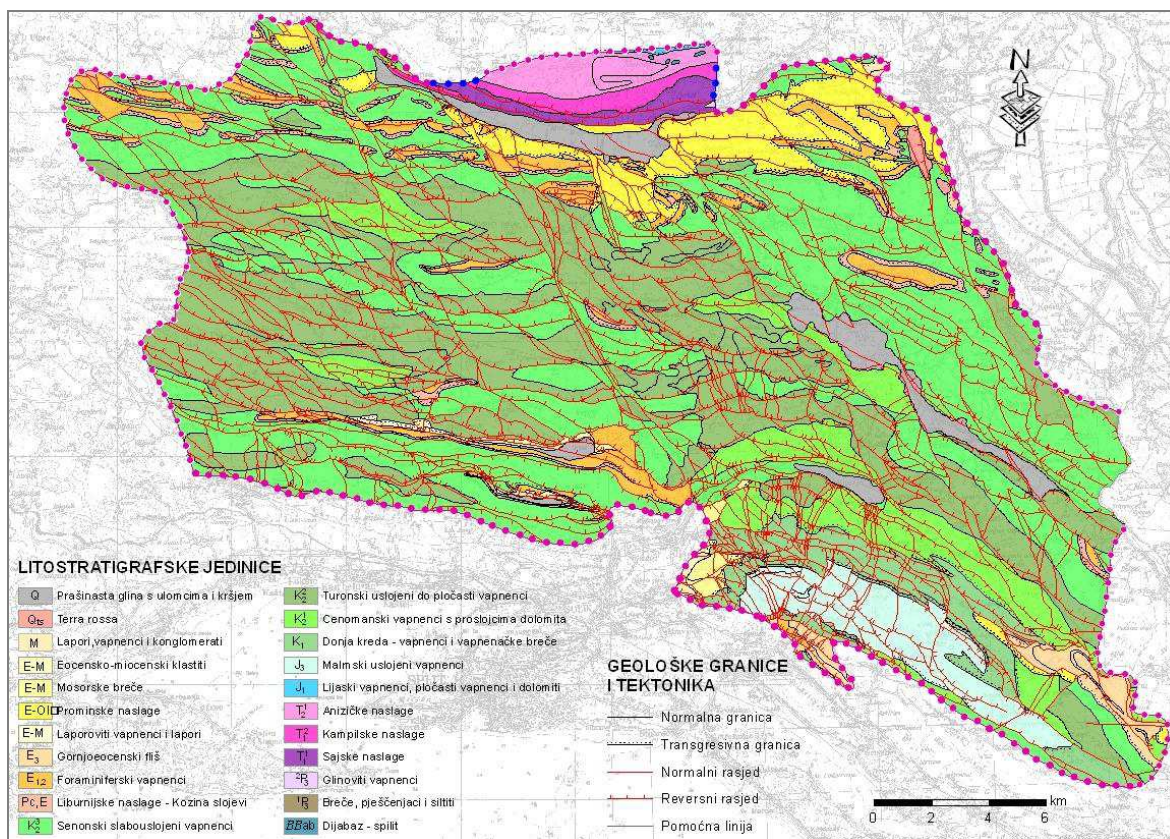
U slivu Jadra i Žrnovnice ukupno su izdvojena 22 litostratigrafska člana koji izgrađuju istraživano područje. Korištenjem GIS-a načinjen je pregled površinske zastupljenosti pojedinog člana (**slika 4.1**). Ovi su rezultati prikazani u **tablici 4.1**.

Tablica 4.1. Zastupljenost pojedinih stratigrafskih članova u slivu Jadra i Žrnovnice

LITOSTRATIGRAFSKE JEDINICE		POVRŠINA		RAZDOBLJE	POVRŠINA
Opis	Simbol	km	%		%
Prašinstva glina s ulomcima i kršjem stijena	Q	17,132	3,02	KVARTAR	3,21
Terra rossa	Q <sub>ts</sub>	1,07	0,19		
Lapori, vapnenci i konglomerati	M	0,456	0,08	NEOGEN	6,3
Eocensko-miocenski klastiti	E-M	2,34	0,41		
Mosorske breče - uslojene vapnenačke breče	E-M	2,653	0,47		
Prominske naslage	E-OI	30,317	5,34		
Laporoviti vapnenci i lapori	E-M	0,939	0,17	PALEOGEN	8,34
Gornjoeocenski fliš	E <sub>3</sub>	7,916	1,39		
Foraminiferski vapnenci	E <sub>1,2</sub>	26,505	4,67		
Liburnijske naslage - Kozina slojevi	Pc,E	11,961	2,11		
Senonski slabouslojeni vapnenci	K <sub>2</sub> <sup>3</sup>	198,256	34,92	KREDA	75,08
Turonski uslojeni do pločasti vapnenci	K <sub>2</sub> <sup>2</sup>	162,448	28,62		
Cenomanski vapnenci s proslojcima dolomita	K <sub>2</sub> <sup>1</sup>	43,108	7,59		
Donja kreda - vapnenci i vapnenačke breče	K <sub>1</sub>	22,404	3,95		
Malmški uslojeni vapnenci	J <sub>3</sub>	20,283	3,57	JURA	3,65
Lijaski vapnenci, pločasti vapnenci i dolomiti	J <sub>1</sub>	0,432	0,08		
Anizičke naslage - dolomiti, klastiti i breče	T <sub>2</sub> <sup>1</sup>	8,509	1,50	TRIJAS	3,4
Kampilske naslage	T <sub>1</sub> <sup>2</sup>	5,112	0,90		
Sajske naslage - pješčenjaci i šejlovi	T <sub>1</sub> <sup>1</sup>	5,67	1,00		
Glinoviti vapnenci	<sup>2</sup> P <sub>3</sub>	0,054	0,01	PERM	0,03
Breče, pješčenjaci i siltiti	<sup>1</sup> P <sub>3</sub>	0,003	0,00		
Dijabaz - split	ββab	0,107	0,02		

Napomena: Opisi litostratigrafskih jedinica odgovaraju legendi na slici 4.1.

Iz ovog pregleda uočava se da karbonatne stijene mlađeg mezozoika (kreda) izgrađuju preko 75% površine istraživanog područja. Tercijarne i kvartarne stijene i naslage izgrađuju manje od 18% područja (točnije 17,85%), dok ostale (perm, trijas i jura) zauzimaju samo oko 7% površine terena sliva.



Slika 4.1. Karta litostratigrafskih jedinica i tektonike u slivu (Prelogović & Kapelj, 2006 preuzeto iz Kapelj et al., 2006)

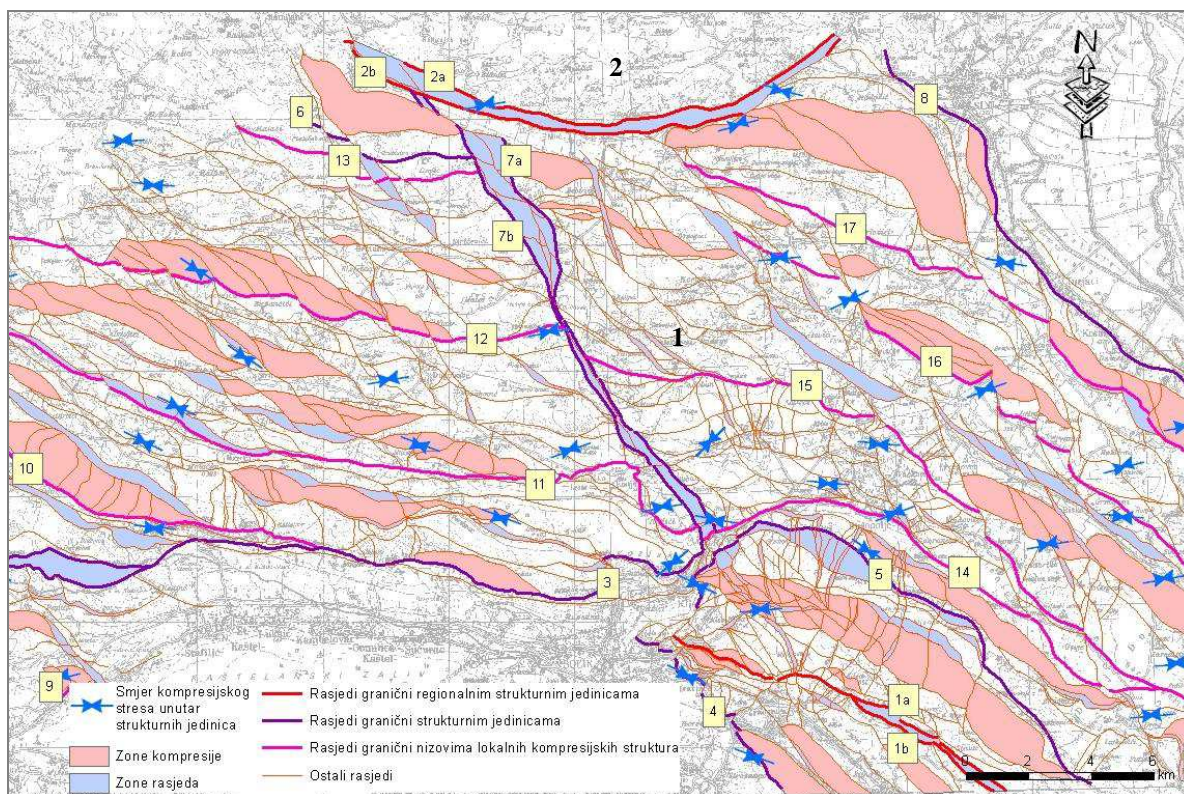
## 4.2. Strukturni sklop i tektonika

Obuhvaćeno područje odlikuje se naglašenom razlomljenošću i prisutnom tektonskom aktivnošću, na što upućuje stalno pojavljivanje potresa. Tektonska aktivnost rezultira i promjenama strukturnih odnosa, osobito sustava rasjeda i pukotina. Kako su geološki strukturni odnosi iznimno važni za razumijevanje hidrogeoloških odnosa u slivu, bilo je potrebno detaljno razraditi strukturni sklop i odrediti pomake struktura, aktivne rasjede i posebice sustave važne za moguću cirkulaciju podzemne vode. Zaključci takve analize



opisani su u nastavku rada, a skica strukturnih odnosa prikazana je na **slici 4.2** (*Prelogović & Kapelj, 2006*).

Razmatrano područje nalazi se u dodirnom prostoru dvije regionalne strukturne jedinice: Adriatik (1) i Dinarik (2) (**slika 4.2**). Zbog stalno prisutnih promjena strukturnih odnosa i naglašene seizmotektonske aktivnosti, granica tih jedinica, osobito u zaleđu Mosora, nije strogo definirana.



Slika 4.2. Skica strukturnog sklopa i tektonske aktivnosti na području sliva (*Prelogović & Kapelj, 2006* preuzeto iz *Kapelj et al., 2006*)

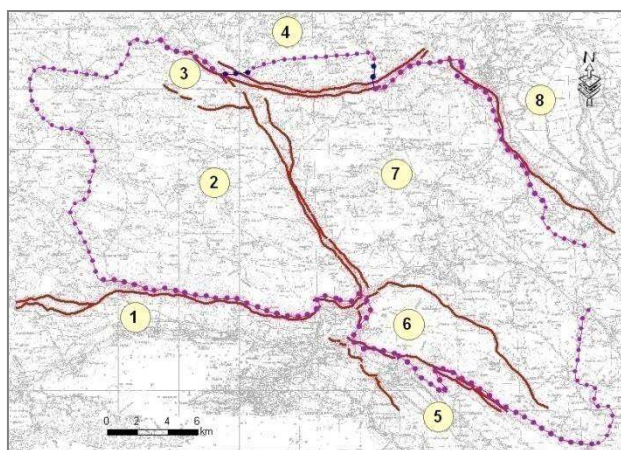
Na prikazu (**slika 4.2**), koji je izveden iz osnovne geološke karte mjerila 1:100 000 i potvrđen terenskim istraživanjima, vidljiva je izrazita razlomljenost područja u mnoštvu rasjeda različitih pružanja. Debljim linijama (**slika 4.2**) izdvojeni su rasjedi veće važnosti (pojedini je označen brojem):

- crvenom debljom linijom izdvojeni su rasjedi koji razgraničavaju regionalne strukturne jedinice: 1 – rasjed Mosor – Biokovo  
2 – rasjed Knin – Muć
- ljubičastom linijom označeni su rasjedi koji odvajaju lokalne strukturne jedinice:

- 3- rasjed Zadar – Tijesno – Svilaja – Kozjak
- 4- rasjed Žrnovnica – Omiš – Brela
- 5- rasjed Klis – Zagvozd – Župa
- 6- rasjed Novigrad – Drniš – Moseć
- 7- rasjed Muć – Klis
- 8- rasjed Sinj – Lovreč – Tihaljina
- ružičastom linijom rasjedi granični nizovima lokalnih kompresijskih struktura
- 9- rasjed Jelinak – Trogir – Marjan
- 10- rasjed Šibenik – Primorski Dolac – Opor
- 11- rasjed Perković – Trolovke – Konjsko
- 12- rasjed Divojevići – Lećevica – Pometeno Brdo
- 13- rasjed Gornje Utore – Matasi
- 14- rasjed Dugopolje – Donji Dolac
- 15- rasjed Prugovo – Osoje – Srinjine
- 16- rasjed Neorić – Dicmo – Bisko
- 17- rasjed Neorić – Sićane – Vojnić Sinjsko
- svi ostali rasjedi prikazani su tankom narančastom linijom.

Klasificiranjem važnosti pojedinih skupina rasjeda bilo je moguće izdvojiti pojedine strukture recentnog sklopa i na taj način izdvojeno je 8 strukturalnih jedinica u recentnom strukturalnom sklopu (slika 4.3):

1. Primoštenska Zagora – Trogir
2. Šibenska i Trogirska Zagora
3. Promina – Moseć
4. Svilaja
5. Žrnovnica – Križ – Omiška Dinara
6. Mosor
7. Mosorska Zagora
8. Sinj – Imotski

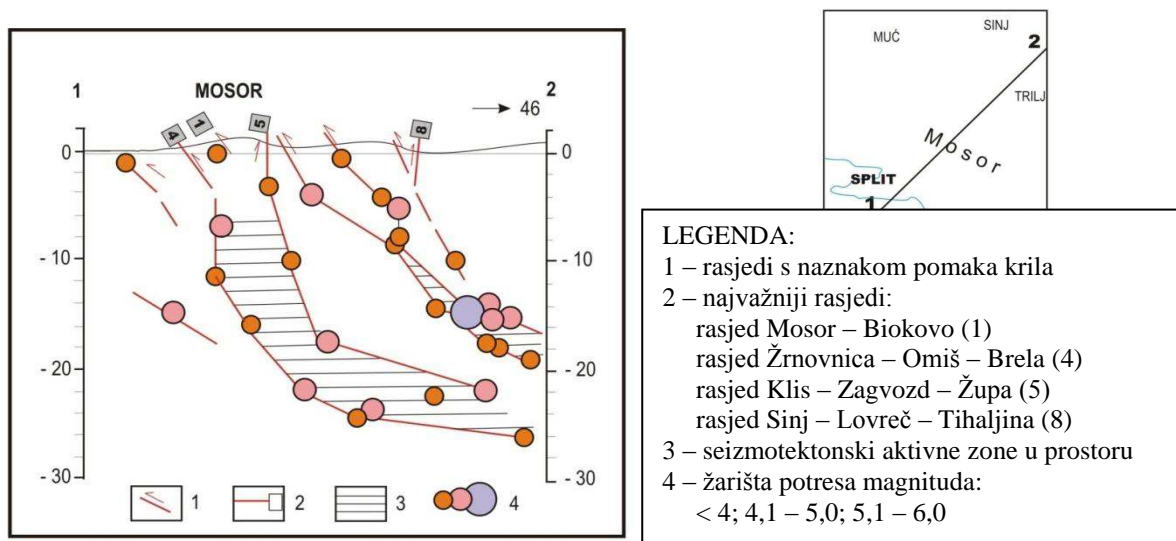


Slika 4.3. Jedinice strukturalnog sklopa

Najvažnije je istaknuti da se obuhvaćeni strukturalni sklop sastoji iz reversnih strukturala pružanja Z-I, ZSZ-ISI i SZ-JI. Značajno je nizanje pojedinih strukturala istih ili sličnih značajki. Također i unutar svake pojedine strukture postoje različiti sustavi rasjeda. Stoga se u

proučavanju sklopa usredotočilo na klasificiranje struktura i rasjeda, izdvajanje najaktivnijih dionica rasjeda posebice mogućih provodnica podzemne vode, te odredbu vrste i smjera recentnih pomaka struktura.

Uzročnici tektonske aktivnosti jesu pomaci Jadranske mikroploče. Dodatno mikroploča gura pored sobom dijelove jedinice Adriatik (1). Nastupa odupiranje masa stijena smještenih unutar Dinarika (2) tako da u dodirnom prostoru između te dvije jedinice nastaje izražena kompresija. Stijene se boraju i rasjedaju, te reversno pomiču duž rasjeda koji dopiru do površine. Položaj stijena i rasjeda u dubini otkriva duboki seizmički refleksijski profil (slika 4.4) i na njemu je dobro vidljivo da su žarišta potresa izravno povezana s rasjedima.



Slika 4.4. Duboki seizmotektonski refleksijski profil

Tektonski su najaktivnije dionice rasjeda poprečnog ili gotovo poprečnog pružanja prema orijentaciji kompresijskog stresa. Nastaje kompresija prostora uz oblikovanje lokalnih struktura duž čijih se krila pružaju reversni rasjedi suprotnih vergencija. Zbog toga se u području istraživanja osobito ističu rasjedi sustava SSZ-JJI do SZ-JI duž kojih su zamjetni desni pomaci struktura. Najčešće se ističu zone paralelnih rasjeda.

Pomaci struktura i osobito njihovih dijelova događaju se uz rotaciju i najčešće uz dijagonalne pomake na pružanje rasjeda promatranog sustava. To ukazuje na zasebne i ponešto različite pomake svake strukture ili strukturnog bloka. Takvi pomaci očito su posljedica njihove rotacije. U prvom planu ističe se retrogradna rotacija Mosora koja se zamjećuje i po različitoj orijentaciji stresa.



Posebnu pozornost obraća se Mosoru i rasjedima koji se pojavljuju unutar strukture. Pri tom se misli na rasjede pogodne za cirkulaciju podzemne vode. Iz odnosa stresa i pružanja rasjeda najprije se ističu rasjedi i zone sustava SSI-JJI između Dugopolja i Žrnovnice. Otvaranje prostora očekuje se i duž rasjeda sustava skoro S-J koji se pojavljuju oko sela Smodlake, Batići i Kursani. Osobito se ističu rasjedi sustava SZ-JI koji su najčešći u zapadnom dijelu Mosora. Također se ističe i zona paralelnih pretežito reversnih rasjeda pružanja Z-I između Klis Kose i vrha Plišivac (1053 m n.m.). Tu je moguće otvaranje prostora jedino uz svijanje rasjeda po nagibu. Osobito je važan rasjed sustava SI-JZ koji se pruža sjeverno od kamenoloma prema izvoru Jadra. Duž pojedinih njegovih dionica vjerojatno je prisutno širenje (tenzija) prostora uz izravnu mogućnost cirkulacije vode. Prikupljeni podaci sigurno pokazuju da se i oko izvora Jadra događa širenje prostora (*Prelogović & Kapelj, 2006* preuzeto iz *Kapelj et al., 2006*).

### 4.3. Geomorfološka obilježja sliva

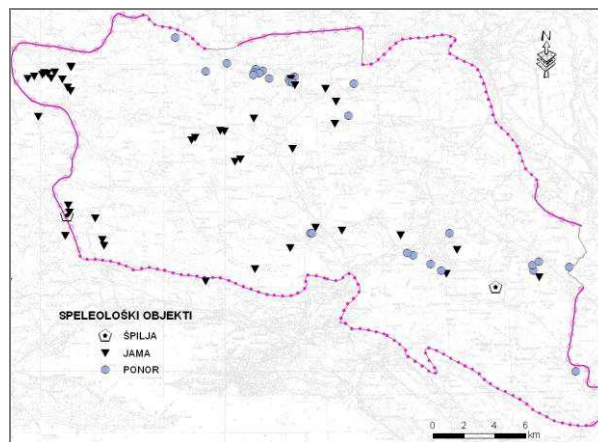
Na temelju geološke građe područja i prikazane tektonske aktivnosti do izražaja dolaze geomorfološka obilježja slivnog područja koje ima sve značajke tipičnog krškog reljefa (ponori, jame, špilje, vrtače, škrape, suhe doline, pojave strmo odsječenih padina itd.). U morfološkom smislu jasno je uočljiva pojava izrazito raščlanjenog reljefa, posebno u području rasprostranjenja karbonatnih stijena. Između niza vrhova, koji su visine od 550 do 680 metara, nalazi se više krških polja, uvala i zaravni na nadmorskim visinama od 300 do 350 metara. Najveća krška polja su Mučko polje (400 ha), Dicmansko polje (300 ha), Dugopolje (190 ha) i Konjsko polje (150 ha). Nizovi uzdignuća i depresija u sjeverozapadnom dijelu razmatranog područja imaju pravac pružanja sjeverozapad-jugoistok ("dinarsko pružanje"), dok idući prema istoku orijentacija morfoloških cjelina postupno prelazi u pravac istok-zapad ("hvarsko pružanje"). U morfološkim depresijama, koje uglavnom izgrađuju klastične prašinasto glinovite naslage različite vrste i starosti, mogu se uočiti manji terasni odsjeci, zatim pojave povremenih tokova i ponora, posebno u obodnim dijelovima polja. Također su karakteristična i brojna sufozijska uleknuća u klastičnim naslagama krških polja.

Uz sve navedeno, na području sliva uočena je izrazita brojnost i karakteristična prostorna rasprostranjenost vrtača (ponikva). Vrtače su, pored ostalih elemenata (litološki sastav, razlomljenost, strukturna građa), jedan od ključnih morfoloških elemenata koji ukazuju na

intenzitet okršenosti karbonatnih naslaga. Također su jedan od čimbenika koji ukazuju na dijelove terena s izrazito brзом infiltracijom vode u podzemlje (*Kapelj et al., 2004a*), a indirektno ukazuju na razvijenu epikršku zonu (*Ford & Williams, 2007*). Ova svojstva su, s aspekta zaštite podzemnih voda, vrlo zanimljiva i iz tog je razloga kasnije u radu vrtačama posvećena posebna pažnja.

Uz vrtače, na području sliva izdvojeni su i drugi pokazatelji stupnja okršavanja, a to su svakako i speleološki objekti. Pod tim je nazivom objedinjena skupina pojava u kršu koje omogućuju izravnu vezu površinskih i podzemnih voda, a radi se o špiljama, jamama i ponorima. Na temelju podataka ranijih istraživanja (*Kapelj et al., 2001, 2002; Fritz & Kapelj, 1998; Fritz & Bahun, 1960*) za područje istraživanja prikupljeni su podaci o 114 speleoloških pojava. Od ukupnog broja pojava izdvojeno je 50 značajnijih objekata. Osnovni kriterij za odabir bila je hidrogeološka funkcija objekta. Po ovom kriteriju za daljnje analize odabrani su svi objekti za koje postoje podaci o trajnom ili povremenom prisustvu vode. U navedenu skupinu objekata svrstana je jedna špilja, 18 jama i 26 ponora. Premda su najbrojniji, ovdje je važno naglasiti da ponori nisu tipični speleološki objekti, odnosno njihovi ulazi su najčešće zatvoreni, a voda ponire kroz naplavni nanos ili između kamenih blokova. Sljedeći kriterij selekcije bile su dimenzije objekata, pa su tako za prikaz odabrane sve špilje i jame duže (dublje) od 50 m. Na osnovi ovog kriterija odabrane su samo jedna špilja i četiri jame. Jedina značajna špilja je Vranjača, koja se nalazi na sjeverozapadnom podnožju Mosora kod mjesta Kotlenice. To je ujedno i najpoznatiji speleološki objekt ovog područja koji je već 1927. godine uređen i otvoren za posjet turista svom dužinom od 300 metara (*Božičević, 1992*).

Kasnijim terenskim istraživanjima upotpunjena je baza podataka s novootkrivenim speleološkim objektima, tako da trenutno postoje podaci o 72 objekta, od toga su dvije špilje, 26 ponora, te 44 jame. Vrlo vjerojatno to još uvijek nije konačan broj, već će se u budućim istraživanjima nailaziti na nove geomorfološke i speleološke objekte, koji će se uvrstiti u bazu podataka, a postojeći objekti će vjerojatno biti bolje istraženi.



Slika 4.5. Speleološki objekti u slivu

## 5. Hidrogeološki odnosi i kakvoća izvorske vode u slivu

### 5.1. Hidrogeološka obilježja stijena

Na temelju podataka iz OGK listova Drniš (*Ivanović et al., 1977, 1978*), Sinj (*Papeš et al., 1984, Raić et al., 1984*), Omiš (*Marinčić et al., 1977, Marinčić et al., 1976*) i Split (*Marinčić et al., 1971; Marinčić et al., 1973*), rezultata analize geološke građe terena i određivanja litostratigrafskih jedinica, razrade strukturno – tektonskih odnosa i geomorfoloških obilježja, te detaljnih terenskih istraživanja, izvedena su hidrogeološka obilježja stijena prisutnih na slivu. Tom je prilikom na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice izdvojeno, prema svojstvu vodopropusnosti, pet kategorija stijena:

- **dobro propusne stijene**
- **srednje propusne (djelomično nepropusne) stijene**
- **slabo propusne (djelomično propusne) stijene**
- **nepropusne stijene**
- **naslage naizmjeničnih svojstava**

i izrađena je hidrogeološka karta područja (**slika 5.1**).

**Propusne stijene** zastupljene su u najvećoj mjeri karbonatnim stijenama permske do eocenske starosti, te promina naslagama i mosorskim brečama. Propusne stijene permske starosti (šupljikave vapnenačke breče) izdvojene su na vrlo malom izdanku sjeverno od regionalnog rasjeda Knin-Muč-Sinj i za sliv nemaju nikakvu hidrogeološku funkciju. Slijede srednje trijasko (otarnik naslage), koje su razvijene u formi uske zone sjeverno od Muća, kao prijelaz iz kampilskih klastita u karbonate srednjeg trijasa. Ove stijene su, prema hidrogeološkoj funkciji, vrlo bliske vapnencima. Superpozicijski slijede vapnenci gornje jure (malm). Ove propusne karbonatne stijene (uslojeni i gromadasti vapnenci) izgrađuju jezgru antiklinalne strukture Mosor. Sjeveroistočno krilo ove strukture izgrađuju naslage donje krede zastupljene bazalnim vapnenačkim brečama i debelo uslojenim vapnencima, no za ovo područje najzanimljiviji su vapnenci svih katova gornje krede koji zauzimaju najveći dio površine. To su dobro uslojene karbonatne stijene debljine slojeva oko 20-50 cm. Lokalno mogu biti i deblje uslojene, a registrirani su i gromadasti vapnenci. Osim ovih, lokalno su



zastupljeni i eocenski foraminiferski vapnenci. Najmlađe propusne stijene u razmatranom području su prominske neuslojene vapnenačke breče razvijene južno od Muća kao i uslojene (mosorske) vapnenačke breče koje se nalaze samo na zapadnim padinama Mosora. Na hidrogeološkoj karti (slika 5.1) ove stijene su prikazane tamno zelenom bojom.

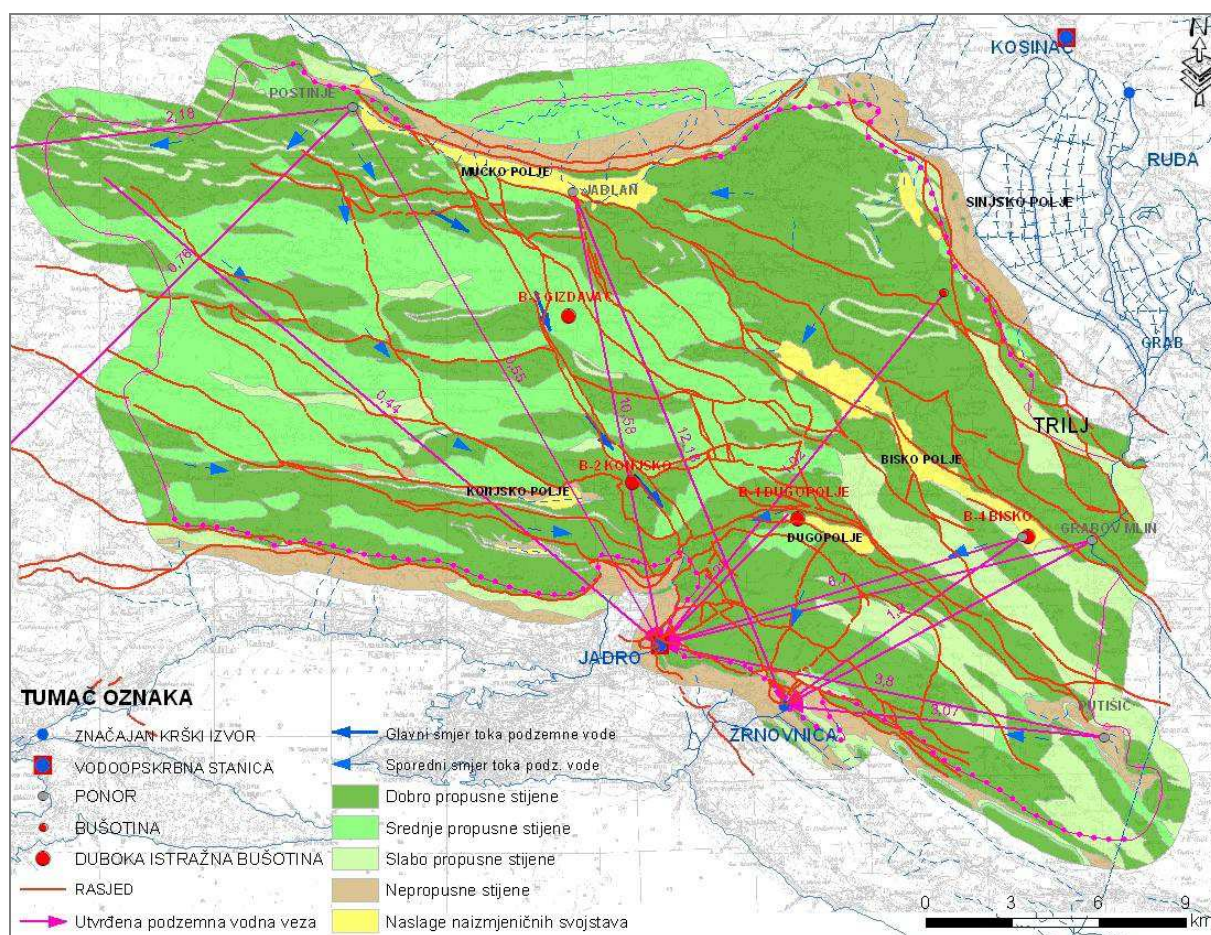
**Srednje propusne (djelomično nepropusne) stijene** na području sliva su zastupljene dolomitičnim vapnencima i dolomitima cenomana kao i pločastim vapnencima turonske starosti. Stijene cenomanskog kata gornje krede su vrlo usko povezane s ranije opisanima. Prijelazi između vapnenaca i dolomita su najčešće postupni budući da je dolomitizacija proces koji je u nepravilnim formama zahvaćao postojeća vapnenačka sedimentna tijela. Upravo zbog djelomične dolomitizacije stijene imaju obilježja prijelaznih varijeteta. Znatno se jasnije na terenu mogu izdvojiti pločasti vapnenci turonske starosti. Na hidrogeološkoj karti ova grupa stijena (slika 5.1) prikazana je nijansom svjetlije zelene boje.

**Slabo propusne (djelomično propusne) stijene** čine glinoviti vapnenci perma, anizički dolomiti, klastiti i breče, kao i laporoviti vapnenci i vapnoviti lapori paleocenske starosti. Permske glinovite vapnence nalazimo u zoni rasjeda kod Muća. Trijaski dolomiti, klastiti i breče izdvojeni su u zoni trijaskih naslaga sjeverno od Muća. Laporoviti vapnenci i vapnoviti lapori paleocena izdvojeni su na više lokaliteta po površini sliva: zona kod Prugova, kod Mojanke, te dijelom kod Konjskog i Blaca, gdje izgrađuju bokove sinklinala. Debljina im je relativno mala i vjerojatno ne prelazi 30 – 50 m. Ove stijene su na grafičkom prikazu (slika 5.1) prikazane najsvjetlijom nijansom zelene boje.

**Nepropusne stijene** čini grupa klastičnih naslaga donjeg trijasa kod Muća kao i naslage eocenskog fliša. Ovim je nazivom općenito obuhvaćen kompleks naslaga koji se sastoji od više različitih litoloških članova koji su kontinuirano taloženi na foraminiferskim vapnencima. U litološkom smislu, zastupljeni su laporima, laporovitim vapnencima, vapnovitim laporima i pješčenjacima, a lokalno i vapnencima u vertikalnoj i lateralnoj izmjeni. U razmatranom području izgrađuju sinklinalnu strukturu kod Konjskog, zatim mala krška polja kod Blaca i kod Putišića. Zastupljeni su pretežito lapori, vapnoviti lapori i laporoviti vapnenci. Na svježim otvorenim izdancima lapori su sive do plavosive boje, dok su žuti do svjetlosmeđi u zoni oksidacije i površinskog trošenja. Ove su laporovite naslage izrazito podložne površinskom trošenju, pa pod utjecajem egzogenih faktora najčešće prelaze u neuslojeni materijal

prašinsto glinovito sastava. Opisane fliške naslage razvijene su također u priobalnom području od Kaštelanskog polja prema Omišu. Npropusne stijene i naslage su na **slici 5.1** izdvojene nijansom svjetlo smeđe boje.

**Naslage naizmjeničnih svojstava** čine petu hidrogeološku skupinu stijena, a u nju su uvrštene razne nevezane ili slabovezane naslage međuzrnske poroznosti koje su nastale bilo površinskim trošenjem osnovne stijene ili deluvijalnim procesima trošenja materijala na padini. Izdvojene su u krškim poljima i općenito u lokalnim depresijama gdje izgrađuju plitke pokrove prašinsto glinovito materijala s različitim udjelom vapnenačkog kršja. Nalaze se u Mučkom polju, krškim poljima kod Konjskog i Dicma kao i kod Dugopolja. Ove su naslage izdvojene u sklopu detaljnih istraživanja, a na **slici 5.1** prikazane su nijansom žute boje.



Slika 5.1. Shematska hidrogeološka karta sliva

## 5.2. Hidrogeološka funkcija stijena

Svojstvo vodopropusnosti u prvom je redu ovisno o litološkom sastavu stijena. Međutim, stijene istog litološkog sastava, zbog različitog položaja u strukturnom sklopu terena, kao i sekundarnih obilježja mogu imati različite hidrogeološke funkcije. Na širem istraživanom području mogu se izdvojiti grupe stijena koje u terenu imaju sljedeće funkcije: **relativna barijera, potpuna barijera i propusno područje (slika 5.2).**

Na istraživanom području najveći dio stijena ima **hidrogeološku funkciju propusnog područja**, a radi se o vapnenačkim brečama, te vapnencima jure, krede i paleogena. To su stijene s tercijskim porozitetom, što je posljedica razlomljenosti i okršenosti uzduž rasjeda i pukotina. One imaju svojstvo velike vertikalne i horizontalne propusnosti, što omogućuje infiltraciju oborinskih i horizontalnu cirkulaciju podzemnih voda.

Propusnost srednje propusnih stijena također je sekundarnog karaktera, a hidrogeološka funkcija može im se ocijeniti između **propusnog područja i lokalne relativne barijere**. To uvelike ovisi o njihovoj teksturi (dobra uslojenost, pločasti habitus) i sadržaju dolomitne komponente. Tako su tanje uslojeni do pločasti vapnenci zbog male debljine i površinske rasprostranjenosti slabije propusni, posebno što se tiče vertikalnog procjeđivanja, te im je dodijeljena funkcija lokalne relativne barijere (**slika 5.2**).

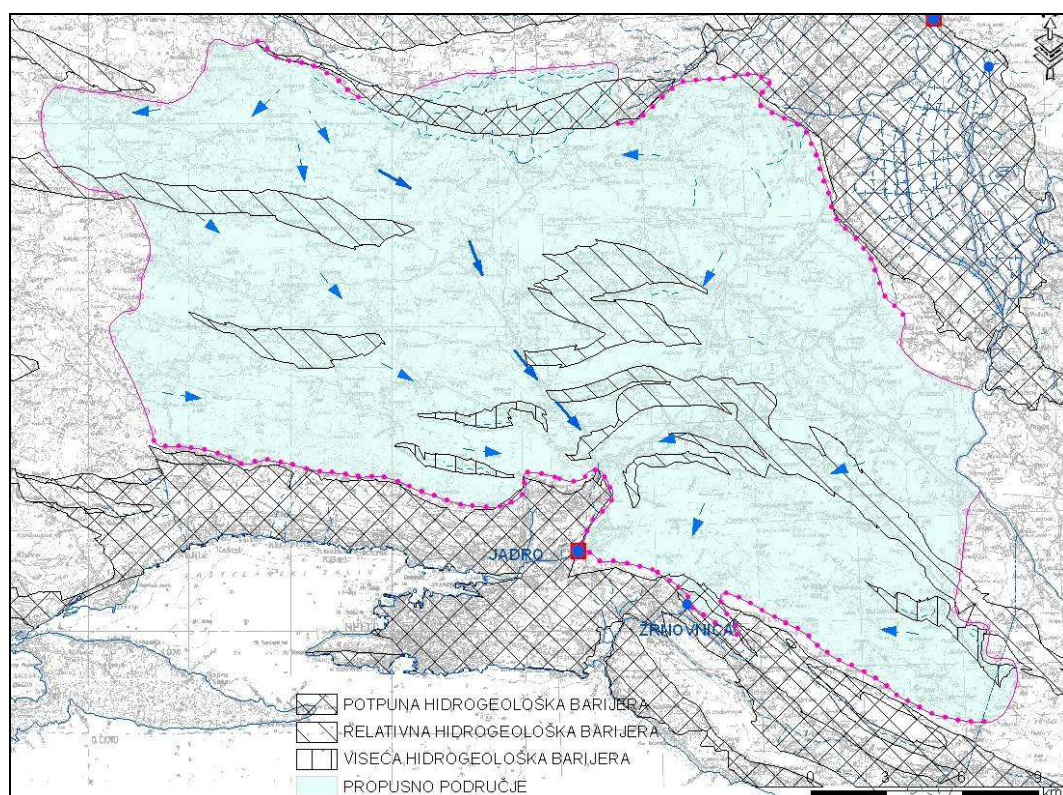
Funkciju **relativne hidrogeološke barijere** imaju i slabopropusne stijene u koje spadaju kredne (cenomanske) antiklinalne strukture koje izgrađuju pretežito dolomiti. Ove stijene, zbog litološkog sastava i strukturnog položaja, treba smatrati znatno slabije propusnim u odnosu na predhodno opisane, pa stoga imaju dobru sposobnost zadržavanja površinskih voda, a mogu i usmjeravati tokove podzemnih voda u onoj mjeri koliki im je doseg i rasprostranjenje do razine podzemnih voda.

Posebno su odvojene slabo propusne stijene na lokalitetu Konjsko koje predstavljaju podlogu fliške sinklinale. One su u cjelini oko 150 m iznad statičke razine podzemnih voda i njihova je hidrogeološka funkcija upitna, ali ako se promatra u vezi s tercijskom fliškom sinklinalom Konjsko tada preuzima ulogu "**viseće**" **hidrogeološke barijere**. Identičnu hidrogeološku



funkciju imaju i nepropusne stijene: lapori, laporoviti vapnenci i vapnoviti lapori koji na području istraživanja izgrađuju sinklinalnu strukturu kod Konjskog i nekoliko manjih krških polja kod Blaca i kod Putišića.

Hidrogeološku funkciju **potpune hidrogeološke barijere** zbog svoje velike debljine i strukturnog položanja (podinsko krilo regionalne navlačne strukture) imaju fliške naslage Kaštelanskog zaljeva zahvaljujući kojima istječu krški izvori. Identičnu hidrogeološku funkciju imaju klastične naslage donjeg trijasa kod Muća.



Slika 5.2. Prikaz prostorne raspodjele hidrogeološke funkcije u slivu

### 5.3. Provedena trasiranja i ustanovljene podzemne vodne veze

Poznavanje podzemnih vodnih veza i prividnih brzina podzemnih tokova u kršu ima višestruku primjenu. To se prije svega odnosi na određivanje hidrogeoloških granica sliva, radi određivanja zona sanitarne zaštite izvora pitke vode i na određivanje hidrodinamičkih uvjeta u vodonosniku.

U slivu Jadra i Žrnovnice je do sada provedeno devet trasiranja. Provedeno je i jedno trasiranje izvan sliva kod Kljaka, na području sliva rijeke Krke, ali je obuhvatilo opažanje izvora Jadra i Žrnovnice i Pantana. Jedno trasiranje provedeno je za potrebe hidrogeoloških istraživanja kod određivanja upojnog mjesta za oborinske vode na području poslovne zone Podi na Dugopolju, dva trasiranja provedena su za potrebe "Studije utjecaja na okoliš Centra za gospodarenje komunalnim i neopasnim otpadom Splitsko-dalmatinske županije" na prostoru Lećevice i jedno trasiranje provedeno je kod provođenja hidrogeoloških istražnih radova deponije Mojanka. Ostala trasiranja regionalnog su karaktera i provedena su radi određivanja slivnog područja. Sva trasiranja prikazana su u **tablici 5.1** i na **slici 5.3**.

*Tablica 5.1. Provedena trasiranja*

R.br.	MJESTO UBACIVANJA TRASERA	VRIJEME UBACIVANJA TRASERA	TRASER (vrsta i količina)	POJAVA	BRZINA (cm/s)
1.	ponor Grabov mlin (dolina rijeke Cetine)	11.9.1963.	Na-fluorescein	Jadro	(nema podataka)
				Žrnovnica	(nema podataka)
2.	ponor Jablan (Mučko polje)	14.1.1978.	Na-fluorescein 120 kg	Jadro	10,58
				Žrnovnica	12,18
3.	ponor Čulina Mlinica (Kljake, sliv Krke)	24.10.1990.	Na-fluorescein 100 kg	Jadro	/
				Žrnovnica	/
4.	ponor Ponikva (Strijansko polje)	28.3.1992.	Na-fluorescein	Jadro	3,8
				Žrnovnica	3,07
5.	Colića ponor (Dugopolje)	12.2.2004.	Na-fluorescein	Jadro	1,22
				Žrnovnica	/
6.	bušotina B-2 (Kladnjice)	16.8.2004.	Na-fluorescein	Jadro	/
				Žrnovnica	/
7.	prirodna jama (Kladnjice)	2006.	Na-fluorescein 60 kg	Jadro	0,44
				Žrnovnica	/
8.	bušotina (Mojanka) radna zona Kukuzovac	7.5.2007.	Na-fluorescein 35 kg	Jadro	1,018
				Žrnovnica	/
9.	ponor u Postinju (Mučko polje)	8.2.2008.	Na-fluorescein 100 kg	Jadro	0,553
				Žrnovnica	/
10.	ponor u Biskom polju	15.1.2010.	Na-fluorescein 50 kg	Jadro	6,7
				Žrnovnica	1,9

Trasiranja su se provodila prema sljedećem redosljedu:

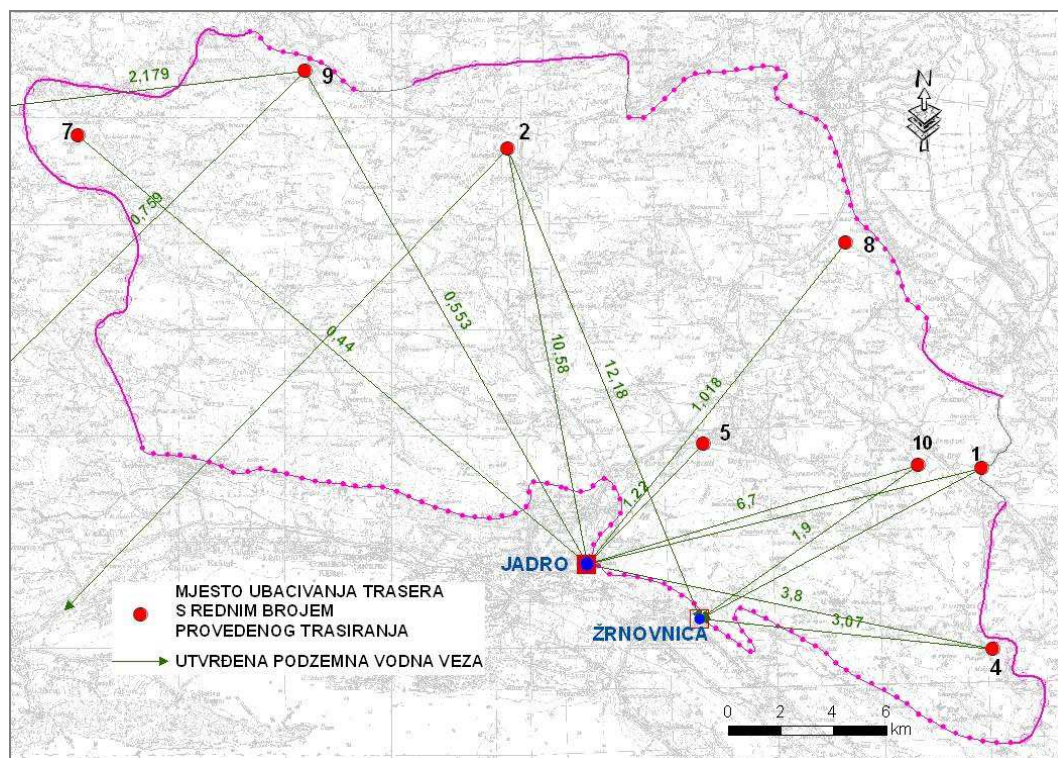
1. Prvo trasiranje provedeno je 11.9.1963. godine ubacivanjem Na-fluoresceina u ponor kod **Grabova Mlina u dolini rijeke Cetine** u koji voda ponire u sušnom razdoblju. Trasiranje je provedeno u sklopu izrade projektne dokumentacije za HE Đale i rezultati trasiranja su preuzeti iz Hidrogeološke studije općine Split (*Fritz, 1979b*). Tim trasiranjem dokazana je vodna veza ovog dijela terena s izvorima Jadro i Žrnovnica.

2. Trasiranje izvedeno 14.1.1978. godine iz ponora **Jablan u Mućkom polju** u okviru izrade Hidrogeološke studije općine Split (*Fritz, 1979b*). Ubačeno je 120 kg Na-fluoresceina, a u ponor su utjecale vode u količini od 300 l/s. Pojava boje registrirana je na izvorima Jadro i Žrnovnica, a pri tome su ustanovljene vrlo velike prividne brzine od 10,58 cm/s (Jadro) i 12,18 cm/s (Žrnovnica).
3. Trasiranje ponora **Čulina Mlinica kod Kljaka** provedeno je 24.10.1990. godine u sklopu radova za Osnovnu hidrogeološku kartu list Drniš (*Fritz, 1990*). U vrijeme trasiranja u ponor je poniralo oko 5 l/s vode. Ubačeno je 100 kg Na-fluoresceina. Trasiranje je izvedeno nakon dugog sušnog razdoblja, neposredno prije prognoziranе kiše. Opažanja su vršena na izvorima Torak, Jaruga, Ribnik, Pantan, Jadro i Žrnovnica. Rezultati provedenog trasiranja u vrijeme niskih voda pokazali su sigurnu vezu ponora s izvorom Torak i znatno slabiju s izvorom Jaruga. Prividne brzine tečenja podzemnih voda su vrlo male te iznose 0,77 cm/s (Torak) i 0,71 cm/s (Jaruga). Nije utvrđena podzemna vodna veza s izvorima Jadro i Žrnovnica.
4. Trasiranje provedeno 28.3.1992. godine iz **ponora Ponikva u Strijanskom polju kod Putišića**, provedeno je za potrebe određivanja zona sanitarne zaštite crpilišta Studenci (*Renić, 1992*). Ustanovljena je pojava trasera na izvorima Žrnovnici i Jadru, uz prividne brzine podzemnog tečenja od 3,07 odnosno 3,80 cm/s, što upućuje na dobru podzemnu vodnu vezu s tim dijelom sliva.
5. Trasiranje toka podzemne vode iz **Colića ponora u Dugopolju** provedeno je 12.2.2004. godine za potrebe idejnog rješenja dispozicije oborinskih voda s područja Poslovno građevinske zone Podi-Krč (*Kapelj et al., 2004b*). Pojava trasera opažana je na izvorima Jadra i Žrnovnice, međutim dokazana je veza ponora samo s izvorom Jadra, uz prividnu brzinu podzemnog tečenja od 1,22 cm/s. Prema tome, ponor i njegova okolica s poslovnom zonom pripadaju II. zoni sanitarne zaštite izvora Jadro.
6. Trasiranje bušotine **B-2 na području Kladnjice**, za potrebe istraživanja lokacije Centra za gospodarenje komunalnim i neopasnim industrijskim otpadom Splitsko-dalmatinske županije, izvedeno je 16.8.2004. godine (*Oluić et al., 2004*) u sušnom razdoblju. Opažano je šest stalnih izvora: Jadro, Žrnovnica, Ropotina, Radun, Tupinolom i Pantan. Nakon četiri mjeseca opažanja boja se nije pojavila niti na jednom od spomenutih izvora.

7. Tijekom 2006. godine za potrebe daljnjih hidrogeoloških istraživanja na području predložene lokacije Centra za gospodarenje komunalnim i neopasnim otpadom za Splitsko-dalmatinsku županiju, izvedeno je trasiranje iz speleološkog objekta –**prirodne jame na području Kladnjice dubine 32 m** – a ubačeno je 60 kg Na-fluoresceina (*Korbar et al., 2006*). U opažanje su bili uključeni izvori: Žrnovnica, Jadro, Tupinolom, Fuležina, Pantan, Marina, Ribnik, Jaruga I i II, Torak i Gospa Stomorija. Boja je registrirana samo na izvoru Jadra 66 dana i 20 sati nakon ubacivanja traseru, a prividna brzina toka podzemne vode iznosila je 0,44 cm/s.
8. Trasiranje iz **bušotine na području radne zone Kukuzovac** u sklopu hidrogeoloških istražnih radova deponije Mojanka provedeno je 7.5.2007. (*Biondić B. & Biondić R., 2007*). Ubačeno je 35 kg Na-fluoresceina, opažani su izvori Jadro, Žrnovnica i Studenci. Boja se pojavila samo na izvoru Jadro i to s prividnom brzinom toka od 1,018 cm/s.
9. Trasiranje provedeno iz ponora u **Postinju u Mućkom polju** provedeno je 8.2.2008. godine ubacivanjem 100 kg Na-fluoresceina i njegovim ispiranjem s više od 520 m<sup>3</sup> vode iz hidrantske mreže u kontinuiranom vremenskom slijedu od 24 sata (*Kapelj et al., 2008*). Opažano je devet lokacija: četiri aktivna crpilišta javnog vodovoda (Žrnovnica, Jadro, Jaruga i Čikola), zatim crpilište Torak, koje se ne koristi, te četiri priobalna bočata izvora (Pantan, Mandrača, Grebaštica i Ribnik). Boja se na izvoru Jadra pojavila tek 23.3.2008. godine s prividnom brzinom tečenja od 0,553 cm/s, a na izvoru Žrnovnica se uopće nije pojavila. Ovim trasiranjem potvrđeno je da dio vode s područja Postinja gravitira prema izvorima Ribnik (Morinjski zaljev) i Marina kod Trogira, a nakon obilnijih oborina dio vode se podzemno usmjeri (prelije) prema izvoru Jadra.
10. Trasiranje **ponora u Biskom polju** provedeno je 15.1.2010. godine u uvjetima visokih voda (*Kapelj et al., 2009*). Ubačeno je 50 kg Na-fluoresceina koji je ispiran prirodnim površinskim tokom u količini od 150 - 200 l/s. Traser se pojavio na izvorima Jadro i Žrnovnica, a na izvoru Studenci u slivu rijeke Cetine i na rijeci Cetini (na mostu kod blata) boja se nije pojavila. Vrlo velika prividna brzina i oko 80% izračunatog pronosa traseru prema izvoru Jadro (oko 6,7 cm/s) upućuju na privilegiran tok podzemne vode u tom pravcu. Prividna brzina podzemnog toka od 1,9 cm/s, koja je registrirana na Žrnovnici, potvrdila je podzemnu vodnu vezu tog područja, ali znatno manjeg intenziteta.



Ovim trasiranjem potvrđeno je da krajnji istočni dio Biskog polja pripada slivu Jadra i Žrnovnice, a ne slivu rijeke Cetine.



Slika 5.3. Prikaz provedenih trasiranja na području sliva

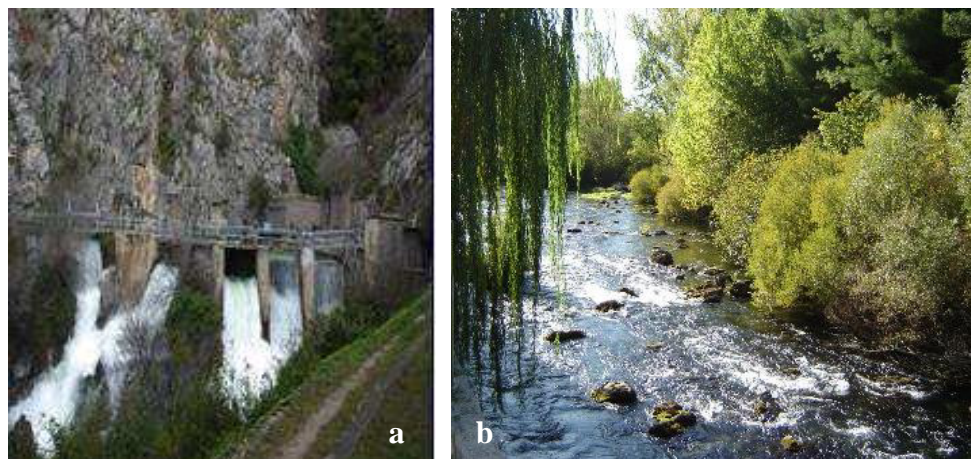
#### 5.4. Vodne pojave na području sliva

**Izvor Jadro** (slika 5.4. a) je zahvaćen za vodoopskrbu i predstavlja vrijedan izvor pitke vode za stanovništvo šire okolice i to za gradove: Split, Solin, Kaštela i Trogir, te niz prigradskih i okolnih naselja. Centralnu poziciju pri opskrbi vodom s ovog izvora ima grad Split, kao najveći potrošač, do kojeg se voda doprema kroz dva paralelna kanala: starog Dioklecijanovog kanala i novog betonskog kanala, ukupno preko 2000 l/s.

Prema raspoloživim hidrološkim podacima minimalna izdašnost izvora Jadro se kreće između 3,60 m<sup>3</sup>/s (kolovoz 1995. godine) i 3,90 m<sup>3</sup>/s (rujan 1997. godine te kolovoz i rujan 2003. godine). Izdašnost izvora Jadro je najmanja u sušnom razdoblju i to uglavnom u kolovozu i rujnu kada srednji mjesečni protok može pasti na svega 4,0 m<sup>3</sup>/s (kolovoz 1995. godine i rujan



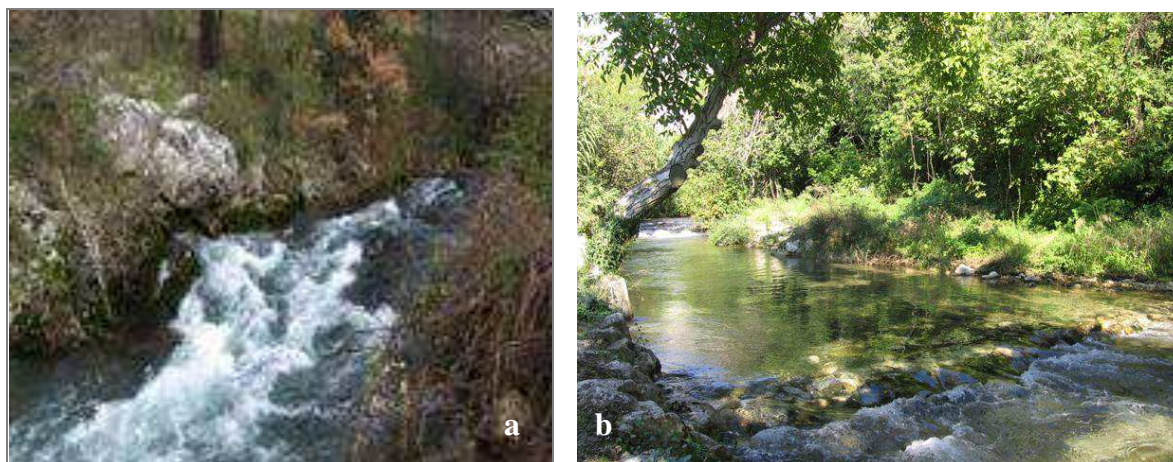
2003. godine). U sušnom razdoblju zahvaćanje vode s izvora Jadro za potrebe vodoopskrbe najčešće poraste radi pojačane potrošnje, pa se umjesto dopuštenih  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$  tada uzima i do  $2,9 \text{ m}^3/\text{s}$  (Kapelj et al., 2006).



Slika 5.4. a) Izvor Jadro; b) gornji tok rijeke Jadro

**Rijeka Jadro** zauzima važno mjesto u životu okolnog stanovništva, o čemu svjedoči bogato kulturno, povijesno i arheološko nasljeđe koje ju prati. Rijeka Jadro (slika 5.4. b) predstavlja poseban fenomen specifične pejzažne raznolikosti i stanište endemskih vrsta. To je tipična krška rijeka, koja se formira od podzemnog dotoka s gornjih horizonata i površinskog dotoka s izravnog sliva. Cijelim svojim tokom, ukupne dužine oko 4,2 km, prolazi područjem grada Solina i na istočnom rubu Kaštelanskog zaljeva ulazi u more. U samom središtu Solina račva se na glavno korito i više rukavaca, koji se prije ušća u more opet spajaju u zajedničko korito. Najveći dio ove rijeke je reguliran, ali još uvijek ne u potpunosti. Jadro prima vode pet pritoka od kojih su najjači bujice Rupotina i Poklinovac. Dosadašnjim regulacijskim radovima na bujičnim pritocima i njihovim slivovima nije zaustavljena erozija zemljišta niti je bitnije smanjeno donošenje nanosa do rijeke Jadro. Protoke Jadra značajno i brzo variraju zavisno o količini oborina na slivu. Najmanji izmjereni protok rijeke Jadro kod Vidovića mosta (Majdan) iznosi  $0,22 \text{ m}^3/\text{s}$  (16.11.1985. godine), maksimalni izmjereni protok  $78,1 \text{ m}^3/\text{s}$  (13.11.1997. godine), a srednji godišnji protok  $9,7 \text{ m}^3/\text{s}$ . Srednji mjesečni protok rijeke Jadro kod Vidovića mosta je najmanji u kolovozu i rujnu, kada se može dogoditi da padne i do  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$  (2000. i 2003. godine) (Kapelj et al., 2006). Prema klasifikaciji voda, rijeka Jadro pripada I. kategoriji voda na cijelom toku, od izvora do vodnih pragova nizvodno od centra grada. Nizvodni dio rijeke, koji je pod utjecajem mora, i samo ušće pripadaju II. kategoriji voda (Štambuk-Giljanović, 2006).

**Izvorište Žrnovnice (Slika 5.5.a)** se sastoji od nekoliko manjih izvora koji se javljaju na širem području u visinskom rasponu od 77,0 do 88,0 m n.m. Izvorišne vode se djelomično koriste za vodoopskrbu istoimenog naselja Žrnovnica i navodnjavanje okolnog poljoprivrednog zemljišta. Minimalna izmjerena izdašnost ovog izvorišta iznosi 250 l/s (9.9.1993. godine), a maksimalna 19,1 m<sup>3</sup>/s (18.12.2004. godine) (*Kapelj et al., 2006*).



Slika 5.5. a) Izvor Žrnovnice; b) rijeka Žrnovnica

**Rijeka Žrnovnica (slika 5.5. b)** ima nekoliko bujičnih pritoka koji su uglavnom suhi veći dio godine. Ukupna dužina rijeke Žrnovnice od izvora do ušća u more u Stobrečkoj uvali iznosi oko 4,5 km. Protoke joj značajno i brzo variraju zavisno o količini oborina na slivu. Najveći izmjereni protok u koritu rijeke Žrnovnice (kod postaje Laboratorij) iznosi 58,4 m<sup>3</sup>/s (18.12.2004. godine), najmanji protok oko 200 l/s (1.9.1993. godine), a srednji godišnji protok 1,8 m<sup>3</sup>/s. Srednji mjesečni protoci rijeke Žrnovnice su najmanji u srpnju i kolovozu (na izvoru iznose 0,61-0,58 m<sup>3</sup>/s, a kod Laboratorija 0,52-0,48 m<sup>3</sup>/s) (*Kapelj et al., 2006*).

Osim izvora Jadra i Žrnovnice, koji istječu na samoj južnoj razvodnici, na području sliva ima još nekoliko izvora, ali ni jedan nije značajnijeg kapaciteta. Na sjevernom dijelu sliva, iznad Mućkog polja na kontaktu propusnih i nepropusnih trijaskih naslaga javlja se nekoliko manjih stalnih izvora od kojih su značajniji: Veliko vrilo, Radača i Žukovik, svaki u kategoriji izdašnosti 1-10 l/s. Jednaka situacija je na jugozapadnom dijelu sliva, na kontaktu karbonatnih i fliških naslaga gdje se nalaze izvori Umbalac i Bujanj, također vrlo male izdašnosti.

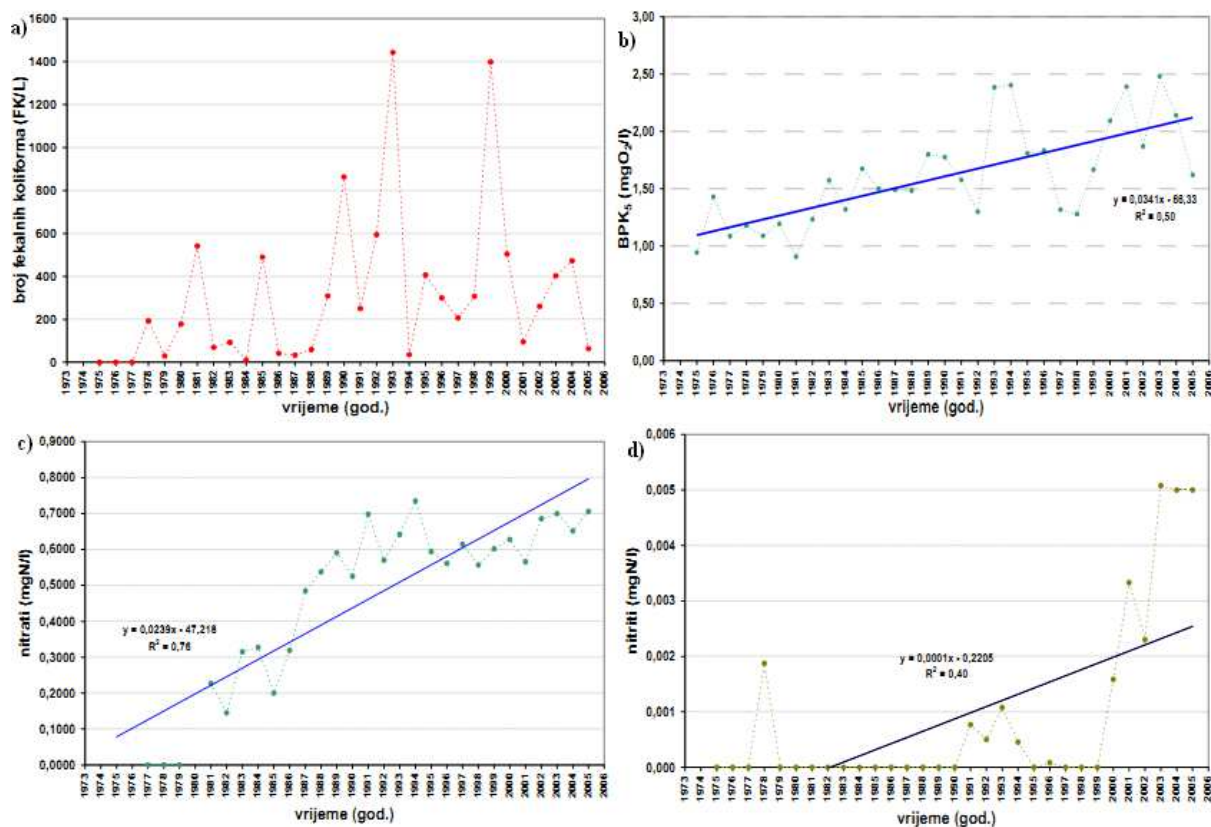
Područje sliva izvora Jadra i Žrnovnice općenito pripada tipu orogenskog akumuliranog krša u kojem su zastupljeni svi krški fenomeni. Izrazita razlomljenost terena omogućila je intenzivno okršavanje karbonatnih stijena. U području rasprostranjenja karbonatnih stijena nema stalnih tokova, već sva oborinska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

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

## 5.5. Kakvoća vode

Izvorske vode Jadra i Žrnovnice uključene su u monitoring kakvoće vode budući da se koriste za potrebe javne vodoopskrbe. Monitoring provodi Zavod za javno zdravstvo Splitsko-dalmatinske županije u mjesečnim intervalima. Za ocjenu stanja kakvoće izvorskih voda Jadra i Žrnovnice statistički su analizirani rezultati kemijskih analiza pokazatelja kakvoće vode na izvorištu rijeke Jadro i Žrnovnica u razdoblju od 1975. do 2005. godine (izvor Jadra), odnosno 1975. do 2004. godine (izvor Žrnovnice) godine (*Kapelj et al., 2006*). Kakvoća izvorske i riječne vode Jadra i Žrnovnice detaljno je istraživana i za potrebe odredbe indeksa kakvoće voda Dalmacije (*Štambuk-Giljanović, 2006*).

Na temelju provedenih analiza uočen je povremeno znatan porast bakteriološkog onečišćenja izvora Jadra posljednjih godina. S obzirom na vrstu bakteriološkog onečišćenja, izvor su pretežito otpadne vode iz domaćinstava zbog nepostojanja kanalizacijskog sustava i njihovog pročišćavanja. Trend porasta pokazuju koncentracije hranjivih soli dušika, nitrati, nitriti i koncentracija amonijaka, čiji porast je također odraz porasta antropogenog utjecaja na podzemne vode sliva Jadra (**slika 5.6**).

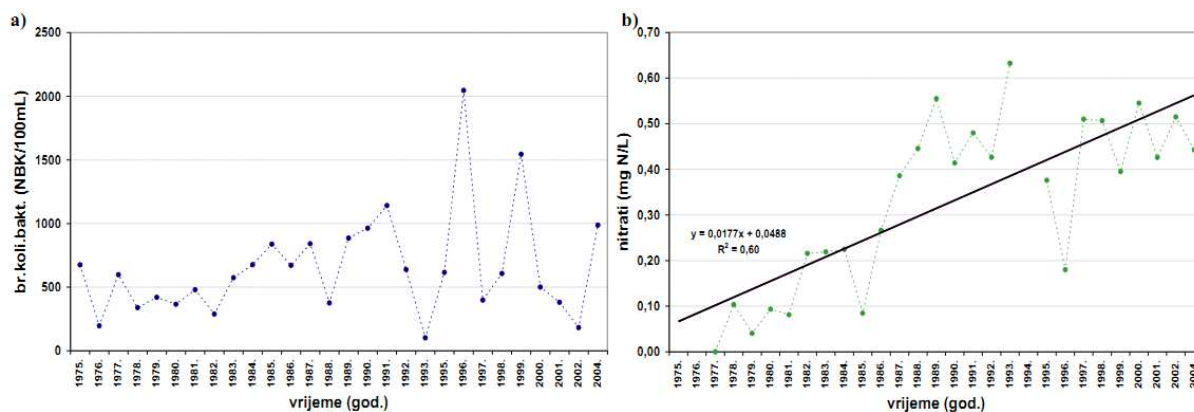


Slika 5.6. Pokazatelji antropogenog onečišćenja u izvorskoj vodi Jadra (1975. – 2005.)

a) broj fekalnih koliforma; b) biološka potrošnja kisika; c i d) trend hranjivih soli dušika, nitrati (c) i nitriti (d)

U velikom dijelu sliva intenzivirala se tijekom promatranog razdoblja izgradnja stambenih i poslovnih objekata. Naselja u slivu većinom su dobila pitku vodu, a time raste i količina otpadne vode. U konačnici, posljedica je trend porasta onečišćenja u podzemnoj vodi sliva. I druge aktivnosti u slivu uzrokuju porast onečišćenja, od poljodjelske aktivnosti, servisnih postaja za različite namjene, kamenoloma, specifičnih industrijskih pogona itd. Spomenuti trend zapažen je za odabrane pokazatelje onečišćenja i u izvorskoj vodi Žrnovnice (slika 5.7). Prema tome, i u dijelu sliva koji se drenira pretežito prema izvoru Žrnovnice posljednjih godina došlo je do dodatnog opterećenja na podzemne vode, vjerojatno zbog istih uzroka kao i na Jadru.



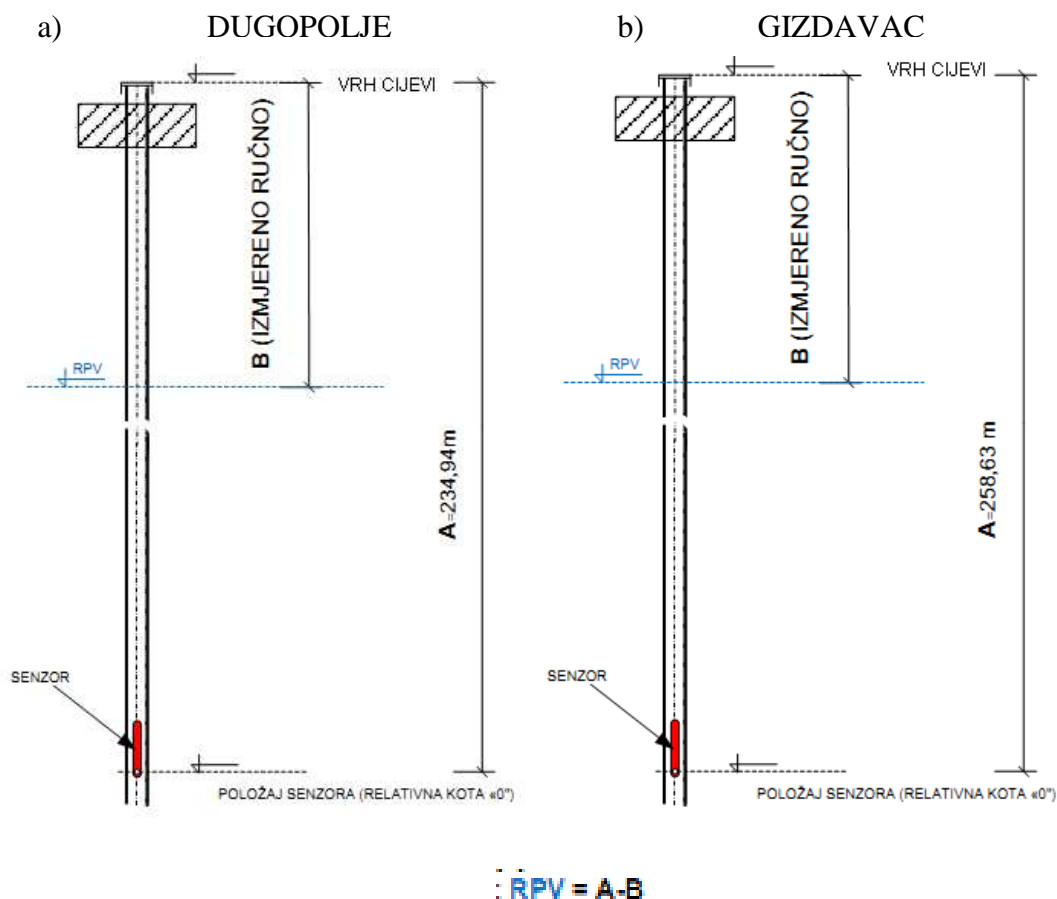


Slika 5.7. Pokazatelji antropogenog onečišćenja u izvornoj vodi Žrnovnice (1975. – 2004.)  
a) broj fekalnih koliforma; b) trend hranjivih soli dušika – nitrata

Kakvoća podzemnih voda, koje istječu na izvorima Jadro i Žrnovnica, kontrolirana je dugi niz godina. Nizovi nekih pokazatelja onečišćenja, koje propisuju i upute o implementaciji Okvirnih smjernica o vodama Europske unije, dovoljno su dugi i omogućavaju prilično dobru ocjenu kakvoće podzemne vode u slivu. Poboljšanje stanja kakvoće izvorskih voda može se očekivati jedino kontroliranom odvodnjom i pročišćavanjem otpadnih voda u slivu.

Da bi se dodatno pratilo stanje količine i kakvoće podzemne vode u slivu predviđena je izrada četiri duboke istražno opažačke bušotine: **B-1** na lokaciji Dugopolje (koordinate: **X = 4 827 308; Y = 6 385 888**), **B-2** na području Konjskog (koordinate: **X = 4 828 776; Y = 6 380 231**), **B-3** na području Gizdavca (koordinate: **X = 4 834 544; Y = 5 620 215**) i **B-4** na području Biskog polja (koordinate: **X = 4 826 383; Y = 6 393 811**). Lokacije ovih bušotina označene su na **slici 5.1**. Bušotina B-1 locirana je na Dugopolju iz razloga što je to područje blizu izvorima Jadro i Žrnovnica, a u posljednje vrijeme doživljava nagli gospodarski razvoj, pa je potrebno pratiti antropogeni utjecaj na kakvoću podzemne vode. Bušotine B-2 i B-3 locirane su duž transverzalne rasjedne zone Muć-Gizdavac-Prugovo-Konjsko-Klis, koja predstavlja pravac najbrže podzemne vodne veze s izvorima Jadro i Žrnovnica. To je ujedno i područje u kojem se koncentriraju tokovi iz zapadnog i sjeverozapadnog dijela sliva. Bušotina B-4 locirana je na Biskom polju, na križanju dviju rasjednih zona, kako bi se omogućilo praćenje onečišćenja i količina voda iz sliva rijeke Cetine. Do sada su bušotine B-1 i B-3 u potpunosti izvedene i opremljene uređajima za kontinuirano praćenje razina podzemne vode, temperature, električne vodljivosti i mutnoće, te uranjajućom crpkom za povremeno uzorkovanje vode.

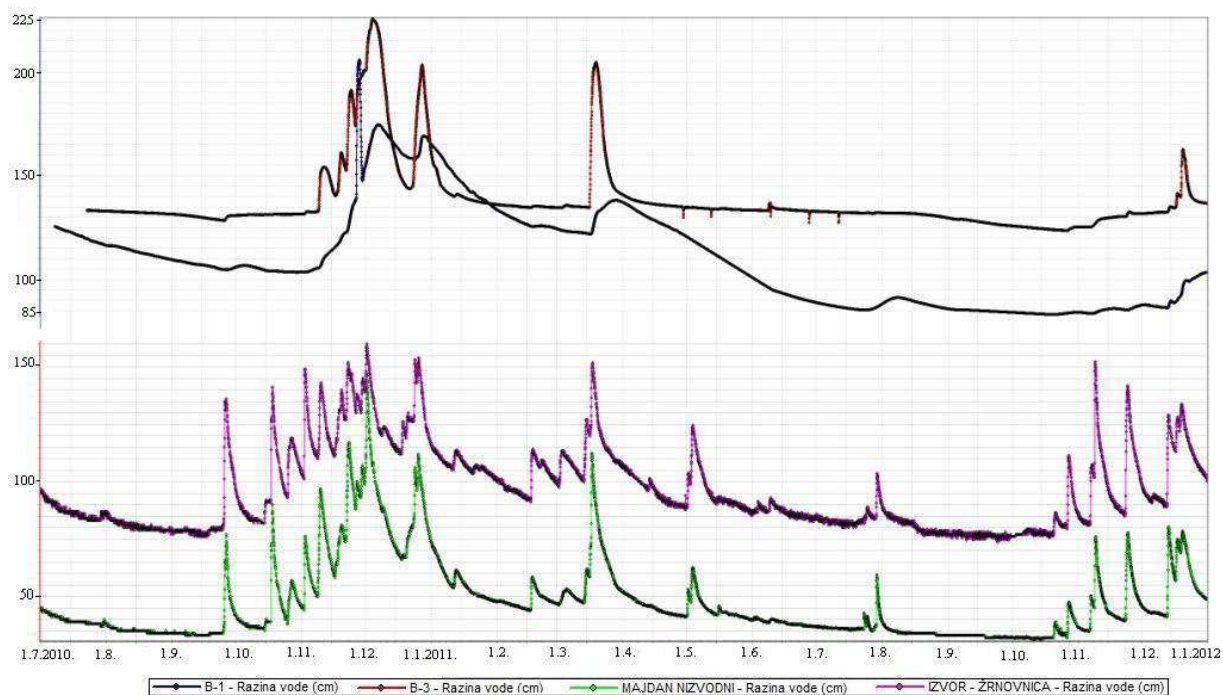
Bušotina Dugopolje je počela s radom 8.7.2010. godine, a bušotina Gizdavac 23.7.2010. godine. Shematski prikazi bušotina nalaze se na **slici 5.8 a i b**.



Slika 5.8. Presjek bušotina: a) B-1 Dugopolje; b) B-3 Gizdavac

Rezultati do sada provedenog monitoringa razina podzemnih voda prikazani su na **slici 5.9**. Na dijagramu su paralelno prikazane razine podzemnih voda u bušotinama (gornje dvije krivulje – Dugopolje plavom bojom, a Gizdavac crvenom) i mjereni vodostaji na rijekama Jadro i Žrnovnica (Jadro zelenom bojom, Žrnovnica ružičastom) za vremenski period od 1.7.2010. do 1.1.2012. godine s podacima u satnim intervalima. Razine u bušotinama prikazane su u apsolutnim kotama, a vodostaji u centimetrima.

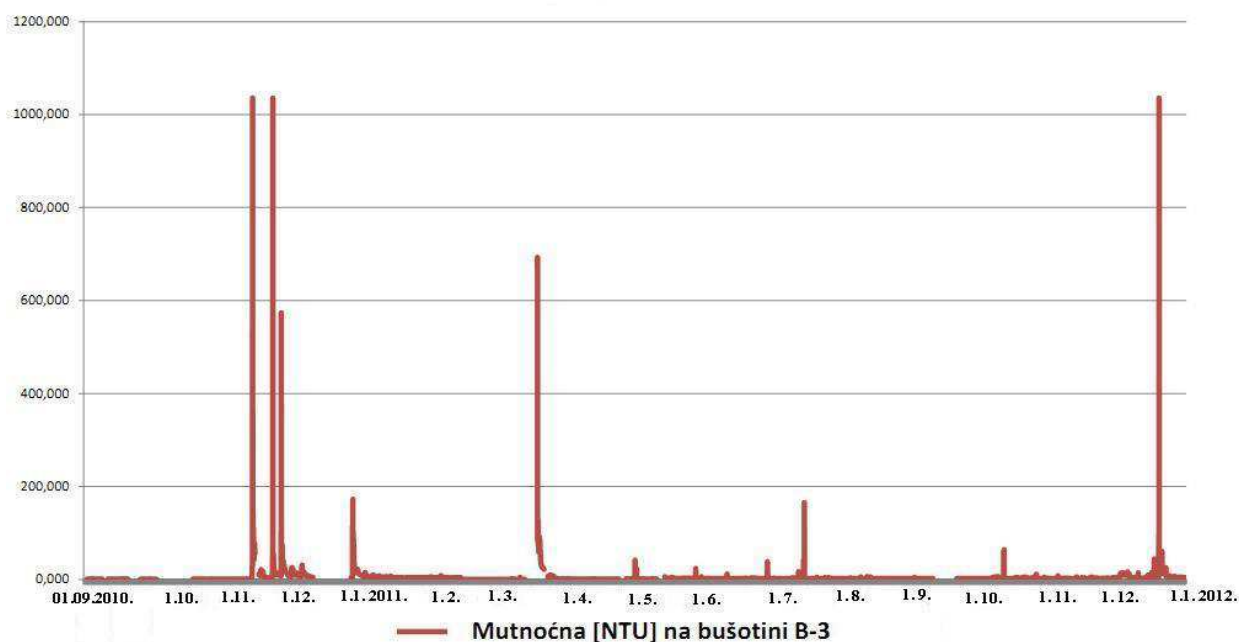
Iz dijagrama je vidljivo da postoji veliko kolebanje podzemnih voda ovisno o hidrološkim uvjetima na slivu. Također je vidljivo da vodostaji rijeka rastu u isto vrijeme kao i razine podzemnih voda (porast se vidi malo ranije što može biti posljedica površinskog otjecanja sa izravnog sliva rijeka) i amplitude kolebanja su im gotovo jednakih veličina (pogotovo Jadro i Gizdavac) što potvrđuje brzu podzemnu vodnu vezu i količinu dotoka.



Slika 5.9. Dijagram mjerenih razina podzemnih voda u bušotinama B-1 i B-3 i mjereni vodostaji na rijekama Jadro i Žrnovnica

Kod bušotine na Dugopolju izmjerene minimalne razine podzemne vode iznose 85 m n.m., a maksimalne 205 m n.m., što ukazuje na veliku amplitudu kolebanja podzemnih voda, a ujedno ukazuje da je u vrijeme visokih voda podzemna voda na samo 30 metara dubine od površine terena. Kod bušotine na Gizdavcu situacija je slična, minimalna kota razine podzemne vode je na 125 m n.m., a maksimalna na 225 m n.m., odnosno minimalna dubina do vode je 35 metara. U oba slučaja, za vrijeme obilnih oborina razina podzemne vode se nalazi vrlo blizu površine terena i ispire veliku debljinu nesaturirane zone, što je vrlo važno radi procjene ranjivosti i rizika od onečišćenja podzemnih voda.

Osim podataka o razinama podzemne vode u ovom radu korišteni su i podaci monitoriga mutnoće podzemne vode u dubokim istražnim bušotinama. Smatra se da je to jedan od važnih pokazatelja u procjeni prirodne ranjivosti krškog vodonosnika jer ukazuje na odnos količine oborina i kakvoće vode podzemnih voda. Za potrebe ove analize obrađeni su satni podaci monitoringa na bušotini B-3 (Gizdavac) od 27.8.2010. do 1.1.2012. jer je to najcjelovitiji niz mjerenih podataka (slika 5.10).



Slika 5.10. Dijagram mjerenja mutnoće u bušotini B-3

Iako je većinu vremena vrijednost mutnoće ispod 4 NTU, jedinica koliko je propisano Pravilnikom o parametrima sukladnosti i metodama analize vode za ljudsku potrošnju (*NN, 2013b*) (najčešće između 1 i 2 NTU), graf prikazan na **slici 5.10.** prikazuje promjene mutnoće koje ukazuju na drastično povećanje mutnoće u vrijeme podizanja razina podzemnih voda (uslijed obilnih padalina), a javlja se kao posljedica ispiranja nezasićene zone vodonosnika. Ovi rezultati uzeti su u obzir kod prilagodbe parametra oborina za procjenu prirodne ranjivosti i rizika od onečišćenja podzemnih voda u slivu izvora Jadra i Žrnovnice.



## 6. Procjena prirodne ranjivosti, opasnosti i rizika podzemne vode

### 6.1. Povijesni pregled

Koncept ranjivosti podzemne vode zasniva se na pretpostavci da fizički uvjeti u okolišu pružaju svojevrsnu prirodnu zaštitu podzemnim vodama od antropogenih utjecaja. Za prvu procjenu ranjivosti vodnih sustava, ujedno i za uvođenje pojma "ranjivost podzemnih voda od onečišćenja", zaslužan je *Margat (1968)*. Od tada se mnogo znanstvenika bavilo ovom problematikom razvijajući i predlažući pri tome različite metode za procjenu ranjivosti. *Vrba & Zaporozec (1994)* daju pregled do tada prisutnih metoda. Uz to, predlažu prvu kompletnu definiciju ranjivosti, prema kojoj je ranjivost kvalitativno, relativno, nemjerljivo i bezdimenzionalno svojstvo nekog prirodnog sustava. Oni predlažu i osnovnu podjelu ranjivosti na:

- prirodnu ranjivost – koja je isključivo vezana za hidrogeološke značajke vodonosnika i ne ovisi o vrsti onečišćivača, ni o načinu kretanja onečišćenja
- specifičnu ranjivost – koja uzima u obzir sve značajke onečišćivača (ili grupe onečišćivača) i njihovo međudjelovanje s hidrogeološkim sustavom.

Idući veći pomak bio je pokretanje projekta *COST 65 (1995)* pod nazivom Hidrogeološki aspekti zaštite podzemnih voda u krškim područjima (*eng. Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas*) kojim se naglasila potreba za složenim geološkim, hidrogeološkim, hidrološkim, geofizičkim, hidrogeokemijskim i drugim istraživanjima svih dijelova krškog vodonosnog sustava. U izvješću koje je predstavljeno po završetku projekta dane su sve definicije koje na bilo koji način opisuju ranjivost kao svojstvo vodonosnog sustava. Uz to, prikazan je i pregled postojećih regulativa i mjera u zaštiti podzemnih voda u kršu, kao i preporuke. Jedna od mjera bila je i procjena ranjivosti vodonosnih sustava. Kao posljedica toga došlo je do razvoja različitih metoda za procjenu ranjivosti, za koje se predlagalo da postanu alati kod strategija zaštite vodnih resursa i u upravljanju okolišem. *Gogu & Dassargues (2000a)* objavili su općeniti pregled do tada postojećih metoda, svrstavajući ih u dvije osnovne klase i još nekoliko podklasa:

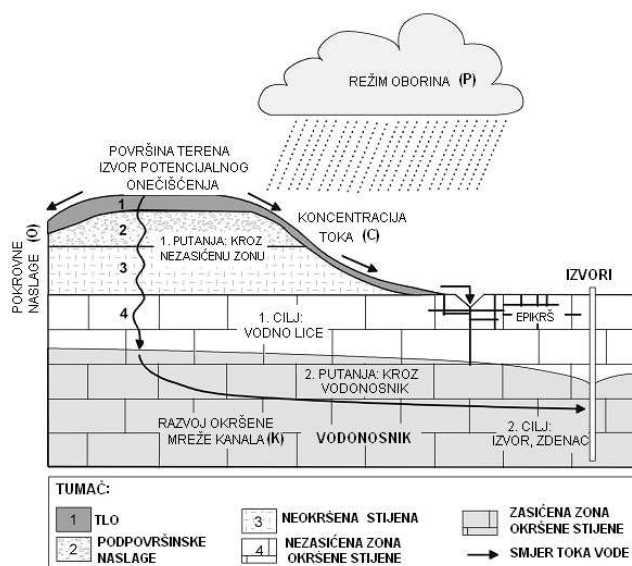
- Metode hidrogeološkog kompleksa – koje procjenjuju ranjivost na kvalitativan način, na temelju određenih hidrogeoloških, morfoloških i hidrografskih značajki. Sva područja s istim propisanim značajkama imaju jednaku razinu ranjivosti.
- Parametarske metode – temelje se na vrednovanju određenih parametara, a dijele se na:
  - o Metode matričnog sustava – kombinacija malog broja odabranih parametara, dobije se upotrebom matričnog sustava (primjerice Irska metoda, (*DoELG/EPA/DSI, 1999*))
  - o Metode jednostavnog vrednovanja – svaki parametar ima konstantni raspon vrijednosti (klase), a konačna procjena ranjivosti dobiva se zbrajanjem ili množenjem parametara, primjerice GOD metoda, (*Foster, 1987*)
  - o Metode bodovanja s dodjeljivanjem težinskih vrijednosti – uvode težinske faktore koji množe parametre i na taj način naglašavaju utjecaj nekog parametra u odnosu na druge (DRASTIC (*Aller et al., 1987*), EPIK (*Doerfliger et al., 1999*), SINTACS (*Civita & DeMaio, 2000*)).

Često su te metode bile slične, promatrale su slične parametre i imale slične sustave bodovanja, no nerijetko se dogodilo da bi primjenjivanjem nekoliko različitih metoda na istom području dobili vrlo različite karte ranjivosti. Da bi se to izbjeglo (ili barem umanjilo) pokrenut je novi COST projekt pod nazivom "Kartiranje ranjivosti i rizika u svrhu zaštite karbonatnih (krških) vodonosnika" (*eng. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*) (*Zwahlen, 2004*). Osnovni cilj ovog projekta, koji je pokrenut 1997. godine na temelju rezultata projekta COST 65, bio je predložiti objektivnu metodologiju i okvirne smjernice za ujednačeni pristup u procjeni ranjivosti i rizika. Tako je nastao tzv. Europski pristup (*eng. "European Approach"*) za određivanje prirodne i specifične ranjivosti, te rizika u krškim vodonosnim sustavima. Potrebno je odmah naglasiti da Europski pristup nije metoda, nema detaljne upute, formule za izračun ili tabele za isčitavanje vrijednosti. To je skup smjernica koje definiraju i detaljno objašnjavaju parametre koji su se do tada često koristili u različitim metodama procjene ranjivosti, ali su bili interpretirani na različite načine. Uz to, točno su definirani pojmovi radi usporedbe rezultata sličnih analiza, tako da se istakla precizna razlika kod procjene ranjivosti, opasnosti i rizika, zatim razlika u procjeni ranjivosti samog vodonosnika ili pojedinog izvorišta, te razlika u procjeni prirodne i specifične ranjivosti. Na taj se način postigla željena ujednačenost, a opet zadržala fleksibilnost i mogućnost prilagodbe lokalnim uvjetima, pojedinim regijama različitih

okolišnih značajki, različitog stupnja ekonomskog razvoja i znanstvenog stupnja istraženosti krša (*Daly et al., 2002*). Međutim, to ne znači da je time završilo razdoblje novih metoda procjene ranjivosti, budući da znanstvenici diljem svijeta i dalje traže i razvijaju nove metode DISCO (*Pochon et al., 2008*); PaPRIKa (*Kavouri et al., 2011*); itd. ili kombiniraju postojeće (*Civita, 2010*) kojim bi najbolje procijenili ranjivost nekog područja.

## 6.2. Osnovni koncept Europskog pristupa

Uspostavom Europskog pristupa u procjeni ranjivosti predložen je konceptualni model kojim se na pojednostavljen način nastojalo objediniti najvažnije segmente u opisivanju ranjivosti, a to je tzv. "porijeklo – put – cilj" model (*slika 6.1*).



Slika 6.1. Model "porijeklo – put – cilj" (prema: *Zwahlen, 2004*)

Objašnjenje ovog konceptualnog modela razjašnjava i razliku između dva glavna pristupa u procjeni prirodne ranjivosti, a to je zaštita (ili procjena ranjivosti) vodonosnika i zaštita (ili procjena ranjivosti) pojedinačnog izvorišta u kršu. Možda na prvi pogled izgleda pretjerano praviti razliku između toga jer zaštita izvora podrazumijeva i zaštitu vodonosnika, no obratno ne vrijedi. Zato je potrebno pratiti kompletni "put" i "cilj" onečišćenja. U oba slučaja "porijeklo" se odnosi na površinu terena na kojem se očekuje ili promatra potencijalni izvor onečišćenja, dok je kod zaštite vodonosnika "cilj" razina podzemne vode, a "put" samo vertikalni tok kroz nesaturiranu zonu. Kod zaštite izvora, koji je krajnji cilj, prati se i horizontalni tok kroz saturirani dio vodonosnika.

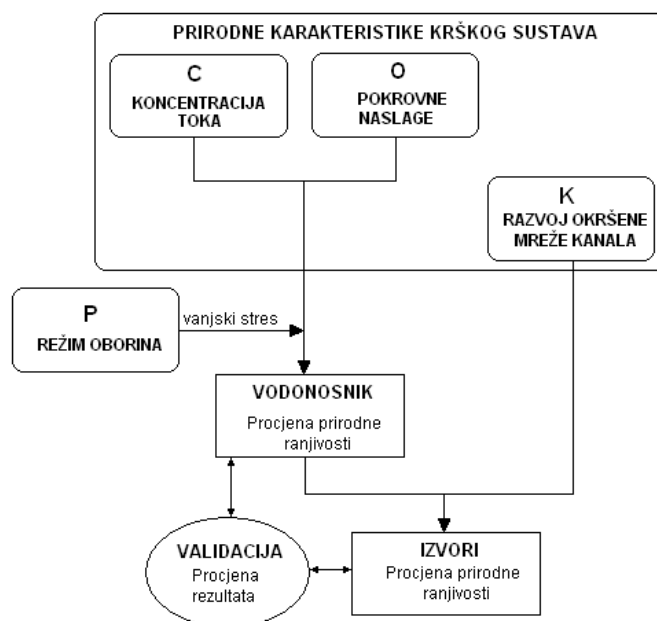
Ovaj model ranjivosti ostvaruje se procjenom vrijednosti četiri glavna faktora, a to su: krovinske naslage (O faktor – eng. "*overlying layers*"), koncentracija toka (C faktor – eng. "*concentration of flow*"), režim oborina (P faktor – eng. "*precipitation regime*") i stupanj okršenosti (K faktor – eng. "*karst network development*") (slika 6.2).

**O faktor** predstavlja zaštitnu funkciju pokrovnih slojeva (tlo i nezasićena zona), zbog njihove mogućnosti razrjeđenja i zadržavanja potencijalnog onečišćenja. Europski pristup predviđa četiri sloja pokrovnih naslaga (slika 6.1): tlo (nastalo trošenjem stijena na površini, sastoji se od minerala, organske tvari, vode, zraka i živih bića), podpovršinske naslage (nalaze se ispod tla, a nisu konsolidirane, važne su ukoliko sadrže makropore), nekrške stijene (važan je tip stijene) i nesaturirane okršene stijene koje se često nazivaju i epikrška zona. Ukoliko epikrška zona koncentrira tokove, ona ne predstavlja zaštitni element. Vrijednost faktora O općenito ovisi o značajkama pokrovnih slojeva (poput poroznosti i propusnosti) i njihovoj debljini.

**C faktor** predstavlja stupanj do kojeg se oborine koncentriraju prema mjestima brze infiltracije u krško podzemlje. Vrijednost faktora C ovisi o parametrima koji kontroliraju površinsko tečenje kao što su nagib terena, značajke površinskih slojeva (debljina, propusnost i infiltracijski kapacitet tla), vegetacija i prisutnost mjesta koncentrirane infiltracije (ponori, jame, vrtače). Ukoliko je prihranjivanje vodonosnika difuzno, faktor C nema veliki značaj na povećanje ranjivosti.

**P faktor** uzima u obzir ukupne godišnje oborine, njihovu učestalost, trajanje i intenzitet ekstremnih događaja. Ovaj faktor može utjecati na tip i količinu infiltracije ili formiranje površinskog otjecanja. Faktor P je vanjski čimbenik koji utječe na sve ostale parametre.

**K faktor** predstavlja stupanj okršenosti vodonosnika i razvoj mreže okršenih kanala. Prvenstveno se tu misli na horizontalne tokove u saturiranom dijelu vodonosnika. Ocjena vrijednosti K faktora temelji se na geološkom opisu podloge, izdvajanju krških geomorfoloških obilježja, rezultatima trasiranja podzemnih tokova, rezultatima probnih crpljenja, geofizičkih istraživanja, podataka iz bušenja i sličnog. Ovaj faktor koristi se samo kod procjene ranjivosti izvorišta.



Slika 6.2. Shema izrade karata ranjivosti kombinacijom parametara O, C, P i K (prema: *Zwahlen, 2004*)

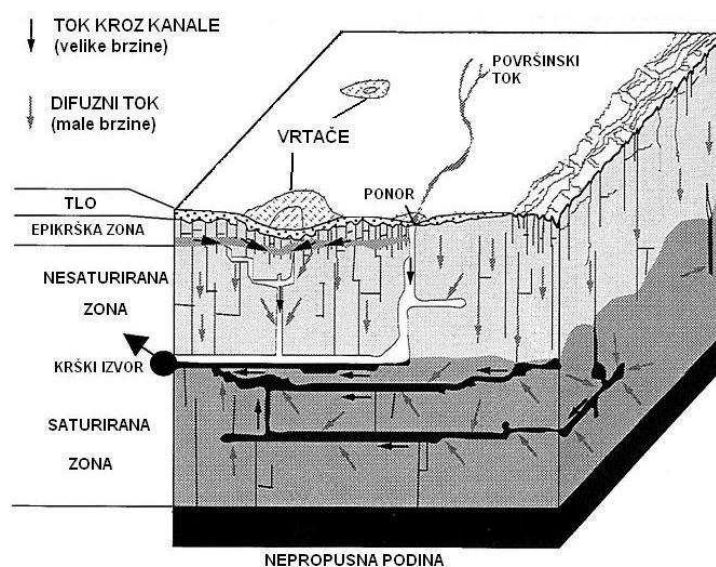
### 6.3. Dosadašnja istraživanja ranjivosti, opasnosti i rizika

Detaljna geološka, hidrogeološka i hidrološka istraživanja osnovni su preduvjet za izradu karte ranjivosti jer je samo na taj način moguće je prepoznati individualna obilježja krškog sustava koja je potrebno uvažiti kod procjene ranjivosti i rizika za podzemne vode u kršu.

U svakom slučaju pažnju treba usmjeriti na nekoliko osnovnih značajki krša:

- krški slivovi su vrlo često velikih dimenzija, povezuju vrlo velike dijelove terena i stoga je ponekad teško odrediti stroge granice slivova;
- anizotropija i heterogenost krških slivova ograničavaju primjenu interpolacije i ekstrapolacije podataka;
- vodonosnici se prihranjuju na dva osnovna (vrlo različita) načina – difuzno kroz pokrovne naslage i koncentrirano kroz geomorfološke objekte (ponore, jame, vrtače);
- postojanje i stupanj razvoja epikrške zone vrlo je teško odrediti s površine;
- epikrška zona može imati dvojnu funkciju s pogleda ranjivosti vodonosnika – pozitivnu, ako su pukotine ispunjene sitnozrnatim materijalom koji može zadržati vodu (onečišćenje), ili negativnu, ako pukotine koncentriraju podpovršinske tokove;

- krški vodonosnici imaju dominantnu pukotinsku, odnosno pukotinsko-kavernoznu poroznost (kanali imaju ulogu drenova), ali je prisutna i intergranularna poroznost u matriksu stijene (podzemna voda je uskladištena u pukotinama i porama);
- prisutne su dvije komponente toka: brza, kroz pukotine i kanale (omogućuje vrlo brzo reagiranje na hidrološke događaje) i spora, kroz matriks stijene, male pukotine i prsline (omogućuje dugo zadržavanje vode u podzemlju što je povoljno po pitanju kakvoće podzemne vode);
- vrlo je teško odrediti vodno lice, koje je često diskontinuirano i oscilirajuće i do nekoliko desetaka metara u kratkom vremenskom razdoblju (brza reakcija na hidrološke događaje).



Slika 6.3. Konceptualni model krškog vodonosnika koji se koristi kod procjene prirodne ranjivosti (prema: *Doerfliger & Zwahlen, 1995*)

Zaštita podzemnih voda temelji se na odgovarajućoj analizi rizika. U smjernicama COST projekta 620 rizik se definira kao vjerojatnost pojave štete uslijed opasnosti. Primijenjeno na zaštitu podzemnih voda, procjena rizika predstavlja analizu mogućeg onečišćenja podzemnih voda aktivnostima na površini terena u zoni utjecaja na vodonosnik. Europski pristup, predložen projektom COST 620, preporuča korištenje tri indeksa rizika: indeks intenziteta rizika, indeks osjetljivosti rizika i ukupni indeks rizika. Indeks intenziteta rizika odnosi se na mogućnost pojave neke štete, a procjenjuje se kombiniranjem prirodne ranjivosti sustava i rezultata provedene analize opasnosti. Indeks osjetljivosti na rizik odnosi se na posljedice do

kojih će doći uslijed pojave štete. Ukupni indeks rizika predstavlja matematički algoritam kojim se kombiniraju vrijednosti intenziteta rizika i osjetljivosti na rizik. Konačni cilj analize rizika je procjena ukupnog rizika koji se prikazuje na karti rizika i služi kao jedna od glavnih podloga u donošenju odluka o zaštiti voda i prostornom planiranju.

U Republici Hrvatskoj dosad je napravljeno nekoliko radova u kojima se određuje ranjivost podzemnih voda na onečišćenje u krškim vodonosnicima. *Biondić et al. (2002)* su, u suradnji sa slovenskim kolegama, primijenili SINTACS metodu za određivanje prirodne ranjivosti na slivu izvora Rižane. *Kapelj et al. (2005)* su primijenili SINTACS i PI metode za procjenu ranjivosti u zadarskom zaleđu. *Kapelj et al. (2007)* su koristili COP metodu pri određivanju ranjivosti na prekograničnim vodonosnicima između Plitvičkih jezera i sliva rijeke Une. *Biondić (2005)* je u sklopu doktorske disertacije procijenio prirodnu ranjivost i rizik sliva izvora Kupice. *Biondić et al. (2008)* analizirali su prirodnu ranjivost, opasnosti i rizik na području Plitvičkih jezera. *Biondić et al. (2009)* procijenili su prirodnu ranjivost na području krškog dijela Republike Hrvatske. *Vujnović (2010)* je u sklopu doktorske disertacije procijenila prirodnu ranjivost parka prirode "Žumberak – Samoborsko gorje" korištenjem modificirane COP metode i pojednostavljene metode (*Nguyet & Goldscheider, 2006*). *Meaški (2011)* je u sklopu svoje doktorske disertacije procijenio prirodnu ranjivost, opasnosti i rizik na području nacionalnog parka Plitvička jezera.

U ovom radu prirodna ranjivost je procijenjena korištenjem četiri metode: **SINTACS** metode (*Civita & DeMaio, 2000*), **EPIK** metode (*Doerfliger et al., 1999*), **PI** metode (*Goldscheider et al., 2000*) i **COP** metode (*Vias et al., 2002*). SINTACS metoda je najstarija od njih, primjenjiva je u svim tipovima vodonosnika (bez obzira na vrstu poroznosti), vrednuje sedam parametara i sadrži težinske faktore za četiri okolišna slučaja. EPIK i PI metode također su nastale prije projekta COST 620, ali su u sklopu projekta opširno testirane (*Zwahlen, 2004*). Prilagođene su procjeni ranjivosti u kršu i predstavljaju osnovu za razvoj Europskog pristupa. COP metoda proizašla je iz Europskog pristupa i najprilagođenija je toj terminologiji i metodologiji. Teorijske osnove ove četiri metode, kao i osnovni principi za procjenu opasnosti i rizika podzemnih voda od onečišćenja opisani su u nastavku ovog rada.

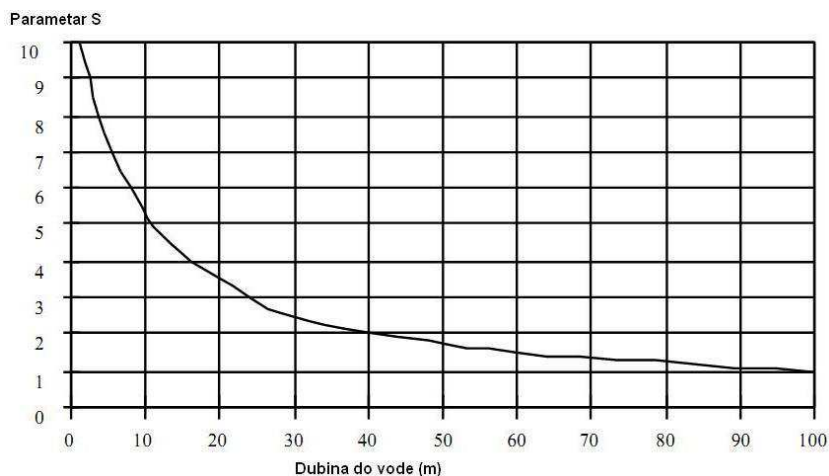
## 6.4. Osnove SINTACS metode

Metoda procjene ranjivosti SINTACS razvijena je 90-ih godina u Italiji po uzoru na američki DRASTIC (*Aller et al., 1987*). Autori ove metode željeli su predložiti model za procjenu ranjivosti koji bi bio primjenjiv na području cijele Italije (bez obzira na tip vodonosnika) kako bi rezultati bili usporedivi. Kroz godine se prvotno predložen sustav procjene nadopunjavao na temelju iskustava s provedenih ispitivanja (preko 500 primjena metode na različitim područjima), predlagane su novije i poboljšane verzije metode, sve do 2000. godine kada je predložena verzija SINTACS R5 (*Civita & De Maio, 2000*). Prema toj verziji, procjena ranjivosti temelji se na vrednovanju sljedećih sedam parametara: dubina do podzemne vode, djelovanje efektivne infiltracije, kapacitet razrijeđenja u nezasićenoj zoni, kapacitet razrijeđenja u tlu/pokrovnim naslagama, hidrogeološka obilježja vodonosnika, raspon hidrauličke vodljivosti vodonosnika i hidrološka uloga nagiba terena. Uz to, za razliku od DRASTIC metode, ima pet težinskih sustava koji ovise o hidrogeološkoj građi vodonosnika i površinskim uvjetima antropogenog opterećenja.

Parametri koji se pojavljuju u modelu SINTACS konvertiraju se pomoću predloženih dijagrama, tablica, raspona i izračuna u SINTACS parametre, odnosno u S, I, N, T, A, C i S parametre, svaki u rasponu vrijednosti od 1 do 10 gdje veća vrijednost parametra označava veću ranjivosti vodonosnika.

**Parametar S** – dubina do podzemne vode definira se kao dubina piezometarske razine koja, zajedno sa značajkama nezasićene zone, određuje vrijeme procjeđivanja onečišćenog fluida i trajanje procesa razrijeđivanja uslijed različitih sorpcijskih procesa. U skladu s modelom, vrijednost procjene koja se odnosi na dubinu do podzemne vode se s porastom dubine smanjuje (**slika 6.4**).





Slika 6.4. Dijagram određivanja parametra S – dubina do podzemne vode (prema: *Civita & De Maio, 2000*)

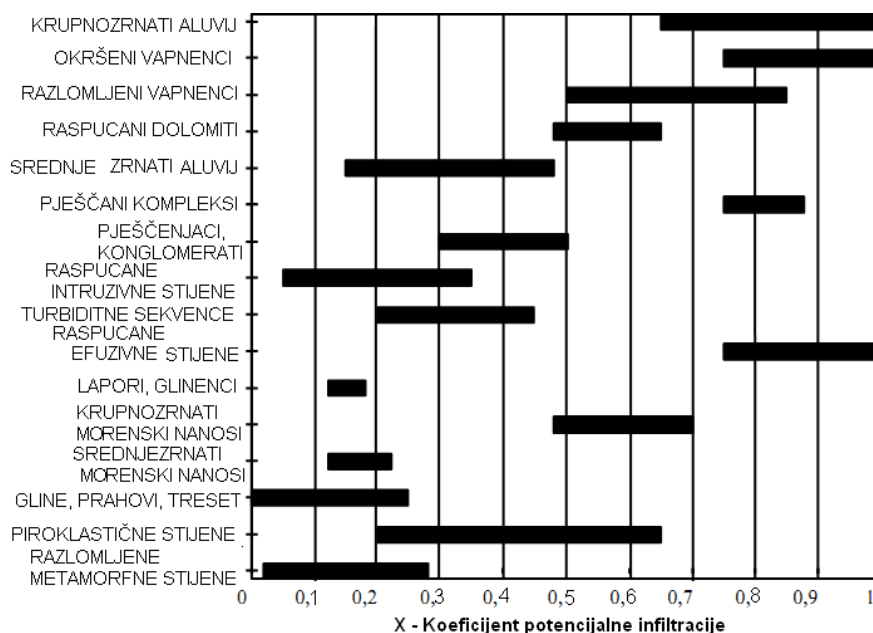
**Parametar I** opisuje ulogu efektivne infiltracije koja je značajna u ocjeni ranjivosti vodonosnika zbog procjeđivanja onečišćenja s površine terena i razrijeđenja za vrijeme transporta onečišćenja kroz nezasićenu i zasićenu zonu. Vrijednosti parametra su izračunate na temelju oborina ( $P$ ) i evapotranspiracije ( $E_t$ ) (niz od najmanje 20 srednjih godišnjih količina oborina i srednjih godišnjih temperatura zraka), u kombinaciji s površinskim hidrogeološkim uvjetima što je sadržano u indeksu potencijalne infiltracije ( $X$  – heta). Indeks  $X$  ovisi o: površinskoj litologiji vodonosnika (u slučaju izbijanja stijene vodonosnika na površinu terena ili pod oskudnim pokrovom tla) (slika 6.5), hidrauličkim značajkama tla, ako mu je debljina veća od 0,5 m (slika 6.6), nagibu površine terena i tipu relativne propusnosti medija izdanka stijene vodonosnika na površini.

Količina infiltracije  $I$  za područja gdje nema kontinuiranih naslaga tla se tada dobiva prema formuli (6.1):

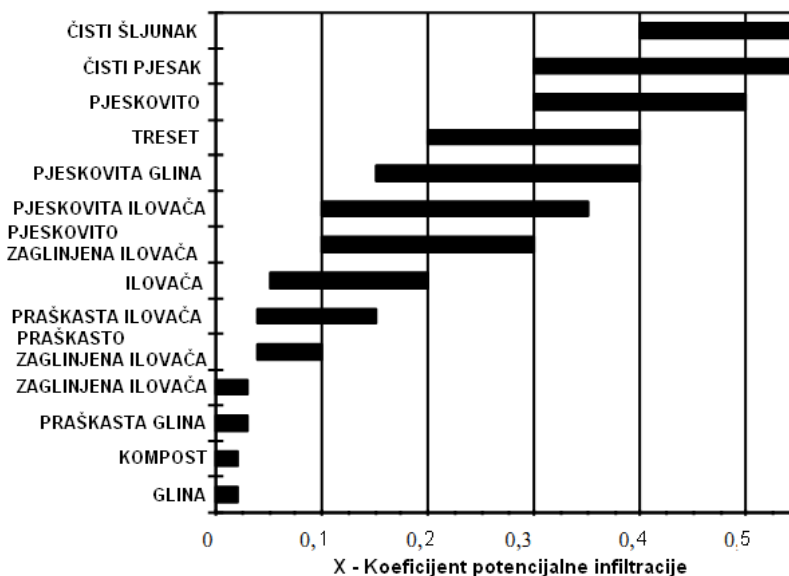
$$I = (P - E_t) \cdot X \quad (6.1)$$

A u područjima gdje je debljina tla veća od 0,5 metara prema formuli (6.2):

$$I = P \cdot X \quad (6.2)$$

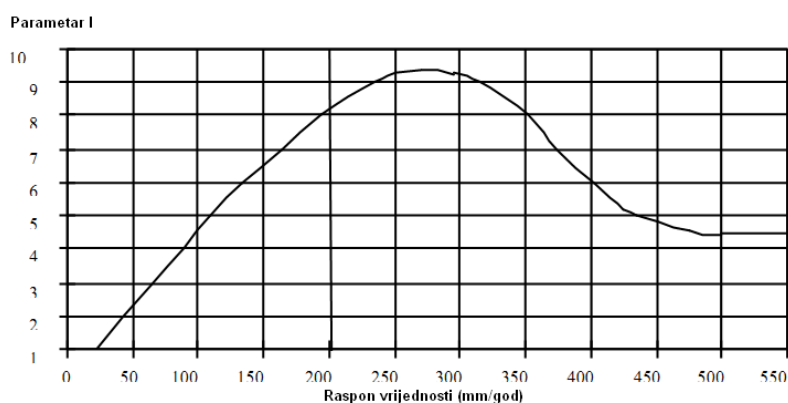


Slika 6.5. Dijagram određivanja koeficijenta X ovisno o vrsti stijene (prema: *Civita & De Maio, 2000*)



Slika 6.6. Dijagram određivanja koeficijenta X ovisno o teksturi tla (prema: *Civita & De Maio, 2000*)

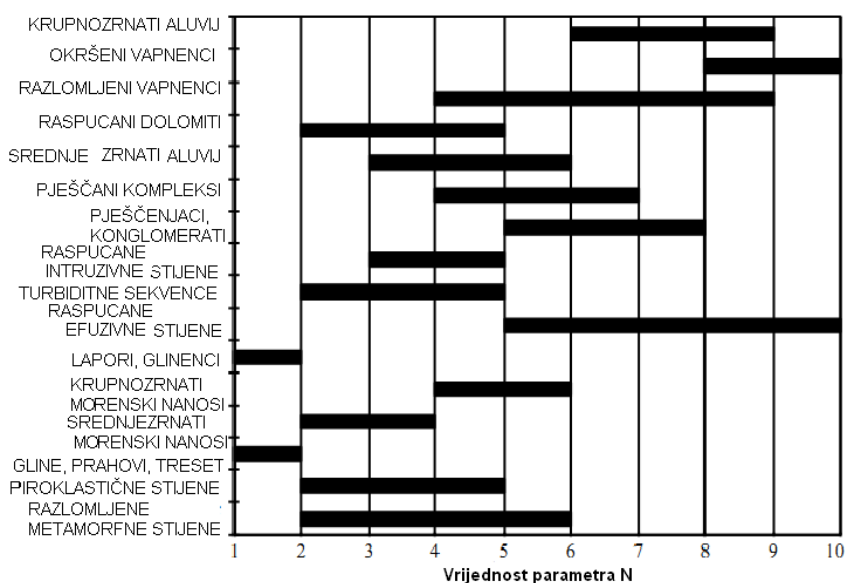
Rezultat I (mm/god) uvrštava se u dijagram (slika 6.7) koji daje vrijednost parametra I. Prikazana krivulja pokazuje da nakon određene vrijednosti infiltriranih količina dodatne količine smanjuju ranjivost. Taj učinak objašnjava se razrjeđenjem, odnosno smanjenjem koncentracije onečišćenja do kojeg dolazi uslijed velike količine oborina (a time i infiltracije).



Slika 6.7. Dijagram određivanja parametra I (prema: *Civita & De Maio, 2000*)

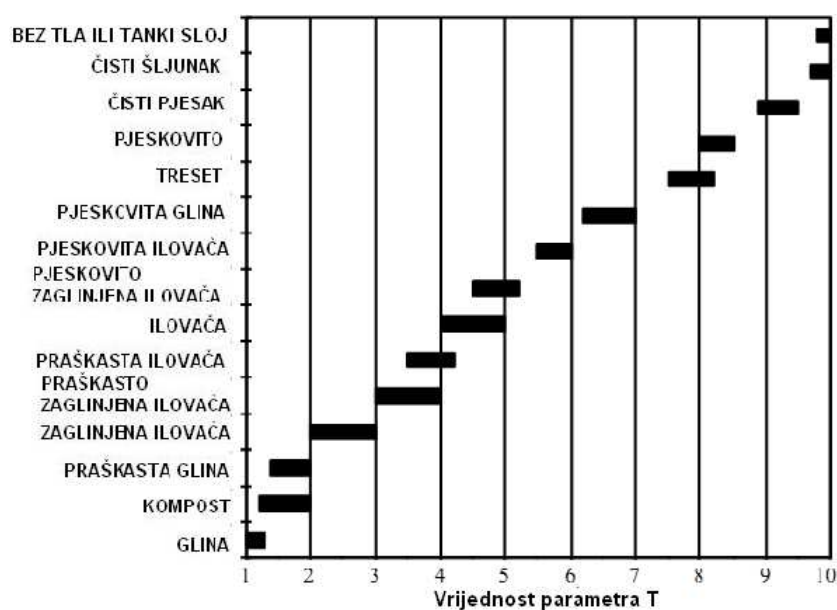
**Parametar N** opisuje kapacitet razrjeđivanja u nezasićenoj zoni. Nezasićena zona je druga linija obrane vodonosnika protiv onečišćenog fluida. Unutar nezasićene zone događaju se fizički i kemijski procesi koji djeluju na razrjeđivanje onečišćenja. Kapacitet razrjeđivanja uključuje litološke i hidrogeološke značajke nezasićene zone (tekstura, mineralni sastav, granulometrijski sastav, razlomljenost, okršavanje itd.). Predložen je dijagram (slika 6.8) za procjenu vrijednosti parametra N ovisno o hidrogeološkim značajkama naslaga. Ukoliko se po dubini nezasićene zone nalaze slojevi različitih litoloških i hidrogeoloških značajki, ukupna vrijednost parametra N dobiva se kao suma umnoška debljine i težinske vrijednosti pojedinog sloja podijeljeno s ukupnom debljinom nezasićene zone.

Ako je vodonosnik prekriven s jednim ili više nepropusnih slojeva, ocjena koja se pripisuje nezasićenoj zoni je 1.



Slika 6.8. Dijagram određivanja parametra N (prema: *Civita & De Maio, 2000*)

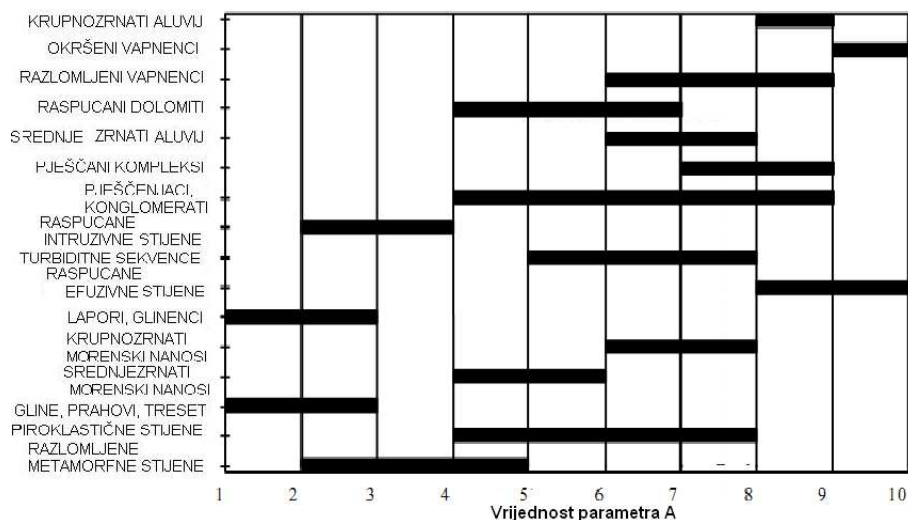
**Parametar T** opisuje kapacitet tla ili pokrovnih naslaga da zadrži onečišćenje. Tlo i pokrovne naslage imaju vrlo efikasnu ulogu usporavanja ili zadržavanja kretanja onečišćenja kroz hidrogeološki sustav, stoga su vrlo važne za ocjenu ranjivosti podzemnih voda. U tlu može doći do nekoliko bitnih procesa koji utječu na ponašanje potencijalnih onečišćivala, ovisno o svojstvima tla ili pokrovnih naslaga koja se promatraju kroz dvije skupine parametara. Prva skupina parametara definirana je: granulometrijskim sastavom, teksturom, dubinom, gustoćom, ukupnim porozitetom, hidrauličkom vodljivošću tla i raspoloživom količinom vode u tlu, te izravno utječe na adsorpciju, filtraciju, drenažni kapacitet, sadržaj vode i brzinu procjeđivanja. Druga grupa obuhvaća parametre: pH, kapacitet kationske izmjene (CEC), sadržaj organske materije i sadržaj glina, a oni omogućavaju sorpciju nekog kemijskog spoja ili elementa na čestice tla. Kako su podaci potrebni za takvu procjenu parametra T često nedostupni i ograničeni na podatke o granulometrijskom sastavu i teksturi, "rejting dijagrami" pozivaju se upravo na te značajke tla (slika 6.9).



Slika 6.9. Dijagram određivanja parametra T (prema: *Civita & De Maio, 2000*)

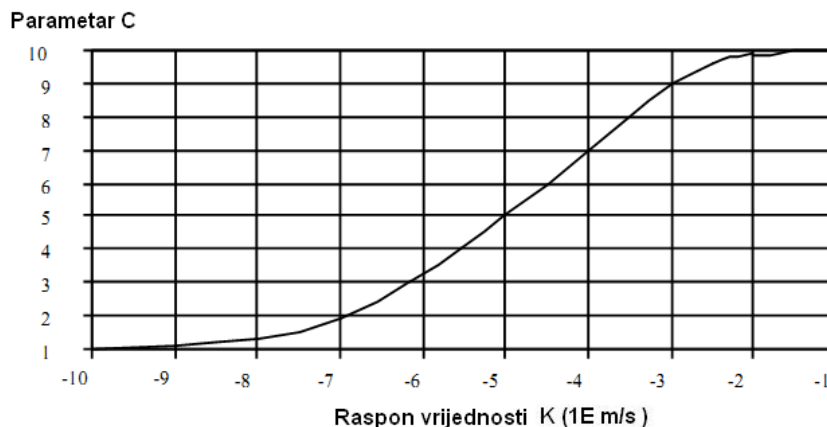
**Parametar A** predstavlja hidrogeološke značajke vodonosnika koje opisuju procese unutar saturirane zone vodonosnika, kada dolazi do miješanja onečišćenja s podzemnom vodom, a nakon što se koncentracija onečišćenja potencijalno smanji uslijed procjeđivanja kroz tlo i nesaturiranu zonu. Hidrogeološka istraživanja ujedinjuju sve dostupne podatke o litologiji, strukturi, raspucalosti i okršenosti saturirane zone (prikupljene geološkim istraživanjima, bušenjem, speleološkim istraživanjima...), što predstavlja jedinu bazu podataka neophodnu za

procjenu značajki ranjivosti vodonosnika. Na temelju dostupnih podataka pomoću ponuđenih raspona u "rejting dijagramima" (slika 6.10) može se odabrati vrijednost u svakom dijelu unutar vodonosnika.

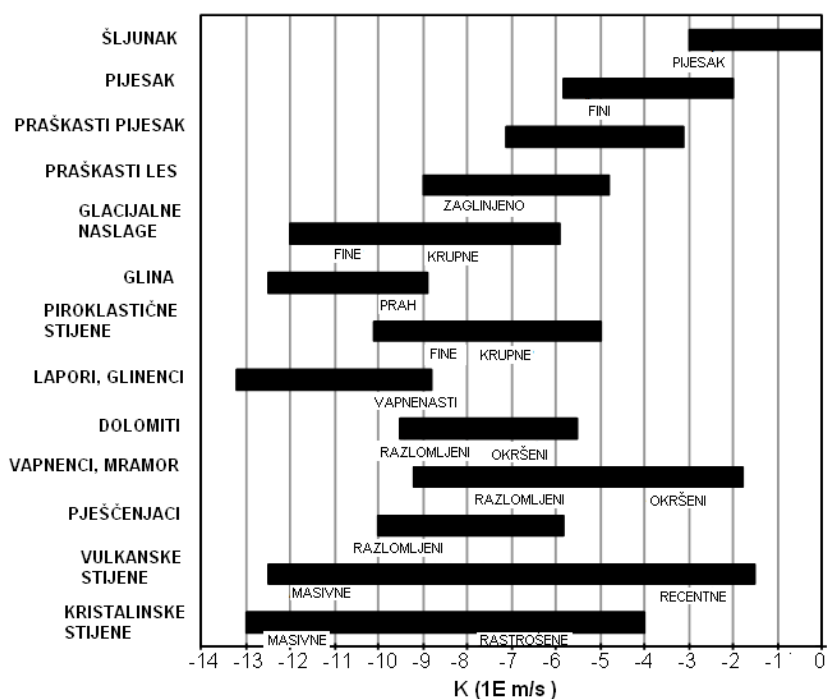


Slika 6.10. Dijagram određivanja parametra A (prema: *Civita & De Maio, 2000*)

**Parametar C** opisuje hidrauličku vodljivost vodonosnika koja predstavlja lakoću gibanja podzemne vode unutar saturiranog medija. Također može predstavljati i potencijal mobilnosti onečišćenja čija je gustoća i viskoznost jednaka vodi. Procjena i zoniranje ovog parametra je iznimno teško, posebno u planinskim područjima gdje nema zdenaca dostupnih za probno crpljenje ili injektiranje vode, a korištenje trasera je skupo i često neučinkovito. Dijagram ocjenjivanja (slika 6.11) za dodjeljivanje vrijednosti parametra C vezan je uz vrijednost hidrauličke vodljivost (K) koji je moguće procijeniti iz predloženog dijagrama (slika 6.12).

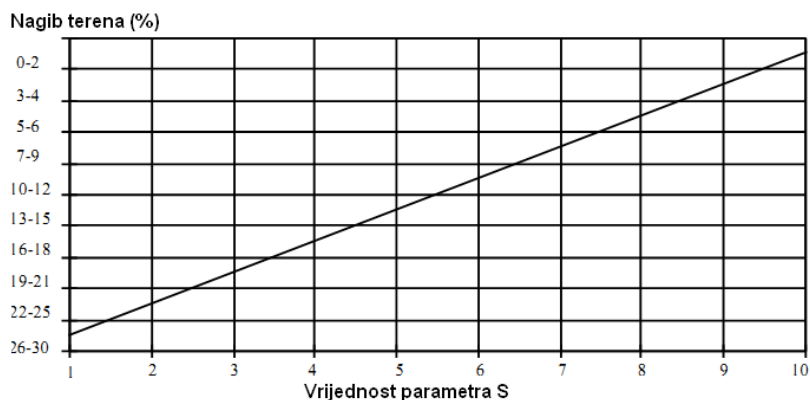


Slika 6.11. Dijagram određivanja parametra C (prema: *Civita & De Maio, 2000*)



Slika 6.12. Raspon vrijednosti hidrauličke vodljivosti, K za najčešće vrste vodnosnika (prema: *Civita & De Maio, 2000*)

**Parametar S** prikazuje hidrogeološku ulogu nagiba terena. Nagib terena je važan faktor u procjeni ranjivosti, jer određuje količinu oborina koja površinski otječe, te brzinu i smjer toka vode ili onečišćivala. Pri tome vrijednost parametra S linearno opada s povećanjem nagiba terena (slika 6.13). Znači da su veće vrijednosti parametra S dodijeljene zaravnjenim dijelovima terena jer je tamo manja mogućnost rasprostiranja (raspršenja) onečišćenja uslijed procesa pod utjecajem gravitacije. Osim toga, nagib terena može biti pokazatelj tipa tla, stoga indirektno određuje kapacitet zadržavanja onečišćenja.



Slika 6.13. Dijagram određivanja parametra S – utjecaj nagiba terena (prema: *Civita & De Maio, 2000*)

Nakon što se odrede vrijednosti svih parametara, za procjenu konačnog stupnja ranjivosti potrebno je još odrediti sustav težinskih koeficijenata. Već je spomenuto da metoda predviđa pet pojedinačnih sustava za različite scenarije, kojima se definiraju težinski koeficijenti svakog pojedinog parametra, kako bi se procijenjeni parametri što je moguće bolje prilagodili ukupnim hidrogeološkim značajkama vodonosnika i antropogenom opterećenju na površini promatranog područja. Težinski faktori prikazani su u **tablici 6.1**. Zbroj težinskih faktora u svakom scenariju je 26. Scenariji "NORMALNI UVJETI" i "VELIKO OPTEREĆENJE" odnose se na nizinska područja s debelim slojem tla i plitkim vodnim licem. Razlika je u tome da se u prvom slučaju radi o relativno prirodnim uvjetima u područjima s malom gustoćom naseljenosti, s ekstenzivnom poljoprivredom, bez agresivne upotrebe agrokemijskih sredstava, dok se u drugom slučaju radi o područjima intenzivne poljoprivrede sa značajnim utjecajem agrokemijskih sredstava i navodnjavanja, velikim naseljima i industrijskim kompleksima i sa stalnim opterećenjem otpadnih voda. Treći slučaj "PROCJEDIVANJE" odnosi se na područja u kojima je dubina do podzemne vode zanemariva, tj. radi se o močvarama ili poplavljenim područjima. Slučajevi scenarija "KRŠ" i "RASPUCALE STIJENE" jasni su iz samog naziva.

Tablica 6.1. Težinski koeficijenti SINTACS metode

PARAMETAR	NORMALNI UVJETI	VELIKO OPTEREĆENJE	PROCJEDIVANJE	KRŠ	RASPUCALE STIJENE
S	5	5	4	2	3
I	4	5	4	5	3
N	5	4	4	1	3
T	4	5	2	3	4
A	3	3	5	5	4
C	3	2	5	5	5
S	2	2	2	5	4

Konačna ocjena ranjivosti dobiva se izračunom indeksa ranjivosti prema formuli (6.3):

$$I_{SINTACS} = \sum_{i=1}^7 P_i \cdot W_i \quad (6.3)$$

gdje  $P_i$  predstavlja parametre SINTACS metode, a  $W_i$  pripadajuće težinske faktore.

Raspon vrijednosti SINTACS indeksa ranjivosti je od 26 do 260. Ranjivost se prikazuje na karti različitim bojama u šest klasa prema **tablici 6.2.**

*Tablica 6.2. Klase ranjivosti SINTACS metode*

<b>I<sub>SINTACS</sub></b>	<b>Klasa ranjivosti</b>
26 - 80	Vrlo niska
>80 - 105	Niska
>105 - 140	Srednja
>140 - 186	Velika
>186 - 210	Vrlo velika
>210 - 260	Ekstremna

SINTACS metoda je do sada primijenjena za procjenu ranjivosti različitih vrsta vodonosnika, s međuzrnskom, pukotinskom ili kavernožnom poroznosti. Testirana je na mnogim dijelovima Italije (*Civita & De Maio, 2000; Corniello et al., 2004; Polemio et al., 2009*), u nekim dijelovima Slovenije (*Janža & Prestor, 2002; Mali & Janža 2005; Uhan et al., 2008*) i Španjolske (*Longo et al., 2001*), te na području prekograničnog vodonosnika između Hrvatske i Slovenije (*Biondić et al., 2002*).

## 6.5. Osnove EPIK metode

**EPIK** metoda (*Doerfliger et al., 1999*) je razvijena u Švicarskoj i predstavlja svojevrsnu osnovu Europskog pristupa. Osnovna ideja ove metode bila je predložiti novi pristup i strategiju za poboljšanje metodologije u određivanju zona sanitarne zaštite izvorišta pitke vode u kršu na području Švicarske. Temelji se na proučavanju četiri osnovne značajke krških sustava: epikrška zona, pokrovne zaštitne naslage, uvjeti infiltracije i stupanj okršenosti sustava. Svaka od opisanih značajki predstavlja jedan parametar E, P, I i K u procjeni prirodne ranjivosti vodonosnika. U konačnom prikazu razlikuju se četiri stupnja ranjivosti. Ova je metoda razvijena isključivo za krške vodonosnike i procjena svakog od četiri parametra temeljena je na konceptualnom modelu krškog sustava prikazanom i opisanom ranije (**slika 6.3**).



**Parametar E** opisuje značajke epikrške zone. Epikrška zona obuhvaća podpovršinske naslage koje su izrazito razlomljene i rastrošene. Vrlo je teško opisivati značajke epikrške zone budući da je ona izrazito heterogena i složena za istraživanje. Stoga se klase epikrške zone određuju indirektno, pomoću nekih površinskih obilježja krša koje ukazuju na svojstva epikrške zone. Obično se ta obilježja izdvajaju iz topografskih podloga različitih mjerila, no svakako se preporuča izdvojene objekte potvrditi i po potrebi dopuniti pomoću novijih satelitskih snimaka (ukoliko su one dostupne). U ovoj metodologiji razlikuju se tri osnovne klase epikrške zone (slika 6.14): dobro razvijena – koja odgovara epikrškoj zoni dobro povezanoj s krškom mrežom i vodonosnikom; umjereno razvijena – može čak biti dobro razvijena, ali je slabo ili nikako povezana s vodonosnikom; te slabo razvijena ili potpuno odsutna epikrška zona.

KORAK I.

PARAMETAR E - Epikrška zona

EPIKRŠ	KLASA	KRŠKA MORFOLOŠKA OBILJEŽJA
Dobro razvijeni	E <sub>1</sub>	Ponori, jame, vrtače, ogoljene krške zaravni, izrazito izlomljeni izdanci i zasjeci uz ceste.
Umjereno razvijeni	E <sub>2</sub>	Umjerene zone krških zaravni, suhe doline, srednje razlomljeni izdanci.
Slabo razvijeni ili odsutan	E <sub>3</sub>	Nisu prisutni krška morfološka obilježja. Vrlo slaba razlomljenost.

→ E karta

Slika 6.14. Dijagram određivanja klasa parametra E (prema: *Doerfliger et al., 1999*)

**Parametar P** opisuje značajke pokrovnih zaštitnih naslaga, koje uključuju tlo i ostale nekrške naslage, kao što su kvartarne naslage (prahovi, prapor i stijensko kršje) ili gline i pješčenjaci. I u ovom slučaju najveću ulogu za određivanje ranjivosti vodonosnika ima tlo jer ono ima fizička, kemijska i biološka svojstva koja mu omogućuju da zadržava onečišćenje. Pri tome je presudna debljina sloja tla, jer ona određuje vrijeme zadržavanja vode unutar tog sloja. Deblje tlo ukazuje na manju ranjivost vodonosnika jer dulje vrijeme zadržava vodu (i onečišćenje), a time se povećava mogućnost da dođe do procesa smanjenja onečišćenja. EPIK metoda definira dva pristupa određivanja funkcije pokrovnih naslaga. U prvom slučaju se radi o tlu koje je izravno na vapnencima ili nekim drugim dobro propusnim naslagama, a u drugom slučaju se radi o tlu ispod kojeg se nalazi više različitih slojeva slabe propusnosti. U oba slučaja parametar P dijeli se u četiri klase, ovisno o debljini pojedinih slojeva, kao što je prikazano na slici 6.15. Za određivanje ovog parametra koriste se postojeći podaci kao što su

geološke, pedološke i topografske podloge, te satelitske snimke, ukoliko su dostupne. Podatke je potrebno verificirati terenskim opažanjima.

KORAK II.

PARAMETAR P - Pokrovne naslage

POKROVNE NASLAGE	KLASA	KARAKTERIZACIJA	
		A) Tlo izravno na vapnencima ili nekim drugim dobro propusnim naslagama	B) Tlo ispod kojeg se nalazi više različitih slojeva slabe propusnosti
ODSUTNE ↓ PRISUTNE	P <sub>1</sub>	0 - 20 cm tla	0 - 20 cm tla na naslagama debljine manje od 1 m
	P <sub>2</sub>	20 - 100 cm tla	20 - 100 cm tla na naslagama debljine manje od 1 m
	P <sub>3</sub>	100 - 200 cm tla	<100 cm tla ili >100 cm tla i >100 cm naslaga slabe propusnosti
	P <sub>4</sub>	> 200 cm tla	>100 cm tla na debelim naslagama slabe propusnosti ili >8 m gline i zaglinjenog praha

→ **P karta**

Slika 6.15. Dijagram određivanja klasa parametra P (prema: *Doerfliger et al., 1999*)

**Parametar I** opisuje uvjete infiltracije, tj. način prihranjivanja vodonosnika u kršu, s time da se ne određuje količina vode koja se infiltrira niti lokacija. EPIK metoda razlikuje četiri osnovne klase infiltracije: koncentrirano prihranjivanje, difuzno prihranjivanje vodonosnika, srednja klasa u kojoj površinsko otjecanje može imati važnu ulogu, te ostatak sliva (slika 6.16). Parametar I procjenjuje se u nekoliko koraka. Najprije je potrebno izdvojiti podslivove rijeka ponornica i ponorne zone kao dio sliva koji se prihranjuje koncentrirano. Zatim se pomoću nagiba terena i vegetacije izdvajaju druga i treća klasa infiltracije, tj. dijelovi na kojima se sliv prihranjuje difuzno, a na kojima dolazi do formiranja površinskog otjecanja. Onaj dio sliva koji nije ni u jednoj od tih kategorija svrstava se u posljednju klasu – ostatak sliva. Za razdvajanje druge i treće klase I parametra, EPIK metoda predlaže definiranje pomoću vrijednosti koeficijenta otjecanja za različite vrijednosti nagiba terena, uz podjelu vegetacije na šume, livade/pašnjake i obrađene površine. Pri tome treba imati na umu da su strmija područja s manje vegetacije označena kao ranjivija, jer koncentriraju površinski tok. Autori naglašavaju da su predložene granice praktične i proizvoljne.

## KORAK III.

## PARAMETAR I - uvjeti Infiltracije

UVJETI INFILTRACIJE	KLASA	KARAKTERIZACIJA
KONCENTRIRANO ↓	I <sub>1</sub>	Stalne ili povremene rijeke ponornice, uključujući i umjetne drenažne sustave, te okolica ponora ili vrtača u kojima dolazi do koncentrirane infiltracije vode u podzemlje.
	I <sub>2</sub>	Slivovi ponornica iz klase I <sub>1</sub> (bez umjetnih drenaža) s nagibom terena većim od 10% za obrađene površine i 25% za livade/pašnjake
	I <sub>3</sub>	Slivovi ponornica iz klase I <sub>1</sub> (bez umjetnih drenaža) s nagibom terena manjim od 10% za obrađene površine i 25% za livade/pašnjake. To su područja koja skupljaju vodu koja otječe sa strmijih područja (I <sub>2</sub> ).
DIFUZNO	I <sub>4</sub>	Ostatak sliva

→ **I karta**

Slika 6.16. Dijagram određivanja klasa parametra I (prema: *Doerfliger et al., 1999*)

**Parametar K** predstavlja stupanj okršnosti sustava i odnosi se na razvoj mreže kanala i pukotina u krškim stijenama, promjera (ili širine) veće od 10 mm kroz koje se odvija turbulentan tok vode. EPIK metoda predviđa tri osnovne klase za rangiranje okršnosti sustava, a to su (**slika 6.17**): dobro razvijena okršena mreža kanala, slabo razvijena okršena mreža kanala i raspucani vodonosnik. Obično se vrijednost parametra K procjenjuje jedinstveno za čitav sliv, budući da je ovo podpovršinsko svojstvo krškog vodonosnika nemoguće detaljno kartirati. Glavni pokazatelj razvoja mreže kanala u kršu je prisustvo ponora, jama i špiljskih sustava, no ukoliko one nisu vidljive s površine, ne znači da sustav nema okršenu mrežu. Autori predlažu tri načina karakterizacije K parametra: pomoću dviju analiza hidroloških podataka – analize vremena prihranjivanja izvora, te pomoću rezultata trasiranja podzemnih tokova.

## KORAK IV.

## PARAMETAR K - stupanj okršnosti sustava

MREŽA KANALA	KLASA	KARAKTERIZACIJA
Dobro razvijena	K <sub>1</sub>	Prisutna dobro razvijena okršena mreža (rijetko začepljeni i dobro spojeni kanali decimetarskih ili metarskih dimenzija)
Slabo razvijena	K <sub>2</sub>	Prisutna slabo razvijena okršena mreža (mreža malih pukotina ili ispunjenih pukotina ili slabo spojena mreža ili decimetarski i manji otvori)
Raspucani vodonosnik	K <sub>3</sub>	Prisutni izvori nastali u poroznom terenu. Samo raspucani, ne okršeni vodonosnik.

→ **K karta**

Slika 6.17. Dijagram određivanja klasa parametra K (prema: *Doerfliger et al., 1999*)

Nakon toga izračunava se zaštitni faktor  $F_P$  (*eng. protection factor*) uvrštavanjem vrijednosti pojedinih parametara zajedno s težinskim koeficijentima u empirijsku formulu:

$$F_p = \alpha \cdot E_i + \beta \cdot P_j + \gamma \cdot I_k + \delta \cdot K_l ; \quad (6.4)$$

gdje vrijednosti pojedinog parametra ( $E_i$ ,  $P_j$ ,  $I_k$  i  $K_l$ ) ovise samo o klasi u koju su svrstani, a mogu se očitati iz tablice 6.3, a vrijednosti težinskih koeficijenata iz **tablice 6.4**. Niska vrijednost faktora zaštite  $F_P$  odgovara visokom stupnju ranjivosti.

*Tablica 6.3. Vrijednosti E, P, I i K parametara ovisno o klasama (Doerfliger et al., 1999)*

Epikrška zona			Pokrovne naslage				Uvjeti infiltracije				Stupanj okršenosti		
$E_1$	$E_2$	$E_3$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$K_1$	$K_2$	$K_3$
1	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3

*Tablica 6.4. Vrijednosti težinskih faktora  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  i  $\delta$  (prema: Doerfliger et al., 1999)*

Epikrška zona (E)	Pokrovne naslage (P)	Uvjeti infiltracije (I)	Stupanj okršenosti (K)
$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
3	1	3	2

Iz **tablice 6.3** vidljivo je da su klase raspoređene tako da što je niži broj klase niža je i vrijednost koja doprinosi faktoru zaštite vodonosnika, odnosno, ranjivost vodonosnika na onečišćenje je veća. Jednako tako iz **tablice 6.4** vidljivo je da najniži težinski faktor zaštite imaju pokrovne naslage  $\beta = 1$ . Razlog tome je da se umanjuje eventualni precjenjeni utjecaj pokrovnih naslaga dobiven samo na temelju debljine tih naslaga. Najveće vrijednosti težinskih faktora zaštite dodijeljeni su utjecaju epikrške zone i infiltracije ( $\alpha = \gamma = 3$ ) zbog toga da doprinesu smanjenju stupnja ranjivosti, pogotovo u višim klasama ( $E_3$ ,  $I_4$ ) gdje omogućuju zaštitu vodonosnika neovisno o pokrovnim naslagama. Konačni prijedlog klasa ranjivosti, ovisno o vrijednostima zaštitnog faktora  $F_p$ , dan je u **tablici 6.5**, zajedno s prijedlogom zona sanitarne zaštite pitke vode u kršu ( $S_i$ ).

Tablica 6.5. Raspodjela klasa ranjivosti vodonosnika ovisno o vrijednostima zaštitnog faktora i prijedlog propisane zone zaštite (prema: **Doerfliger et al., 1999**)

KLASA RANJIVOSTI	ZAŠTITNI FAKTOR $F_p$	ZONA ZAŠTITE $S_i$
Vrlo visoka	< 19	$S_1$
Visoka	20 – 25	$S_2$
Umjerena	> 25	$S_3$
Niska	Prisutnost $P_4$	Ostatak sliva

Epik metoda testirana je na području švicarskih Alpi (St-Imier sliv – *Doerfliger et al., 1999*), na području Njemačke (Engen, Svabian Alb – *Zwahlen, 2004*), Italije (*Polemio et al., 2009*), te na području Slovenije (*Petrič & Šebela, 2004; Ravbar & Goldscheider, 2009*).

## 6.6. Osnove PI metode

PI metoda razvijena je u sklopu projekta COST 620, u Njemačkoj (*Goldscheider et al., 2000; Goldscheider, 2005*). Najprije je primijenjena i testirana na području Engena, gdje je uspoređena s još dvije metode (EPIK i GLA-Njemačka metoda), a nakon toga su metoda i njene modifikacije testirane na mnogo lokacija u više različitih država (*Zwahlen, 2004; Werz & Hötzl, 2007*). PI metoda koristi GIS tehnologiju, bazira se na pristupu "porijeklo – putanja – cilj" i predstavlja svojevrsan primjer Europskog pristupa u procjeni ranjivosti vodonosnika. Akronim PI odnosi se na dva glavna faktora koja se koriste za procjenu ranjivosti – P (pokrovne naslage) i I (uvjeti infiltracije), a konačna ranjivost vodonosnika određuje se pomoću faktora zaštite  $\pi$  koji je umnožak P i I.

**Faktor P** predstavlja zaštitnu ulogu svih slojeva između površine terena i razine podzemne vode: tlo (*eng. topsoil – T*), podpovršinske naslage (*eng. subsoil – S*), neokršene stijene i nesaturirane krške stijene (*eng. bedrock – B*). Faktor P funkcijom odgovara faktoru O iz Europskog pristupa, ali je PI nastala prije Europskog pristupa (po uzoru na njemačku metodu GLA (*Hölting et al., 1995*), stoga nazivlje nije jednako. Vrijednost parametra P procjenjuje se preko svojstva debljine i propusnosti svakog pojedinog sloja. Propusnost se određuje iz granulometrijskog dijagrama za nevezana tla ili kao funkcija litologije i razlomljenosti za stijene. U izračun se uvrštavaju i količina vode koja prihranjuje vodonosnik te arteški pritisak u vodonosniku prema shemi prikazanoj na **slici 6.18**.

**DOKTORSKI RAD**

**TLO - T**

eFC (mm)* do 1 m dubine	T
> 250	750
>200 - 250	500
> 140 - 200	250
> 90 - 140	125
> 50 - 90	50
< 50	0

**PRIHRANJIVANJE - R**

mm/god	R
0 - 100	1,75
> 100 - 200	1,5
> 200 - 300	1,25
> 300 - 400	1
> 400	0,75

\*eFC (eng. „effective field capacity“)- kapacitet aktivne vode u tlu dostupne biljkama

**PODPOVRŠINSKE NASLAGE - S**

Vrsta podtla (prema granulometrijskom sastavu)	S
Glina	500
Ilovačasta glina, blago prašinstva glina	400
Blago pjeskovita glina	350
Prašinstva glina, zaglinjena prašinstva ilovača	320
Zaglinjena ilovača	300
Vrlo prašinstva glina, pjeskovita glina	270
Vrlo ilovačasti prah	250
Blago zaglinjena ilovača, zaglinjena prašinstva ilovača	240
Vrlo zaglinjeni prah, prašinstva ilovača	220
Vrlo pjeskovita glina, pjeskovito prašinstva ilovača, blago pjeskovita ilovača, ilovačasti prah, zaglinjeni prah	200
Pjeskovita ilovača, blago ilovačasti prah	180
Blago zaglinjeni prah, pjeskovito ilovačasti prah, prah, vrlo pjeskovita ilovača	160

Vrsta podtla (prema granulometrijskom sastavu)	S
Vrlo zaglinjeni pijesak, zaglinjeni pijesak, ilovačasto praškasti pijesak	140
Pjeskoviti prah, vrlo ilovačasti pijesak	120
Ilovačasti pijesak, vrlo praškasti pijesak	90
Blago glinoviti pijesak, praškasti pijesak, pjeskovito zaglinjeni šljunak	75
Blago ilovačasti pijesak, pjeskovito prašinstva šljunak	60
Blago prašinstva pijesak, blago prašinstva pijesak sa šljunkom	50
Pijesak	25
Pijesak sa šljunkom, pjeskoviti šljunak	10
Šljunak, šljunak s brečom	5
Nelificiran vulkanski materijal (piroklastični)	200
Treset	400
Organski mulj (sapropel)	300

**STIJENE - B**

Litologija	L
Glinenci, škriljci, lapor, silit	20
Pješčenjak, kvarcit, vulkanske stijene, plutonit, metamorfiti	15
Porozni pješčenjak, porozne vulkanske stijene (tuf)	10
Konglomerat, breča, vapnenac, dolomitne stijene, gips	5

Razlomljenost	F
Nevezane	25
Umjereno vezane, slabo okršene, krška obilježja potpuno zapunjena	1
Umjereno okršene ili krška obilježja većinom zapunjena	0,5
Jako raspucane ili jako okršene i nezapunjene	0,3
Epikrška zona jako razvijena i nezapunjena	0
Podatak nepoznat	1

**B = L · F**

**DEBLJINA SVAKOG SLOJA U (m) - M**

**ARTEŠKI TLAK - A  
1500 bodova**

Slika 6.18. Shematski prikaz procesa procjene faktora P (prema: *Goldscheider et al., 2000*)

Formula (6.5) po kojoj se određuje funkcija zaštite  $P_{TS}$  i vrijednost P faktora glasi:

$$P_{TS} = \left[ T + \left( \sum_{i=1}^m S_i \cdot M_i + \sum_{j=1}^n B_j \cdot M_j \right) \right] \cdot R + A \quad (6.5)$$

Pri čemu je:

$P_{TS}$  – izračunata vrijednost funkcije zaštitnih naslaga

T – podfaktor funkcije tla

$S_i$  – podfaktor funkcije svih slojeva podpovršinskih naslaga po dubini

$M_{i/j}$  – debljina svakog sloja

$B_j$  – podfaktor funkcije svih slojeva stijena po dubini

R – podfaktor prihranjivanja vodonosnika

A – podfaktor arteškog pritiska

Tako izračunata vrijednost  $P_{TS}$  uvrštava se u tablicu (**tablica 6.6**) i iz nje se očitava vrijednost faktora P koji se prikazuje na P karti i dalje služi za analizu prirodne ranjivosti.

Tablica 6.6. Određivanje faktora P

$P_{TS}$	Zaštitna uloga pokrovnih naslaga	P - faktor	Primjer
0 - 10	Vrlo slaba	1	0 – 2 m šljunka
>10 - 100	Slaba	2	1 – 10 m pijeska sa šljunkom
>100 - 1000	Srednja	3	2 – 20 m blago prašinastog pijeska
>1000 - 10000	Visoka	4	2 – 20 m gline
>10000	Vrlo visoka	5	>20 m gline

**Faktor I** prikazuje mogućnost slabljenja funkcije pokrovnih zaštitnih naslaga kod infiltracije vode (ili onečišćivala) u vodonosnik zbog formiranja koncentriranih tokova kod površinskog i podpovršinskog otjecanja. Na nekom zaravnjenom području s vegetacijom nema značajnijeg otjecanja, već se voda ravnomjerno infiltrira u podzemlje prolazeći kroz sve slojeve zaštitnih pokrovnih naslaga – na takvim područjima faktor I ima vrijednost 1, tj. ranjivost isključivo ovisi o efikasnosti pokrovnih naslaga koja je opisana faktorom P. Za razliku od toga, ponori, jame ili druge krške forme omogućuju vodi (ili onečišćivalu) izravan ulaz u podzemlje,

zaobilazeći pri tome sve naslage u nesaturiranoj zoni. Na tim područjima vrijednost faktora I je 0, odnosno pokrovne naslage gube svoju zaštitnu funkciju. Na preostalom dijelu sliva faktor I poprima vrijednosti između 0 i 1, i ovisi o dominantnom procesu tečenja (koji se određuje kao funkcija propusnosti tj. koeficijenta hidrauličke vodljivosti pokrovnih naslaga), nagibu terena i vegetaciji (**slika 6.19**). PI metoda kod definiranja vrijednosti faktora I vrlo veliku pažnju posvećuje određivanju dominantnog procesa tečenja i razlikuje čak šest tipova (**slika 6.19**, prvi korak):

- Tip A: infiltracija s naknadnim procjeđivanjem kroz porozni medij (tlo i stijene) – dominantni je hidrološki proces kad je intenzitet kiše manji od upojnog kapaciteta tla i kad je hidraulička vodljivost tla dovoljno velika da omogući vertikalno kretanje vode s površine prema vodnom licu. Obično je dominantna na ravnim ili blago nagnutnim terenima s gustom vegetacijom i grubim ili humusnim tlima (posebno u šumama).
- Tip B: difuzni podpovršinski bujični tok – javlja se kod vrlo intenzivnih oborina u tlima s vrlo velikim koeficijentom propusnosti.
- Tip C: podpovršinski bujični tok u predodređenim smjerovima – javlja se u tlima koja imaju pukotine zbog suše ili životinjske rovove (od crva ili glodavaca), u kojima se tok kanalizira i mogu se razviti vrlo velike brzine.
- Tip D: saturirani površinski tok – javlja se u slučajevima kada kiša pada dovoljno dugo i obilno da zasiti upojni kapacitet tla pa sve dodatne oborine otječu površinski. Takva vrsta toka obično se javlja u slučajevima kad se ispod dobro propusnog tankog sloja tla nalaze slabo propusne naslage, a količina oborina premašuje efektivnu poroznost.
- Tip E i F: Hortonijevo otjecanje ili nesaturirani površinski tok – pojavljuje se kad je intenzitet kiše mnogo veći od hidrauličke vodljivosti tla pa voda jednostavno nema vremena infiltrirati se u podzemlje nego stvara površinske tokove. Količina vode koja otječe na taj način ovisi o nagibu terena i značajkama površine.

Ukoliko nema dovoljno podataka za istraživano područje i nije moguće razlikovati svih šest tipova tečenja, dovoljno je prepoznati radi li se o infiltraciji, o podpovršinskom ili površinskom toku, što je moguće odrediti iz geoloških i pedoloških podataka ili terenskim opažanjima. Nakon što se odredi dominantni proces tečenja određuje se I faktor koji tečenje dovodi u funkciju nagiba terena i vegetacije (**slika 6.19**, drugi korak).



Uz navedeno, da bi se odredio I faktor potrebno je podijeliti promatrani sliv na zone. Vrlo je važno odrediti odvija li se određeni tip tečenja u blizini ponora, u podslivovima rijeka ponornica ili na ostatku područja. Iz tog razloga izrađuje se karta površinskih zona koja se preklapa s I faktorom da bi se dobila konačna vrijednost I faktora (**slika 6.19**, treći korak). Karta I faktora prikazuje na kojim područjima uvjeti infiltracije uzrokuju smanjenje zaštitne funkcije pokrovnih naslaga i ulazi u konačni izračun ranjivosti vodonosnika.

1. KORAK: Određivanje dominantnog toka

		DUBINA DO SLABOPROPUSNIH SLOJEVA		
		< 30 cm	30 - 100 cm	> 100 cm
SATURIRANA HIDRAULIČKA VODLJIVOST (m/s)	> 10 <sup>-4</sup>	TIP D	TIP C	TIP A
	> 10 <sup>-5</sup> -10 <sup>-4</sup>		TIP B	
	> 10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-5</sup>	TIP E		
	< 10 <sup>-6</sup>	TIP F		

2. KORAK: Određivanje faktora I'

ŠUME				
DOMINANTNI PROCES TEČENJA		NAGIB TERENA		
		< 3,5 %	3,5 - 27 %	> 27 %
infiltracija	TIP A	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
podpovršinski tok	TIP B	1	0,8	0,6
	TIP C	<b>1</b>	<b>0,6</b>	<b>0,6</b>
površinski tok	TIP D	0,8	0,6	0,4
	TIP E	1	0,6	0,4
	TIP F	<b>0,8</b>	<b>0,4</b>	<b>0,2</b>

POLJA / LIVADE / PAŠNJACI				
DOMINANTNI PROCES TEČENJA		NAGIB TERENA		
		< 3,5 %	3,5 - 27 %	> 27 %
infiltracija	TIP A	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0,8</b>
podpovršinski tok	TIP B	1	0,6	0,4
	TIP C	<b>1</b>	<b>0,4</b>	<b>0,2</b>
površinski tok	TIP D	0,6	0,4	0,2
	TIP E	0,8	0,4	0,2
	TIP F	<b>0,6</b>	<b>0,2</b>	<b>0</b>

3. KORAK: Određivanje faktora I





KARTA POVRŠINE SLIVA		I' faktor					
		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
a	zona 10 m od ponora ili rijeke ponornice	0	0	0	0	0	0
b	zona 100 m od rijeke ponornice	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
c	sliv rijeka ponornica	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1
d	ostalo područje sliva	0,4	0,6	0,8	1	1	1
e	područje na kojem voda otječe izvan sliva	1	1	1	1	1	1



**I karta**

Slika 6.19. Shematski prikaz procjene faktora I (prema: *Goldscheider et al., 2000*)

Prirodna ranjivost PI metodom dobiva se množenjem pojedinačnih faktora P i I. Kao umnožak predstavljen je **faktor zaštite** –  $\pi$ , s rasponom vrijednosti od 0 do 5, gdje veće vrijednosti prikazuju veću prirodnu zaštitu, odnosno manju ranjivost vodonosnika od onečišćenja s površine. Različiti stupnjevi ranjivosti se na kraju prikazuju određenim bojama na karti ranjivosti prema predloženoj legendi (**slika 6.20**). Autori preporučuju uz glavnu kartu ranjivosti uvijek prikazati male karte P i I, da bi se lakše uočilo je li ranjivost nekog područja posljedica nepostojanja zaštitne funkcije pokrovnih naslaga ili posljedica uvjeta infiltracije.

KARTA RANJIVOSTI VODONOSNIKA		P - KARTA zaštitna funkcija pokrovnih naslaga		I -KARTA stupanj zaobilaženja pokrovnih naslaga	
OPIS	$\pi$ faktor	OPIS	P faktor	OPIS	I faktor
 ekstremna	0 - 1	vrlo niska	1	vrlo visoki	0 - 0,2
 visoka	> 1 - 2	niska	2	visoki	0,4
 umjerena	> 2 - 3	umjerena	3	umjereni	0,6
 niska	> 3 - 4	visoka	4	niski	0,8
 vrlo niska	> 4 - 5	vrlo visoka	5	vrlo niski	1

Slika 6.20. Legenda za kartu ranjivosti te P i I karte (prema: *Goldscheider et al., 2000*)

## 6.7. Osnove COP metode

COP metoda razvijena je na Sveučilištu u Malagi (Španjolska), u razdoblju od 2001. – 2002. godine. Pristup u procjeni ranjivosti i predložena metodologija uvelike prati temeljne koncepte "Europskog pristupa" (*Daly et al., 2002*). Zasniva se na vrednovanju tri faktora koja opisuju ranjivosti vodonosnika: C, O i P (*Vias et al., 2002, 2006*):

**O – faktor krovinskih naslaga** (eng. *Overlying layers*) – ukazuje na mogućnost da naslage nesaturirane zone vodonosnika razrijede i smanje nepovoljan učinak onečišćenja. O faktor se procjenjuje kombinacijom ocjena značajki tla ( $O_S$ ) i litološke građe nesaturirane zone ( $O_L$ ) kroz postupak koji se odvija u šest koraka kao što prikazuje **slika 6.21**.

O faktor (faktor pokrovnih naslaga)

Os - UTJECAJ TLA

I		TEKSTURA					
GLINENO TLO	>30% GLINE	II DEBLJINA	GLINENO	PRAŠKASTO	ILOVAČA	PJESKOVITO	
PRAŠKASTO TLO	>70% PRAHA		>1.0 m	5	4	3	2
PJESKOVITO TLO	PIJESAK >70%		0,5-1 m	4	3	2	1
	GLINA ≤15%	<0,5 m	3	2	1	0	
ILOVAČA	OSTALO						

Ol - UTJECAJ LITOLOGIJE

III	
LITOLOGIJA I RAZLOMLJENOST	L <sub>y</sub>
Gline	1500
Prahovi	1200
Lapori, kompaktni metapeliti i magmatske stijene	1000
Laporoviti vapnenci	500
Raspucani metapeliti i magmatske stijene	400
Kompaktni ili čvrsto vezani konglomerati i breče	100
Pješčenjaci	60
Raspucani ili slabo vezani	40
Pjesci i šljunci	10
Propusni bazalti	5
Raspucane karbonatne stijene	3
Okršene stijene	1

$$\sum(L_y \cdot m) = \text{INDEKS SLOJA}$$

IV	
INDEKS SLOJA	VRIJEDNOST
0 - 250	1
250 - 1 000	2
1 000 - 2 500	3
2 500 - 10 000	4
> 10 000	5

V	
STUPANJ ZATVORENOSTI VODONOSNIKA	cn
Zatvoreni	2
Poluzatvoreni	1,5
Otvoreni	1

$$O_L = \text{VRIJEDNOST INDEKSA SLOJA} \cdot cn$$

$$\text{FAKTOR } O = O_s + O_L$$

VI	
FAKTOR O	STUPANJ ZAŠTITE
1	vrlo niska
2	niska
2 - 4	srednja
4 - 8	visoka
8 - 15	vrlo visoka

Slika 6.21. Prikaz određivanja O faktora (prema: *Vias et al, 2006*)

Podfaktor tla  $O_s$  opisuje značajke biološki aktivnog dijela naslaga u kojima se mogu očekivati procesi zadržavanja onečišćenja i smanjenja ranjivosti za podzemne vode. Osnovne značajke koje se pri tome uzimaju u obzir su sastav tla, tekstura i debljina (koraci I i II, slika 6.21). Područjima u kojima nema prisutnog tla dodjeljuje se vrijednost  $O_s = 0$ .

Litološki podfaktor  $O_L$  definira svojstva zadržavanja onečišćenja za svaki sloj stijena unutar nesaturirane zone. Osnovni kriteriji za određivanje faktora  $O_L$  su: vrsta stijene i stupanj razlomljenosti ( $L_y$  – korak III) te debljina svakog pojedinog sloja ( $m$ ). Sumiranjem umnoška tih parametara definira se indeks sloja po dubini nesaturirane zone za svaku točku sliva (formula 6.6).

$$\text{Indeks sloja} = \sum (L_y \cdot m) \quad (6.6)$$

Postupak sumiranja slojeva sličan je onom AVI metode (*Van Stempvoort et al., 1993*) i PI metodi (*Goldscheider et al., 2000*).

Indeks sloja se zatim razvrstava u jednu od pet klasa i očitava se vrijednost indeksa sloja u rasponu od 1-5 (korak IV) koja se zatim množi s parametrom stupnja otvorenosti vodonosnika ( $cn$  – korak V), a rezultat je podfaktor  $O_L$  (formula 6.7). Parametar "cn" ima funkciju dodatno naglasiti stupanj zaštite za zatvorene vodonosnike, a na otvorene vodonosnike nema nikakav utjecaj. Slični parametar prisutan je i u GOD metodi i PI metodi.

$$O_L = \text{vrijednost indeksa sloja} \cdot cn \quad (6.7)$$

Konačna vrijednost faktora  $O$  dobiva se zbrajanjem podfaktora  $O_S$  i  $O_L$ . Stupanj zaštite definiran je  $O$  faktorom, koji se opisuje s jednom od pet kategorija (korak VI). Općenito se smatra da najniže vrijednosti parametra  $O$  (najveća ranjivost) odgovaraju područjima građenim od razlomljenih karbonatnih stijena bez pokrovnih naslaga tla, a najviše vrijednosti parametra  $O$  (najmanja ranjivost) odgovaraju područjima s debelim naslagama tla ili slabo propusnim stijenama.

**C – faktor koncentracije toka** (flow Concentration) – uzima u obzir površinske uvjete koji kontroliraju površinsko otjecanje jer dijelovi sliva na kojima dolazi do površinskog otjecanja imaju manji kapacitet razrijeđenja onečišćenja. Faktor  $C$  predstavlja stupanj koncentracije površinskog otjecanja do ponora, jama ili sličnih krških obilježja, koje omogućuju izravnu infiltraciju oborina, pri tome zaobilazeći naslage nesaturirane zone i njihovu zaštitnu funkciju. Ovakva definicija faktora  $C$  temeljena je na PI i EPIK metodama.  $C$  faktor procjenjuje se na dva različita načina za dva scenarija prihranjivanja vodonosnika:

- a) scenarij 1 – zona koncentriranog prihranjivanja vodonosnika kroz ponore (**slika 6.22**)
- b) scenarij 2 – ostatak područja s difuznim prihranjivanjem (**slika 6.23**)

**C faktor (faktor koncentracije toka)****SCENARIJ 1****ZONA PRIHRANJIVANJA KROZ PONORE**

Udaljenost do ponora (dh)		Udaljenost do ponornice (ds)		Nagib i vegetacija (sv)		
<b>VII</b>		<b>VIII</b>		<b>IX</b>		
Udaljenost do ponora (m)	dh	Udaljenost do ponornice (m)	ds	NAGIB	VEGETACIJA	sv
≤ 500	0	< 10	0	≤ 8 %	nema	1
500 - 1 000	0,1	10 - 100	0,5	8 - 31 %	mnogo	0,95
1 000 - 1 500	0,2	> 100	1		malo	0,9
1 500 - 2 000	0,3			31 - 76 %	mnogo	0,85
2 000 - 2 500	0,4				malo	0,8
2 500 - 3 000	0,5			> 76 %	nema	0,75
3 000 - 3 500	0,6					
3 500 - 4 000	0,7					
4 000 - 4 500	0,8					
4 500 - 5 000	0,9					
> 5 000	1					

$$C = dh \cdot ds \cdot sv$$

Slika 6.22. Prikaz određivanja C faktora za scenarij 1 (prema: *Vias et al., 2006*)

Scenarij 1 odnosi se na zone sliva u kojima se vodonosnik prihranjuje kroz ponore, odnosno, u kojima se koncentrira površinski tok i prodire u podzemlje kroz ponore, jame i slična krška obilježja, zaobilazeći pri tome naslage nesaturirane zone. U tim područjima faktor C se izračunava kao umnožak triju podfaktora: udaljenost od ponora (dh) – zona maksimalnog utjecaja procjenjuje se na 5 000 metara; udaljenost od površinskog toka koji ponire (ds) – zona utjecaja je definirana do 100 metara; te podfaktor kombinacije nagiba terena i vegetacije (sv) – vrijednosti rastu s povećanjem nagiba terena, najveće vrijednosti se dodjeljuju strmijim područjima bez vegetacije jer je na tim područjima veća mogućnost formiranja površinskog otjecanja i smanjuje se vrijeme dotoka do vodnog lica.

Scenarij 2 opisuje procjenu faktora C u ostatku sliva, odnosno u područjima gdje se vodonosnik prihranjuje difuzno. U ovom slučaju faktor C predstavlja umnožak podfaktora (sf) i (sv). Podfaktor (sf) opisuje ulogu površinskih značajki u prihranjivanju vodonosnika, a procjenjuje se kombinacijom uloga površinskih naslaga (njihove propusnosti) i prisutnosti krških obilježja. Podfaktor (sv) također je kombinacija utjecaja nagiba terena i vegetacije, ali u ovom slučaju ima obrnute vrijednosti nego u scenariju 1, jer je za difuzno prihranjivanje

vodonosnika najznačajniji dio s malim nagibima terena i prisustvom vegetacije, dok strmi nagibi i odsustvo vegetacije nemaju utjecaj na difuznu infiltraciju.

SCENARIJ 2

OSTATAK PODRUČJA

Površinske značajke (sf)				Nagib i vegetacija (sv)				
X	Površinske naslage			XI	NAGIB	VEGETACIJA	sv	
		Nema	Propusne		Nepropusne	≤ 8 %	nema	0,75
	Obilježja krša	Razvijen krš	0,25	0,5	0,75	8 - 31 %	mного	0,8
		Slabo razvijeni ili disolucijski krš	0,5	0,75	1		malo	0,85
		Pukotinski krš	0,75	0,75	1	31 - 76 %	mного	0,9
Nema krša		1	1	1	malo		0,95	
				> 76 %	nema	1		

**C = (sf) · (sv)**

Slika 6.23. Prikaz određivanja C faktora za scenarij 2 (prema: *Vias et al., 2006*)

Konačna karta C faktora dobije se smještanjem procijenjene vrijednosti u jednu od 5 klasa smanjenja stupnja zaštite koju vodonosnik ima zahvaljujući o faktoru (slika 6.24).

XII	
FAKTOR C	STUPANJ SMANJENJA ZAŠTITE
0 - 0,2	vrlo visoki
0,2 - 0,4	visoki
0,4 - 0,6	srednji
0,6 - 0,8	niski
0,8 - 1	vrlo niski

→ **C karta**

Slika 6.24. Prikaz klasifikacije C faktora (prema: *Vias et al., 2006*)

**P – faktor oborina (Precipitation)** – uzima u obzir sposobnost vode (u ovom slučaju oborina) da prenese onečišćenje s površine kroz nesaturiranu zonu do vodnog lica. Što je ta sposobnost veća, veća je i ranjivost vodonosnika od onečišćenja. Prema *Daly et al. (2002)* dva obilježja oborina određuju količinu infiltracije, a to su količina oborina i intenzitet oborina. Upravo ta dva podfaktora služe za procjenu P faktora u COP metodi (slika 6.25).

**P faktor (faktor oborina)****P<sub>Q</sub> - količina oborina**

XIII	
Oborine* (mm/god)	P <sub>Q</sub>
> 1 600	0,4
1 200 - 1 600	0,3
800 - 1 200	0,2
400 - 800	0,3
< 400	0,4

\* Prosječno oborina u vlažnoj godini.  
 Vlažna godina  $\geq (0,15 \cdot x) + x$   
 x=prosječne godišnje količine oborina

**P<sub>I</sub> - intenzitet oborina**

$$\text{Intenzitet oborina} = \frac{P \text{ (mm/godinu)}}{\text{broj kišnih dana}}$$

XIV	
Intenzitet (mm / dan)	P <sub>I</sub>
< 10	0,6
(10 - 20)	0,4
> 20	0,2

$$P = P_Q + P_I$$

XV	
FAKTOR P	STUPANJ SMANJENJA ZAŠTITE
0,4 - 0,5	vrlo visoki
0,6	visoki
0,7	srednji
0,8	niski
0,9 - 1	vrlo niski

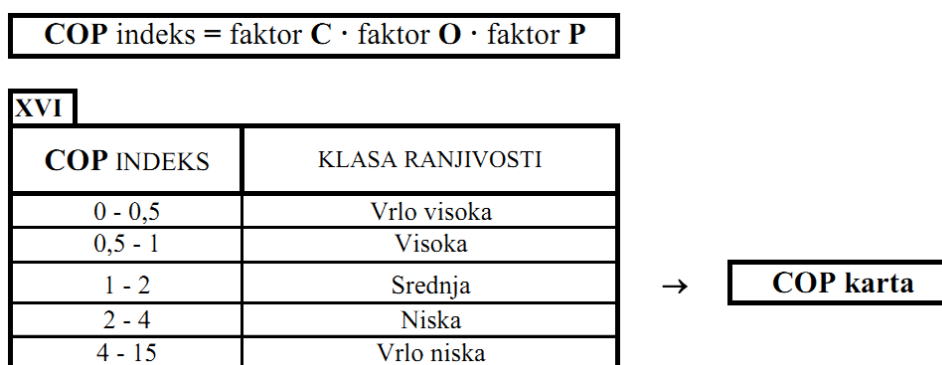
→ **P karta**Slika 6.25. Prikaz određivanja P faktora (prema: *Vias et al., 2006*)

Podfaktor P<sub>Q</sub> opisuje količinu oborina. Njegova vrijednost određuje se preko prosječne količine oborina u vlažnoj godini (vlažna godina je ona za koju vrijedi da je u njoj palo 15% više oborina nego što prosječno padne) koja se svrstava u jednu od pet predloženih klasa. Vrijednost P<sub>Q</sub> faktora smanjuju utjecaj oborina na ranjivost vodonosnika za veće količine oborina zato jer dolazi do znatnog razrjeđenja onečišćenja, a time i smanjenja ranjivosti. To je u skladu sa SINTACS metodom koja također uzima u obzir smanjenje ranjivosti kod velike količine oborina, dok za razliku od toga PI metoda procjenjuje povećanje ranjivosti za velike količine oborina jer dolazi do brže infiltracije onečišćenja u podzemlje.

Drugi podfaktor, P<sub>I</sub> odnosi se na intenzitet oborina, to jest na vremensku raspodjelu oborina kroz godinu koja se dobije tako da se prosječna godišnja količina oborina podijeli s brojem kišnih dana u godini. Ta se vrijednost zatim uvrštava u jednu od tri klasa raspona i očitava vrijednost podfaktora P<sub>I</sub>. Vrijednost ukupnog faktora P dobije se zbrajanjem podfaktora P<sub>Q</sub> i P<sub>I</sub>. Konačni faktor P svrstava se u pet klasa – pet stupnjeva smanjenja zaštite vodonosnika.



**Faktor O** predstavlja zaštitnu zonu, njegova vrijednost je od 0 do 15, a faktori C i P modificiraju taj stupanj zaštite. Vrijednost faktora C kreće se između 0 i 1, faktora P od 0.4 do 1. Konačni indeks COP dobiva se množenjem ta tri faktora. Ranjivost se zatim prikazuje na karti koja razlikuje pet različitih klasa ranjivosti, ovisno o rasponima ukupnog COP indeksa, od vrlo niske do vrlo visoke ranjivosti (slika 6.26).



Slika 6.26. Prikaz određivanja COP indeksa i klasa ranjivosti (prema: *Vias et al., 2006*)

## 6.8. Teorijska osnova analize opasnosti za podzemne vode

Daljnja ocjena antropogenih utjecaja na podzemne vode postiže se izradom karte opasnosti (hazarda). Prema smjernicama projekta COST 620 (*Zwahlen, 2004*) opasnost (hazard) je definirana kao mogući izvor onečišćenja od ljudskoga djelovanja i pritom se prvenstveno misli na onečišćenje s površine ili pripovršinske zone terena. Postupak procjene opasnosti na nekom području obuhvaća određivanje stupnja štetnosti koji potencijalna opasnost (hazard) može imati na podzemne vode, uzimajući u obzir svojstva samog hazarda, ali i vanjske utjecaje koji mogu smanjiti mogućnost pojave opasnog događaja. S aspekta zaštite podzemnih voda vrlo je važno prostorno locirati opasnosti, međusobno ih usporediti i dovesti u odnos s drugim prostornim značajkama područja (primjerice hidrogeološkim svojstvima ili smjerovima toka podzemne vode). Opasnosti se na karti mogu prikazati kao točkasti, linijski ili poligonski objekti, ovisno o mjerilu prikaza i svrsi koju jedna takva karta ima. U Okvirnoj direktivi o vodama (*2000/60/EZ*) navedeno je da postoji potreba za utvrđivanjem zajedničkih kriterija u istraživanju izvora onečišćenja na nekom području. Postupak procjene opasnosti, ovdje prikazan, može poslužiti upravo u tu svrhu, a rezultat takve analize, karta opasnosti, može poslužiti u planiranju korištenja prostora i za donošenje odluka vezanih uz zaštitu

podzemnih voda, a može biti i osnovna podloga za procjenu rizika od onečišćenja podzemnih voda na nekom području.

Izrada karte opasnosti (hazarda) podijeljena je u nekoliko faza. Najvažnije je prikupiti podatke o potencijalnim onečišćivačima na istraživanom području i oblikovati GIS bazu podataka u kojoj svaki pojedinačni objekt ima zapisanu svoju prostornu referencu i najvažnije attribute. Postupak prikupljanja podataka za izradu karte opasnosti (hazarda) nije jednoznačno određen, već je kombinacija nekoliko izvora podataka: iz topografskih karata, iz avio i satelitskih snimaka, iz raznih izvješća i arhiva, terenskog rekognosciranja, izravnog prikupljanja informacija od odgovornih osoba u industriji, lokalne uprave itd. Što se više detaljnih podataka o potencijalnom onečišćivaču prikupi, točnija je procjena stupnja štetnog potencijalnog ili stvarnog utjecaja na podzemnu vodu.

Nakon prikupljanja svih raspoloživih podataka o potencijalnim onečišćivačima radi se početna faza karte opasnosti (hazarda), neklasificirana karta opasnosti koja prikazuje prostornu raspodjelu mogućih onečišćivača i koja se koristi kao tematska karta, te kao temeljna podloga za klasifikaciju mogućih onečišćivača, odnosno izradu klasificirane karte opasnosti. Iako tako provedena analiza pruža evidenciju potencijalnih onečišćivača i njihov detaljni prostorni smještaj, ona ne pruža nikakve informacije o stvarnoj razini opasnosti koju za podzemne vode predstavlja svaki od izdvojenih onečišćivača, niti je na ovaj način moguće međusobno uspoređivati štetni utjecaj ovih opasnosti. Stoga je potrebno provesti i drugu fazu analize opasnosti, a to je klasifikacija onečišćivača prema stupnju štetnosti za podzemne vode koja omogućuje i kvalitetnu usporedbu različitih vrsta opasnosti. Primjerice, izradom neklasificirane karte opasnosti lociran je ispust nepročišćene industrijske otpadne vode u podzemlje koji nedvojbeno predstavlja opasnost za podzemne vode. No, za kvalitetnu ocjenu stvarne razine opasnosti koju taj ispust predstavlja za vodonosnik nije dovoljno samo ga izdvojiti kao onečišćivača i točno ga locirati, već je potrebno prikupiti podatke o količinama ispuštanja otpadne vode, njen sastav i toksičnost, vrstu mogućeg onečišćenja i sl. Svi ti podaci nisu uvijek dostupni, pa se često radi procjena opasnosti pojedinih onečišćivača temeljena na iskustvima s drugih područja. Zato je u sklopu projekta COST 620 predložen postupak klasifikacije opasnosti za podzemne vode koji je opisan u nastavku.

Za dobivanje realne procjene opasnosti (hazarda) za podzemne vode, ovdje prikazane indeksom opasnosti (HI), potrebno je za svaki izdvojeni potencijalni onečišćivač procijeniti tri faktora. Prvi od njih je težinska vrijednost onečišćivača, koja se očitava iz tablice predložene u smjernicama projekta COST 620 i nakon toga potrebno ju je pomnožiti s faktorom rangiranja (tzv. faktorom ocjene stvarne opasnosti) i faktorom redukcije prema sljedećoj formuli (6.8):

$$HI = H \cdot Q_n \cdot R_f \quad (6.8)$$

gdje je:

- HI – indeks opasnosti (*hazard index*)
- H – težinska vrijednost
- $Q_n$  – faktor ocjene stvarne opasnosti (*ranking factor*)
- $R_f$  – faktor redukcije (*reduction factor*)

Vrijednost H (težinska vrijednost) očitava se iz tablica, ovisno o vrsti mogućeg onečišćivača i ima raspon 0 - 100, gdje 0 označava područja bez opasnosti za podzemne vode, a 100 označava ekstremnu razinu opasnosti (**slika 6.27**).

## DOKTORSKI RAD

	VRSTA OPASNOSTI	H
<b>1</b>	<b>INFRASTRUKTURNI OBJEKTI</b>	
<b>1.1.</b>	<b>Otpadne vode</b>	<b>25-85</b>
1.1.1.	Naselja (istjecanje kanalizacijskih sustava)	35
1.1.2.	Naselja bez kanalizacijskih sustava	70
1.1.3.	Izdvojeni pojedinačni objekti bez kanalizacije	45
1.1.4.	Septičke i sabirne jame, nužnici	45
1.1.5.	Navodnjavanje otpadnom vodom	55
1.1.6.	Ispust iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda	35
1.1.7.	Površinsko zbrinjavanje urbanih otpadnih voda	60
1.1.8.	Otjecanje s asfaltiranih površina	25
1.1.9.	Ispust otpadne vode u površinski vodotok	45
1.1.10.	Upoini zdenac otpadnih voda	85
<b>1.2.</b>	<b>Komunalni otpad</b>	<b>35-50</b>
1.2.1.	Odlagalište otpada, kante za smeće	40
1.2.2.	Prikupna stanica za otpad, reciklažno dvorište	40
1.2.3.	Sanitarni deponij	50
1.2.4.	Spremište i odlagalište građevinskog otpada	35
1.2.5.	Mulj s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda	35
<b>1.3.</b>	<b>Gorivo, benzin, nafta</b>	<b>50-65</b>
1.3.1.	Nadzemni spremnik goriva	50
1.3.2.	Podzemni spremnik goriva	55
1.3.3.	Skladišni rezervoari	50
1.3.4.	Dvorišni spremnici	50
1.3.5.	Utovarne stanice gotiva	60
1.3.6.	Benzinske postaje	60
1.3.7.	Kaverna za čuvanje goriva	65
<b>1.4.</b>	<b>Promet i prijevoz</b>	<b>30-60</b>
1.4.1.	Cesta, neosigurana	40
1.4.2.	Cestovni tunel, neosiguran	40
1.4.3.	Cestovno vozno skladište	35
1.4.4.	Parkiralište za automobile	35
1.4.5.	Željeznička pruga	30
1.4.6.	Željeznički tunel, neosiguran	30
1.4.7.	Željeznička postaja	35
1.4.8.	Otpremno dvorište	40
1.4.9.	Pista	35
1.4.10.	Cjevovod opasnih tekućina	60
<b>1.5.</b>	<b>Rekreacijski centri</b>	<b>25-30</b>
1.5.1.	Turističko naselje	30
1.5.2.	Mjesto za kampiranje	30
1.5.3.	Otvoreni sportski stadion	25
1.5.4.	Golf igralište	35
1.5.5.	Skijalište	25
<b>1.6.</b>	<b>Ostali hazardi</b>	<b>25-35</b>
1.6.1.	Groblje	25
1.6.2.	Životinjsko pokapalište	35
1.6.3.	Kemijska čistionica	35
1.6.4.	Transformatorska stanica	30
1.6.5.	Aktivni i napušteni vojni objekti	35

	VRSTA OPASNOSTI	H
<b>2</b>	<b>INDUSTRIJSKE AKTIVNOSTI</b>	
<b>2.1.</b>	<b>Rudarenje (aktivni i napušteni rudnici)</b>	<b>60-85</b>
2.1.1.	Rudnik, sol	60
2.1.2.	Rudnik, drugi nemetali	70
2.1.3.	Rudnik, ruda	70
2.1.4.	Rudnik, ugljen	70
2.1.5.	Rudnik, uran	80
2.1.6.	Vanjski spremnici opasnog krutog materijala	85
2.1.7.	Postrojenje za obradu rude	70
2.1.8.	Odlagalište rudničkog i zemljanog materijala	70
2.1.9.	Jalovna ruda	70
2.1.10.	Sustav za drenažu rudnika	65
2.1.11.	Jezerce jalovine	65
<b>2.2.</b>	<b>Kamenolomi</b>	<b>10-30</b>
2.2.1.	Iskapalište i nasip za gradnju	10
2.2.2.	Šljunčara i pješčara	30
2.2.3.	Kamenolomi	25
<b>2.3.</b>	<b>Eksploatacija nafte i plina</b>	<b>40-70</b>
2.3.1.	Proizvodne bušotine	40
2.3.2.	Bušotine za ponovno ubacivanje	70
2.3.3.	Stanice za utovar	55
2.3.4.	Naftovod	55
<b>2.4.</b>	<b>Industrijska postrojenja</b>	<b>40-85</b>
2.4.1.	Ljevaonica	40
2.4.2.	Željezni i čelični radovi	40
2.4.3.	Industrija za završnu obradu metala	50
2.4.4.	Galvaniziranje	55
2.4.5.	Rafinerija nafte	85
2.4.6.	Tvornica kemikalija	65
2.4.7.	Tvornica gume	40
2.4.8.	Proizvodnja papira i celuloze	40
2.4.9.	Štavionica kože	70
2.4.10.	Prehrambena industrija	45
<b>2.5.</b>	<b>Elektrane</b>	<b>50-65</b>
2.5.1.	Plinara	60
2.5.2.	Termoelektrana na kruta goriva	50
2.5.3.	Nuklearna elektrana	65
<b>2.6.</b>	<b>Industrijska skladišta</b>	<b>45-100</b>
2.6.1.	Skladišta krutih materijala i kemikalija	60
2.6.2.	Spremnici opasnih tvari	70
2.6.3.	Napomilani neneo i šliaka	70
2.6.4.	Odlagališta neopasnih tvari	45
2.6.5.	Odlagališta opasnih tvari	90
2.6.6.	Odlagališta nuklearnog otpada	100
<b>2.7.</b>	<b>Odvodnja i pročišćavanje otpadnih voda</b>	<b>40-85</b>
2.7.1.	Cjevovod otpadne vode	65
2.7.2.	Laguna za sakupljanje otpadnih voda industrije	65
2.7.3.	Ispust iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda	40
2.7.4.	Upojni zdenac otpadnih voda	85
<b>3</b>	<b>POLJOPRIVREDA I STOČARSTVO</b>	
<b>3.1.</b>	<b>Životinjske farme</b>	<b>25-45</b>
3.1.1.	Životinjska staja (šupa, štagalj, svinjac)	30
3.1.2.	Hranilište	30
3.1.3.	Industrijska farma	30
3.1.4.	Gnojišnica	45
3.1.5.	Bazen ili rezervoar s gnojivom	45
3.1.6.	Područje intenzivne ispaše	25
<b>3.2.</b>	<b>Poljoprivreda</b>	<b>15-60</b>
3.2.1.	Otvorena silaža (polje)	25
3.2.2.	Zatvorena silaža	20
3.2.3.	Skladište umjetnog gnojiva i pesticida	40
3.2.4.	Područje intenzivne poljoprivrede	30
3.2.5.	Bašća (vrt)	15
3.2.6.	Staklenik	20
3.2.7.	Navodnjavanje otpadnom vodom	60

Slika 6.27. Težinske vrijednosti za pojedine tipove opasnosti (prema: *Zwahlen, 2004*)

Vrijednosti prikazane na **slici 6.27** rezultat su složene analize provedene u sklopu projekta COST 620, gdje se pomoću tri različita pristupa određivala preliminarna težinska vrijednost pojedinog tipa onečišćivača, a konačna težinska vrijednost rezultat je izračunate srednje vrijednosti. U konačnom prikazu opasnosti su grupirane prema trima osnovnim ljudskim djelatnostima koje predstavljaju prvu kategoriju opasnosti (brojevi 1, 2 i 3): infrastrukturni razvoj, industrijske aktivnosti, te poljoprivreda i stočarstvo. Drugu kategoriju opasnosti (brojevi 1.1., 1.2., ... 2.1., 2.2., ...) čine podpodjele osnovnih djelatnosti grupirane prema zajedničkim svojstvima, svaka sa svojim težinskim rasponom. Treću kategoriju opasnosti čine djelatnosti detaljno rasčlanjene do krajnjeg oblika opasnosti koji određuje točnu jednoznačnu vrijednost. Kod izrade ovog inventara opasnosti (*eng. Hazard Inventory*), cilj nije bio proširiti popis onečišćivača na što je moguće veći broj, već je pažnja posvećena tome da su zastupljeni svi glavni tipovi onečišćivača čiji je utjecaj značajan za podzemnu vodu, a opet da bude jednostavan za upotrebu u različitim okruženjima, dovoljno jasan s logičnim podjelama i podpodjelama. Ukoliko se kod istraživanja nekog područja pojavi potreba za definiranjem i rangiranjem novog tipa onečišćivača u sklopu projekta COST 620 date su preporuke kako da se to učini, a da novi onečišćivač bude potpuno usklađen i usporediv s ostalima.

No, još uvijek se može dogoditi da dva jednaka tipa onečišćivača ne predstavljaju jednaku opasnost za podzemne vode. Zbog toga se uvodi faktor ocjene stvarne opasnosti  $Q_n$  (faktor rangiranja – *eng. ranking factor*) koji ima raspon 0,8 do 1,2, a prikazuje veličinu stvarne opasnosti od onečišćenja podzemnih voda, uslijed različitih svojstava i tvari unutar iste vrste onečišćivača. Obično je razlika u štetnosti utjecaja na podzemnu vodu izravna posljedica količine ispuštene štetne tvari. Tako, primjerice, u neklasificiranoj karti opasnosti locirane su dvije životnjske farme. Jedna sadrži 300 svinja za tov koje se isporučuju svaka četiri mjeseca, odnosno godišnje oko 900 svinja prođe farmom. Druga farma je peradarnik za proizvodnju jaja s 200 kokoši nesilica. Očito je da prva farma predstavlja mnogo veću opasnost za onečišćenje podzemnih voda, a vrednovanjem prema **slici 6.27** obje farme bile bi jednake, tj. težinska vrijednost iznosila bi im 30. Upravo faktor rangiranja omogućava da se HI indeks poveća opasnijoj farmi, a onoj manje opasnoj smanji. Raspon vrijednost od 0,8 do 1,2 ne omogućava neke drastične razlike, ali one nisu ni poželjne, budući da bi velika odstupanja od srednje vrijednosti nerealno izdvojila jednu djelatnost od drugih, njoj srodnih. Ne može se dogoditi da izrazito velike farme dođu u rang nuklearnih elektrana ili slično.

Treći faktor – faktor redukcije  $R_f$  (eng. *reduction factor*) kreće se u rasponu od 0-1 i prikazuje vjerojatnost pojavljivanja onečišćenja iz pojedinoga mogućeg onečišćivača. U slučaju da je faktor redukcije 0, pretpostavlja se da nema mogućega rizika onečišćenja podzemne vode, dok faktor 1 označava da nema poznatih razloga za smanjenje stvarne opasnosti za potencijalno onečišćenje podzemne vode iz te vrste onečišćivača. Potrebno je vrlo oprezno upotrebljavati faktor redukcije, u malom rasponu od broja 1 i to samo kad za to postoje opravdani razlozi. Stoga je dodatna preporuka da se u konačnu formulu uvrštava kvadratni korijen procijenjene vrijednosti faktora redukcije.

Kombinacijom navedenih faktora za svaki se onečišćivač izračunava indeks opasnosti (hazard indeks – HI) po zadanoj formuli. Nakon toga se vektorski slojevi konvertiraju u rastere (svaki tip zasebno – točkasti, linijski i poligonski). Veličina ćelije iznosi 25 m (mora biti jednaka kao i kod analize ranjivosti), a vrijednost ćelije se određuje prema indeksu opasnosti. Rasteri se zbrajaju i sumarni raster predstavlja ukupnu opasnost. Nakon provedene analize opasnosti dobiveni prikaz potrebno je reklasificirati u 5 kategorija koje se prikazuju na karti klasificiranih opasnosti koja dalje, zajedno s kartom prirodne ranjivosti, služi za procjenu rizika od onečišćenja podzemnih voda (**tablica 6.7**).

Tablica 6.7. Kategorije opasnosti od mogućeg onečišćenja i njihov način prikaza na karti

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

## 6.9. Pojam rizika, postupak procjene rizika podzemnih voda

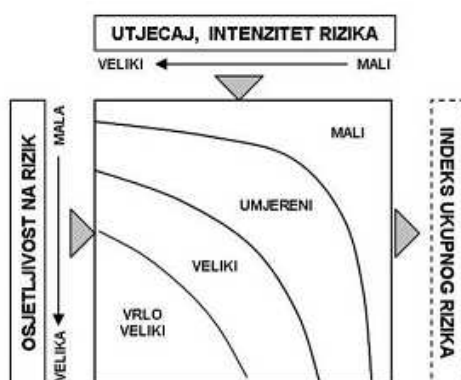
U pogledu upravljanja vodnim resursima, pogotovo s aspekta zaštite zaliha kvalitetne podzemne vode pogodne za ljudsku upotrebu, sve se više koriste pojmovi "rizik", "procjena rizika" i "upravljanje rizikom" od onečišćenja podzemnih voda. Upravo zbog te sveopće i

svakodnevne upotrebe termina važno je naglasiti da se pritom nužno ne misli uvijek na jednu te istu stvar ili proces. Jedan od ciljeva projekta COST 620 bio je jednoznačno odrediti definicije pojmova upotrijebljenih u analizama i objašnjenjima. Tako je "rizik" definiran kao pojam koji opisuje vjerojatnost da će neka opasnost (hazard) izazvati štetne posljedice. U odnosu na podzemnu vodu rizik predstavlja vjerojatnost da će doći do onečišćenja uslijed pojave hazardnog događaja i upravo u tom kontekstu je taj pojam korišten u ovom radu.

Prema smjernicama projekta COST 620 analiza rizika se provodi u dvije faze:

- Procjena intenziteta rizika – odnosi se na mogućnost pojave neke štete na način da analizira sve moguće faktore vezane uz pojavu opasnosti, te faktore prirodnog okruženja koji pogoduju širenju ili spriječavaju širenja opasnosti. Drugim riječima, intenzitet rizika procjenjuje se kombiniranjem prirodne ranjivosti sustava i rezultata provedene analize opasnosti.
- Procjena osjetljivosti na rizik – odnosi se na posljedice do kojih će doći uslijed pojave štete, a procjenjuje se na temelju određene ekološke i ekonomske vrijednosti promatranog vodonosnog sustava.

Ukupni rizik predstavlja matematički algoritam kojim se kombiniraju vrijednosti intenziteta rizika i osjetljivosti na rizik (**slika 6.28**).



Slika 6.28. Shematski prikaz ukupnog rizika (prema: *Zwahlen, 2004*)

Iako je u većini slučajeva postupak provedbe analize rizika od onečišćenja podzemnih voda obuhvaćao samo prvu fazu, procjenu intenziteta rizika, jer nije bilo dovoljno relevantnih podataka za provedbu druge faze, važno je naglasiti da samo kompletna analiza, uključujući i analizu osjetljivosti može dati pravu vrijednost rizika koji dalje služi za planiranje korištenja prostora, donošenje odluka i slično.

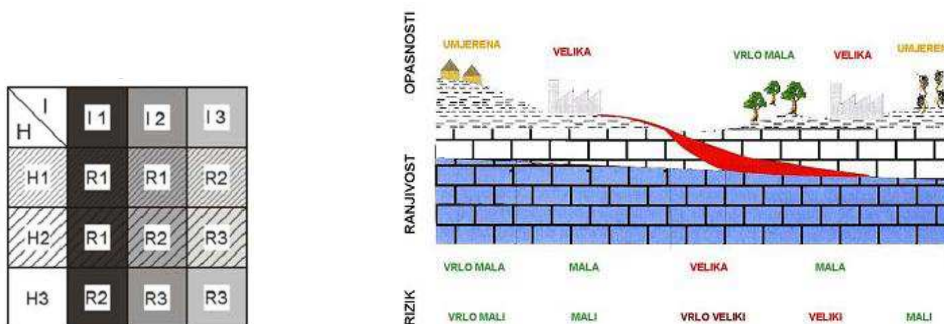


### 6.9.1. Postupak procjene intenziteta rizika

Da bi bilo moguće procjeniti intenzitet rizika potrebno je imati rezultate dvije prethodne analize:

- Procjena prirodne ranjivosti (karta prirodne ranjivosti) – sadrži podatke o prirodnim uvjetima koji pogoduju smanjenju onečišćenja i njihovom prostornom razmještanju prije nego dođe u kontakt s podzemnim vodama ili do promatranog izvora (crpilišta) vode. Pri tome je vrlo važno pretpostaviti dobar konceptualni model koji vjerodostojno opisuje kretanje vode (i onečišćenja) u podzemlju (**slika 6.3**) te također imati u vidu da se sve temelji na modelu "porijeklo – put – cilj" (**slika 6.1**).
- Procjena opasnosti (tj. njezin krajnji rezultat, karta klasificiranih opasnosti) – daje sve potrebne podatke o porijeklu i ponašanju potencijalnog onečišćenja, odnosno o lokaciji potencijalnih i aktivnih opasnosti, stupnju štetnosti za podzemne vode, te vjerojatnosti pojave opasnosti.

Krajnji rezultat procjene intenziteta rizika može biti kvantitativna vrijednost, indeks intenziteta rizika (ako je korišten matematički algoritam međuodnosa ranjivosti i opasnosti) ili semikvantitativna vrijednost (ako se intenzitet dobiva uspostavljanjem odnosa između klasa ranjivosti i opasnosti). Različiti načini procjene intenziteta rizika pomoću superpozicioniranja efekata opasnosti i prirodne ranjivosti, bez kvantitativnih izračuna shematski su prikazane na **slici 6.29. a i b**. Na ovaj način indeks intenziteta ranjivosti nema brojčanu vrijednost, već opis klase, pa se na taj način moraju procjenjivati i indeks osjetljivosti na rizik, te indeks ukupnog rizika.

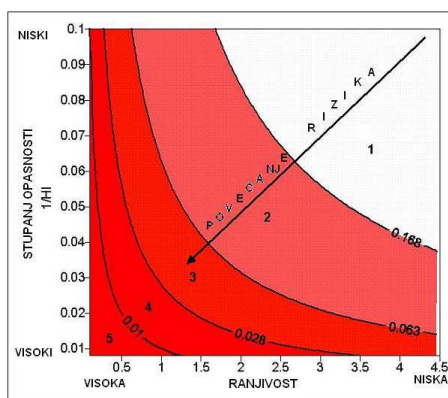


Slika 6.29. a i b. Različiti načini procjene intenziteta rizika bez matematičkih izračuna (prema: **Zwahlen, 2004**)

Osim na taj način, intenzitet rizika moguće je dobiti pomoću matematičkog modela. U smjernicama COST 620 projekta dana je preporuka za korištenje relativno jednostavne jednadžbe, gdje se indeks intenziteta rizika ( $RI_i$ ) dobiva kao umnožak recipročne vrijednosti indeksa opasnosti ( $1/HI$ ) i zaštitnog faktora procjenjene prirodne ranjivosti ( $\pi$  – u PI metodi, COP indeks u COP metodi itd.) kao što je prikazano formulom 6.9.

$$RI_i = \frac{1}{HI} \cdot \pi \quad (6.9)$$

Prednost ovakve metode je što se koristi numerički definirana raspodjela vrijednosti ranjivosti i opasnosti (koja se ne izražava s vrijednostima klasa), što daje precizniju raspodjelu intenziteta rizika, iako se prikaz na kraju reklasificira u pet klasa (slika 6.30). Negativna strana ovog pristupa je što naginje procjenjivanju rizika tako što dodjeljuje klasu vrlo visokog rizika svugdje gdje je ranjivost visoka bez obzira na (ne)postojanje opasnosti, jednako kao i na područjima gdje su visoke klase opasnosti, iako je ranjivost niska. No, to se može regulirati drugačijim rasporedom parametara na osima, što spada u subjektivnu prilagodbu istraživanom području.



Slika 6.30. Dijagram procjene intenziteta rizika prema matematičkom modelu (prema *Zwahlen, 2004*)

### 6.9.2. Postupak procjene osjetljivosti na rizik

Osjetljivost na rizik drugi je pokazatelj u procjeni ukupnog rizika od onečišćenja podzemnih voda, a odnosi se na definiranje posljedica nekog štetnog djelovanja (onečišćenja). Osjetljivost na rizik procjenjuje se pomoću dvije zasebne analize:

- Analiza utjecaja onečišćenja na vodonosnik – od mjesta prodora onečišćenja u krško podzemlje, njegovog ponašanja unutar zasićenog dijela vodonosnika, pa sve do predviđanja stanja (količina, koncentracija onečišćivača) na izlazu (krškom izvoru). Na osjetljivost vode na onečišćenje u zasićenoj zoni vodonosnika najviše utječu uvjeti toka (količine vode, brzine i smjerovi toka, vrijeme zadržavanja u podzemlju) (*U.S. EPA, 1993*), stoga su to osnovni parametri koji se definiraju u ovom dijelu analize osjetljivosti. Uz to pažnju treba posvetiti svim faktorima koji utječu na zadržavanje onečišćenja (biorazgradivost, filtracija, sorpcija itd.).
- Analiza nastale štete i njenih posljedica – odnosi se na definiranje ekološke (utjecaj na ekosustav) i ekonomske vrijednosti koju ima vodonosni sustav, te kako bi nastale štete mogle utjecati na promjenu te vrijednosti. Kod procjene ekonomske štete promatra se u prvom redu nemogućnost daljnjega korištenja podzemne vode za vodoopskrbu i druge ljudima korisne svrhe, te cijena postupka obnove vodonosnika. Postoji mnogobrojna literatura i preporuke (*Ganoulis, 2005; Adams & Foster, 1992; U.S. EPA, 1996; NWC, 2012...*) na koji način se može izračunati cijena sanacije negativnih posljedica hazardnog događaja na podzemnim vodama (tzv. analize troškova i koristi), ali svaki takav izračun ima određenu količinu nesigurnosti jer je teško predvidjeti sve utjecajne parametre, a obično se uopće ne uzima u obzir ekološka šteta niti ekološka vrijednost podzemnih voda i o podzemnoj vodi ovisnih ekosustava. Za potrebe procjene rizika od onečišćenja podzemnih voda potrebno je odrediti vrijednost podzemne vode prema namjeni. U tu svrhu može se koristiti neka od predloženih podjela podzemnih voda, gdje pojedina kategorija označava stupanj važnosti vode. Jedna od takvih kategorizacija je ona predložena od strane Američke agencije za zaštitu okoliša (*U.S. EPA, 1993*) koja uzima u obzir kakvoću i količine dostupne podzemne vode, sadašnju i buduću namjenu, javno mišljenje o važnosti vode i ekološki značaj, a predlaže tri kategorije:
  - 1. kategorija – voda visoke vrijednosti, nezamjenjiv izvor pitke vode i od vitalnog ekološkog značaja;
  - 2. kategorija – voda dobre kakvoće, izvor potencijalno uključiv u vodoopskrbni sustav ili podoban za neku drugu korisnu svrhu;
  - 3. kategorija – voda koja nije za ljudsku upotrebu zbog zasljenjenja ili prethodnog onečišćenja.

Kombinacijom rezultata ove dvije analize moguće je ocijeniti koji dijelovi sliva karakteriziraju podzemnu vodu kao visoko osjetljivu na rizik od onečišćenja, koji dijelovi su umjereno, a koji nisko osjetljivi. Takva ocjena prikazuje se pomoću indeksa osjetljivosti na rizik, koji zajedno s indeksom intenziteta rizika ulazi u procjenu ukupnog rizika podzemnih voda od onečišćenja.

### **6.9.3. Postupak procjene ukupnog rizika od onečišćenja podzemnih voda**

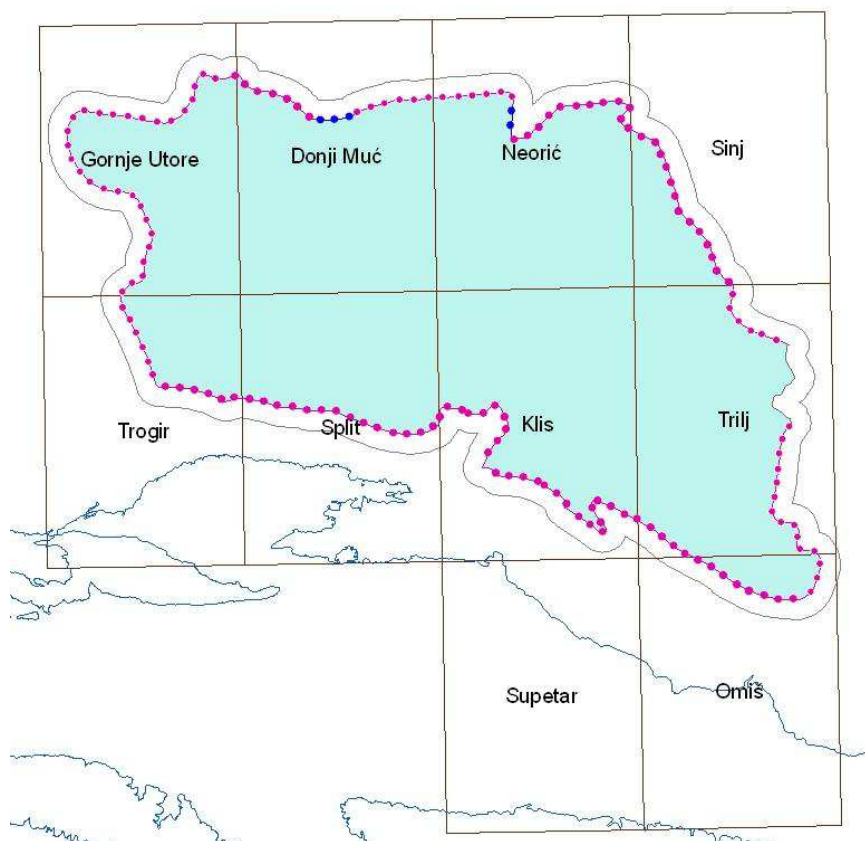
Konačni cilj analize rizika je procjena ukupnog rizika od onečišćenja, prikazana kao karta rizika od onečišćenja podzemnih voda, koja služi kao osnovna podloga kod planiranja korištenja prostora te donošenja odluka u upravljanju i zaštiti vodama. Europskim pristupom rizik je definiran pomoću tri indeksa: RI-i (indeks intenziteta rizika, *eng. risk intensity index*) – relativna mjera intenziteta štetnog djelovanja, koja je posljedica odnosa prirodne ranjivosti sustava i opasnosti za podzemne vode; RS-i (indeks osjetljivosti na rizik, *eng. risk sensitivity index*) – relativna mjera osjetljivosti vodonosnog sustava na pojavu štetnog djelovanja u vidu smanjenja ekološke i ekonomske vrijednosti podzemnih voda i o vodi ovisnih ekosustava; i TR-i (indeks ukupnog rizika, *eng. total risk index*) – zbroj svih utjecajnih parametara identificiranih kroz analizu rizika.

## 7. Analiza prirodne ranjivosti podzemnih voda u slivu Jadra i Žrnovnice

### 7.1. Izrada podloga za ocjenu prirodne ranjivosti vodonosnika

Određivanje značajki pojedinih krških sustava osnovni je preduvjet za procjenu ranjivosti podzemnih voda. Poznavanje hidrogeoloških odnosa u slivu prvi je korak analize ranjivosti, stoga se hidrogeološka karta istraživanog područja s podacima o smjerovima i prividnim brzinama tečenja podzemne vode smatra prvom i osnovnom podlogom za procjenu ranjivosti.

Kod izrade ostalih podloga, koje su korištene kod analize prirodne ranjivosti u slivu, korištene su topografske karte M 1:25 000, listovi: Gornje Utore, Donji Muć, Trogir, Split, Neorić, Sinj, Klis, Trilj, Supetar i Omiš (slika 7.1).

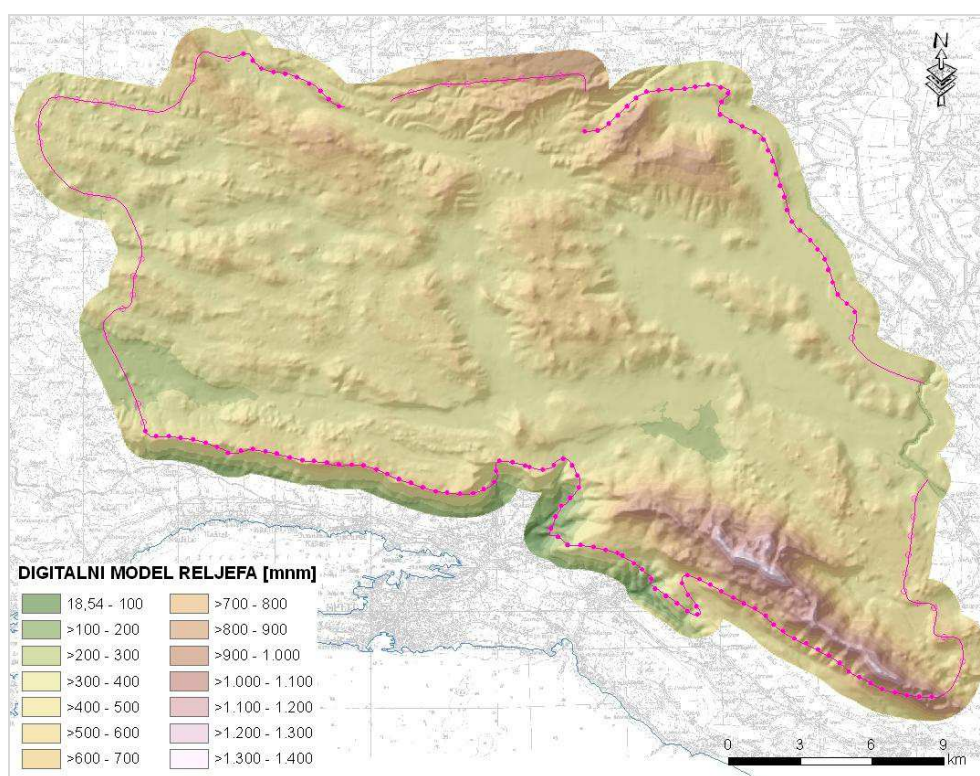


Slika 7.1. Shema listova topografske karte M 1:25 000

Topografske karte korištene su za digitalizaciju: slojnica, kota, hidrografske mreže i geomorfoloških objekata (vrtača). Navedeni elementi su procesom digitalizacije pretvoreni u vektorski format i kao takvi poslužili su kao ulazni parametri za izradu karte nagiba terena, karte prioriternih površinskih tokova i karte prostorne distribucije vrtača. Kod pripreme podloga, kao i za analize i postupke procjene prirodne ranjivosti, opasnosti i rizika, korištena je GIS tehnologija (Geografski Informacijski Sustav – eng. "Geographic Information System") upotrebom ESRI ArcGis softvera.

### 7.1.1. Prostorno modeliranje

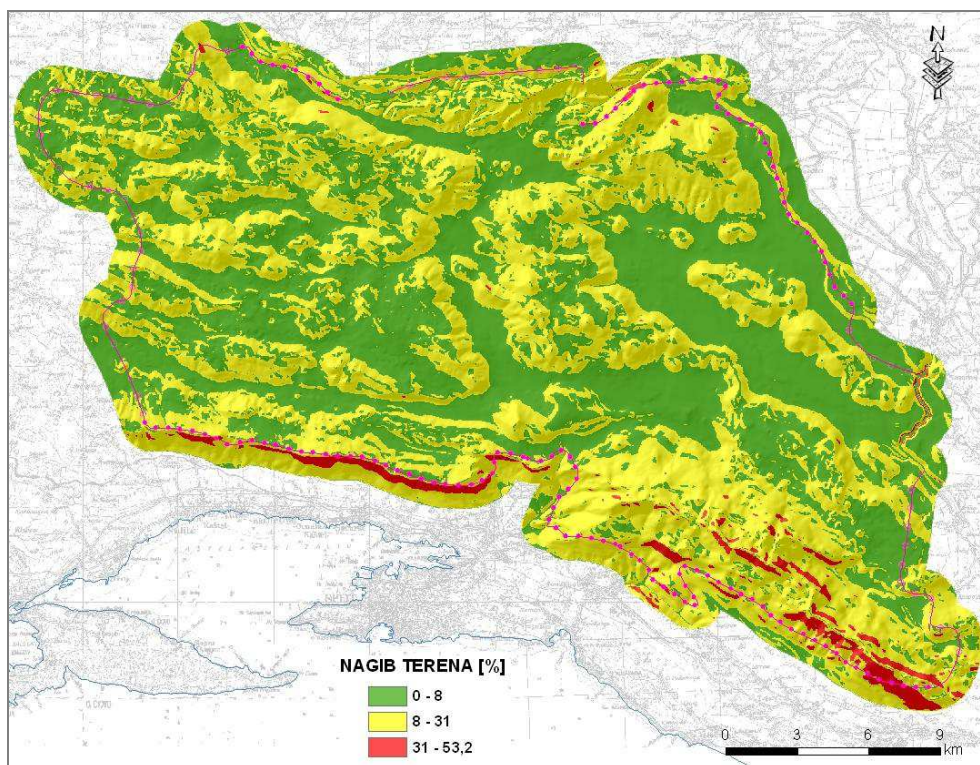
Iz digitaliziranih slojnica, uz upotrebu ESRI ArcGIS Spatial Analyst ekstenzije, izrađen je digitalni model reljefa DMR (eng. *Digital Elevation Model*) u formi "grida", rezolucije 25 metara (slika 7.2). DMR grid je korišten u prostornom modeliranju, prilikom izrade karte nagiba terena, smjera otjecanja i akumulacije toka i definiranja prioriternog otjecanja.



Slika 7.2. DMR "grid" sa sjenama u podlozi



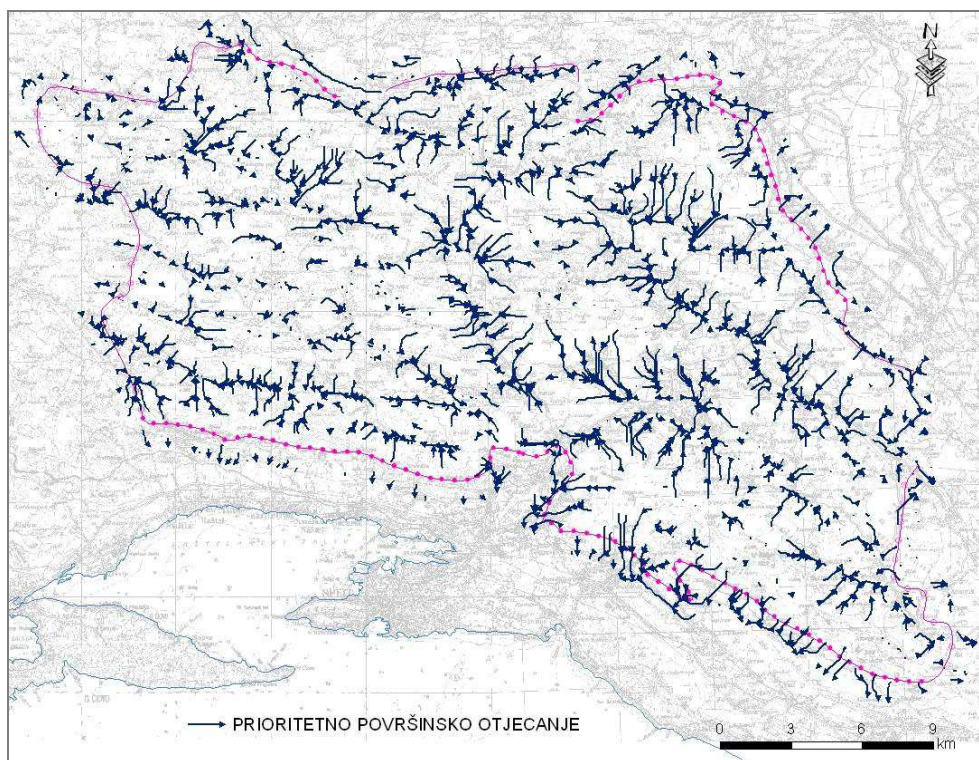
Na temelju podataka DMR-a izrađena je i karta nagiba terena, također u formi "grida", u rezoluciji 25 m, s rasponom vrijednosti od 0 – 53,18%. Tako dobiven "grid" reklasificiran je u tri klase: prva u rasponu od 0 – 8%, druga u rasponu od 8 – 31% i treća  $\geq 31\%$  (slika 7.3). Na kraju je "grid" konvertiran u formu vektora kako bi se moglo izvršiti prostorno preklapanje i kako bi se mogla izračunati površina pojedinih klasa (kao što je prikazano u tablici 7.1).



Slika 7.3. Karta nagiba terena

Temeljem DMR-a, pomoću hidrografskih alata u okviru ESRI ArcGIS Spatial Analyst ekstenzije, izvršeno je i hidrografsko modeliranje. Određen je smjer otjecanja svake ćelije "grida" (eng. *FlowDirection*) i akumulacija toka za svaku pojedinu ćeliju (eng. *Flow Accumulation*). Na kraju su izdvojene ćelije u kojima se akumulira otjecanje s više od 200 okolnih ćelija i na taj način je generiran "grid" prioritetnog površinskog toka. Taj "grid" također je konvertiran u formu vektora tj. linije sa smjerom otjecanja (eng. *StreamToFeature*) (slika 7.4) radi prostornog preklapanja i statističke obrade.

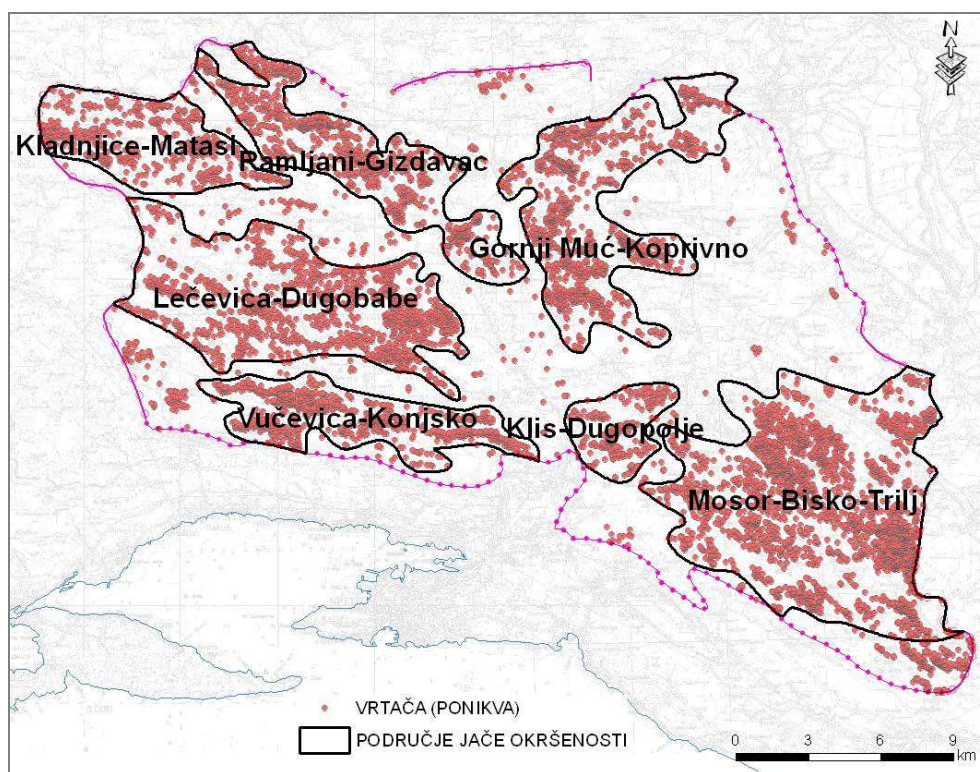




Slika 7.4. Karta prioritetnih površinskih tokova

Poseban sloj u GIS-u je i karta prostorne distribucije vrtača. Vrtače su jedan od odlučujućih čimbenika koji ukazuju na intenzitet okršenosti karbonatnih naslaga, postojanje epikrške zone, a time i na dijelove terena koji su izrazito ranjivi zbog nepovoljnog utjecaja na podzemnu vodu (*Ford & Williams, 2007; Kapelj et al., 2004a*). Upravo iz tog razloga digitalizirane su vrtače iz topografske podloge mjerila 1:25 000, ukupno 10 312 pojedinačnih objekata. Na temelju prostorne raspodjele vrtača, izdvojena su područja jače okršenosti sliva, odnosno sedam cjelina (**slika 7.5**):

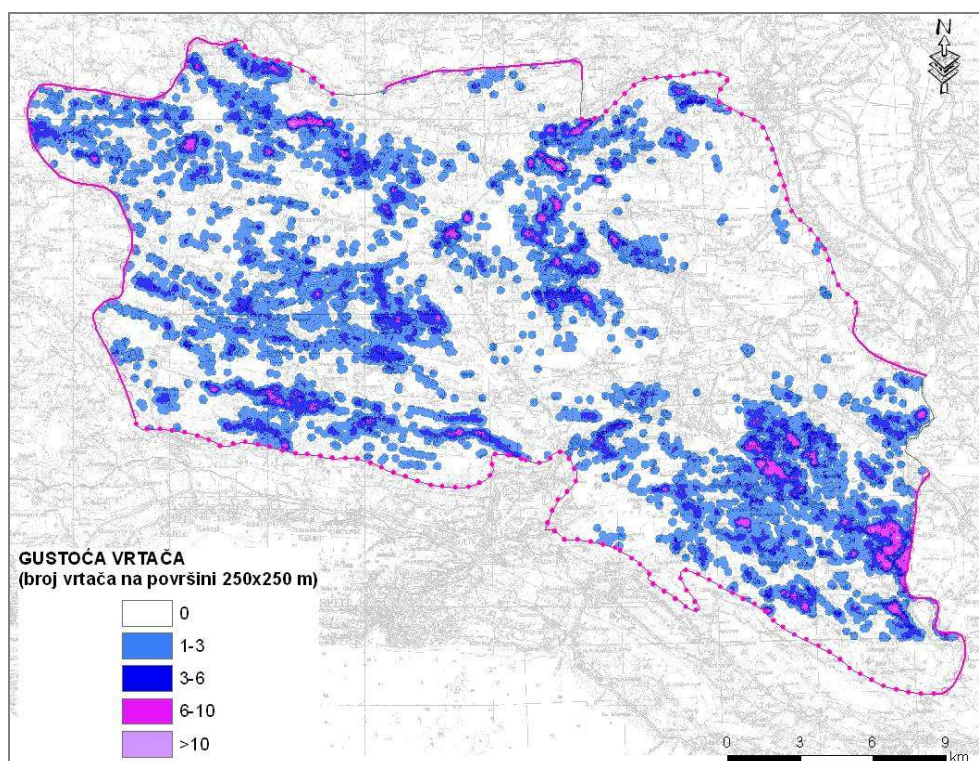
- područje Kladnjice – Mataci,
- područje Ramljane – Gizdavec,
- područje Koprivno – Gornji Muć,
- široka zona između Dugobaba i Lećevice,
- izdužena zona Konjsko – Vučevica,
- prostor sjeverozapadnog zaleđa Mosora preko Biskog do Trilja,
- dodirna zona Mosora i Kozjaka (Klis Grlo – Dugopolje).



Slika 7.5. Područja jače okršenosti unutar sliva

Nakon toga je pomoću alata za izračun gustoće u okviru ESRI ArcGIS Spatial Analyst ekstenzije izrađen "grid" prostorne gustoće vrtača, a veličina pojedinačne ćelije je dimenzija 250x250 metara. Dobiveni "grid" reklasificiran je u pet kategorija: I = 0; II = 1 – 3; III = 3 – 6; IV = 6 – 10 i V  $\geq$ 10. Rezultat je karta okršenosti sliva prema prostornoj raspodjeli gustoće vrtača (slika 7.6).



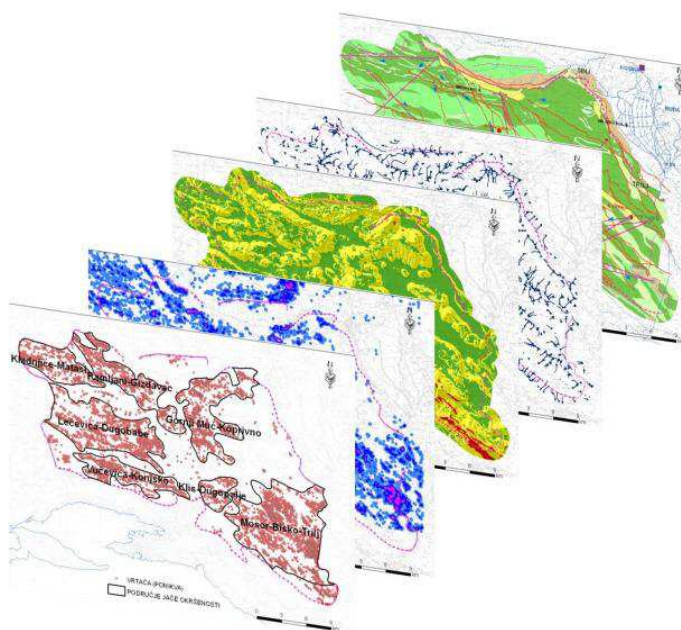


Slika 7.6. Karta raspodjele gustoće vrtača

### 7.1.2. Prostorno preklapanje

Za statističku obradu prostornih podataka korištene su: karta nagiba terena, karta hidrogeoloških jedinica, karta prioritnog otjecanja i karta vrtača (slika 7.7). Svaka karta predstavlja zasebni tematski sloj u vektorskom formatu (točke, linije, poligoni).

Rezultati preklapanja, odnosno najvažniji numerički rezultati statističke obrade, prikazani su u tablicama 7.1 i 7.2.



Slika 7.7. Slojevi korišteni za statističku obradu prostornih podataka

Tablica 7.1. Odnos hidrogeoloških jedinica, distribucije vrtača, prioriternih površinskih tokova i nagiba reljefa

HIDROGEOLOŠKE JEDINICE	POVRŠINA		BROJ VRTAČA		DUŽINA PRIORITETNIH POVRŠINSKIH TOKOVA		POVRŠINE IZDVOJENIH KATEGORIJA NAGIBA RELJEFA (km <sup>2</sup> )		
	(km <sup>2</sup> )	(%)	(num)	(%)	(km)	(%)	0 - 8 <sup>0</sup>	8 - 31 <sup>0</sup>	> 31 <sup>0</sup>
Kvartarne naslage slabe propusnosti	1,33	0,10	2	0,00	3,01	0,32	1,03	0,30	0,00
Naslage naizmjeničnih hidrogeoloških svojstava	18,75	2,60	30	0,03	65,33	7,00	18,42	0,33	0,00
Karbonatne stijene dobre propusnosti	357,75	51,35	5158	57,71	459,01	49,33	165,19	184,54	8,03
Karbonatne stijene srednje propusnosti	183,21	26,30	2287	25,59	228,93	24,55	93,89	88,69	0,64
Karbonatne stijene slabe propusnosti	83,14	11,95	1449	16,25	93,73	10,05	36,04	42,63	4,47
Pojave magmatskih stijena - nepropusno	0,14	0,00	0	0	0,29	0	0,10	0,04	0,00
Klastične naslage - nepropusno	52,29	7,70	11	0,12	82,01	8,75	15,65	35,07	1,57
<b>UKUPNO</b>	<b>696,61</b>	<b>100</b>	<b>8937</b>	<b>100</b>	<b>932,31</b>	<b>100</b>	<b>330,32</b>	<b>351,60</b>	<b>14,71</b>
							<b>47,41 %</b>	<b>50,47 %</b>	<b>2,12 %</b>

Tablica 7.2. Odnos broja vrtača i dužine prioritetnog površinskog otjecanja po kategorijama nagiba terena

KATEGORIZACIJA NAGIBA TERENA	POVRŠINA (km <sup>2</sup> )	BROJ VRTAČA	DUŽINA PRIORITETNOG POVRŠINSKOG OTJECANJA (km)
0-8 °	331,78	7385	715,11
8-31 °	351,97	1565	211,81
>31 °	14,72	1	3,41

Preklapanjem tematskih slojeva uočljivo je da su se vrtače uglavnom razvile na krškim vapnenačkim zaravnima u dijelovima terena na kojima ne postoji kontinuirani pokrov tla i na nagibima koji ne prelaze 8°. U ovim su zonama također najbolje razvijeni ostaci prioritetnih površinskih tokova – erozijska mreža.

Izdvojena područja visoke gustoće vrtača potencijalno su zone brze infiltracije voda u podzemlje. To, osim o vodopropusnosti stijena na površini, ovisi i o okršnosti epikrške zone te o dubini do podzemne vode. Time navedena područja postaju potencijalno zone visoke ranjivosti podzemnih voda.

### 7.1.3. Priprema podataka o tlu i vegetaciji

U većini metoda procjene ranjivosti podaci o tlu i vegetacijskom pokrovu imaju važnu ulogu. Tlo pripada u najvažnija prirodna zaštitna obilježja nekog vodonosnog sutava. Međutim, u području sliva Jadra i Žrnovnice, tlo nema značajnu zaštitnu funkciju. U velikom dijelu sliva karbonatne stijene su ogoljele, tlo se može naći samo u većim ili manjim šupljinama, udubljenjima i pukotinama, i tada se radi o tzv. "kamenjarskim tlima", nastalim trošenjem stijene, debljine u pravilu ne veće od 20 cm, koja su izrazito suha i neplodna. U području krških polja su tla rasprostranjenija i veće debljine.

Osnovni podaci o tlu uzeti su iz Hidropedološke karte Republike Hrvatske, mjerila 1:300 000 (Vidaček *et al.*, 2004). Preklapanjem Hidropedološke karte Hrvatske, Karte dubine tla i Karte teksture tla na području sliva izdvojeno je 15 klasa tala (slika 7.9, tablica 7.3), te su za svaki izdvojeni poligon definirane ključne značajke pojedine klase tla, kartirane hidropedološke

jedinice, tekstura tla i dominantna dubina tla. Uz navedeno, korištena je i karta stijena bez vegetacijskog pokrova ili goleti (slika 7.9).

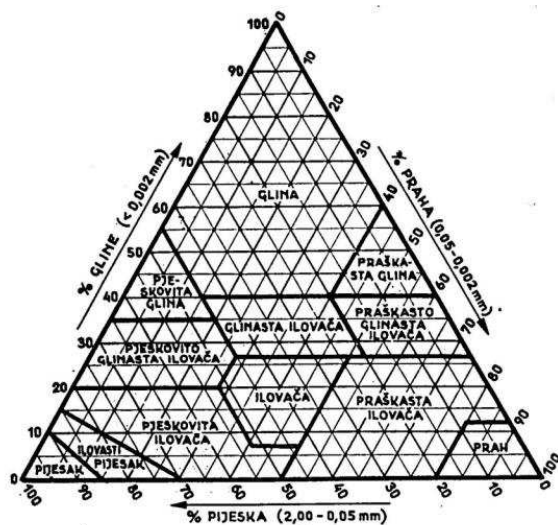
Tablica 7.3. Izdvojene klase tala na području sliva Jadrta i Žrnovnice

R.br. klase tla	Hidropedološka jedinica	Dominantna dubina (cm)	Tekstura	Površina sliva (km <sup>2</sup> ) ili udio sliva (%)
0	Stijene bez pokrova	-	-	106,49 ili 18,77
1	1	10	Skeletna	2,74 ili 0,48
2	1	15	Ilovača	4,5 · 10 <sup>-6</sup>
3	1	40	Ilovača	4,52 ili 0,80
4	1	50	Glina	33,00 ili 5,82
5	2	15	Ilovača	46,85 ili 8,26
6	2	25	Ilovača	33,38 ili 5,88
7	3	25	Ilovača	2,88 ili 0,51
8	3	40	Glina	26,92 ili 4,75
9	3	40	Ilovača	14,00 ili 2,47
10	3	50	Ilovača	96,62 ili 17,03
11	3	50	Glina	168,67 ili 29,74
12	3	60	Ilovača	4,5 · 10 <sup>-6</sup>
13	3	>200	Ilovača	3,83 ili 0,68
14	6	60	Ilovača	20,91 ili 3,86
15	14	>200	Ilovača	6,42 ili 1,13

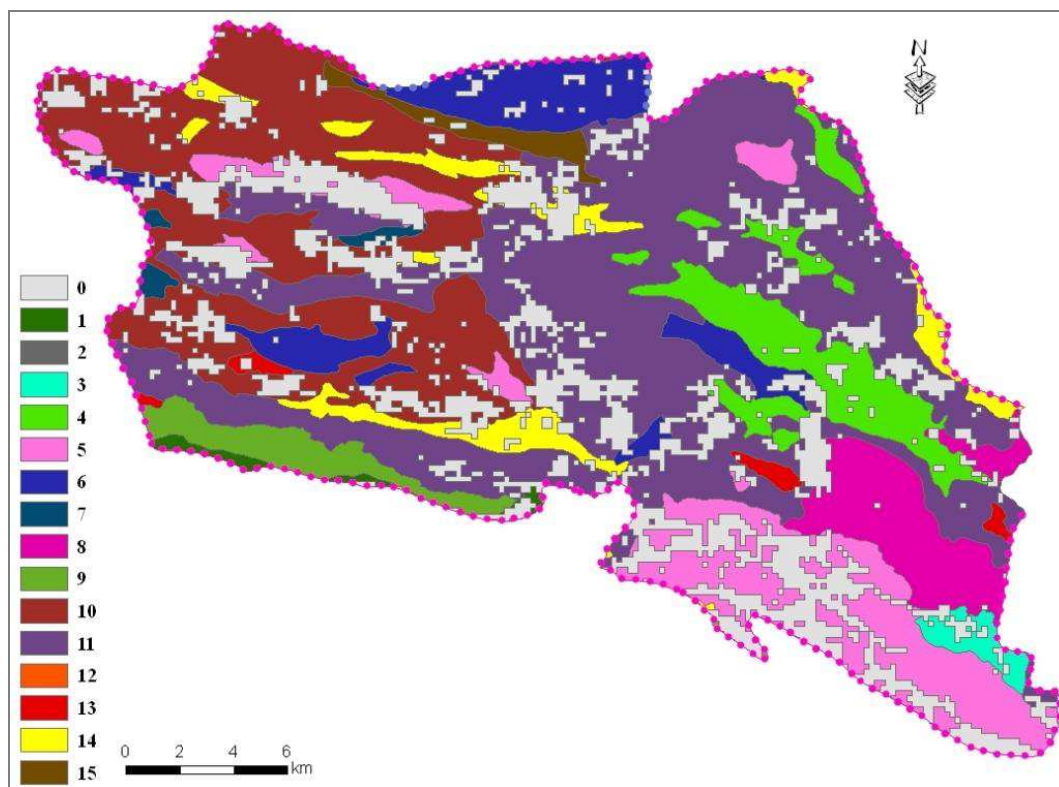
Broj hidropedološke jedinice odgovara onom u Hidropedološkoj karti Hrvatske i predstavlja tlo određenih hidropedoloških karakteristika. Prisutne hidropedološke jedinice 1, 2 i 3 odnose se na automorfna (1) (vlažena procjednom oborinskom vodom), ekscesivno (2) (vrlo brzo vlaženje  $K > 4,8$  m/dan), dobro ( $K = 1,4 - 4,8$  m/dan) ili umjereno dobro (3) ( $K = 0,5 - 1,4$  m/dan) drenirana tla. Razlika je u udjelu stjenovitosti i kamenitosti koja je najveća kod jedinice 1 (90% i 60%), a opada kod jedinica 2 i 3. Kartirana jedinica 6 odnosi se na automorfna, dobro i umjereno dobro drenirana tla, gotovo bez stjenovitosti i kamenitosti, a može sadržavati i epiglejna i duboka hipoglejna tla ( $K = 0,01 - 0,5$  m/dan). Kartirana jedinica 14 odnosi se na automorfna, dobro drenirana tla, bez imalo stjenovitosti i kamenitosti, odnosno duboka ilovasta tla i aluvijalna naplavljena tla.



Tumač teksture: Skeletna – preko 50% skeleta; glina – glina i pjeskovita i praškasta glina; ilovača – ilovača i pjeskovito glinasta, glinasta, praškasto glinasta, pjeskovita i praškasta ilovača (slika 7.8).



Slika 7.8. Ocjena teksture tla (prema *Soil Survey Staff, 1951*; iz *Vidaček et al., 2004*)



Slika 7.9. Prikaz pojedinih klasa tala izdvojenih na području sliva

Ovako dobivena karta korištena je za procjenu utjecaja tla na ranjivost krških vodonosnika, prema smjernicama svake pojedine metode.

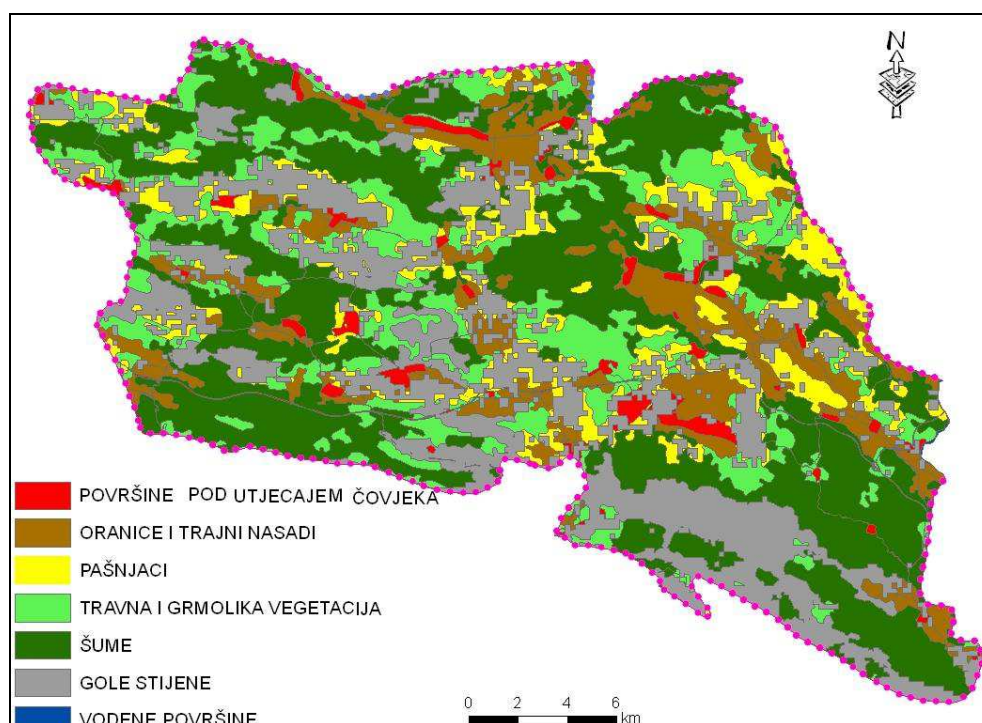


Vegetacija ima najveći utjecaj kod formiranja površinskog otjecanja i uvjeta infiltracije. Uobičajena je podjela na: šume, livade/pašnjake i obradivo tlo. Razlog tome je što više vegetacije pogoduje infiltraciji, a manje vegetacije znači više površinskog otjecanja. Prema tome, obrađene površine (kultivirana tla) pogoduju površinskom otjecanju, što zbog sastava tla (prašinsto – glinoviti materijali), načina obrade, ali i povećanja zbijenosti tla na područjima gdje trenutno ne raste vegetacija. Za razliku od toga, travnate površine su pogodnije za infiltraciju, dok su najprikladnije ipak šume – zbog značajki šumskog tla koje je rahlo, puno humusa, te zbog efekta ublažavanja intenziteta oborina, zbog prepreka (drveća) (Werz & Hötzl, 2007). Ipak, šume u Dalmaciji nemaju gore navedene značajke. Posebne vrste borova, nisko bodljikavo raslinje i makija rastu izravno na okršanim vapnencima i razlomljenim dolomitima (iz pukotina ispunjenih zemljom) ili na vrlo tankim slojevima tla koja se brzo dreniraju. Osim toga, zbog čestih šumskih požara i uništavanja šumskog pokrova, šuma često više podsjeća na neki kamenjarski pašnjak ili suhi travnjak. Stoga pokrov šuma treba uzeti s rezervom, s obzirom na značajke infiltracije oborina.

Za pripremu tematskih slojeva s podacima o vegetaciji na području sliva korišteni su podaci "on-line" baze podataka s mrežne stranice Agencije za zaštitu okoliša "Corine LandCover 2000" (AZO, 2008). Uz navedeno, korištena je i karta pokrova budući da je Agencija za zaštitu okoliša napravila usporedbu pokrova zemljišta prikazanih kartama za referentne godine 2000. i 2006. (CLC2000 i CLC2006), a analizu promjena objavila je u Publikaciji "Pokrov i namjena korištenja zemljišta u Republici Hrvatskoj – stanje i trendovi" (Kušan et al., 2010). Podaci iz te publikacije jasno ukazuju na promjene do kojih je došlo u navedenom razdoblju, a koje se odnose prije svega na povećanje površina pod utjecajem čovjeka (izgradnja autocesta i popratnih objekata, te povećanje naseljenih područja). Kako ta promjena iznosi svega 4% od ukupne površine cijele Republike Hrvatske, smatra se da su podaci iz baze CLC2000 zadovoljavajući, uz uvažavanje ranije navedenih promjena. Zbog toga su iz Prostornih planova Splitsko-dalmatinske županije (PPSDŽ, 2002) uzeti podaci o naseljenim područjima, prometnoj infrastrukturi i korištenju zemljišta u slivu koji su preklopljeni s tematskom kartom CLC2000. Na kraju je iz Hidropedološke karte uzet sloj golih stijena kako bi se utvrdio dio sliva bez tla i vegetacije. Dobiveni rezultati provjereni su i usklađeni s podacima iz satelitskih snimaka. Na konačnoj karti pokrova (slika 7.10) izdvojeno je sedam glavnih klasa pokrova s pripadajućim dimenzijama (tablica 7.4), koji su bodovani ovisno o zahtjevima pojedine metode.

Tablica 7.4. Klase pokrova zemljišta na području sliva

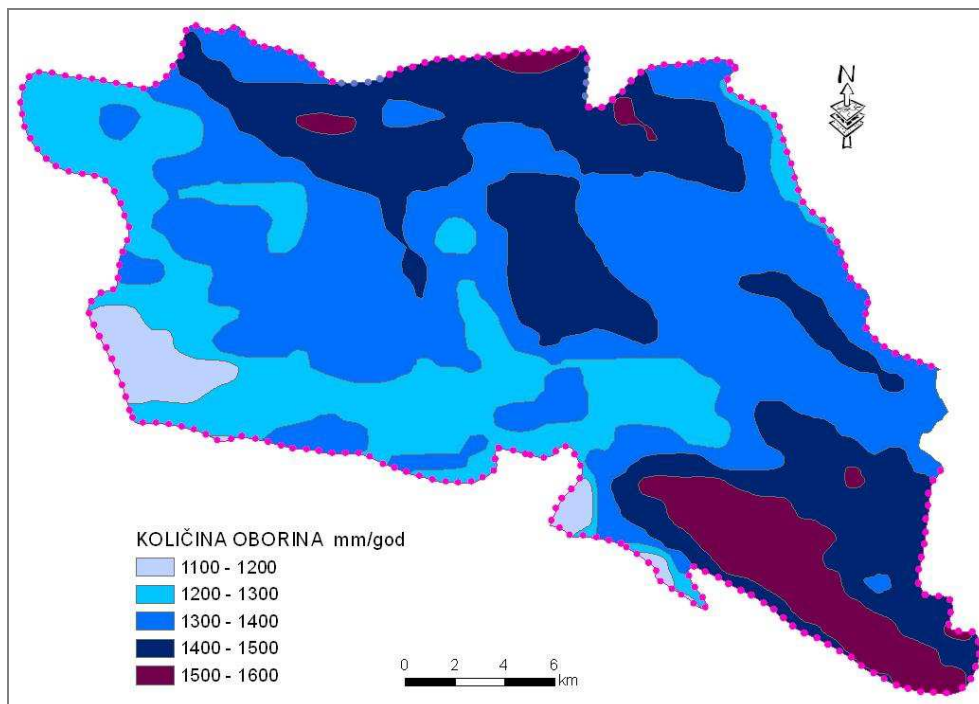
R.br. klase	NAZIV KLASE	Površina (km <sup>2</sup> )	Udio sliva (%)
<b>1</b>	<b>Površine pod utjecajem čovjeka</b>	16,89	2,98
<b>2</b>	<b>Oranice i trajni nasadi</b>	71,24	12,55
<b>3</b>	<b>Pašnjaci</b>	46,49	8,19
<b>4</b>	<b>Travna i grmolika vegetacija</b>	89,0	15,68
<b>5</b>	<b>Šume</b>	206,93	36,45
<b>6</b>	<b>Područje bez vegetacije</b>	136,95	24,12
<b>7</b>	<b>Vodene površine</b>	0,2	0,03



Slika 7.10. Prikaz pojedinih klasa pokrova na području sliva

#### 7.1.4. Priprema podataka o oborinama

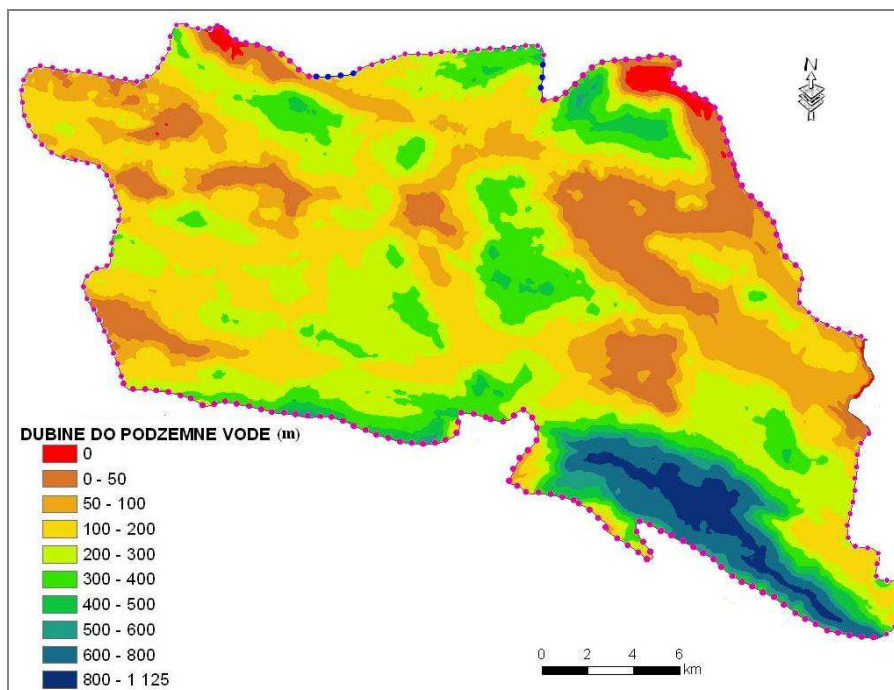
Podaci o srednjim godišnjim oborinama preuzeti su iz Klimatskog atlasa Republike Hrvatske 1961. – 1990. godine (Zaninović *et al.*, 2008). Digitalizacijom karte srednjih godišnjih oborina za promatrano razdoblje dobivena je raspodjela oborina prikazana na slici 7.11. Osim toga, iz istog izvora uzeti su i podaci o evapotranspiraciji i broju kišnih dana na slivu, što je također potrebno za izračun pojedinih parametara.



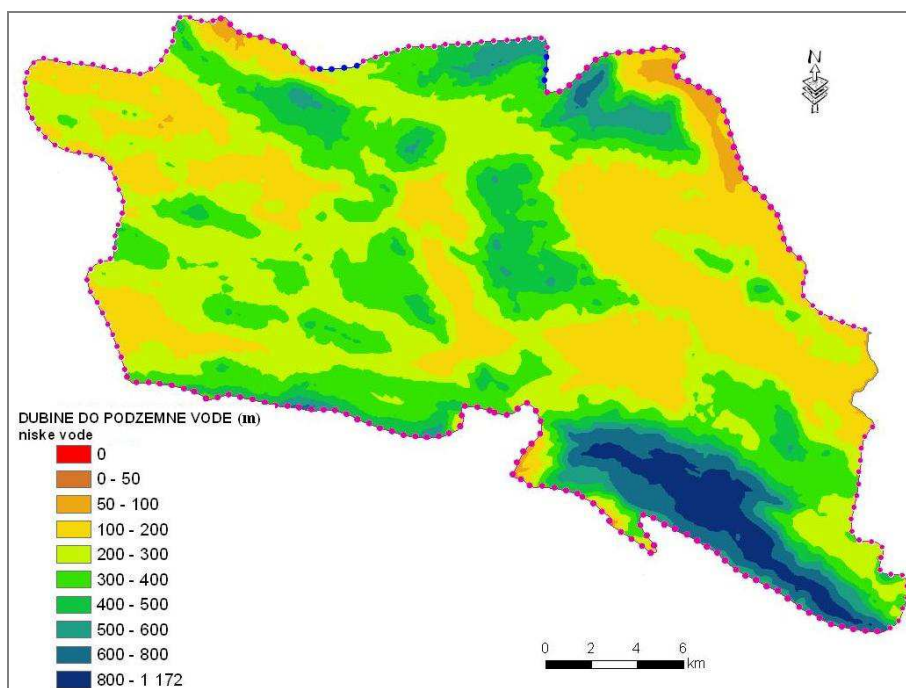
Slika 7.11. Prikaz prostorne raspodjele srednjih godišnjih oborina u periodu od 1961. – 1990. godine (prema: *Zaninović et al., 2008*)

### 7.1.5. Modeliranje razina podzemne vode

Kod procjene ranjivosti vodonosnika često je potrebno odrediti razinu podzemnih voda, jer ona određuje debljinu nesaturirane zone. Kako je u kršu općenito vrlo komplicirano odrediti točnu razinu podzemnih voda, zbog vrlo malog broja mjerenih podataka i nepredvidivosti podzemnih tokova i akumulacija, dubina do podzemne vode u velikoj mjeri je samo procijenjena. U nekim dijelovima sliva procjena je vršena na temelju debljine određenih litoloških jedinica, dok je kod drugih dubina do podzemne vode procijenjena interpolacijom podataka iz istražnih bušotina na slivu u kojima je izmjerena razina podzemne vode. Pri tome su u obzir uzeta dva slučaja, tj. ekstremi izmjerenih vrijednosti u bušotinama – pojave minimalnih i maksimalnih razina podzemnih voda, odnosno najveće i najmanje debljine nesaturirane zone vodonosnika. Pomoću digitalnog modela reljefa dobivena je karta razine podzemne vode s apsolutnim koordinatama. Pomoću "*Raster calculatora*", alata u okviru ESRI ArcGIS, izračunata je razlika između visinskih koordinata s digitalnog modela reljefa i karte razina podzemne vode, čime je dobivena debljina nesaturirane zone u bilo kojoj točki sliva i to posebno za visoke (**slika 7.12**) i za niske razine podzemnih voda (**slika 7.13**).



Slika 7.12. Karta dubina do podzemne vode kod visokih razina podzemne vode



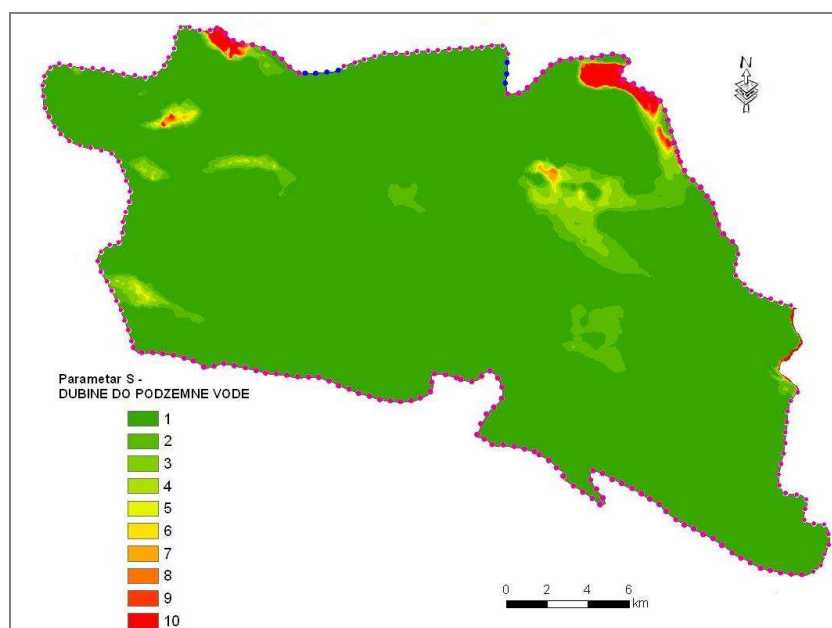
Slika 7.13. Karta dubina do podzemne vode kod niskih razina podzemne vode

## 7.2. Ocjena prirodne ranjivosti vodonosnika SINTACS metodom

### 7.2.1. Određivanje SINTACS parametara za sliv Jadra i Žrnovnice

Podaci, pripremljeni na način prikazan u prethodnom poglavlju, upotrijebljeni su za procjenu ranjivosti vodonosnika metodom SINTACS. Oni su pojedinačno obrađeni i dopunjeni prostornim preklapanjima s potrebnim atributima te su klasificirani za svaki od sedam navedenih parametara S, I, N, T, A, C i S. Prema numeričkim vrijednostima pojedinog parametra, vektorski tematski slojevi su konvertirani u raster "grid" format s rezolucijom ćelija od 25 m, za svaki parametar posebno. Alatom "map algebra" ("raster calculator" u ekstenziji Spatial Analyst) vrijednosti dobivenih "grid-ova" kombinirani su u matematički algoritam prema metodologiji SINTACS modela, koja je objašnjena u poglavlju 6.4, i na kraju je dobiven rezultat – karta prirodne ranjivosti vodonosnika u slivu Jadra i Žrnovnice. U nastavku je objašnjeno na koji način su dobivene vrijednosti pojedinih parametara u SINTACS metodi.

**Parametar S** – Dubina do podzemne vode na području sliva Jadra i Žrnovnice određena je prema **slici 7.12**, tj. dubine kod visokih razina podzemnih voda. Na taj način simuliran je najnepogodniji scenarij za ranjivost podzemnih voda zbog najmanje debljine nezasićene zone. Rasteru dubine do podzemne vode pridodane su odgovarajuće vrijednosti prema rejting dijagramu S faktora, s tim da je na području sliva gdje je dubina do vode >100 m, pridodana vrijednost 1 (**slika 7.14**).



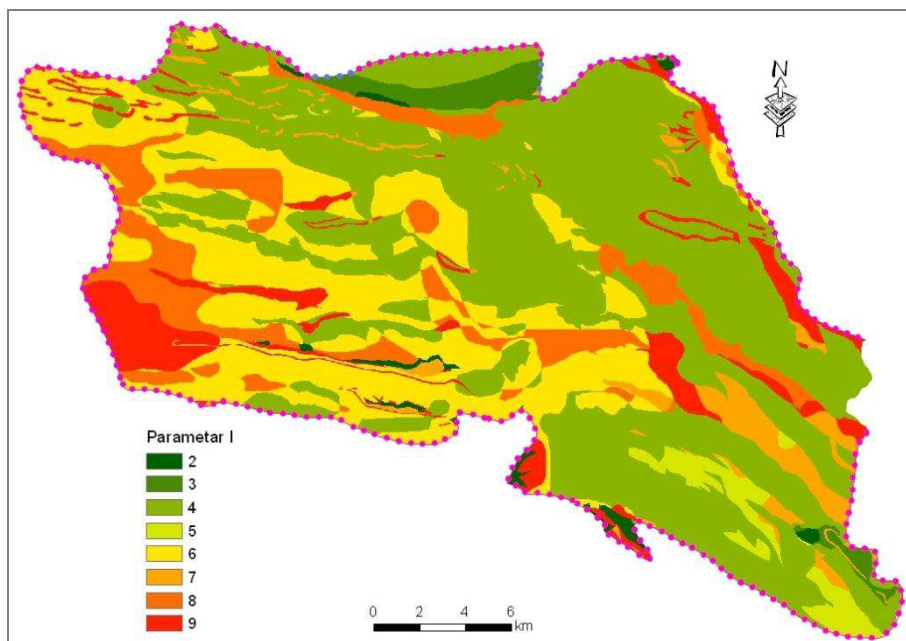
Slika 7.14. Prostorni raspored parametra S

**Parametar I** – Efektivna infiltracija u području sliva izračunata je prema podacima o srednjim godišnjim oborinama i evapotranspiraciji (*Zaninović et al., 2008*) koji su u kombinaciji s parametrima (X) za određene litološke članove dali vrijednosti temeljem "rejting dijagrama" I faktora. Očitane vrijednosti parametra X (*slike 6.5 i 6.6*) prema dijagramima glase:

- dobro propusne (okršene) karbonatne stijene – 0,85
- srednje propusne karbonatne stijene – 0,7
- slabo propusne stijene – 0,55
- nepropusne stijene – 0,12
- naslage polja (ilovača) – 0,15

Te su vrijednosti množene sa srednjom količinom godišnjih oborina na području krških polja (deblje naslage tla) ili s razlikom količine godišnjih oborina i evapotranspiracije za ostatak sliva. Dobiven je raspon potencijalne infiltracije 42,24 – 639,2 mm/godišnje, te su sukladno krivulji (*slika 6.7*) dodijeljene vrijednosti parametra I (*slika 7.15*).

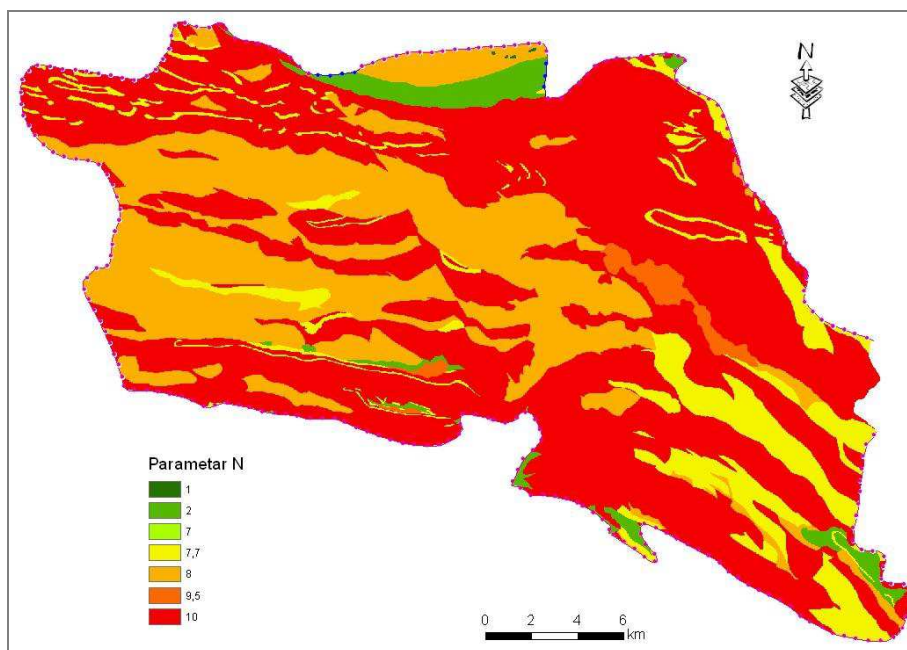




Slika 7.15. Prostorni raspored parametra I

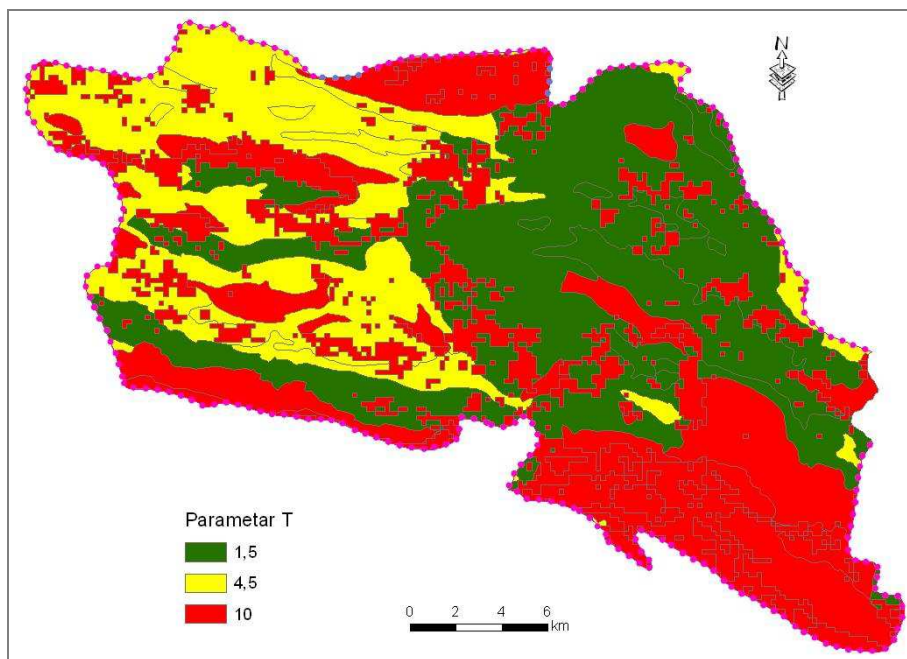
**Parametar N** – Kapacitet razrjeđivanja u nezasićenoj zoni izračunat je za područja kvartarnih naslaga prekrivenih tлом, a za ostala područja s vrlo tankim slojem tla koji je zanemariv u odnosu na debljinu stijena ispod njih ili područja bez pokrivača, N parametar određen je prema dijagramu ocjenjivanja ("rejting dijagramu") i s obzirom na litologiju, odnosno stupanj propusnosti određenog područja. Za dijelove terena prekrivene kvartarnim naslagama izračunate su sljedeće vrijednosti: Dugopolje – 7,7, Bisko polje – 8, Dicmo i Konjsko – 9, Blaca – 9,5 i Muć 10. Propusne karbonatne stijene ocijenjene su s 10, srednje propusne s 8, slabo propusne sa 7, nepropusna područja fliša s 2 i nepropusna područja eruptiva s 1 (**slika 7.16**). Smanjenje vrijednosti parametra N na području Dugopolja i Biskog polja uzrokuje manja dubina do podzemne vode, a time i manja debljina nezasićene zone u odnosu na druge dijelove sliva. Na ostalim krškim poljima ne dolazi do izražaja zaštitna funkcija nezasićene zone, zbog relativno male debljine kvartarnih naslaga u odnosu na duboke slojeve okršenih vapnenaca koje se nalaze ispod njih.





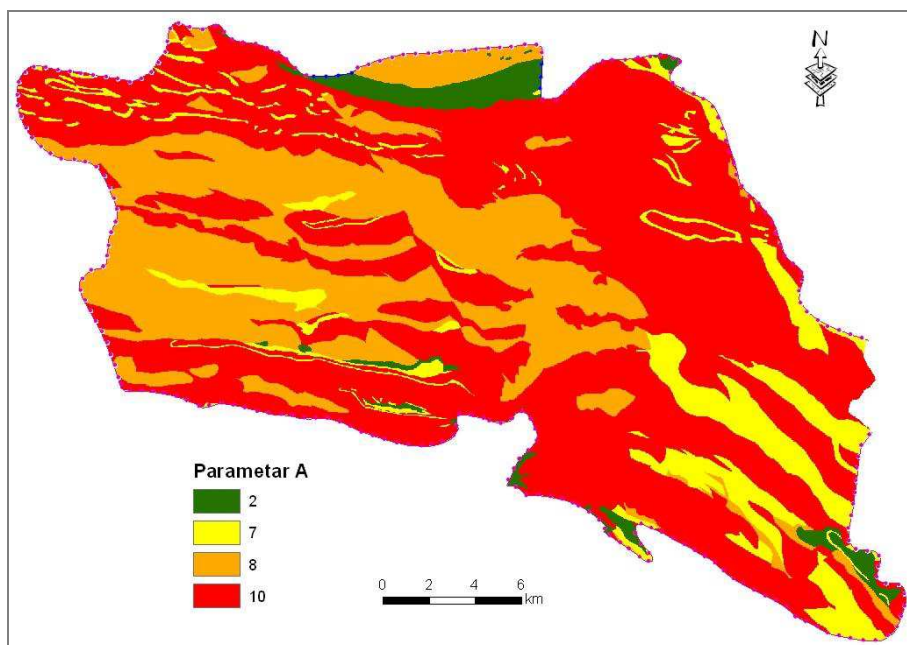
Slika 7.16. Prostorni raspored parametra N

**Parametar T** – Kapacitet tla i pokrovnih naslaga određen je na temelju obrađene hidropedološke karte. Kako je dijagram ocjenjivanja vezan isključivo uz teksturu tla, na hidropedološkoj karti su izdvojene jedinice dominantne debljine veće ili jednake 50 cm, jer se pokazalo da naslage manje debljine imaju gotovo zanemariv utjecaj na vodonosnik u obliku zadržavanja onečišćenja. Tako je jedinicama ilovače debljine  $\geq 50$  cm dodana vrijednost 4,5, a jedinicama gline kojima je debljina  $\geq 50$  cm vrijednost 1,5. Dodijeljena vrijednost parametra T na svim ostalim područjima na kojima nema tla ili je debljina zanemarivo mala, iznosi maksimalnih 10 (slika 7.17).



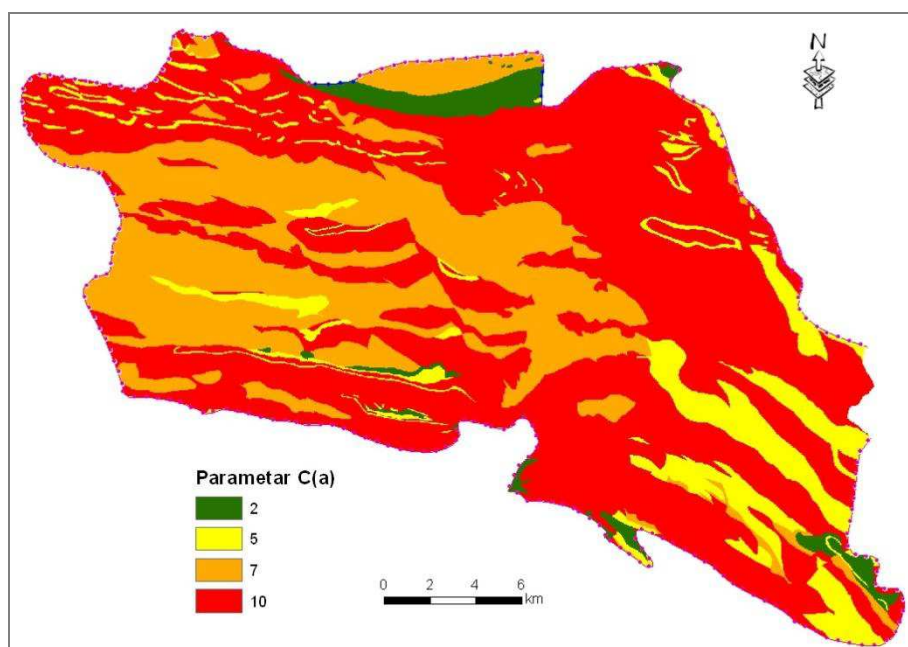
Slika 7.17. Prostorna raspodjela parametra T

**Parametar A** – Hidrogeološka obilježja vodonosnika (njegovog saturiranog dijela) ovise o hidrogeološkim značajkama stijena u kojima se isti nalaze. Za kvartarna područja, područja krških polja, određeni su faktori prema stijenama u podlozi. Propusnim stijenama pridodana je vrijednost 10, srednje propusnim 8, slabo propusnim 7, a nepropusnim 2 (slika 7.18).



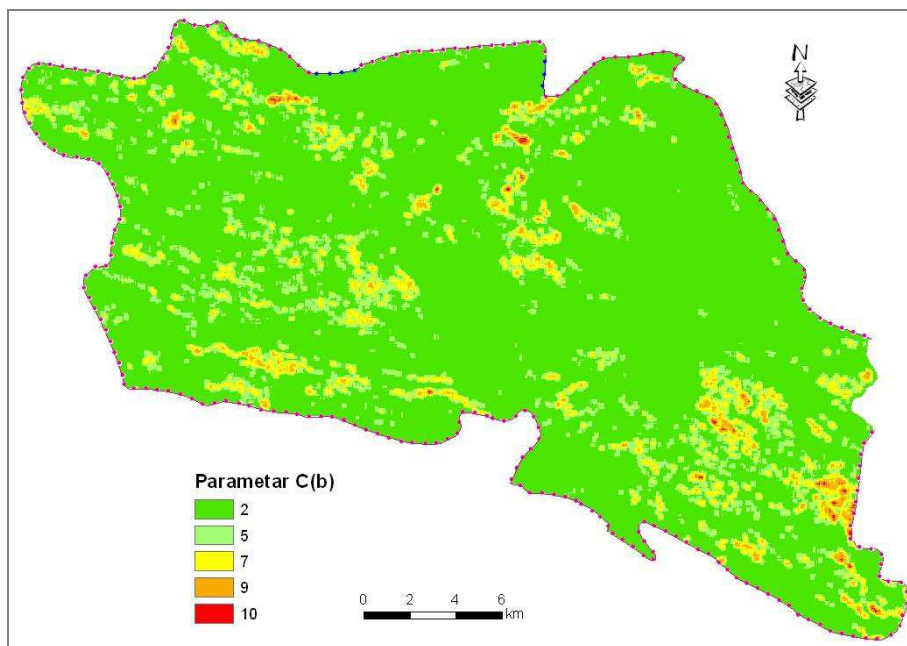
Slika 7.18. Prostorni raspored parametra A

**Parametar C** – hidraulička vodljivost vodonosnika određivana je na tri načina. Standardno prema SINTACS metodi, hidraulička vodljivost je određena prema hidrogeološkim značajkama stijena kojima su iz rejting dijagrama (slika 6.11) pridodane vrijednosti faktora C. Propusnim stijenama određena je vrijednost 10, srednje propusnim 7, slabo propusnim 5, nepropusnim stijenama 2, a kvartarnim naslagama promjenljive propusnosti vrijednost 10. Razlog tako velike procjenjene vrijednosti parametra C za kvartarne naslage je u tome da su ti slojevi površinski (dubine 2-10 m, nerijetko i manje), stoga veći utjecaj na definiciju tog parametra imaju okršene karbonatne stijene ispod njih koje su mnogo veće debljine i izgrađuju vodonosnik. Prema vrijednosti C faktora poligoni su konvertirani u C(a) "grid", čije ćelije imaju navedene vrijednosti (slika 7.19).



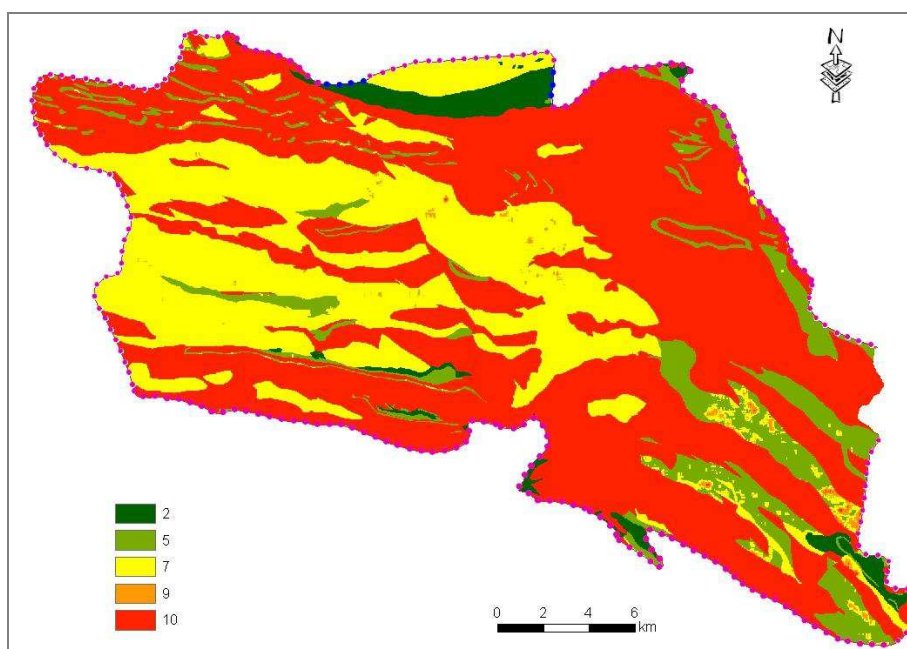
Slika 7.19. Prostorni raspored parametra C(a)

Uz standardnu metodu definiranja C faktora, koji u ovom slučaju predstavlja vrijednosti C(a), uvedena je i modifikacija s obzirom na analizu gustoće vrtača. Prostornom analizom gustoće vrtača na 250x250 m (slika 7.6) određeno je 5 klasa koje su označene vrijednostima C faktora i to: za gustoću > 10 vrtača vrijednost 10, 6-10 vrtača 9, 3-6 vrtača 7, 1-3 vrtače 5, 0 vrtača 2. Izrađen je grid C(b) s vrijednostima C faktora određenih prema gustoći vrtača (slika 7.20).



Slika 7.20. Prostorni raspored parametra C(b)

Prostornim preklapanjem slojeva C(a) i C(b) generiran je novi raster (slika 7.21) koji je za svaku ćeliju "grida" kao konačnu vrijednost C parametra uzeo veću vrijednost (ili C(a) ili C(b)). U tom slučaju uloga parametra C(b) je da dodatno poveća ranjivost područja na račun velike gustoće vrtača, a koja je u slučaju faktora C(a) dobivena samo na temelju značajki stijena.

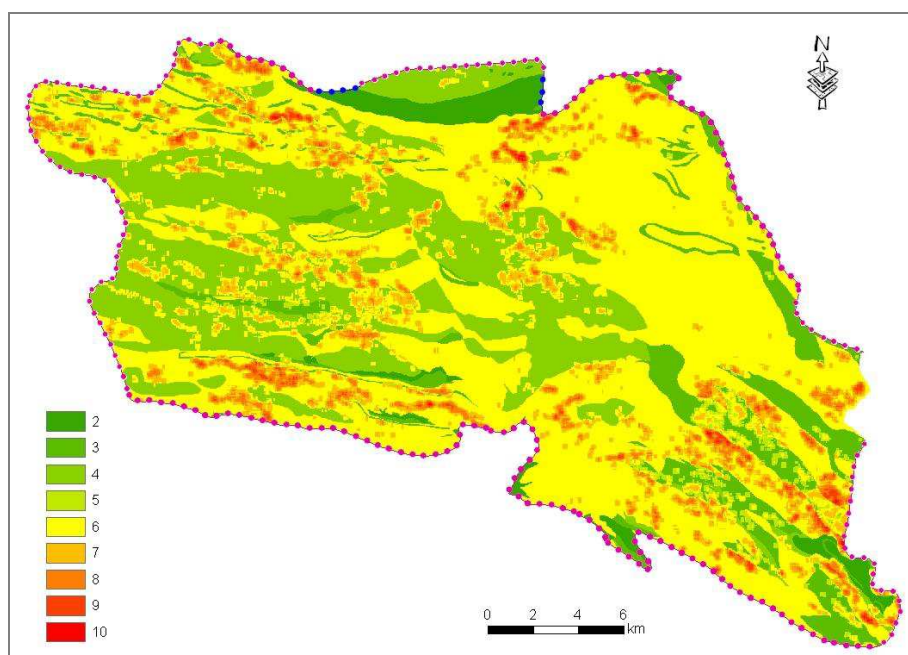


Slika 7.21. Prva kombinacija C(a) i C(b) parametra



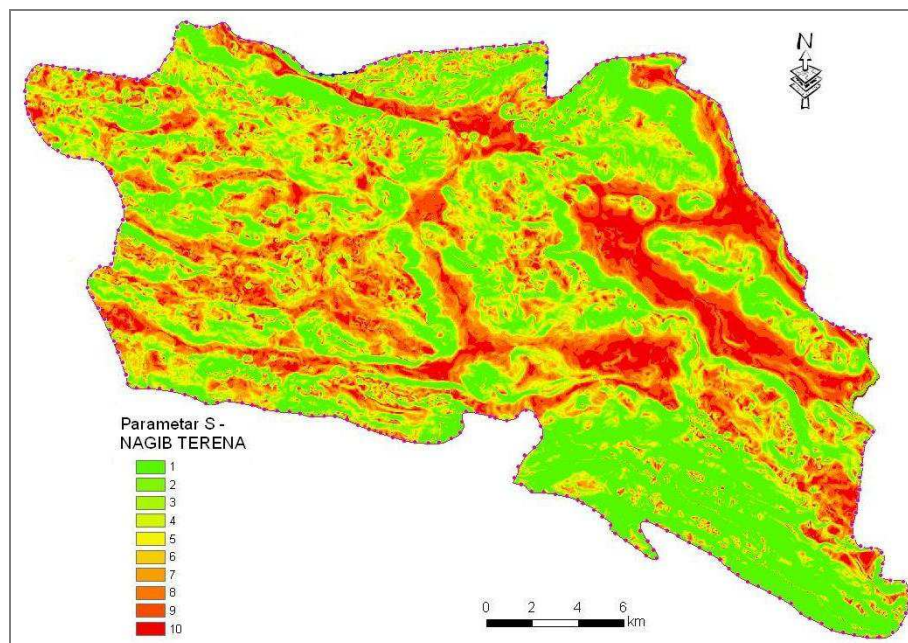
U idućem slučaju vrijednost parametra C dobivena je drugačijom kombinacijom faktora C(a) i C(b) (slika 7.22). Vrijednosti u ćelijama rastera C(a) i C(b) jednake su kao i u prethodnim slučajevima, ali je konačno, u drugoj modifikaciji SINTACS metode, C raster dobiven izračunavanjem po formuli (7.1):

$$(C(a) + C(b))/2. \quad (7.1)$$



Slika 7.22. Druga kombinacija C(a) i C(b) parametra

**Parametar S** – Nagib terena u formi "grida" i s vrijednostima ćelija prema postotku nagiba (%) izrađen je iz digitalnog modela reljefa kao što je prikazano na slici 7.3, ali su za potrebe ove analize nagibi reklasificirani u 11 klasa u rasponima: 0-2, 2-4, 4-6, 6-9, 9-12, 12-15, 15-18, 18-21, 21-25 i >25. "Grid" je konvertiran u poligone kojima je dodan S faktor, ovisan o nagibu i to vrijednosti od 1-10. Poligoni su konvertirani u "grid", čije ćelije sadrže vrijednosti S parametra. Za nagib 0-2 vrijednost je 10, za nagib od 2-4 vrijednost je 9, za nagib 4-6 vrijednost je 8, itd. (slika 7.23).



Slika 7.23. Prostorni raspored parametra S (nagib terena)

### 7.2.2. Analiza ranjivosti vodonosnika pomoću metode SINTACS

Područje sliva Jadra i Žrnovnice pripada tipičnom kršu vanjskih Dinarida. Težinski faktori koji se primjenjuju radi bolje prilagodbe parametara uvjetima krških područja, definirani su redom kako slijedi: S – 2, I – 5, N – 1, T – 3, A – 5, C – 5 i S – 5 (prema **tablici 6.1**).

Temeljem "grid-ova" SINTACS metode i težinskih faktora izrađeni su "grid-ovi" s vrijednostima indeksa prirodne ranjivosti. Indeks ranjivosti ( $I_v$  – *vulnerability index*), klasificiran u raspone, daje stupanj prirodne ranjivosti kao što je prikazano u **tablici 6.2**.

Za područje sliva Jadra i Žrnovnice napravljen je izračun stupnja ranjivosti vodonosnika prema SINTACS metodi na tri načina (*Kapelj et al., 2013*):

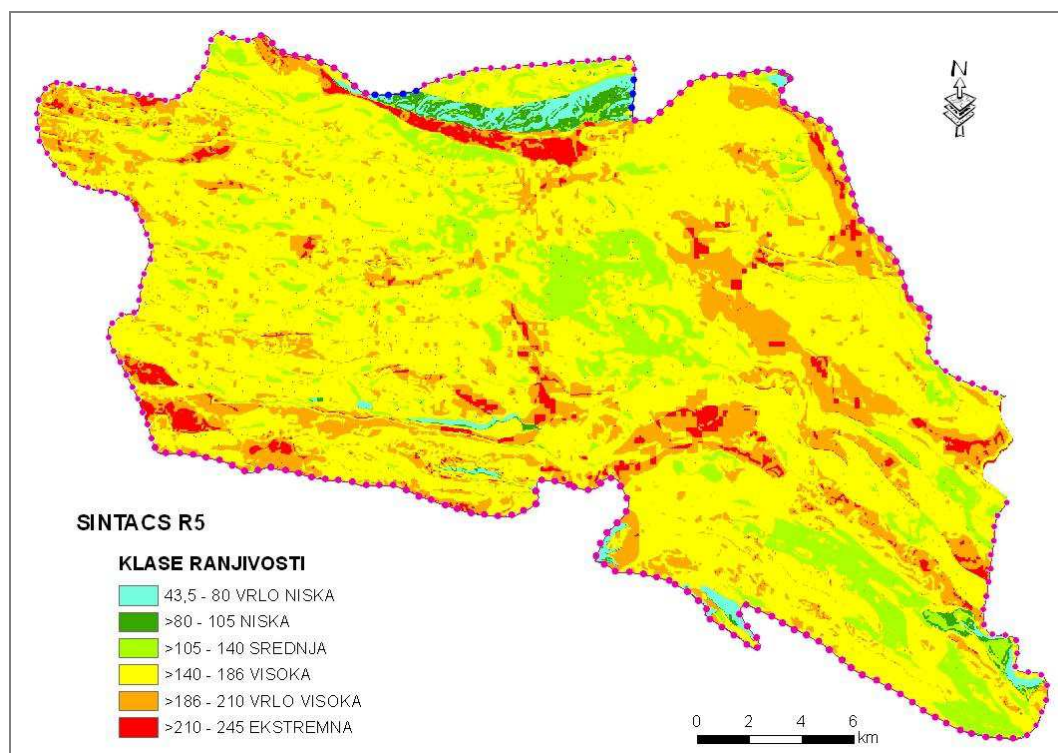
- u prvom slučaju je za parametar C uzeta standardna vrijednost očitana iz dijagrama;
- u drugom slučaju napravljen je izračun parametra C po modificiranoj metodi, uključujući utjecaj gustoće vrtača te je kao konačan faktor C uzeta veća vrijednost u kombinaciji C(a) ili C(b);
- u trećem slučaju faktor C je izračunat po formuli (7.1).

Rezultati izračuna prikazani su u obliku karata ranjivosti.

Račun indeksa ranjivosti vodonosnika prema standardnoj SINTACS metodi i težinskim faktorima za krš (formula 7.2):

$$I_v(\text{SINTACS R5}) = S*2+I*5+N*1+T*3+A*5+C*5+S*5 \quad (7.2)$$

Tako dobivena karta prikazana je na slici 7.24.



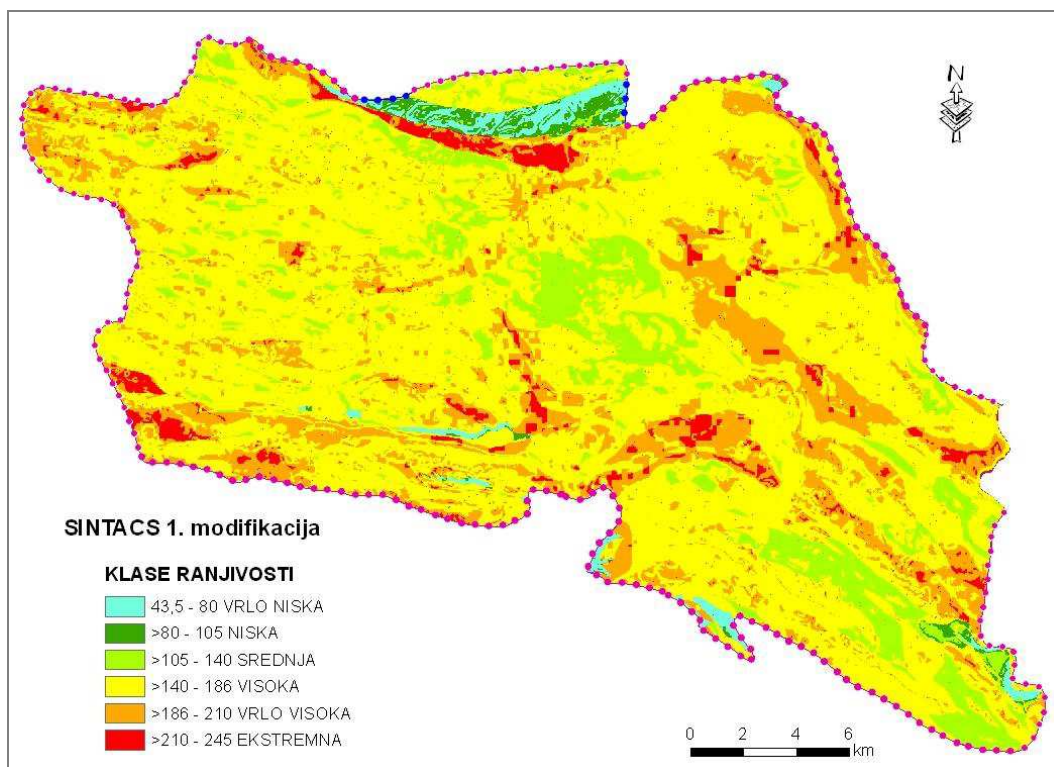
Slika 7.24. Karta prirodne ranjivosti vodonosnika prema standardnoj SINTACS metodi i težinskim faktorima za krš

Izračun indeksa ranjivosti vodonosnika prema modificiranoj SINTACS metodi (uključujući gustoću vrtača) i težinskim faktorima za krš (formula 7.3):

$$I_v(\text{SINTACS 1.modifikacija}) = S*2+I*5+N*1+T*3+A*5+(Ca \text{ ili } Cb)*5+S*5 \quad (7.3)$$

Na ovaj način dobivena karta prikazana je na slici 7.25.



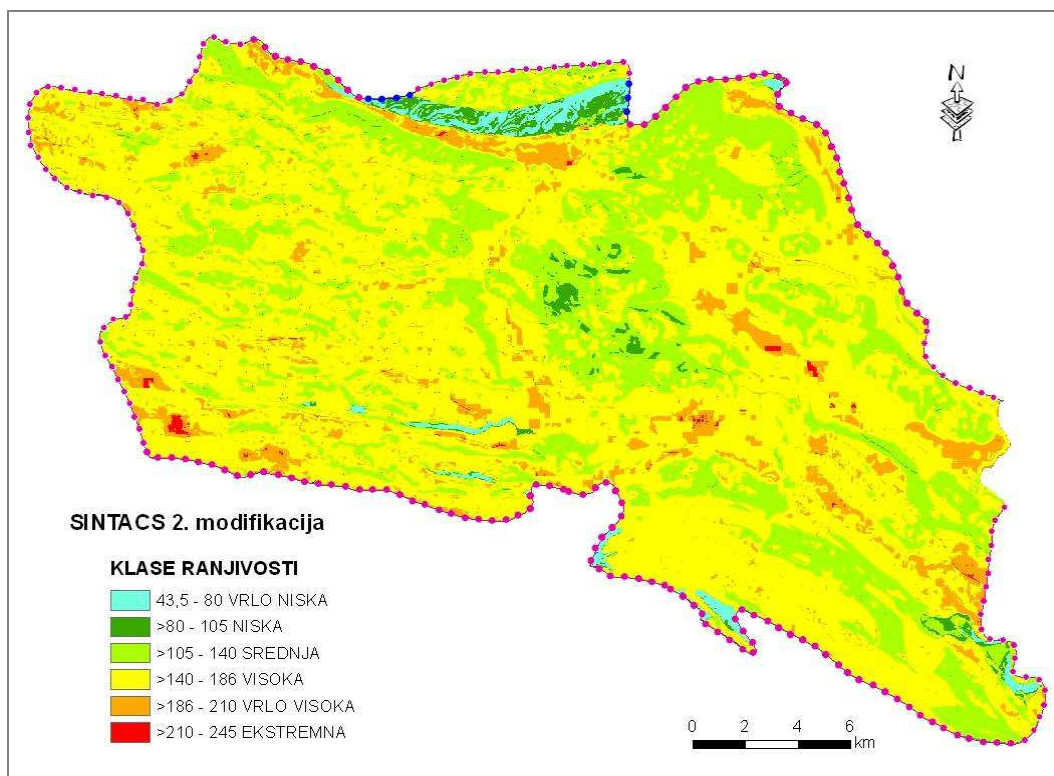


Slika 7.25. Karta prirodne ranjivosti vodonosnika prema modificiranoj SINTACS metodi (uključujući gustoću vrtača) i težinskim faktorima za krš (1. modifikacija)

Izračun indeksa ranjivosti vodonosnika prema modificiranoj SINTACS metodi (uključujući gustoću vrtača) i težinskim faktorima za krš (formula 7.4):

$$I_v(\text{SINTACS 2.modifikacija}) = S*2+I*5+N*1+T*3+A*5+(Ca+Cb)/2*5+S*5 \quad (7.4)$$

Na ovaj način dobivena karta prikazana je na slici 7.26.



Slika 7.26. Karta prirodne ranjivosti vodonosnika prema modificiranoj SINTACS metodi (uključujući gustoću vrtača) i težinskim faktorima za krš (2. modifikacija)

Za svaku kartu prirodne ranjivosti izračunato je koji dio površine sliva zauzima svaka pojedina klasa, te koliki je to udio od ukupne površine sliva. Rezultati su prikazani u **tablici 7.5.**

Tablica 7.5. Usporedba površina klasa ranjivosti prema standardnoj metodi i modificiranim metodama koje uzimaju u obzir gustoću vrtača.

KLASA	SINTACS R5		SINTACS - 1. MODIFIKACIJA C=Ca ili Cb		SINTACS -2. MODIFIKACIJA C=(Ca+Cb)/2	
	POVRŠINA (km <sup>2</sup> )	UDIO POVRŠINE SLIVA (%)	POVRŠINA (km <sup>2</sup> )	UDIO POVRŠINE SLIVA (%)	POVRŠINA (km <sup>2</sup> )	UDIO POVRŠINE SLIVA (%)
vrlo niska	9,26	1,64	8,79	1,55	9,42	1,67
niska	6,78	1,20	6,49	1,15	9,81	1,73
srednja	60,86	10,76	58,66	10,37	148,91	26,33
visoka	371,81	65,74	372,55	65,88	354,46	62,67
vrlo visoka	98,61	17,44	100,66	17,80	41,74	7,38
ekstremna	18,25	3,23	18,38	3,25	1,26	0,22

Iz ovih je podataka očigledno da gustoća vrtača ima utjecaj na procjenu prirodne ranjivosti podzemne vode u krškom području. Poznato je da područja s većom gustoćom vrtača ukazuju na područja višeg stupnja okršenosti. Takva područja su potencijalne zone brze infiltracije vode u podzemlje, a zbog toga ukazuju na veću ranjivost vodonosnika. Upravo iz tog razloga uveden je novi faktor  $C(b)$  koji modificira parametar  $C$  po standardnoj SINTACS metodi (ovdje prikazan kao  $C(a)$ ). U prvoj modifikaciji povećana je vrijednost parametra  $C$  u onim dijelovima koji po vrsti stijene nemaju veliku vrijednost parametra  $C(a)$ , očitano iz "rejting dijagrama", a imaju veliku gustoću vrtača. Međutim, iako određene razlike u površinama postoje, rezultati prikazani u **tablici 7.5.** ukazuju na veliko preklapanje ta dva uvjeta. Odnosno, veliki dio sliva ionako ima maksimalnu vrijednost parametra  $C$  jer je građen od dobro propusnih okršenih karbonatnih stijena, tako da manji doprinos velike gustoće vrtača stvara zanemarivu razliku u površinama klasa ranjivosti između standardne SINTACS R5 metode i SINTACS metode s prvom modifikacijom.

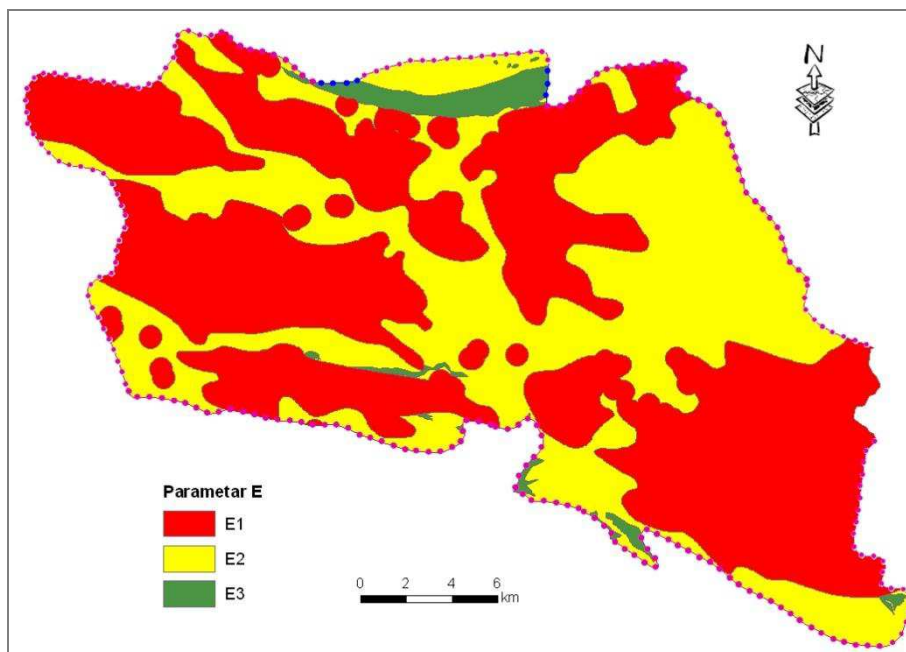
U drugoj modifikaciji faktori  $C(a)$  i  $C(b)$  kombinirani su na drugi način. Upravo zbog toga što je veliki dio sliva izgrađen od dobro propusnih vapnenaca i ima maksimalnu vrijednost  $C$  parametra 10, uvođenjem faktora gustoće vrtača takve velike površine su razlikovane ovisno o klasi gustoće vrtača. Na taj način, maksimalnu vrijednost parametra  $C$  imaju samo oni dijelovi sliva na kojima se poklopila maksimalna vrijednost parametra  $C(a)$  i  $C(b)$ , dok je kod svih ostalih područja vrijednost parametra  $C$  aritmetička sredina parametara  $C(a)$  i  $C(b)$ . Iz tog se razloga u drugoj modifikaciji SINTACS metode znatno smanjila površina klasa ekstremne i vrlo visoke ranjivosti, a povećala površina srednje i niske ranjivosti (**tablica 7.5**). Zbog toga, izdvajanje područja s većom gustoćom vrtača, kao vrlo indikativnog pokazatelja okršenosti, odnosno propusnosti stijena, ima vrlo važnu ulogu u procjeni ranjivosti.

Ovom procjenom ranjivosti metoda SINTACS prilagođena je uvjetima dinarskog krša koji je tipičan po iznimnoj okršenosti, te bogatstvu i raznolikosti reljefnih oblika (posebno vrača). Iz tog se razloga uvode modifikacije u metodu SINTACS, tako da gustoća vrtača postane njen sastavni dio i dodatni pokazatelj iznimno ranjivih dijelova sliva. Usporedbom dobivenih rezultata najpovoljniji pristup procjene ranjivosti podzemne vode u kršu bio bi SINTACS s drugom modifikacijom. On u krškim slivovima vrlo velikih dimenzija jasno ukazuje na najranjivija područja koja je potrebno odgovarajuće štiti, dok s druge strane ostavlja mogućnost povećavanja površine iskoristivog prostora u kršu za neku prikladnu namjenu u područjima sa srednjim i manjim indeksom ranjivosti.

### 7.3. Ocjena prirodne ranjivosti vodonosnika EPIK metodom

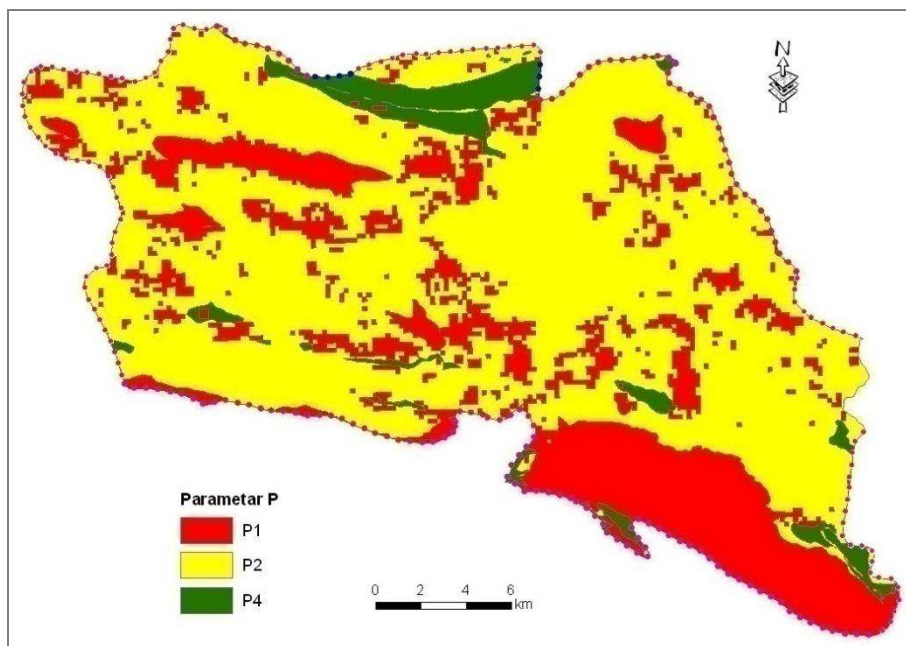
Za procjenu ranjivosti metodom EPIK bilo je potrebno sve pripremljene podatke kombinirati s ciljem određivanja parametara E, P, I i K na način da se, što je moguće bolje, navedeni parametri prilagode zahtjevima metode opisanim u poglavlju 6.3. Svaka klasa parametara ima svoju dodijeljenu vrijednost, na temelju koje se formiraju rasteri koji zajedno s težinskim faktorima služe za konačni izračun zaštitnog faktora, a time i stupnja ranjivosti. Viša klasa pojedinog faktora ima veću vrijednost zaštite, odnosno slabije doprinosi ranjivosti vodonosnika (**tablica 6.3**).

**Parametar E**, koji opisuje svojstva epikrške zone, definiran je za sve tri predložene klase. Klasa E<sub>1</sub>, koja odgovara epikrškoj zoni dobro povezanoj s krškom mrežom i vodonosnikom, definirana je na temelju geomorfoloških obilježja izdvojenih na slivu, a to su u prvom redu špilje, jame, ponori (izdvojene su zone udaljenosti od 500 metara), te vrtače (područje veće koncentracije vrtača, odnosno jače okršenosti (**slika 7.5**)). Vrijednost parametra E u klasi E1 iznosi 1. Za klasu E<sub>3</sub>, koja predstavlja slabo razvijenu epikršku zonu, izdvojena su područja nepropusnih stijena (naslage fliša, klastita i metamorfnih stijena) na kojima nisu uočena krška morfološka obilježja, na tom području vrijednost parametra E iznosi 4. Ostatak sliva svrstan je u klasu E<sub>2</sub>, budući da su i na tom području prisutni znakovi razvoja epikrške zone i razlomljenosti (ali u manjoj mjeri) stoga je i vrijednost parametra E manja, odnosno jednaka 3. Prikaz parametra E vidljiv je na **slici 7.27**.



Slika 7.27. Prostorna raspodjela parametra E

**Parametar P** određuje zaštitnu funkciju pokrovnih naslaga. U ovom slučaju se to odnosi na tlo, te na nekrške naslage znatno slabije propusnosti. Jedini parametar tla, koji se razmatra kod definiranja vrijednosti parametra P, je debljina koja je dobivena iz hidropedološke karte. U skladu s dijagramom (slika 6.15), sliv je podijeljen u tri klase (slika 7.28). Klasu P<sub>1</sub> čine stijene bez pokrovnih naslaga ili područja na kojima je tlo od 0 – 20 cm debljine nad propusnim karbonatnim stijenama. Iznos parametra P za klasu P<sub>1</sub> je 1. Klasa P<sub>2</sub> određena je za područje na kojima je debljina tla od 20 – 100 cm iznad propusnih karbonatnih stijena i tu je vrijednost parametra P jednaka 2. Klase P<sub>3</sub> nema na području sliva, a P<sub>4</sub> obuhvaća područja na kojima je debljina tla veća od 200 cm ili se radi o debelim naslagama nepropusnih stijena. Tu P iznosi 4.

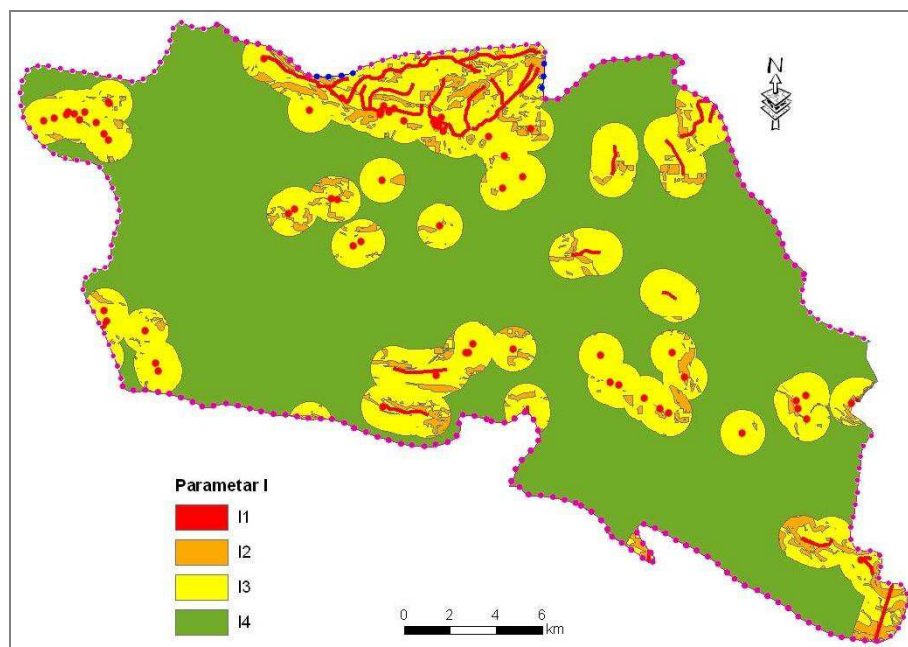


Slika 7.28. Prostorna raspodjela parametra P

**Parametar I** odnosi se na opisivanje uvjeta infiltracije na području sliva. Pri tome se ne opisuje količina vode koja dopijeva u podzemlje, već se samo izdvajaju dijelovi s različitim načinima prihranjivanja vodonosnika. Tako klasa  $I_1$  predstavlja zonu koncentriranog prihranjivanja putem različitih geomorfoloških objekata na površini sliva ili stalnih i povremenih površinskih tokova koji nakon kratkog toka nestaju u podzemlju. Zbog toga su kao klasa  $I_1$  definirani ponori, jame i špilje sa zonom utjecaja od 10 m te povremeni površinski tokovi sa zonom utjecaja 10 m od svake obale. Klase  $I_2$  (u kojoj površinsko otjecanje može imati važnu ulogu) i  $I_3$  definirane su unutar zone utjecaja od 1000 m oko objekata karakteriziranih pod klasom  $I_1$ , pošto nema pravih rijeka ponornica kojima bi se određivalo slivno područje. Za potrebe razgraničenja zona  $I_2$  i  $I_3$  napravljena je karta nagiba terena s klasama između 10 i 25% nagiba terena, prema preporukama primjene metode (slika 6.16). Također je razmatran pokrov terena, ali ovdje je uvedena modifikacija, budući da preporuke razvrstavaju samo obrađene površine, te livade i pašnjake, a ne razmatraju šumski pokrov. Kako je već utvrđeno da zbog karakteristične raspodjele površinskih naslaga i cirkulacije vode nema velike razlike u utjecaju na uvjete infiltracije između pojedinih vrsta pokrova, karta pokrova (slika 7.10) je podijeljena u dvije jednostavne klase: "ima vegetacije" ili "nema vegetacije". Prostornim preklapanjem tako dobivenih podloga razdvojene su klase  $I_2$  za područje nagiba većeg od 10% bez vegetacije i većeg nagiba od 25% s vegetacijom, na kojima je značajno površinsko otjecanje, te klasa  $I_3$  na području nagiba manjeg od 10% bez



vegetacija i manjeg od 25% s vegetacijom, unutar koje se skuplja voda s viših dijelova i infiltrira u podzemlje. Ostatak sliva svrstan je u klasu I<sub>4</sub> (gdje se vodonosnik prihranjuje difuzno) (slika 7.29). Svaka klasa ima vrijednost parametra I jednaku oznaci, redom 1, 2, 3 i 4.



Slika 7.29. Prostorna raspodjela parametra I

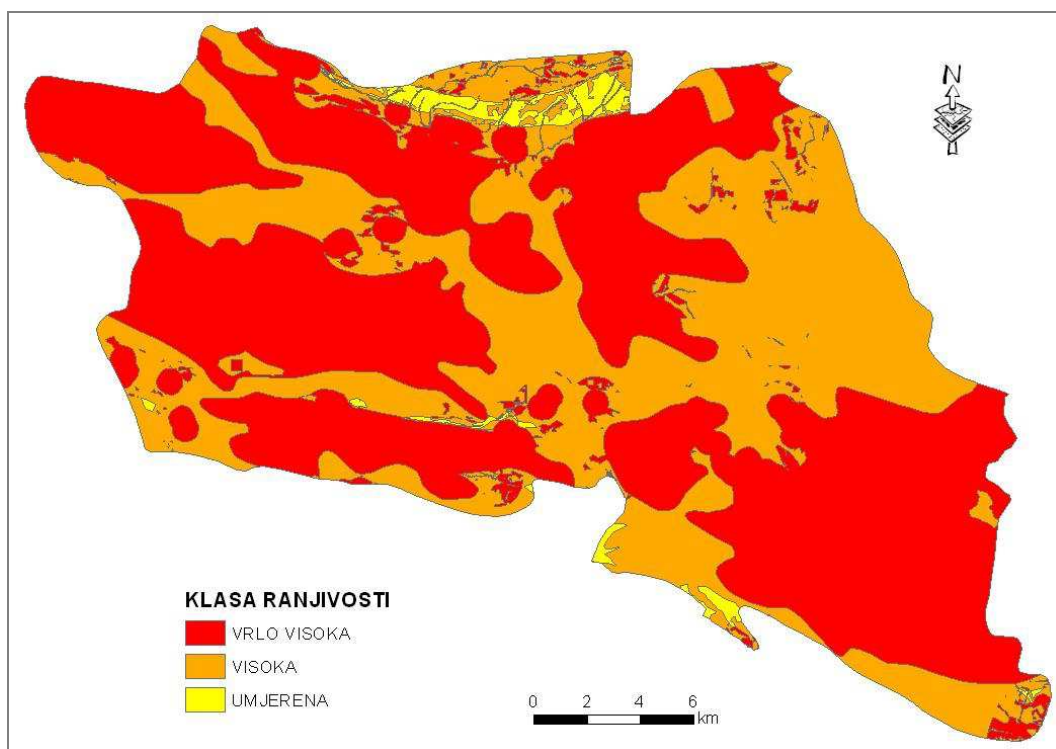
**Parametar K** predstavlja stupanj okršnosti sustava, odnosno razvoj kanala u okršnim stijenama unutar kojih se odvija turbulentan tok vode. Kako je ovaj parametar vrlo teško zonirati, prema preporuci metode definira se jedinstvena vrijednost za područje cijelog sliva. Kako se promatrani sliv nalazi u dinarskom tipu krša, koji je poznat po velikom stupnju okršnosti, bogatstvu morfoloških formi koje to i dokazuju, ovdje je cijeli sliv svrstan u klasu K<sub>1</sub>, što predstavlja dobro razvijenu okršenu mrežu kanala. U prilog tome ide i analiza rezultata provedenih trasiranja koji potvrđuju brzine podzemnih tokova karakterističnih za klasu K<sub>1</sub>. Vrijednost parametra K iznosi 1.

Tako pripremljeni podaci konvertirani su u rastere u kojima ćelije poprimaju vrijednosti pojedinih klasa. Nakon toga je "map algebrom" dodijeljen svakom rasteru težinski faktor i izračunata je ukupna suma utjecaja prema formuli 7.5:

$$F_p = 3 \cdot E + 1 \cdot P + 3 \cdot I + 2 \cdot K \quad (7.5)$$

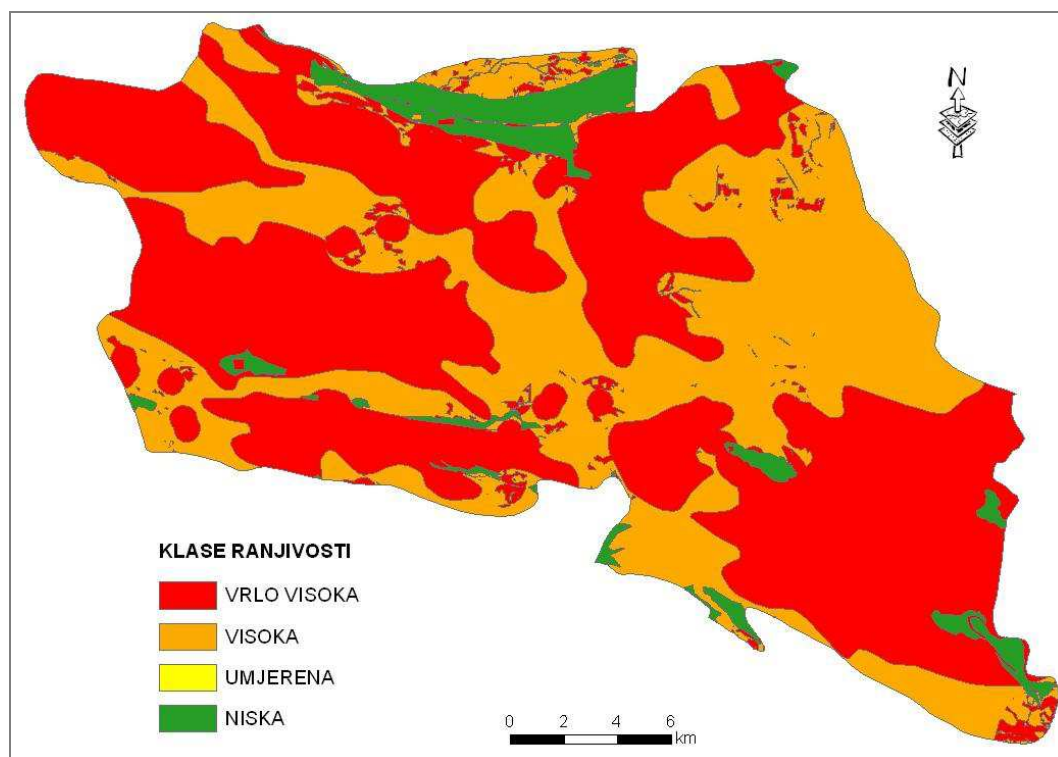


Konačni rezultat je vrijednost zaštitnog faktora  $F_p$  prema kojemu su određene klase ranjivosti u skladu s **tablicom 6.5**. Rezultati provedene analize prikazani su na **slici 7.30**.



Slika 7.30. Karta prirodne ranjivosti vodonosnika prema EPIK metodi

Karta ranjivosti (**slika 7.30**) pokazuje da se vrlo veliki dio sliva nalazi u najvišoj klasi ranjivosti, dok klase niske ranjivosti na karti uopće nema. Ukoliko se prema **tablici 6.5** svim područjima, na kojima je prisutna klasa  $P_4$  (tlo debljine veće od 200 cm ili nepropusne naslage), dodijeli niska klasa ranjivosti vodonosnika, tada su rezultati drugačiji (**slika 7.31**), što ukazuje na vrlo veliku zaštitnu ulogu koja je dodijeljena debljim naslagama tla. U **tablici 7.6** prikazane su površine pojedinih klasa ranjivosti.



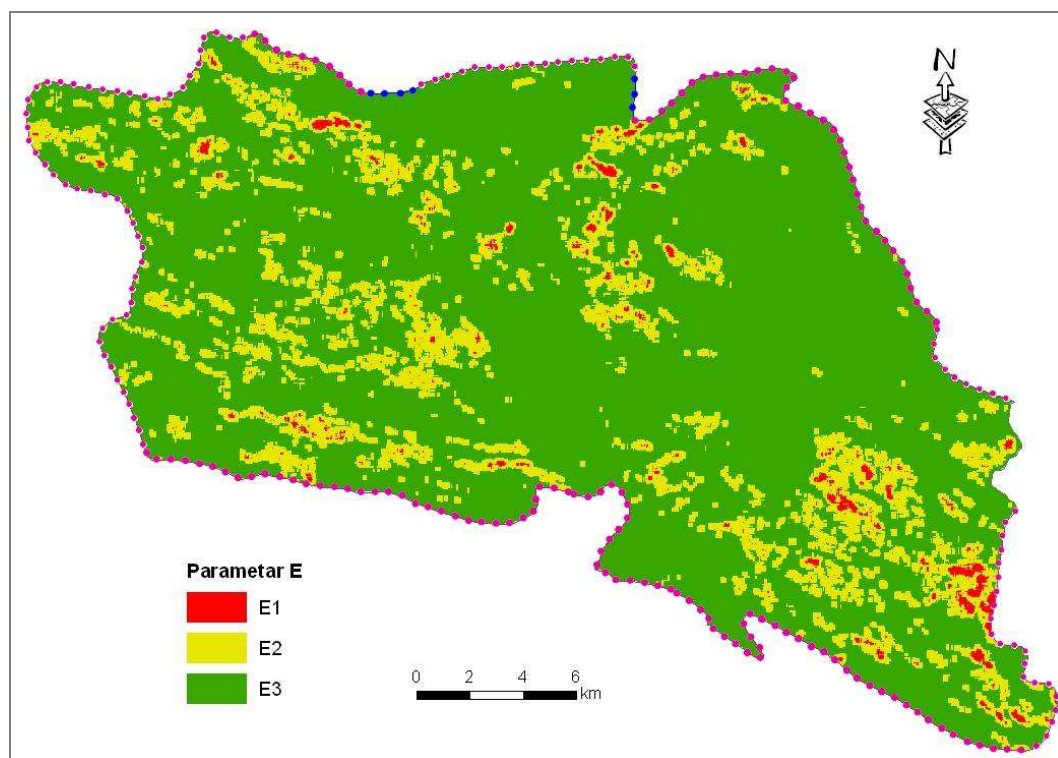
Slika 7.31. Karta prirodne ranjivosti vodonosnika prema EPIK metodi, uključujući utjecaj klase P<sub>4</sub>

Tablica 7.6. Usporedba vrijednosti površina pojedine klase ranjivosti (slike 7.30 i 7.31)

RANJIVOST	EPIK		EPIK uz utjecaj P <sub>4</sub>	
	POVRŠINA (km <sup>2</sup> )	UDIO POVRŠINE SLIVA (%)	POVRŠINA (km <sup>2</sup> )	UDIO POVRŠINE SLIVA (%)
<b>VRLO VISOKA</b>	331,86	58,55	323,72	57,15
<b>VISOKA</b>	224,46	39,61	214,28	37,83
<b>UMJERENA</b>	10,44	1,84	0,19	0,02
<b>NISKA</b>	0	0	28,35	5

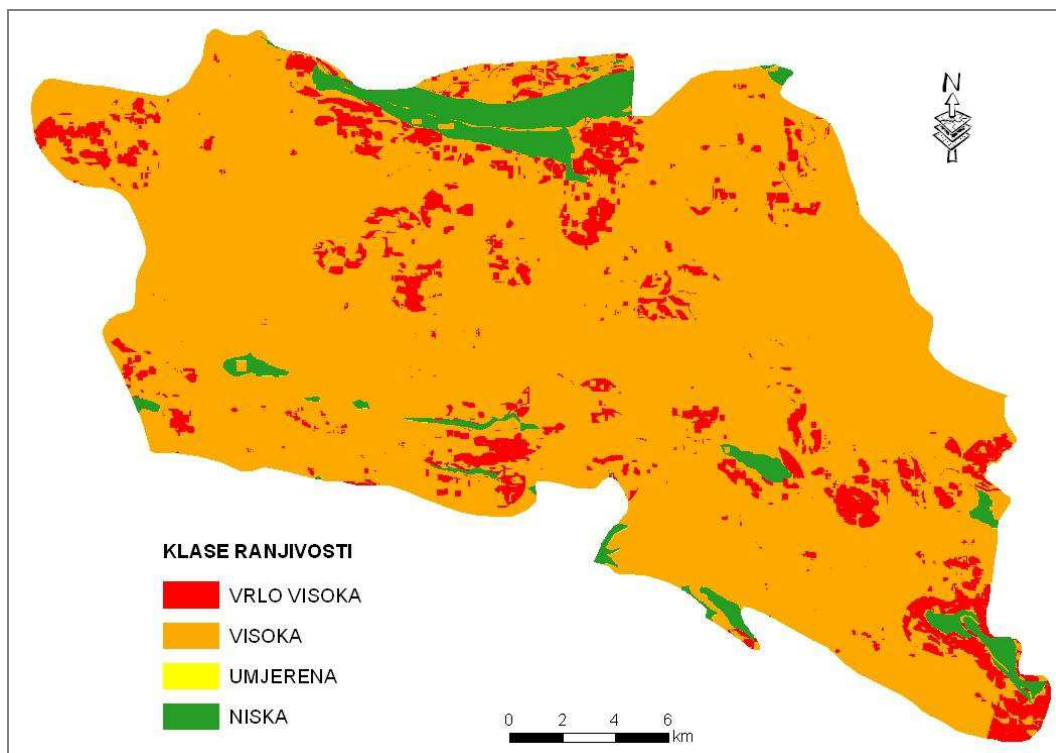
Iz **tablice 7.6** vidljivo je da se procjenom ranjivosti po metodi EPIK gotovo cijeli sliv nalazi u klasama vrlo visoke i visoke ranjivosti vodonosnika. Najveći dio vrlo visoke klase ranjivosti obuhvaća upravo onu površinu sliva na kojoj je definirana najrazvijenija epikrška zona (E<sub>1</sub>), a ovdje je označena kao područje izražene okršenosti. Koliki je utjecaj tog parametra može se vidjeti na jednostavan način. Ako se isti pokazatelj (vrtače) za definiranje okršenosti sliva obradi i prikaže na različite načine, može se dobiti različita raspodjela parametra E. U ovom slučaju uzet je raster gustoće vrtača na području 250x250 m. Reklasificiran je u tri klase i to

tako da klasa E<sub>1</sub> odgovara području na kojem je gustoća vrtača veća od 6, klasa E<sub>2</sub> području od 3 – 6 vrtača, a E<sub>3</sub> području od 0 – 3 vrtače na 250x250 m (slika 7.32).



Slika 7.32. Prostorni raspored parametra E ovisno o gustoći vrtača

Iz **slike 7.32** vidljivo je da je približno sličan dio sliva pod utjecajem vrtača, samo što je u ovom slučaju prostorni raspored parametra E mnogo preciznije definiran, što omogućava i precizniju raspodjelu klasa ranjivosti. Ukoliko se ovaj parametar uvrsti u formulu za izračun zaštitnog faktora EPIK metode, dobiva se nova karta ranjivosti (**slika 7.33**) na kojoj se značajno smanjuje površina sliva s vrlo visokom klasom ranjivosti (**tablica 7.7**). U ovom slučaju najranjiviji dijelovi ostaju područja s najvećom gustoćom vrtača, ponori, površinski tokovi, te dijelovi na kojima se skuplja voda s viših dijelova terena i infiltrira u podzemlje, što je i realno za očekivati. Nisku klasu opet imaju područja nepropusnih stijena (poništen je čak i utjecaj površinskih tokova koji su prisutni na tom području, a po parametrima E i I bi spadali u najvišu klasu ranjivosti) i debljine tla veće od 200 cm, dok umjerenu klasu ima rubni dio polja zanemarive površine. Ostatak sliva ostaje u visokoj klasi, budući da je cijelo područje okarakterizirano kao klasa K<sub>1</sub>, sustav visokog stupnja okršenosti. Preciznijim zoniranjem tog parametra omogućilo bi se dodatno razdvajanje najranjivijih i manje ranjivih područja.



Slika 7.33. Karta prirodne ranjivosti vodonosnika EPIK metodom uz uvažavanje gustoće vrtača

Tablica 7.7 Izračun površina klasa ranjivosti (slika 7.33)

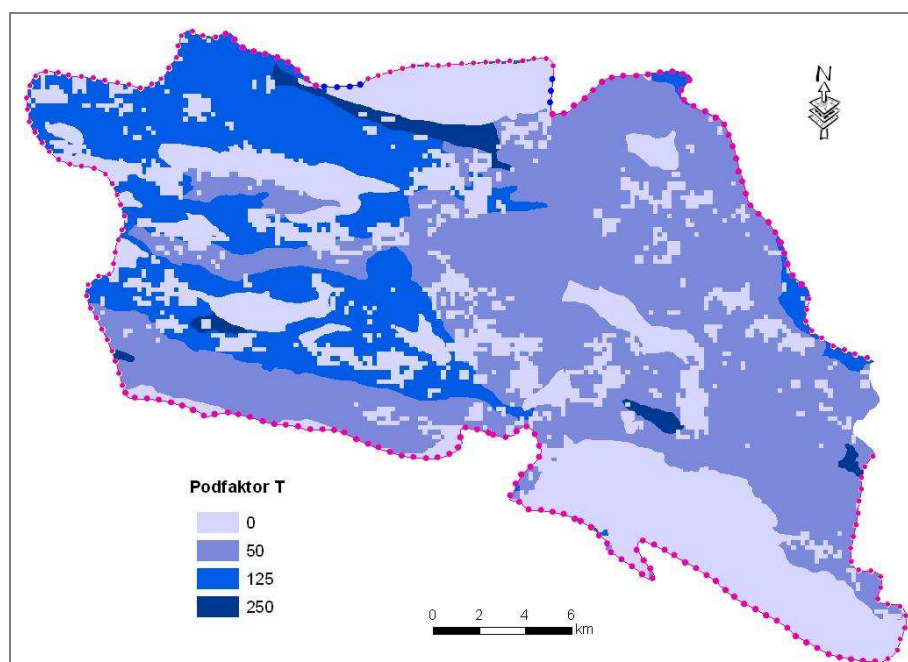
RANJIVOST	POVRŠINA (km <sup>2</sup> )	UDIO POVRŠINE SLIVA (%)
<b>VRLO VISOKA</b>	54,13	9,55
<b>VISOKA</b>	484,26	85,43
<b>UMJERENA</b>	0,1	0,02
<b>NISKA</b>	28,35	5,00

#### 7.4. Ocjena prirodne ranjivosti vodonosnika PI metodom

Za ocjenu prirodne ranjivosti PI metodom potrebno je odrediti dva glavna parametra: P i I. Iako na prvi dojam, zbog broja parametara koji se koriste u analizi, PI metoda djeluje kao najjednostavnija metoda, to nije tako, budući da se parametri određuju na temelju vrlo detaljnih i složenih smjernica koje uključuju definiranje mnoštva podfaktora.

Postupak izračuna faktora P, koji opisuje zaštitnu ulogu svih slojeva između površine terena i razine podzemne vode, provodi se tako da se za svaki sloj (tlo, podtlo i čvrste stijene) definira zasebni podfaktor, koji se zatim uvrštava u zadanu formulu (formula 6.5), a vrijednosti su im dodijeljene prema dijagramima u shemi prikazanoj na **slici 6.18**.

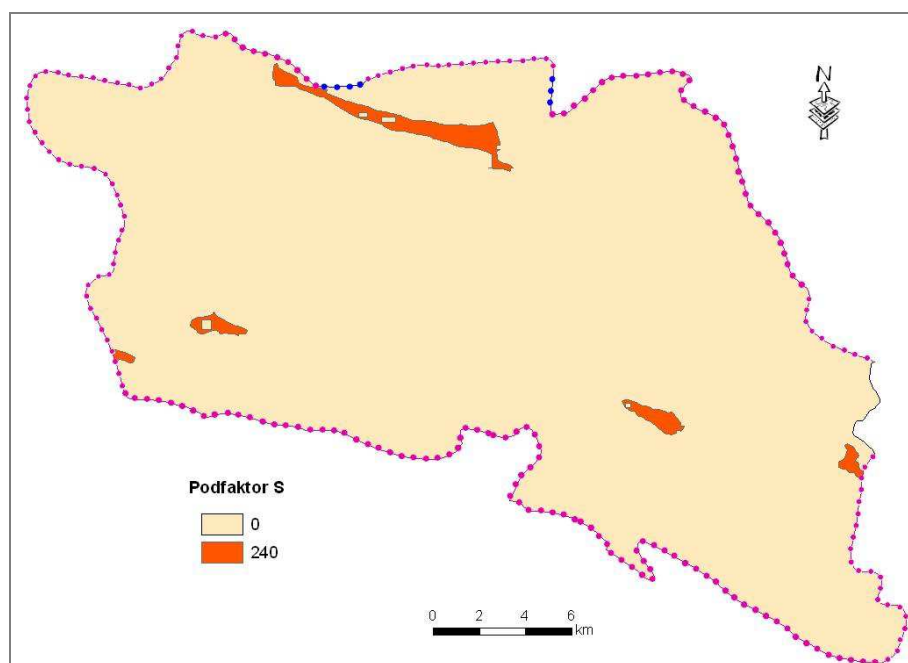
Podfaktor T opisuje ulogu koju tlo ima u zaštiti vodonosnika od onečišćenja. Pri tome se za ovu metodu vrijednost T dodjeljuje na osnovu kapaciteta aktivne vode u tlu dostupne biljkama ( $eFC$  – eng. "effective field capacity"), a u obzir uzima samo tlo do dubine od 100 cm. Ova značajka je u ovisnosti o sastavu i teksturi tla, a konstantna je za određenu vrstu tla, no u literaturi je dan dosta širok raspon vrijednosti za svaku vrstu tla. Na temelju podataka iz Hidropedološke karte RH, posebno onih koji su prikazani u pet hidropedoloških profila na području sliva, usvojene su sljedeće vrijednosti: 150 mm/m za glinovita tla i 200 mm/m za ilovače. Te su vrijednosti dodijeljene poligonima klasa tla (**slika 7.9**) te su množene s dubinom tla. Prema rezultatima umnoška i u skladu s predloženom tablicom dodijeljene su vrijednosti podfaktora T (**slika 7.34**) i to tako da je golim stijenama i tankim pokrovima tla (dubinama do 25 cm) dodijeljena vrijednost 0, dubinama do 40 cm ilovače i do 50 cm gline dodijeljena je vrijednost 50, tla debljine od 50 cm i 60 cm dobila su vrijednost 125, a do 1 m debljine 250.



Slika 7.34. Prostorni raspored podfaktora T



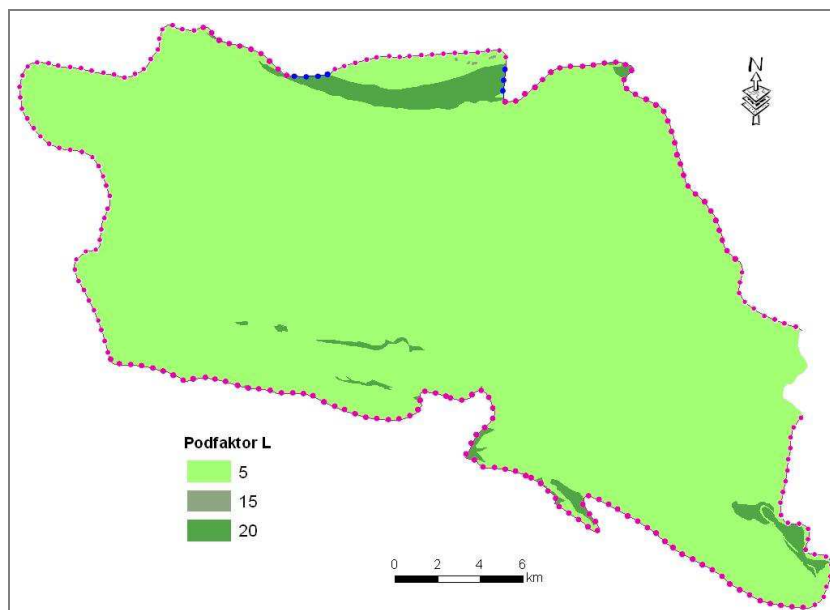
Podfaktor S izračunava se za područja na kojima su prisutne nevezane podpovršinske naslage značajnije debljine. U ovom slučaju je to tlo dublje od 1 m, a koje se na slivu nalazi na području krških polja: Mučko polje, Dugopolje i manji dijelovi oko Biskog polja, te na zapadnoj strani sliva. Upravo na tim lokacijama smješteni su hidropedološki profili i dostupni su detaljniji podaci o svojstvima tala. Kako se na svim lokacijama radi o automorfnim tlima ilovaste strukture, svi izdvojeni poligoni su okarakterizirani jednako kao blago zaglinjena ilovača ili zaglinjena prašinsta ilovača i dodijeljena im je vrijednost 240 (slika 7.35). Procjenjena dubina tih naslaga na području Muća i Dugopolja je oko 10 m, a na manjim poligonima do 5 m.



Slika 7.35. Prostorni raspored podfaktora S

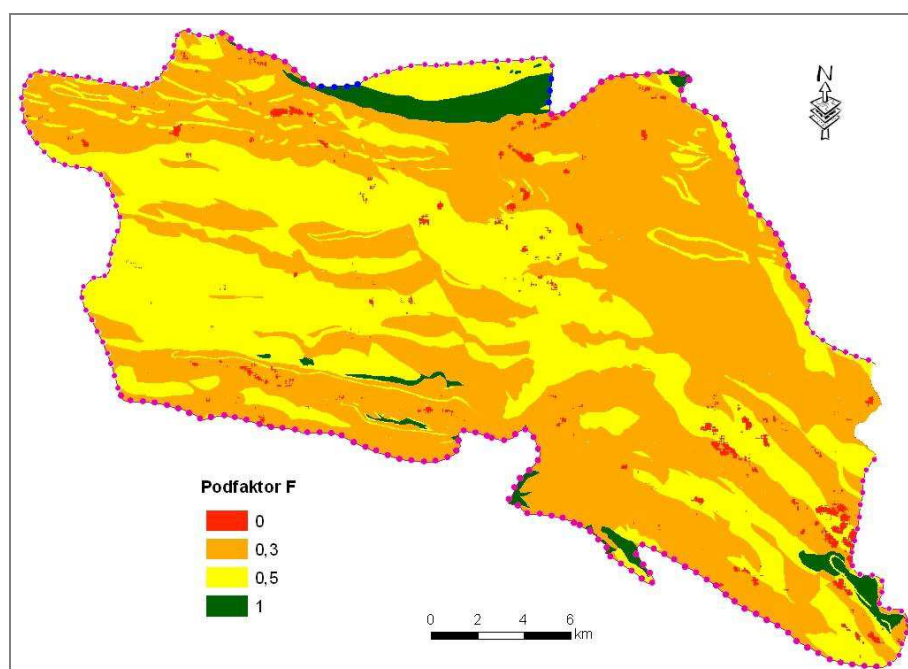
Podfaktor B, koji opisuje ulogu čvrstih stijena, procjenjuje se kombinacijom dva dodatna podfaktora, a to su podfaktor L, koji označava litologiju pojedinih jedinica stijena, i podfaktora F koji opisuje razlomljenost i okršenost stijenske mase. Na području sliva iz geološke i hidrogeološke karte izdvojene su tri skupine stijena: vapnenci i dolomiti kojima je dodijeljena vrijednost faktora L u iznosu 5, magmatske stijene na kojima je  $L=15$ , te naslage fliša koje imaju vrijednost 20 (slika 7.36).





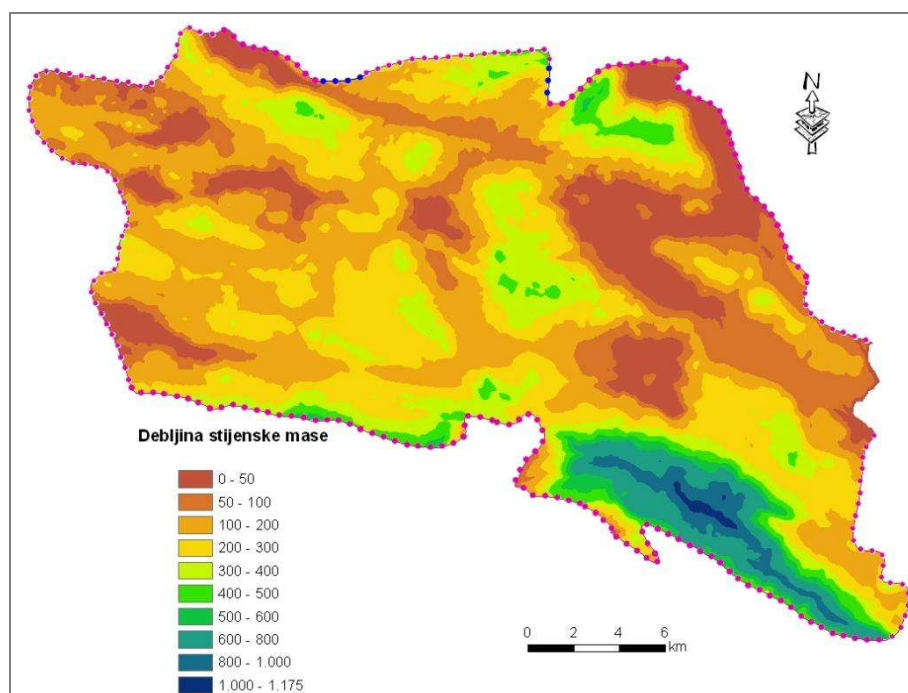
Slika 7.36. Prostorni raspored podfaktora L

Podfaktor F razvrstan je prema okršenosti, tako da je nepropusnim naslagama fliša dodijeljena vrijednost 1, slabo i srednje propusnim stijenama kod kojih je slabija okršenost data je vrijednost 0,5, dobro propusni okršeni vapnenci dobili su vrijednost 0,3, a vrijednost  $F=0$  pripala je dijelovima sliva na kojima postoji dobar pokazatelj jako razvijene epikrške zone, odnosno dijelovima s najvećom gustoćom vrtača (slika 7.37). Kombinacijom podfaktora L i F dobiven je podfaktor B koji ulazi u formulu za izračun zaštitne funkcije.

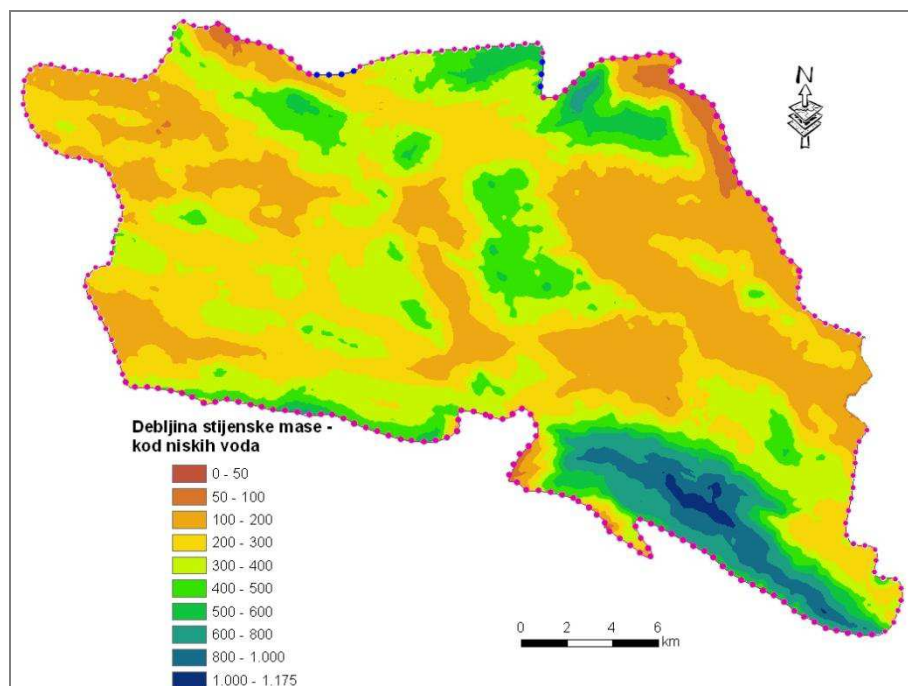


Slika 7.37. Prostorni raspored podfaktora F

Za određivanje zaštitne uloge pokrovnih naslaga, još je jedan podatak jako važno dobro procijeniti, a to je debljina nezasićene zone, koja se može dobiti pomoću karte dubina do podzemne vode. Kako bi utvrdili koliko procijenjena debljina nezasićene zone utječe na ranjivost vodonosnika, u ovom je slučaju uzeta zasebno minimalna i maksimalna debljina nezasićene zone (ovisno o maksimalnim i minimalnim razinama podzemnih voda). Kad se od rastera (prikazanih na slikama 7.12 i 7.13) oduzme debljina naslaga karakterizirane podfaktorom S, rezultirajući rasteri (slika 7.38 i slika 7.39) predstavljaju debljinu stijenske mase kod različitih razina podzemnih voda koja se u nastavku množi s vrijednostima podfaktora B u formuli za izračun zaštitne funkcije pokrovnih naslaga.

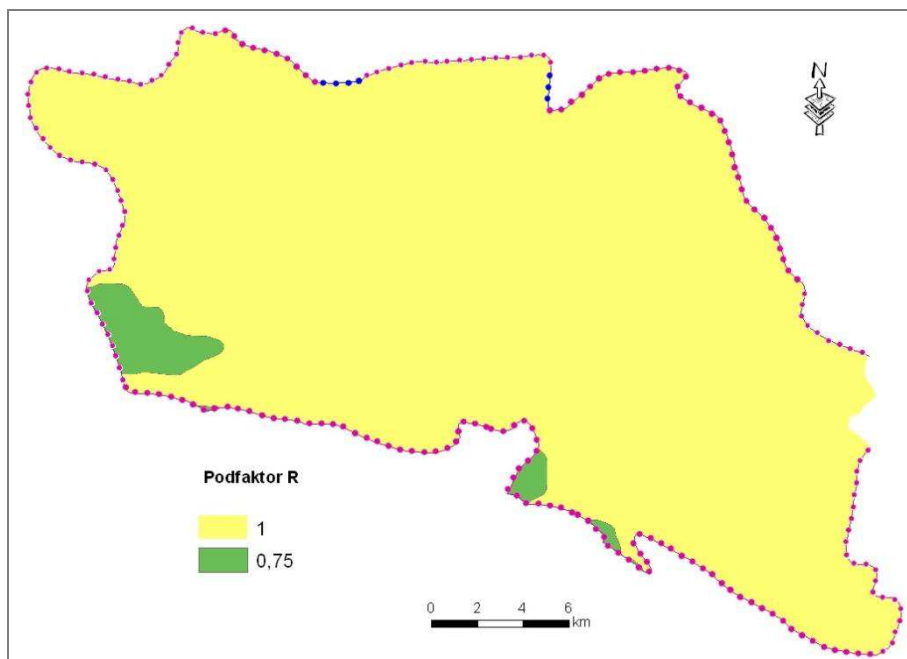


Slika 7.38. Debljina nezasićene zone na slivu kod maksimalne razine podzemne vode



Slika 7.39. Debljina nezasićene zone na slivu kod minimalnih razina podzemne vode

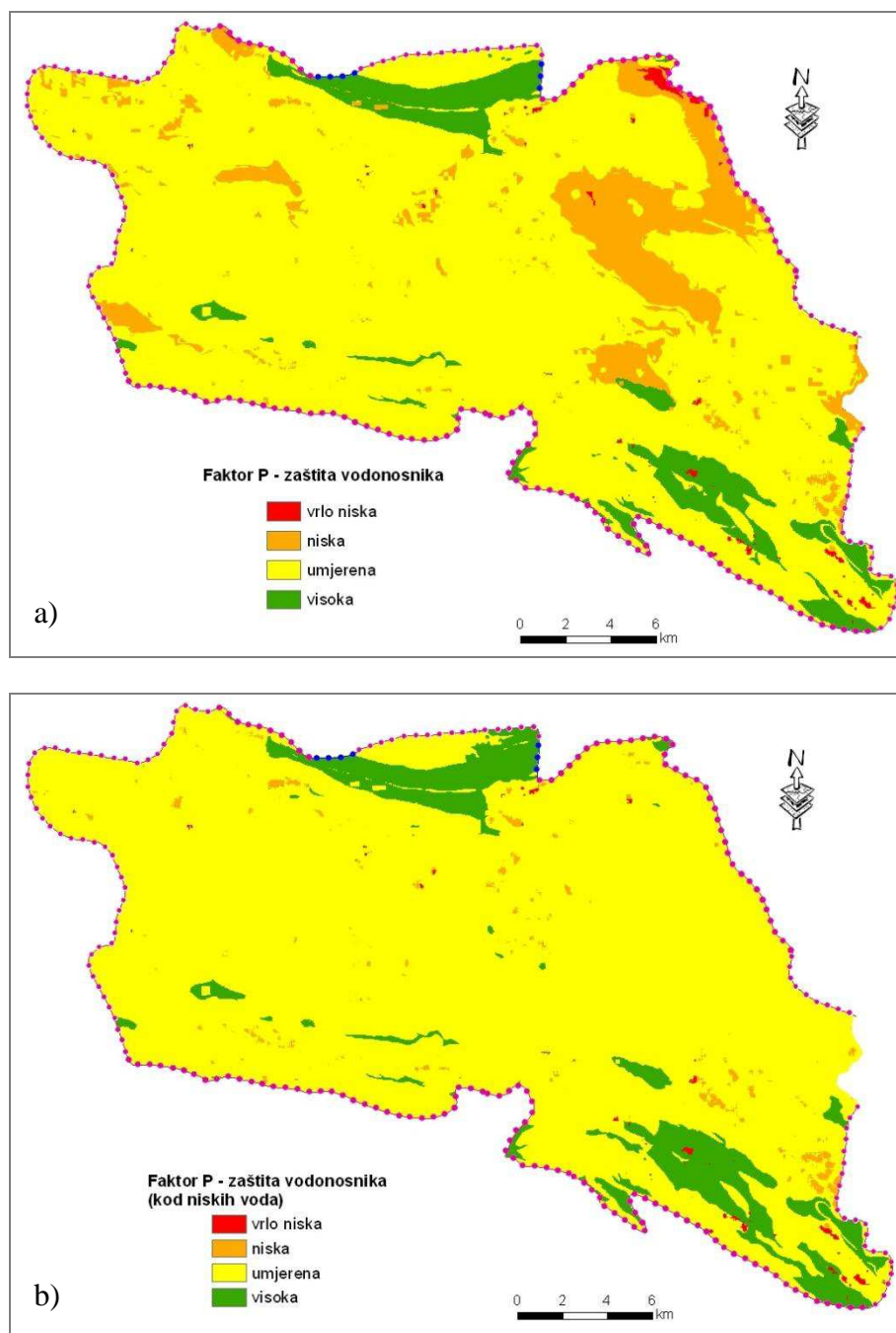
Posljednja komponenta izračuna faktora P je podfaktor R koji predstavlja količinu prihranjivanja vodonosnika. Taj se podatak procjenjuje izravno iz podataka o oborinama i evapotranspiraciji. Karta oborina uzeta je prema pripremljenim podacima (slika 7.11), a podaci o evapotranspiraciji uzeti su prema *Zaninović et al. (2008)*, iako je mjerena na samo jednoj postaji i njena vrijednost je ekstrapolirana na cijeli sliv. Tako je većina sliva obuhvatila najveću klasu podfaktora R (slika 7.40), onu iznad 400 mm/godišnje, budući da samo mali dio sliva ima godišnje oborine manje od 1200 mm, a godišnja evapotranspiracija iznosi gotovo 800 mm (798 mm mjereno na meteorološkoj postaji Split-Marjan).



Slika 7.40. Prostorni raspored podfaktora R

Arteški pritisak nije prisutan na području sliva, te podfaktor A nije uzet u izračun.

Svi prikazani podfaktori konvertirani su u rastere s vrijednostima ćelija koje odgovaraju vrijednostima pojedinog podfaktora, te su "map algebrom" kombinirani u formulu predloženu metodom. U izračunu je kombiniran posebno raster s minimalnom i maksimalnom debljinom nezasićene zone. Dobiveni rasteri predstavljaju vrijednosti  $P_{TS}$  koji se prema **tablici 6.6** reklasificira u klase (**slika 7.41 a i b**).



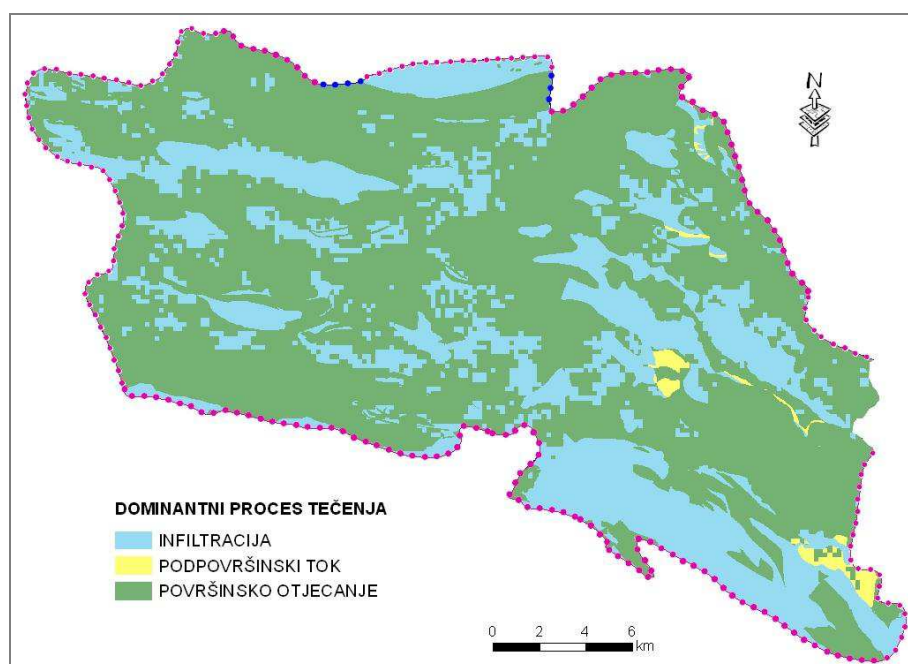
Slike 7.41. a) i b) P karta – zaštitna funkcija pokrovnih naslaga

P karte, kao najranjivije dijelove sliva (vrlo niske i niske zaštitne uloge pokrovnih naslaga), izdvajaju područja intenzivne okršnosti (velike gustoće vrtača), a kao najzaštićenija područja okarakterizirani su dijelovi prekriveni nepropusnim stijenama, te područja krških polja na kojima zaštitu pružaju deblje naslage tla i kvartarnih naslaga. Ostatak sliva, građen od karbonatnih stijena veće ili manje propusnosti (svi su u jednoj klasi litologije), svrstan je u umjerenu klasu zaštite. Zanimljiv je i utjecaj procijenjene dubine do podzemne vode (debljine



nezasićene zone). Na području gdje površinske naslage ne pružaju neku značajniju zaštitu (tanak sloj tla i nepostojanje podpovršinskih naslaga) visoke razine podzemnih voda mogu dodatno povećati ranjivost vodonosnika. Ipak, na području s većim debljinama nezasićene zone ni oscilacije razine podzemnih voda u iznosu od gotovo 100 m ne smanjuju zaštitnu ulogu pokrovnih naslaga.

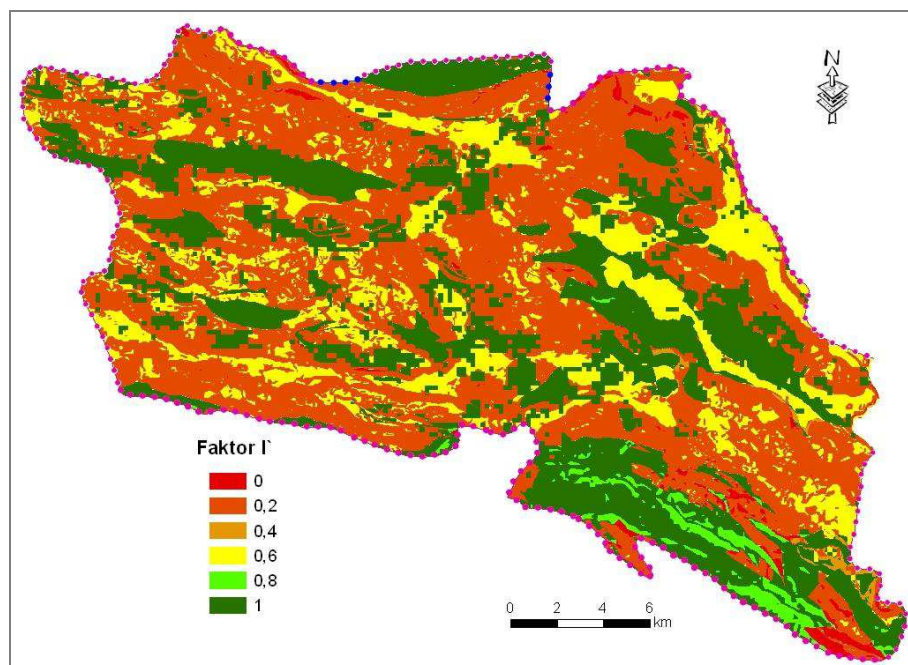
U daljnjem tekstu opisan je postupak procjene faktora I koji prikazuje u kojoj mjeri koncentriranjem tokova voda (i onečišćivalo) može zaobići pokrovne naslage i njihovu zaštitnu funkciju. Prema preporukama metode taj se faktor određuje u tri koraka kao što je prikazano na **slici 6.19**. Najprije se odredi dominantni tip tečenja, prema koeficijentu propusnosti i debljini pokrovnih slojeva. Za tu potrebu preklapljeni su tematski slojevi s hidrogeološkim jedinicama na slivu, te pripremljena hidropedološka karta s podacima o propusnosti i debljini tla. Takvim preklapanjem izdvojeni su dijelovi sliva na kojima je dominantni proces infiltracije (područja bez tla ili s vrlo tankim slojem tla na dobro propusnim vapnencima), te na kojima postoje uvjeti za formiranje površinskih tokova (područja s vrlo tankim slojem tla iznad slabopropusnih stijena ili slojevi tla svih debljina, ali slabije propusnosti). Tek na jednom malom dijelu sliva na kojemu su naslage tla između 30 i 100 cm, a ispod njih su slabo propusne stijene, može doći do formiranja podpovršinskog otjecanja (**slika 7.42**).



Slika 7.42. Procjena dominantnog procesa tečenja na slivu

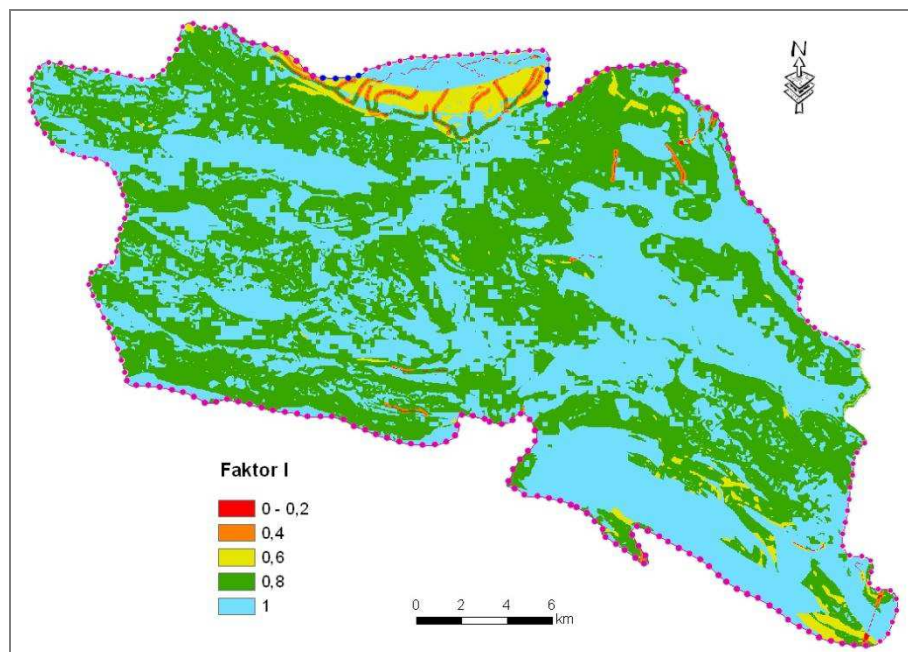


Nakon toga, preklapanjem karte dominantnog procesa tečenja s kartom nagiba terena dobivena je karta prostornog rasporeda  $\Gamma$  faktora. Za potrebe ovog preklapanja, karta nagiba terena reklasificirana je u tri klase: područja s nagibom manjim od 3,5%, srednja klasa s nagibom između 3,5 – 27%, te dio sliva s nagibom terena većim od 27%. Prema preporukama metode, karta pokrova bi trebala biti reklasificirana u dvije klase (pokrov šuma i područje polja/livada/pašnjaka), no zbog već spomenutih značajki šumskog pokrova, koje nisu tipične za intenzivnu infiltraciju, smatra se da nema osnove povećanja zaštite na račun vegetacijskog pokrova. Stoga je za cijeli sliv kod procjene vrijednosti  $\Gamma$  faktora uzet nepovoljniji slučaj, a to je slučaj polja/livada/pašnjaka (slika 7.43).



Slika 7.43. Prostorni raspored faktora  $\Gamma$

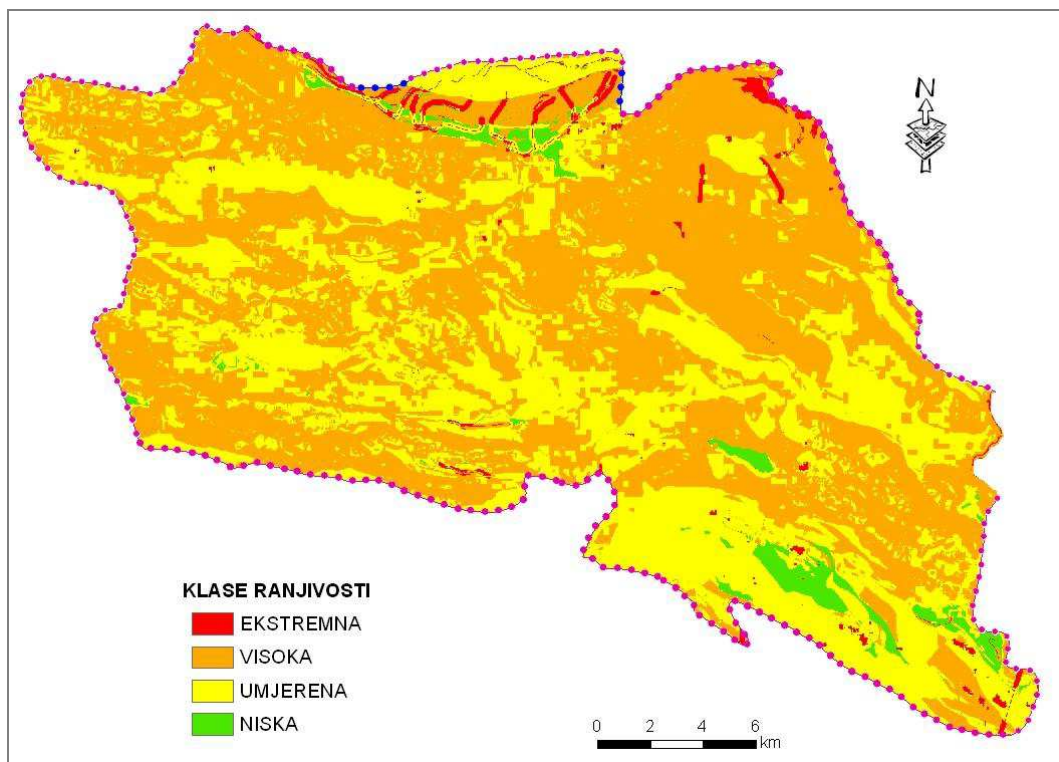
Za izračun konačne vrijednosti faktora I, koji predstavlja ukupan stupanj smanjenja zaštitne funkcije pokrovnih naslaga, potrebno je područje sliva rasporediti u zone različite ugroženosti i prema njima korigirati vrijednosti faktora  $\Gamma$ , kao što je to predloženo u tablici na slici 6.19, treći korak. Za ovaj sliv određene su četiri zone: a) zona utjecaja 10 m oko ponora i rijeka ponornica; b) zona utjecaja 100 m oko rijeka ponornica; c) sliv rijeka ponornica; i d) ostatak sliva. Konačni raspored I faktora (ujedno i I karta ranjivosti) prikazana je na slici 7.44.



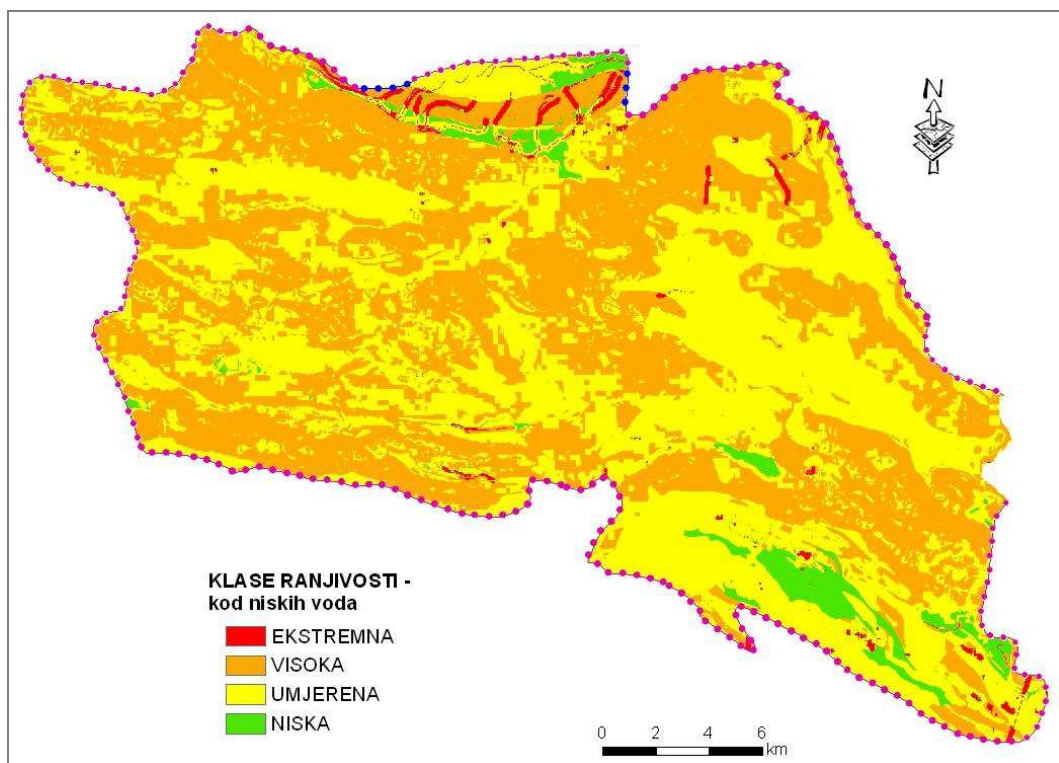
Slika 7.44. I karta – stupanj zaobilaženja pokrovnih naslaga

Iz **slike 7.44** vidljivo je da su najranjiviji dijelovi sliva područja s velikim nagibom terena na kojima se formira površinsko otjecanje, posebno ako se još nalaze u blizini ponora i ponornih zona. Kao najmanje ranjivi dijelovi sliva (s obzirom na I faktor), izdvojena su područja na kojima je dominantni proces tečenja infiltracija (područja bez tla ili s vrlo tankim slojem tla na dobro propusnim vapnencima).

Kombinacijom faktora P i faktora I izračunata je vrijednost  $\pi$  faktora ( $\pi=P \cdot I$ ) i dobivena je karta ranjivosti vodonosnika PI prema uputama metode na **slici 6.20**. Zasebno je izrađena karta ranjivosti vodonosnika za visoke (**slika 7.45**) i niske (**slika 7.46**) razine podzemnih voda (različite su i P karte za pojedini slučaj), a u **tablici 7.8** prikazan je odnos površina pojedinih klasa ranjivosti za dva procijenjena slučaja.



Slika 7.45. Karta ranjivosti dobivena PI metodom za visoke razine podzemnih voda



Slika 7.46. Karta ranjivosti dobivena PI metodom za niske razine podzemnih voda

Tablica 7.8. Odnos površina klasa ranjivosti vodonosnika

KLASA RANJIVOSTI	KOD VISOKIH VODA		KOD NISKIH VODA	
	POVRŠINA (km <sup>2</sup> )	UDIO SLIVA (%)	POVRŠINA (km <sup>2</sup> )	UDIO SLIVA (%)
EKSTREMNA	8,03	1,42	6,68	1,18
VISOKA	323,35	57,07	275,68	48,66
UMJERENA	222,11	39,20	266,66	47,07
NISKA	13,10	2,31	17,53	3,09

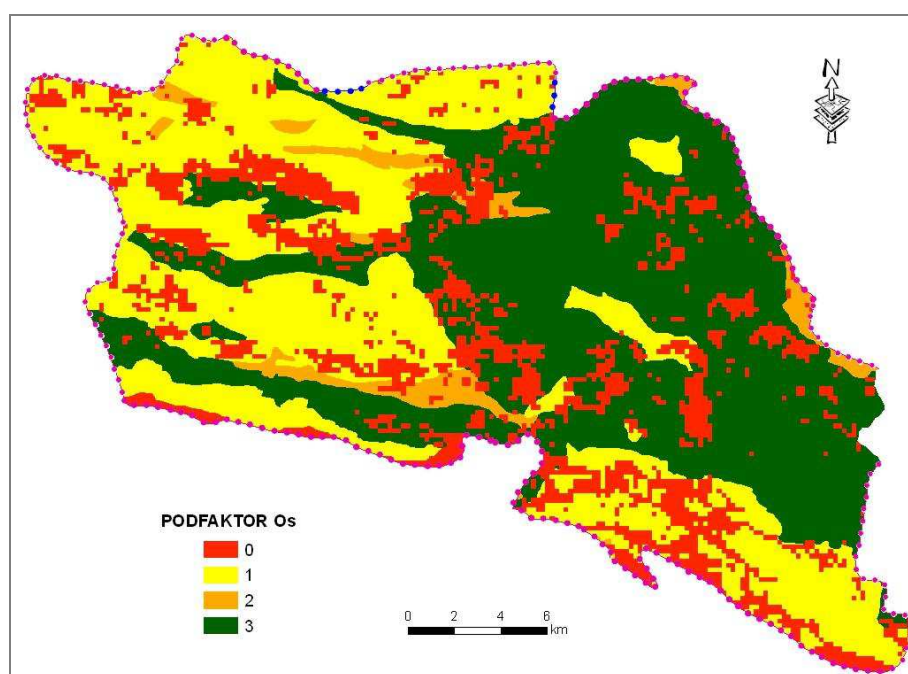
Iz dobivenih karata vidljivo je da su područja s ekstremnom klasom ranjivosti upravo dijelovi na kojima se formiraju povremeni površinski tokovi, te ponorne zone u kojima isti završavaju zaobilazeći pri tome zaštitnu ulogu pokrovnih naslaga (što je bilo i za očekivati jer na tim područjima I faktor ima vrijednost nula). Tom je području pridružen i izrazito okršeni dio, koji je na P karti prikazan u klasi vrlo niske zaštite vodonosnika. U klasi niske ranjivosti izdvojena su područja sa značajnom zaštitnom ulogom podpovršinskih naslaga (krška polja), te lokalno izdvojene nepropusne stijene kao i planinski dijelovi sliva na kojima je procijenjena vrlo velika dubina do podzemne vode. Kod minimalnih debljina nezasićene zone, više od polovice ukupne površine sliva nalazi se u klasi visoke ranjivosti zbog karbonatne građe sliva, koja je lokalno ublažena prisustvom tla veće ili manje debljine i propusnosti, što mijenja uvjete infiltracije i površinskog tečenja. Situacija je malo povoljnija u slučaju niskih razina podzemnih voda kad veća debljina nezasićene zone pruža veću zaštitu vodonosniku i time smanjuje ranjivost. No, mora se uzeti u obzir da je parametar "dubina do podzemne vode" na području krša dosta neprecizan podatak, budući da je procjena napravljena na temelju malog broja stvarno mjerenih podataka, a i uvjeti u podzemlju su jako promjenjivi, stoga se to "smanjenje" ranjivosti mora shvatiti uvjetno.

## 7.5. Ocjena prirodne ranjivosti vodonosnika COP metodom

COP metoda za procjenu ranjivosti je najmlađa od primjenjenih metoda u ovom radu. Nastala je u sklopu projekta COST 620 i u potpunosti je prilagođena smjernicama Europskog pristupa za procjenu ranjivosti vodonosnika. Metodologija, koja je detaljno opisana u poglavlju 6.7. primjenjena je na području sliva Jadra i Žrnovnice i prikazana je u nastavku.

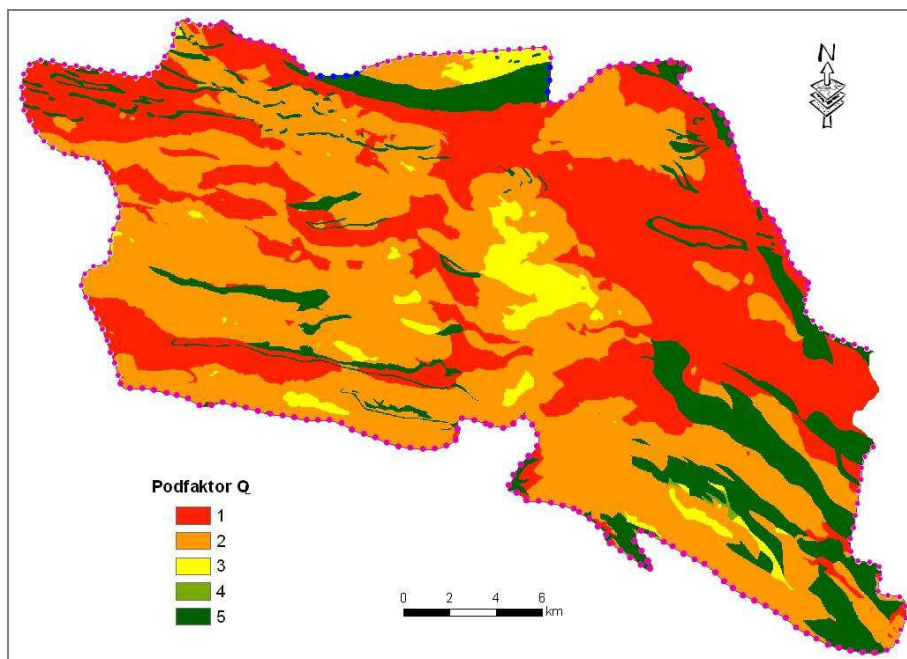


Prvi korak COP metode je procjena faktora O – zaštitne uloge pokrovnih naslaga. Postupak procjene ovog parametra je sličan onome u PI metodi, ali postoje ključne razlike. Postupak je podijeljen u šest osnovnih koraka, a u konačnici predstavlja sumu utjecaja tla (podfaktor  $O_S$ ) i utjecaja stijena prema litološkim karakteristikama (podfaktor  $O_L$ ). Podfaktor  $O_S$  procijenjen je iz podataka Hidropedološke karte Republike Hrvatske (Vidaček *et al.*, 2004), na temelju podataka o teksturi i debljini naslaga. Reklasificirana je karta izdvojenih klasa tala na području sliva (slika 7.9) tako da su, prema preporukama metode (slika 6.21), poligonima bez tla i skeletne strukture dodijeljene vrijednosti O, ilovači debljine do 50 cm vrijednosti 1, ilovači do debljine od 1 m vrijednost 2, a ilovači iznad 1 m vrijednost 3, jednako kao i glinovitim tlima debljine do 50 cm (slici 7.47).

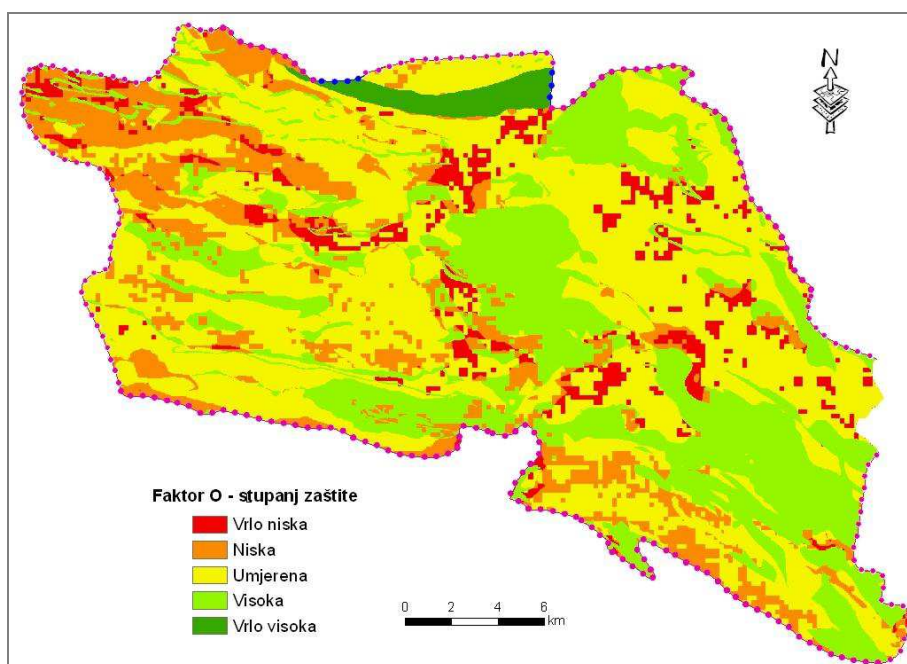


Slika 7.47. Prostorni raspored podfaktora  $O_S$

Podfaktor  $O_L$ , koji prikazuje utjecaj litološke građe nezasićene zone na ranjivost vodonosnika, procijenjen je na osnovu hidrogeološke karte sliva (slika 5.1). Metoda predviđa sumiranje utjecaja pojedinih litoloških članova u vertikalnoj raspodjeli do podzemne vode, međutim u većem dijelu sliva pretpostavljeno je da nema promjene u vertikalnom rasporedu litoloških članova. Jedinicama hidrogeološke karte dodijeljene su vrijednosti litoloških članova koje su zatim množene s dubinom do podzemne vode za nepovoljni slučaj visokih razina podzemne vode. Raster je zatim reklasificiran prema indeksu slojeva i rezultirajući raster prikazuje vrijednosti podfaktora  $O_L$  (slika 7.48).

Slika 7.48. Prostorni raspored podfaktora  $O_L$ 

Sumiranjem vrijednosti ova dva podfaktora dobiven je raster faktora O (slika 7.49) koji prikazuje ukupnu zaštitnu ulogu pokrovnih naslaga svih slojeva do podzemne vode i to u slučaju kad su podzemne vode u slivu visoke, odnosno debljina nezasićene zone je minimalna.

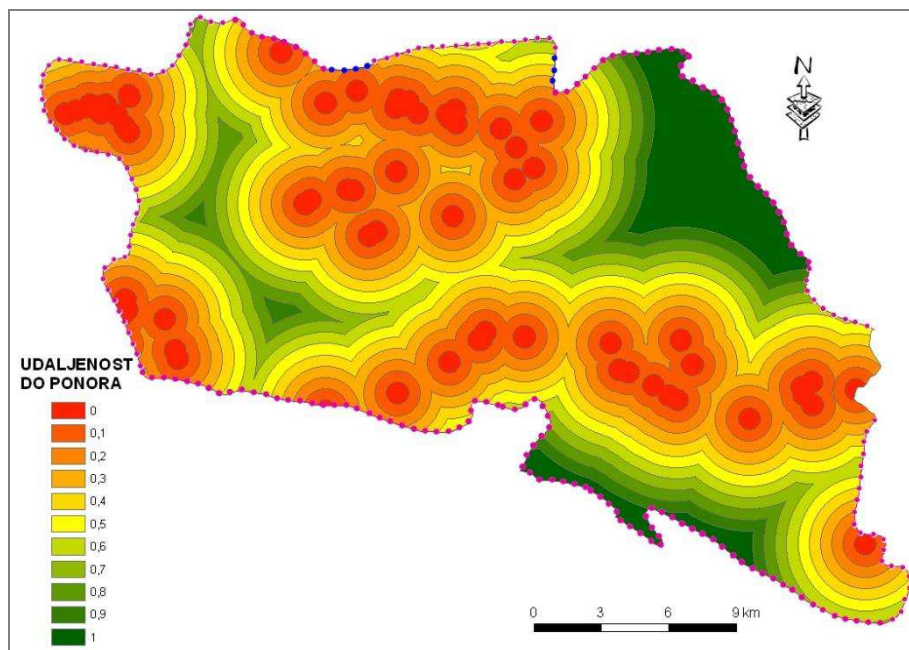


Slika 7.49. O karta – prikaz zaštitne uloge pokrovnih naslaga

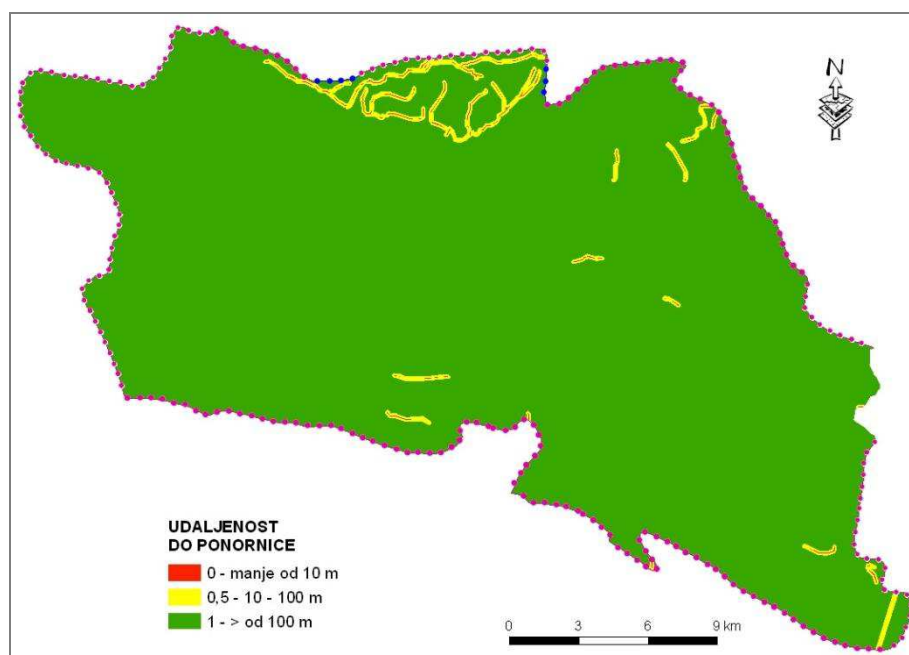


Iz O karte (**slika 7.49**) vidljivo je da su najranjiviji dijelovi sliva (vrlo niska i niska zaštita) oni izgrađeni od dobro propusnih vapnenaca bez tla ili s vrlo tankim slojem tla. Visoku i vrlo visoku zaštitu imaju područja izgrađena od slabo propusnih karbonatnih stijena, gotovo nepropusnih naslaga fliša, te dijelovi s glinovitim pokrovnim naslagama tla. Iako je postupak određivanja faktora O sličan onome za određivanje faktora P u PI metodi, rezultati ukazuju na velike razlike, pošto se u PI metodi izgubio negativni utjecaj područja golih stijena, a ostatak sliva je više ujednačen jer nema razlike u litološkim članovima karbonatnih stijena. Također, u PI metodi u definiciju parametra pokrovnih naslaga uvrštava se i podfaktor prihranjivanja vodonosnika (R) kojeg ovdje nema.

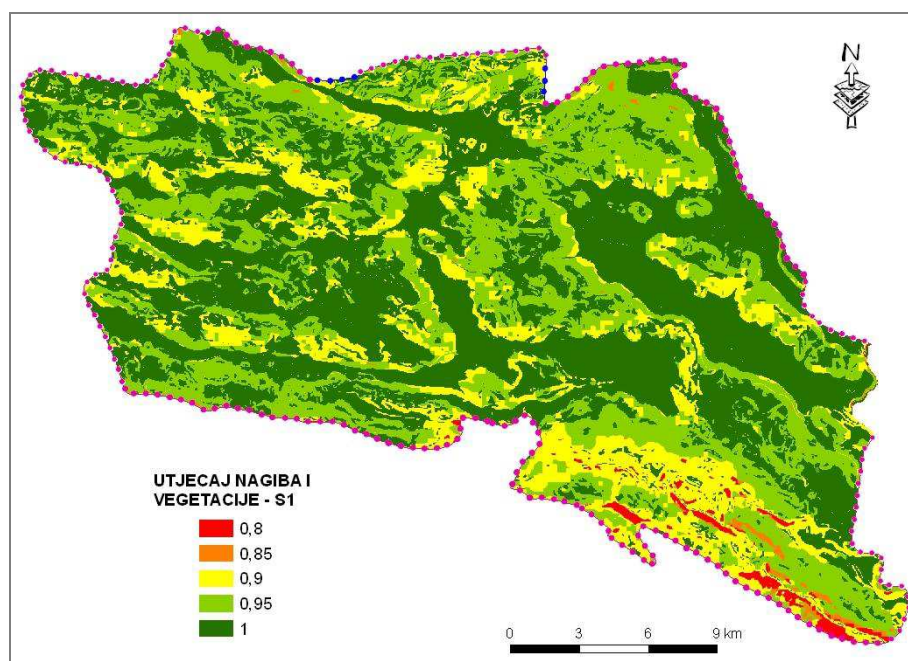
Zatim je procijenjen faktor C – faktor koncentracije toka. On je važan zbog toga jer izdvaja dijelove sliva na kojima postoje uvjeti da se formiraju površinski tokovi koji koncentrirano poniru i time zaobilaze zaštitu omogućenu pokrovnim naslagama. Prema postupku metode, važno je najprije izdvojiti dva osnovna područja sliva: onaj na kojem se prihranjivanje vodonosnika odvija kroz ponore (scenarij 1) i ostatak sliva (scenarij 2). Najprije je izrađena analiza za slučaj koncentriranog prihranjivanja vodonosnika kroz ponore (scenarij 1). Prema preporukama metode potrebno je bilo pripremiti tri podfaktora (dh, ds i sv) čiji umnožak daje vrijednost C faktora u slučaju scenarija 1. Podfaktor dh odnosi se na zone utjecaja oko geomorfoloških objekata špilja i jama do vode te ponora, tako da se za svakih 500 m udaljenosti (od 0 do 5000 m) vrijednost podfaktora **dh** povećava za 0,1 (**slika 7.50**). Prema ovoj metodi jako veliki dio sliva nalazi se pod izravnim utjecajem ponornih zona.

Slika 7.50. Prikaz podfaktora  $dh$ 

Drugi podfaktor  $ds$  odnosi se na definiranje zone utjecaja povremenih površinskih tokova koji koncentrirano poniru u podzemlje. Za tu analizu izrađeni su poligoni zone udaljenosti (*bufferi*) 10 m i 100 m oko tokova. Unutar zone 10 m vrijednost  $ds$  je 0, između 10 i 100 metara dodijeljena je vrijednost 0,5, a iza 100 m nema utjecaja, tj. podfaktor  $ds$  iznosi 1. Parametar  $ds$  prikazan je na slici 7.51.

Slika 7.51. Prikaz podfaktora  $ds$

Kao posljednji dio prvog scenarija izrađena je karta utjecaja nagiba terena i vegetacije (podfaktor *sv*). Karta nagiba terena reklasificirana je u tri zone: nagib <8%, nagib između 8 i 31%, te nagib >31% (zone iznad 76% nagiba nema), a karta pokrova reklasificirana je u dvije osnovne kategorije – ima vegetacije ili nema vegetacije. Prostornim preklapanjem tih dviju karata i vrednovanjem u skladu s preporukama metode dobiven je utjecaj nagiba i vegetacije, podfaktor *sv* za scenarij 1 (slika 7.52) gdje su najranjiviji dijelovi sliva s velikim nagibima bez vegetacije jer su to uvjeti koji pogoduju koncentraciji površinskih tokova.

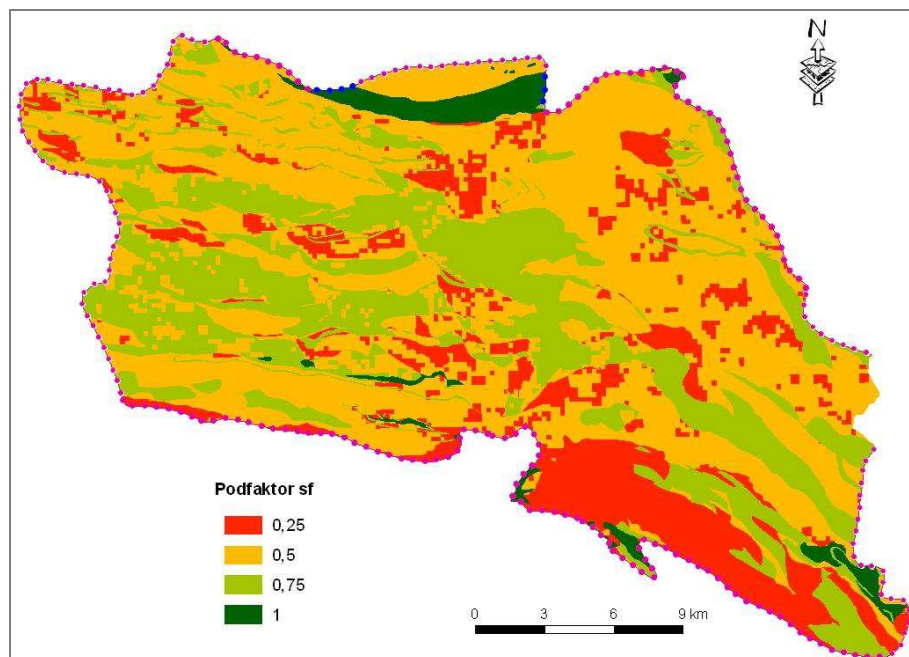


Slika 7.52. Prikaz podfaktora *sv* za scenarij 1

Faktor C za područje koje se prihranjuje preko ponora predstavlja umnožak ova tri podfaktora.

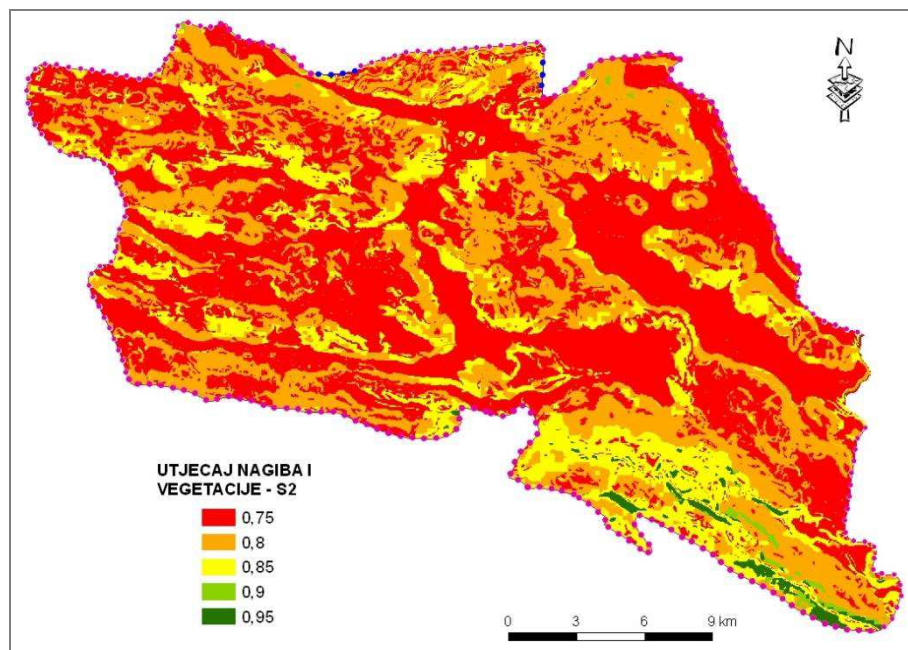
Za ostatak sliva, na kojem je značajno difuzno prihranjivanje vodonosnika (scenarij 2), bilo je potrebno odrediti dva podfaktora: *sf* – koji predstavlja značajke područja kao kombinaciju razvoja epikrške zone i propusnosti pokrovnih naslaga; te također utjecaj nagiba i vegetacije (*sv*), ali sada s obrnutim vrednovanjem nego u scenariju 1. Podfaktor *sf* dobiven je preklapanjem karte tla (prisutna tla su automorfna s većim udjelima stijenskog kršja, pa se smatraju propusnima, čak i ona koja su teksturom glinena ne mogu biti okarakterizirana kao nepropusna) i hidrogeoloških jedinica (čija propusna funkcija se dovodi u vezu sa stupnjem okršavanja). Nepropusne stijene su stoga poprimile vrijednost 1, bez obzira na pokrov tla, dobro propusne karbonatne stijene koje su jasno okršene i gole (bez tla ili s vrlo tankim

slojem tla) vrijednost 0,25, a s debljim slojem tla 0,5. Srednje propusnim karbonatnim stijenama (na kojima su također vidljivi tragovi okršavanja, ali slabiji) dodijeljena je vrijednost 0,5, ako su bez tla, i 0,75 s naslagama tla. Slabo propusne stijene, koje su pretežito raspucane i ne okršene, imaju vrijednost 0,75, bez obzira na pokrov tla (**slika 7.53**).



Slika 7.53. Prikaz podfaktora *sf*

Podfaktor *sv* za scenarij 2 dobiven je na isti način kao i u prvom scenariju, samo su poligonima pridodane druge vrijednosti, budući da su u ovom slučaju ranjiviji niži dijelovi s vegetacijom jer oni skupljaju sve dotoke s površine i provode ih do vodonosnika (**slika 7.54**).

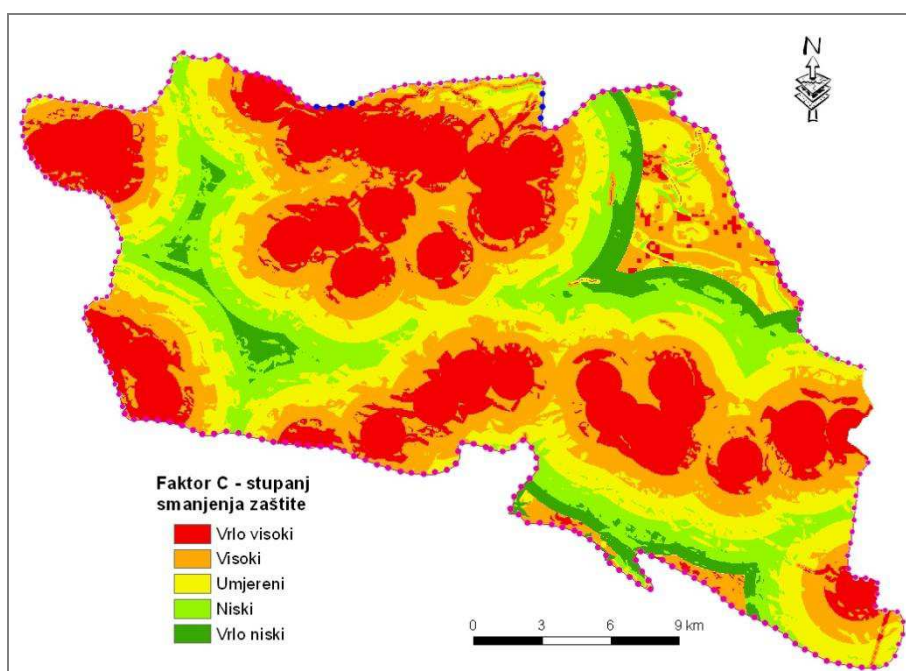


Slika 7.54. Prikaz podfaktora *sv* za scenarij 2

C faktor za područje s difuznim prihranjivanjem dobiva se kao umnožak ova dva podfaktora. Takva analiza rezultira izdvajanjem dijelova sliva na kojima postoje površinski uvjeti za infiltraciju kroz pokrovne naslage, što je povoljno s aspekta zaštite vodonosnika jer to omogućuje da dođe do izražaja zaštitna uloga pokrovnih naslaga. Međutim, jako je dobro kombinirati podfaktor *sv*, za slučaj infiltracije, s podfaktorom *sf* jer se ne može pretpostaviti da je difuznim prihranjivanjem vodonosnik zaštićen pokrovnim naslagama, budući da se kod razvijene epikrške zone u podzemlju pokrovne naslage mogu potpuno zaobići i tokovi se mogu koncentrirati jednako kao i prihranjivanjem kroz ponore.

Konačni raspored C faktora prikazan je na **slici 7.55**.

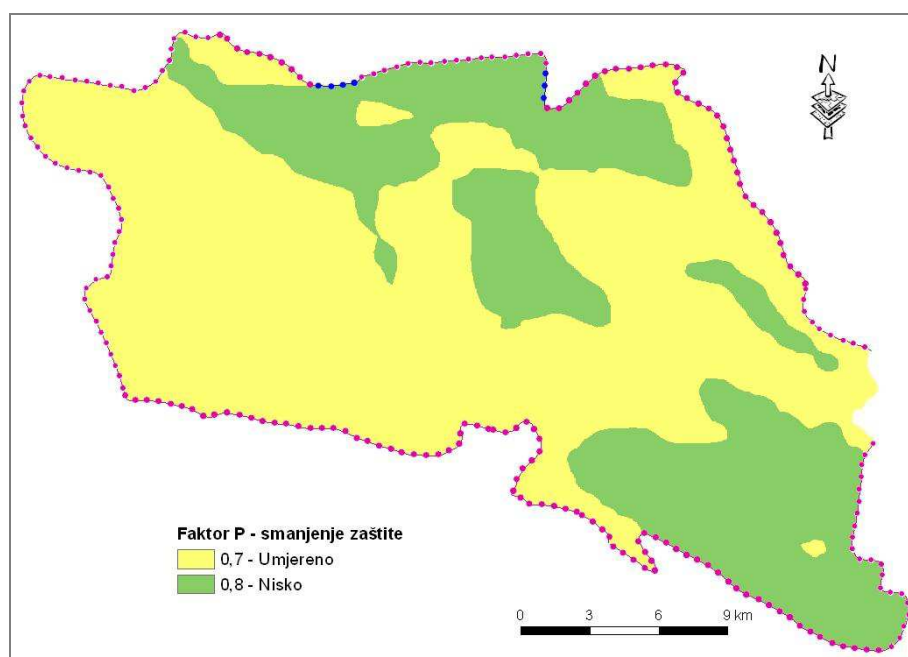




Slika 7.55. C karta – smanjenje zaštite vodonosnika uslijed uvjeta tečenja

Treći i posljednji faktor COP metode je P – faktor oborina. Prema konceptu Europskog pristupa, u procjeni ranjivosti P faktor predstavlja vanjski stres na sustav koji se promatra. Vrlo je važan jer predstavlja glavni izvor prihranjivanja podzemnih voda, medij koji prenosi onečišćenje s površine do vodnog lica, a direktno ili indirektno utječe na sve ostale parametre procjene. Prema uputama COP metode dva su osnovna obilježja oborina koja utječu na ranjivost vodonosnika – količina i intenzitet. Prema shemi koja je predložena (slika 6.25), najprije je napravljena prostorna raspodjela količina oborina za vlažnu godinu i na temelju toga dodijeljena je vrijednost podfaktora  $P_Q$ . Nakon toga izračunat je intenzitet oborina koji je prikazan podfaktorom  $P_i$ . Ukupni P faktor dobiven je kao zbroj ova dva podfaktora (slika 7.56).



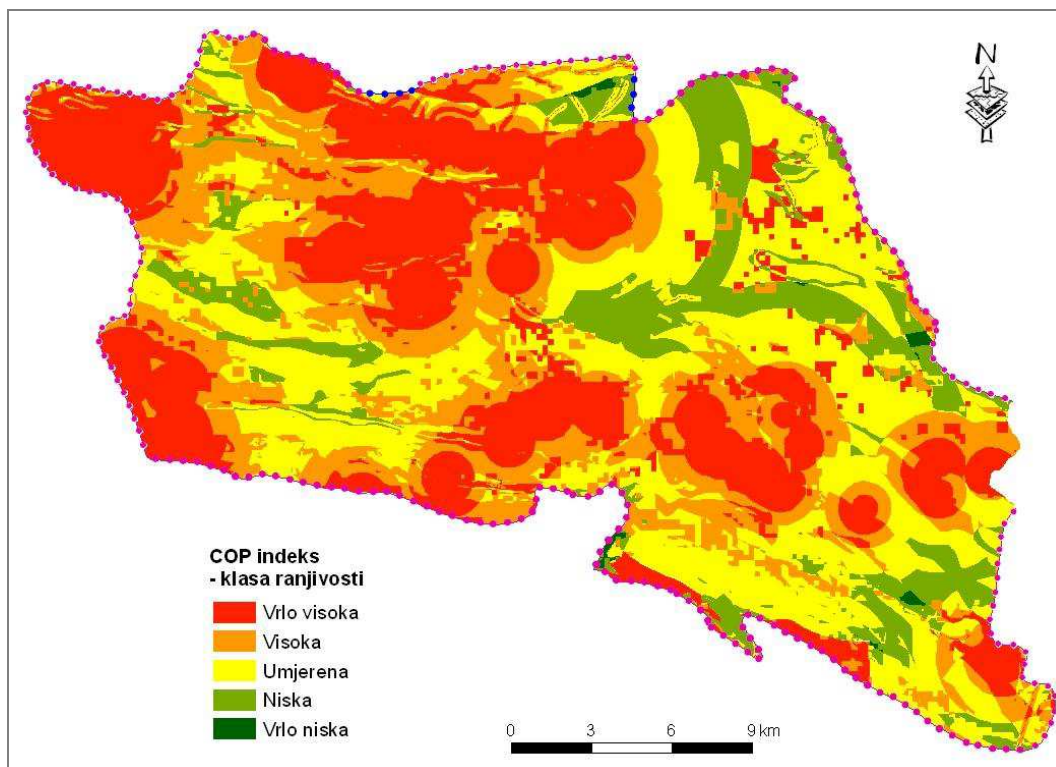


Slika 7.56. P karta – smanjenje zaštite vodonosnika pod utjecajem oborina

Množenjem rastera s vrijednostima faktora C, O i P dobiven je raster s vrijednostima COP indeksa. Prema uputama metode, COP indeks se dijeli u pet kategorija i takav prikaz predstavlja kartu prirodne ranjivosti dobivene pomoću COP metode (slika 7.57). Osim toga, krajnji rezultati izračuna površine zahvaćene pojedinom kategorijom ranjivosti nakon provedene analize prikazani su i u tablici 7.9.

Tablica 7.9. Prikaz klasa ranjivosti COP metode s pripadajućom površinom sliva

COP indeks	Ranjivost	Površina sliva (km <sup>2</sup> )	Površina sliva (%)
0 – 0,5	Vrlo visoka	175,50	30,98
0,5 – 1	Visoka	141,05	24,90
1 – 2	Umjerena	180,34	31,83
2 – 4	Niska	67,88	11,98
4 – 5,4	Vrlo niska	1,73	0,31



Slika 7.57. Karta prirodne ranjivosti vodonosnika dobivena COP metodom

Iz karte (slika 7.57) i tablice 7.9 vidljivo je da je veliki dio sliva svrstan u klasu vrlo visoke ranjivosti. To je područje koje odgovara blizini ponora i ostalih geomorfoloških objekata, koji imaju izravan doticaj s podzemnom vodom, područje neposredne blizine povremenih ponornih tokova, te područje golih dobropropusnih karbonatnih stijena s dobro razvijenom epikrškom zonom. Niskom i vrlo niskom klasom ranjivosti zahvaćen je mali udio sliva (zajedno nešto malo više od 12%) i to dijelovi sliva građeni od slabopropusnih i nepropusnih stijena koje se nalaze dovoljno udaljene od ponora i ponornica.

## 7.6. Usporedba rezultata provedenih analiza ranjivosti

Usporedbom rezultata procjene prirodne ranjivosti (karata ranjivosti), dobivenih pomoću četiri prikazane metode, vidljivo je da postoje značajne sličnosti, ali i značajne razlike između dobivenih rezultata. Detaljnijom analizom utvrđeni su i pripadajući razlozi, a pri tome je najlakše uspoređivati sličnosti i različitosti s obzirom na površinu sliva koja je zahvaćena određenom klasom ranjivosti.

Kod **SINTACS** metode razmjerno je veliki broj parametara procjene koji na prvi pogled otežavaju analizu, ali vrlo brzo se može ustanoviti da su svi ti parametri prisutni i u drugim metodama samo su drugačije raspoređeni. Neki su indirektni, kao svojstvo za određivanje nekog od glavnih faktora, dok su drugi prisutni kao podfaktori. Negativnost primjene velikog broja parametara, kod kojih je važno precizno odrediti svaku veličinu jer ulazi u konačni izračun indeksa ranjivosti, je u tome što u kršu ne postoje detaljna mjerenja nekih značajki (primjerice dubine do podzemne vode, infiltracije, debljine pokrova tla, hidrauličke vodljivosti). Njihova interpolacija na vrlo heterogenom i anizotropnom području, kao što je dinarski krš, je nažalost samo gruba pretpostavka i treba je uzeti s rezervom. Vrijednost SINTACS metode svakako je u težinskim faktorima koji omogućuju maksimalnu prilagodbu parametara površinskim uvjetima na slivu, što je pogodno za područja gdje se unutar jednog te istog sliva nalaze područja s izrazito različitim površinskim uvjetima. Za ovu analizu to nije bilo toliko važno, budući da je cijeli sliv na krškom terenu s vrlo ujednačenim značajkama. Druga značajka, koja također odskače, je broj klasa ranjivosti u konačnom prikazu. Jedino SINTACS metoda prikazuje šest klasa ranjivosti, dodatak je ekstremna klasa ranjivosti, ali ako se ona promatra zajedno s vrlo visokom klasom ranjivosti omogućena je kvalitetna usporedba. SINTACS metoda, kao najranjivije dijelove sliva, izdvaja nizinska područja s malim nagibima terena koja sakupljaju vodu s viših dijelova i provode u podzemlje. Ovom analizom ne dolazi do izražaja zaštitna funkcija kvartarnih naslaga jer su prema "rejting dijagramima" metode kvartarne naslage premale debljine da bi imale učinkovitu zaštitnu ulogu. Značajna je i uloga infiltracije za konačni izračun ranjivosti, budući da je njen težinski faktor utjecaja maksimalan. Ipak, važno je istaknuti da se prema preporukama metode negativna uloga infiltracije smanjuje s većim količinama infiltrirane vode u podzemlje jer nastupaju procesi razrjeđenja onečišćenja, tj. nakon neke točke daljnjim porastom količine infiltrirane vode ranjivost se smanjuje zbog razrjeđenja (takvo je objašnjenje i za P faktor u COP metodi). Za razliku od toga, u PI metodi porastom količine vode ranjivost se stalno povećava (kod većih količina oborina dolazi do znatnijeg ispiranja nezasićene zone i pronosa onečišćenja na veće udaljenosti, što može predstavljati dodatni problem za onečišćenje vodonosnika), stoga se smatra da veće količine infiltracije ne bi trebale smanjivati ranjivost. Također, važno je napomenuti da SINTACS metoda ne uzima u obzir ponore kao posebno ranjiva mjesta u kojima voda izravno ulazi u vodonosnik. Ono što se pokazalo, uvođenjem modifikacija osnovnoj metodi, jest da ranjivost u slučaju procjene SINTACS metodom uvelike ovisi o hidrauličkoj vodljivosti vodonosnika koju je u kršu teško precizno odrediti.

Kako je velika površina sliva građena od karbonatnih stijena bliskih, a opet različitih vrijednosti propusnosti, dobrodošlo je uvođenje alata koji preciznije izdvajaju zone jednakih značajki. U tome je vrijednost uvođenja karte gustoće vrtača u originalnu metodu jer je bogatstvo geomorfoloških obilježja, posebno vrtača, važno obilježje u kršu ovog područja koje ukazuje na intenzitet okršenosti karbonatnih naslaga, postojanje epikrške zone, a time i na dijelove terena koji su propusniji u odnosu na ostale i treba ga uključiti u procjenu ranjivosti.

**EPIK** metodom ranjivost je procijenjena određivanjem četiri osnovna parametra. Metoda je razvijena upravo za krška područja, što je i vidljivo iz izbora parametara i težinskih faktora. Ipak, zamjerka metodi je izrazita generalizacija i subjektivnost primjene metode, bez detaljnijih odrednica. Metoda je primjenjiva u području s vrlo ograničenom bazom podataka za koju se želi odrediti neki globalni prikaz i dobiti općeniti uvid u ranjivost nekog područja, bez neke značajne detaljizacije. *Vias et al. (2010)* ističu da je EPIK metoda pogodna za regionalne prikaze u sitnijem mjerilu, za određivanje zona sanitarne zaštite. U slučaju sliva Jadra i Žrnovnice primjenom osnovne EPIK metode dosta je precijenjena ranjivost jer je više od polovice sliva dospjelo u vrlo visoku klasu ranjivosti, odnosno, cijelo područje za koje je definirana razvijena epikrška zona. Situacija se malo promijenila kad se epikrška zona definirala pomoću rastera gustoće vrtače. Budući da je već utvrđeno da prisutnost vrtača ukazuje na razvijenost epikrške zone takav, postupak je posve opravdan, ali za usporedbu u oba slučaja vrtače su uzete u obzir, a rezultat je znatno različit, što ukazuje na veliku subjektivnost metode bez alata dodatne provjere. EPIK metoda uzima u obzir parametar utjecaja infiltracije, ali napomenuto je da se ti uvjeti ne odnose na količinu vode koja se infiltrira, tako da se nigdje u metodi ne uvrštavaju količine oborina koje prihranjuju sliv. Takav pristup je zadovoljavajući na području gdje ne postoji dovoljno mjerenih podataka o količinama oborina, pa njihovo procjenjivanje može uzrokovati više štete nego koristi. Ipak, na području gdje takvi podaci postoje, trebalo bi ih moći uvrstiti u analizu kao dodatni faktor ili parametar. Daljnja zamjerka metodi je što potencijalno omogućuje precjenjivanje zaštitne funkcije naslaga tla. Naime, P<sub>4</sub> klasa, odnosno maksimalna zaštitna funkcija tla, definirana je za područja na kojima je debljina tla iznad dobro propusnih vapnenaca veća od 2 m, što prema tablici raspodjele klasa ranjivosti odgovara niskoj ranjivosti (bez obzira na ostale parametre). Preporuka metode za određivanje zaštitnih zona izvorišta je da takva područja ne trebaju ulaziti u zaštitu unutar zaštitnih zona, već se tretiraju kao "ostatak sliva". Takva ocjena

ranjivosti nikako nije pogodna za slučaj određivanja ranjivosti u slivu Jadra i Žrnovnice, budući da postoje dokazi terenskih istraživanja gdje to nije moguće primijeniti. Primjerice, na području Dugopolja određene su značajne debljine naslaga tla ( $> 200$  cm) i definirana je klasa pokrovnih naslaga  $P_4$ , stoga ovo područje ne bi trebalo ulaziti u područje zaštitnih zona. Ipak, na krškom polju postoje ponori koji su trasirani i utvrđena je podzemna vodna veza s izvorom Jadro, uz prividne brzine podzemnih tokova dovoljnim da Dugopolje svrsta u drugu, odnosno treću zonu zaštite izvora Jadro, prema važećem Pravilniku o utvrđivanju zona sanitarne zaštite izvorišta (NN, 2011; NN 2013a). Taj isti ponor evidentiran je u okviru metode unutar najveće klase epikrške zone i najveće klase infiltracije, ali je prisustvo klase  $P_4$  poništilo djelovanje oba faktora.

**PI** metoda i **COP** metoda procjene ranjivosti vrlo su slične, procjenjuju na vrlo sličan način pojedine faktore, stoga je i njihova usporedba zajednička (parametar  $P$  u **PI** jednak je parametru  $O$  u **COP**, a  $I = C$ ). Međutim, rezultati ukazuju na značajne razlike u površinama sliva unutar pojedine klase ranjivosti koje su upravo rezultat razlika metoda. Dok je kod **PI** metode više od polovice sliva unutar visoke ranjivosti (za slučaj kada je debljina nezasićene zone minimalna jer je za taj slučaj napravljena analiza **COP**), a vrlo niska klasa nije uopće izdvojena, **COP** metoda mnogo ravnomjernije i realnije raspodjeljuje sliv na svih pet klasa. Ipak, tu je vrlo visoka klasa možda malo prenaplašena zbog prevelike zone utjecaja ponora, što poništava zaštitnu ulogu debljih naslaga tla na krškim poljima koja je kod **PI** metode izdvojena.

U osnovnoj metodologiji, osnovna razlika između dviju navedenih metoda je što **COP** metoda procjenjuje zasebno parametar oborina ( $P$ ), dok ga **PI** metoda uključuje u procjenu parametra pokrovnih naslaga (podfaktor  $R$ ). Osim toga, podfaktor  $R$  djeluje tako da se kod većih količina oborina zaštitna funkcija pokrovnih naslaga smanjuje (ranjivost vodonosnika se povećava), dok je  $P$  faktor **COP** metode definiran tako da u obzir uzima razrjeđenje i kod većih količina oborina smanjuje negativni utjecaj faktora  $P$ . U dinarskom tipu krša (prema *Biondić, 2005; Biondić et al., 2008; Biondić et al., 2009; Meaški, 2011*) vjerojatnije je da se kod većih količina oborina ranjivost povećava jer se onečišćenje prenosi na veće udaljenosti, veća je mogućnost formiranja bujičnih tokova, a dolazi i do ispiranja epikrške zone u većoj mjeri nego kod malih količina oborina. Druga glavna razlika je kod definiranja uvjeta infiltracije, gdje **COP** metoda definira mnogo širi utjecaj ponora (do 5000 m) i na cijelom tom području

promatra se površinsko otjecanje, a PI metoda uzima u obzir samo zonu 10 m oko ponora. Jest da PI metoda mnogo veći utjecaj daje slivovima rijeka ponornica, ali u ovom slučaju to nema neki značajan utjecaj, budući da "pravih", stalnih površinskih tokova nema, pa tako ni slivova pojedinih rijeka ponornica, a povremeni potoci i jaruge koje se pune vodom kod većih količina oborina nemaju značajno slivno područje. I treća razlika je način definiranja zaštitne uloge pokrovnih naslaga. Kod PI metode prisutna su tri sloja unutar nezasićene zone (tlo, podtlo i stijena), a kod COP metode samo dva (tlo i stijena), što je sa stajališta dostupnih podataka i dodatnih utjecaja povoljnije. Također, razlika je u definiranju vrijednosti podfaktora tla koji se kod PI metode određuje na temelju sadržaja aktivne vode u tlu dostupne biljkama, a kod COP metode na temelju teksture (granulometrijskog sastava) i debljine, što je u ovom slučaju također povoljnije.

Ako se ovakva usporedba PI i COP metode proširi i na druge dvije ovdje primjenjene metode (SINTACS i EPIK) i istaknu njihova obilježja koja ih čine manje pogodnim za prilagodbu istraživanom području (kod SINTACS je to veliki broj parametara, "rejting dijagrami" čija podjela ponekad nije dovoljna za detaljna zoniranja nekih parametara, uloga infiltracije; a kod EPIK metode to je svakako generalni pristup i precjenjivanje ranjivosti), COP metoda se čini kao najbolje prilagođena uvjetima istraživanog područja. U njoj se koriste dostupni podaci koji su vrlo prikladno raspoređeni u parametre procjene, naglašena su najranjivija područja (ponori), a eventualne nedostatke moguće je prilagoditi manjim modifikacijama. Stoga se ona uzima u daljnju analizu za moguće modifikacije i detaljne prilagodbe u izradi prijedloga Hrvatskog pristupa u procjeni prirodne ranjivosti vodonosnika.

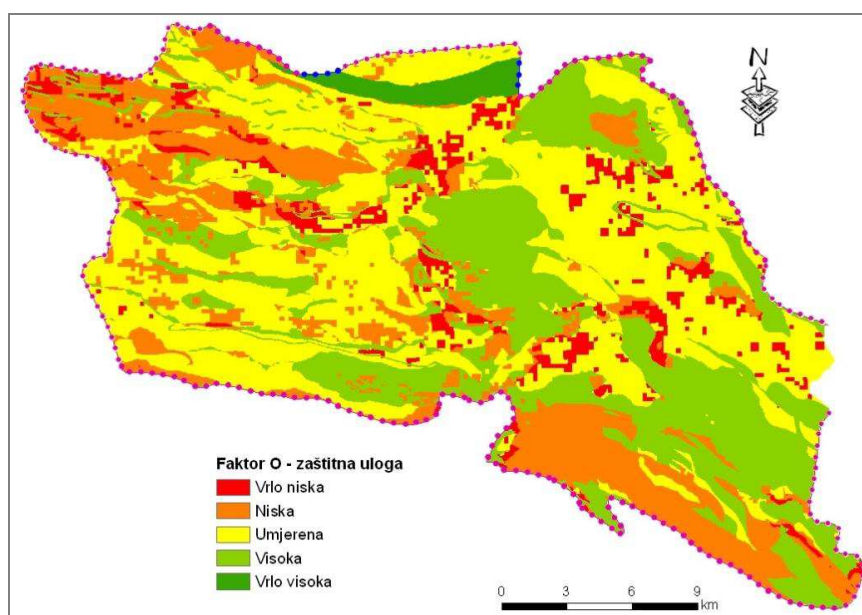
## **7.7. Prijedlog hrvatskog pristupa procjene prirodne ranjivosti u kršu**

Kao najbolja metoda za procjenu prirodne ranjivosti u krškim slivovima na temelju rezultata analize provedene u slivu Jadra i Žrnovnice između primijenjenih metoda pokazala se COP metoda. Da bi se, što je moguće bolje, prilagodila uvjetima koje vladaju na istraživanom području, kao i dostupnim podacima, metoda je modificirana. Glavne modifikacije kao i postupak provedbe ove analize prikazani su u daljnjem tekstu.



Definiranje parametra O, kao i kod originalne metode, određen je kombinacijom podfaktora  $O_S$  (utjecaj tla) i  $O_L$  (utjecaj stijena nesaturirane zone). "Rejting dijagram" za određivanje vrijednosti podfaktora  $O_S$  malo je modificiran, na način da je uvedena dodatna klasa debljine tla od 0 do 20 cm, kojoj je dodijeljena vrijednost parametra  $O_S = 0$ . Razlog tome je što je na tom dijelu dalmatinskog krša karakteristična neravnomjerna raspodjela vrlo tankog sloja tla koji mjestimično može doseći i do 20 cm debljine, ali nije realno za očekivati da takve naslage pružaju vodonosniku jednaku razinu zaštite od onečišćenja kao i naslage debljine 40 ili 50 centimetara. Ovakva raspodjela zona debljine tla karakteristična je za EPIK metodu, a PI metoda preračunavanjem sadržaja dostupne vlage također razdvaja ta dva horizonta tla. Osim toga *Ravbar & Goldscheider (2007)* usvajaju četiri zone debljine tla u prijedlogu Slovenskog pristupa procjene ranjivosti. Ostale vrijednosti  $O_S$  ostale su jednake kao i kod originalne metode. Uvođenjem ove modifikacije više od četvrtine sliva (27,5%) nema nikakvu zaštitu od naslaga tla ( $O_S = 0$ ), za razliku od 19,5% u originalnoj metodi. Razlika možda nije značajna, međutim postupak procjene utjecaja tla je ovime upotpunjen i prilagođen prostorima poput dalmatinskog dijela dinarskog krša gdje je tlo prisutno, ali je vrlo neravnomjerno i nekontinuirano raspoređeno.

Kod procjene podfaktora  $O_L$  nisu uvedene nikakve dodatne modifikacije. Ukupni parametar O dobiven je zbrajanjem vrijednosti  $O_S$  i  $O_L$  (slika 7.58).



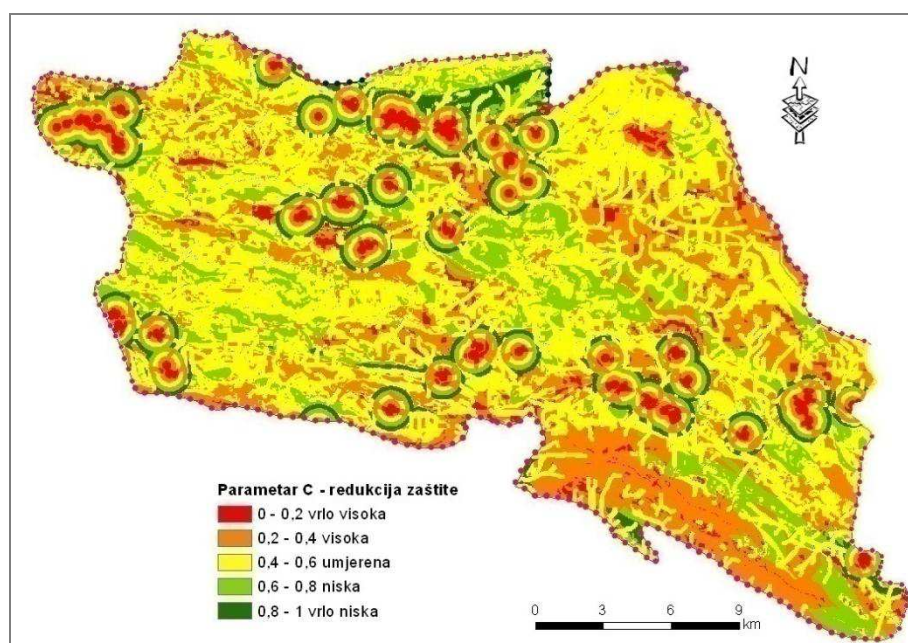
Slika 7.58. Prostorni raspored parametra O prema modificiranoj COP metodi

Na ovaj način smanjila se zaštitna uloga pokrovnih naslaga tako da je klasa umjerene zaštite vodonosnika smanjena sa 46,84% na 41,11%, klasa niske zaštite povećana je sa 16,41% na 21,90%, a klasa vrlo niske zaštite je neznatno povećana s 5,91% na 6,28% površine sliva.

Kod procjene parametra C, u slučaju originalne metode, uočen je problem određivanja načina prihranjivanja vodonosnika (koncentrirano ili difuzno), budući da površinskih tokova gotovo da ni nema, a postoji obilje geomorfoloških objekata koji omogućavaju koncentriranu infiltraciju. Također je utvrđeno da je prema predloženoj metodologiji previše izražen utjecaj ponornih zona na ukupnu ranjivost vodonosnika, zona od 5000 m je svakako previše za ove uvjete (*Kapelj et al., 2007*). Stoga je u tim dijelovima uvedena modifikacija. Utjecaj udaljenosti od ponora sada se promatra za svakih sto metara, tako da je samo prvih sto metara radijusa oko ponora zahvaćeno maksimalno ranjivom zonom tj. vrijednost podfaktora **dh** je jednaka 0, a već nakon 1000 m  $dh = 1$ . Osim toga, uveden je i novi tematski sloj prioritnog površinskog otjecanja, generiran pomoću ArcGIS alata (**slika 7.4**), kojim se prema digitalnom modelu reljefa modelira smjer i količina otjecanja u prostoru (postupak opisan u poglavlju 7.1.1.). Na taj je način dobiven utjecaj površinskih tokova za koje je izrađen raster udaljenosti 100 m, odnosno podfaktor **ds** unutar te zone ima vrijednost 0,5, a izvan nje ima vrijednost 1. Zona utjecaja 10 m oko površinskih tokova nema mnogo smisla, budući da se radi o aproksimaciji točne lokacije toka, a kod transformacije iz rastera u poligon, pa ponovo u raster s određenom veličinom ćelije, može doći do smanjenja prostorne točnosti. Ako bi se toj zoni dodijelila vrijednost  $ds = 0$ , tada, budući da se sve množi, ta vrijednost ostaje trajno 0 u konačnom izračunu, što nije realno. Na kraju se C faktor na dijelu koncentriranog prihranjivanja vodonosnika računa kao umnožak ova dva podfaktora, podfaktor **sv** se u ovom dijelu gubi, budući da je nagib terena već uračunat u model prioritnog površinskog otjecanja, a vegetacija nema neki značajniji utjecaj. Ovakva raspodjela mnogo je realnija s obzirom na uvjete na terenu jer modelirani površinski tokovi završavaju u ponorima, pa nema potrebe pretpostavljati ravnomjerno (koncentrično) uviranje u ponore na velike udaljenosti.

Za ostatak sliva, na kojima se pretpostavlja difuzno prihranjivanje vodonosnika, parametar C dobiven je jednako kao i prema originalnoj metodi, kao kombinacija utjecaja okršenosti i propusnosti površinskih naslaga (podfaktor **sf**), te nagiba terena i vegetacije (podfaktor **sv**). Ovdje je kod procjene stupnja okršavanja uvedena tek manja modifikacija, tako da se okršenost uzima kao funkcija vrste stijene, ali je u obzir uzet i raster gustoće vrtača. Područja s gustoćom vrtača  $>6$  vrtača na površini 250x250 m, te područje dobro propusnih stijena s

gustoćom vrtača >3 vrtače okarakterizirana su kao izrazito okršena područja. Njima je dodijeljena vrijednost  $sf = 0,25$  na dijelovima bez tla, tj. 0,5 tamo gdje su pokrovne naslage tla. Ostalim vrstama stijena, s gustoćom vrtača između 3 i 6 vrtača, dodijeljena je vrijednost 0,5 bez tla, i 0,75 s tlom. Području s gustoćom vrtača manjom od 3 pridodana je vrijednost 0,75 bez obzira na prisutnost tla, jednako kao i nepropusnim stijenama bez krških obilježja vrijednost 1. Podfaktor  $sv$  jednak je onome iz originalne COP metode za scenarij 2. Konačni izgled parametra C vidljiv je na slici 7.59.

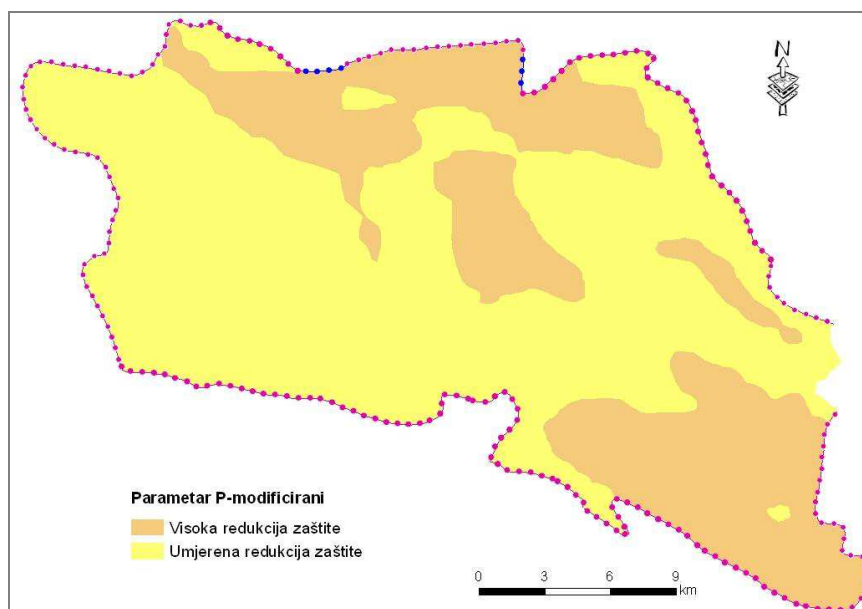


Slika 7.59. Prostorni raspored parametra C prema modificiranoj COP metodi

Na ovaj način postignuto je smanjenje zona oko ponora i detaljnije je izdvojeno jače okršeno područje koje, uz nepostojanje zaštitnih naslaga tla, omogućuje vrlo brzu infiltraciju vode u podzemlje. Ukupna promjena površina sliva, zahvaćenih pojedinom klasom, uzrokovana ovim modifikacijama, ide u prilog smanjenju ranjivosti. Tako je klasa vrlo visoke redukcije zaštite s početnih 27,69% znatno smanjena na 4,71% sliva. Zato je klasa umjerene redukcije ranjivosti povećana s početnih 23,27% na 48,43%. Ostale klase imaju minimalnu promjenu.

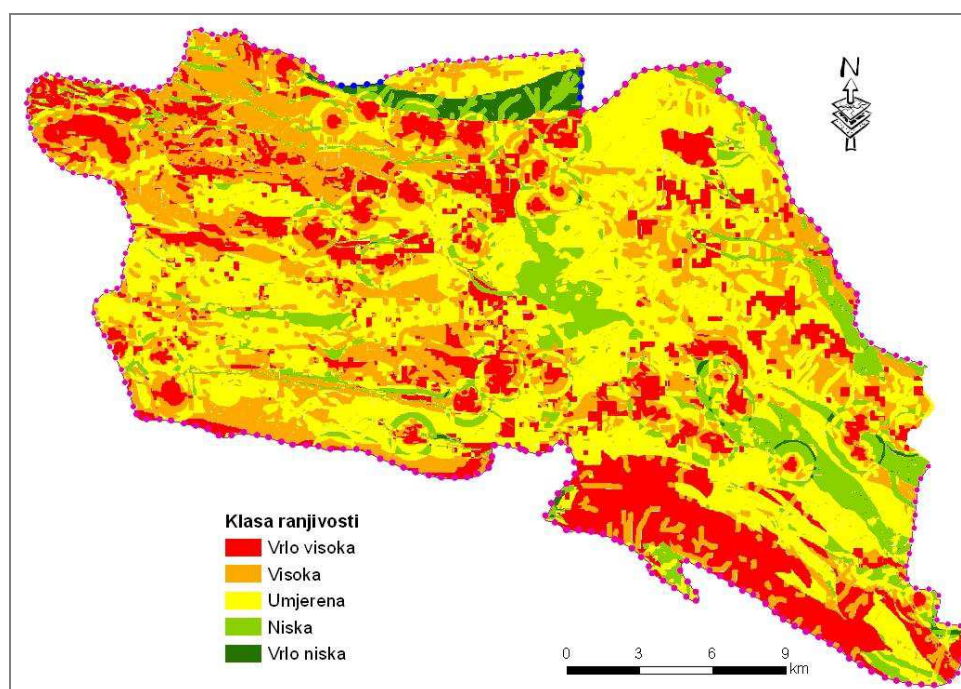
Na kraju je modificiran i parametar P. U skladu s objašnjenjem iz prethodnog poglavlja, u obzir je uzeta pretpostavka da povećanje količine oborina povećava ranjivost vodonosnika. Iz tog je razloga raspon vrijednosti podfaktora  $P_Q$  modificiran tako da najmanje količine oborina imaju najveću vrijednost  $P_Q$ , čime se povećava redukcija zaštite za područja bogata oborinama. Podfaktor  $P_i$  nije mijenjan. Konačni parametar P ima jednaki prostorni raspored

klasa, samo što je područje s većom količinom oborina iz niske klase redukcije zaštite dospjelo u klasu visoke redukcije zaštite (slika 7.60).



Slika 7.60. Prostorni raspored parametra P prema modificiranoj COP metodi

Množenjem vrijednosti sva tri modificirana parametra dobivena je konačna karta ranjivosti vodonosnika modificiranom COP metodom (slika 7.61).

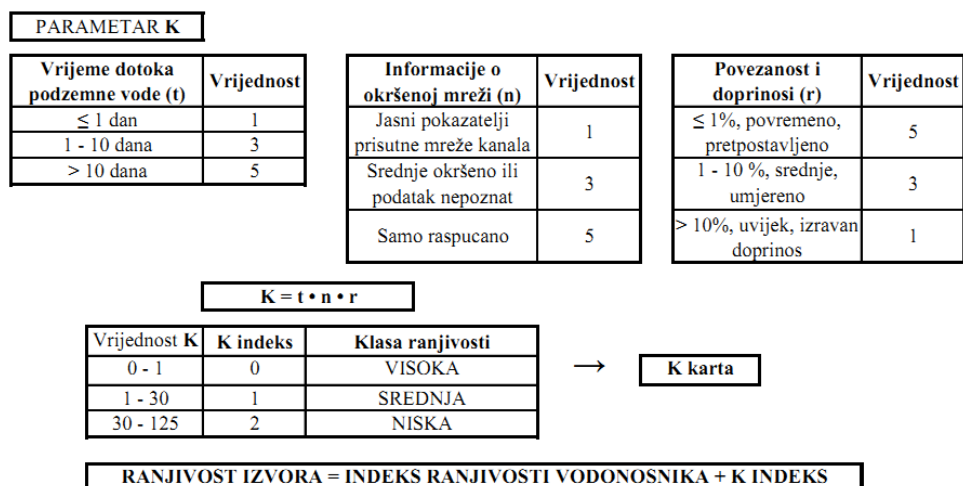


Slika 7.61. Karta ranjivosti vodonosnika dobivena modificiranom COP metodom

Karta ranjivosti je u ovom slučaju mnogo detaljnija i preciznija. Crvenom bojom (vrlo visokom klasom ranjivosti) zahvaćeni su mnogo manji dijelovi sliva nego što je to bilo kod originalne metode. S 30,97% površine sliva smanjeno je na 19,81%, i to oni dijelovi koji stvarno predstavljaju slabe točke: zone oko ponora, jama i špilja, područja izrazite okršenosti i karbonatne stijene dobre propusnosti bez zaštitnog pokrova tla. Vrlo niska klasa ranjivosti ostala je na dijelovima nepropusnih stijena između zona utjecaja formiranih površinskih tokova. Ostatak sliva je ovisno o prisutnosti pokrovnih naslaga tla, stijenama koje izgrađuju područje, te nagibu terena koji omogućava različita prihranjivanja vodonosnika, podijeljen na visoku (dobro propusne karbonatne stijene koje imaju određenu debljinu tla u pokrovu koja im omogućava zaštitnu funkciju), umjerenu i nisku (slabo propusne karbonatne stijene, osim okršenih dijelova, u blizini ponora i s površinskim tokovima) klasu ranjivosti.

Već je ranije spomenuto (poglavlje 6.2.) da je prema Europskom pristupu procjene ranjivosti moguće razlikovati ranjivost vodonosnika i ranjivost pojedinog izvora. **Razlika je u tome da se kod ranjivosti vodonosnika promatra samo vertikalni put vode (onečišćenja) kroz nesaturiranu zonu do vodnog lica, a kod ranjivosti izvora važno je procijeniti utjecaj tokova unutar zasićene zone vodonosnika do promatranog izvora. Budući da se u ovom slučaju radi baš o slivu izvora, konkretno izvorima Jadro i Žrnovnica, potrebno je procjenu ranjivosti prilagoditi tome.** SINTACS i EPIK metoda u svojoj osnovnoj metodologiji već uvrštavaju utjecaj zasićene zone vodonosnika i primjenjive su za ocjenu ranjivosti izvorišta, dok PI i COP metoda to nisu. **Zbog toga je potrebno predloženu modificiranu COP metodu dopuniti četvrtim parametrom procjene koji bi omogućavao određivanje ranjivosti krških izvora – primjenom K parametra – faktora stupnja okršenosti vodonosnika i razvoja mreže okršenih kanala.** *Ravbar & Goldscheider (2007)* i *Andreo et al. (2009)* predlažu dopunu COP metodi u kojoj se K parametar procjenjuje na temelju tri podfaktora: **t** – vrijeme dotoka podzemne vode; **n** – podaci o mreži krških kanala; **r** – doprinos područja i povezanost s izvorom. Svaki podfaktor ima tri klase, a vrijednosti klase se na kraju množe i razvrstavaju u tri klase indeksa K koji se na kraju pribraja COP indeksu za procjenu ranjivosti izvora (**slika 7.62**).





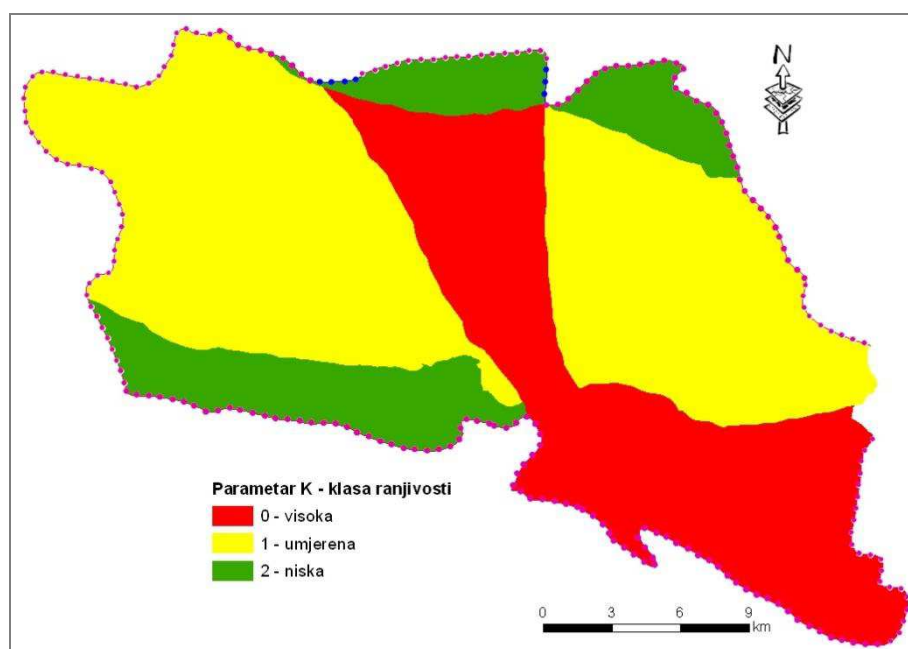
Slika 7.62. Procjena parametra K i konačni izračun COP+K metode (prema: *Ravbar & Goldscheider, 2007*)

Postoji nekoliko problema na koje se nailazi kod procjene parametra K. Najprije, procjenjuju se uvjeti saturiranog dijela vodonosnika koji je u krškom podzemlju potpuno heterogeno i anizotropno, bez mogućnosti modeliranja i predviđanja uvjeta podzemnog toka. Zbog toga se kombiniraju različiti drugi izvori podataka, koji bi mogli ukazati na prostornu raspodjelu brzina i smjerova podzemnih tokova, a neki od preporučenih su: rezultati trasiranja podzemnih tokova, podaci iz bušotina, hidrološki podaci koji ukazuju na reakciju podzemne vode na različite količine oborina i sl. Drugi problem je što ako i postoje potrebni podaci oni su često diskretni i na temelju njih dobivaju se nepouzdana interpolacije na čitavo područje sliva, odnosno dijela sliva na kojem takvi uvjeti vrijede. I treće, možda i najvažnije, uspješnost procjene K parametra uvelike ovisi o veličini sliva. Kod velikih slivova sa zonarnim razvodnicama vrlo je teško odrediti područje dominantnog napajanja i područje povremenog napajanja, a još je teže procijeniti o kojoj se količini doprinosa radi. Također, vrijeme putovanja vode (onečišćivala) od površine do izvora je dugotrajno, ne zbog malih brzina, već zbog velikih udaljenosti.

U ovom slučaju radi se o velikom slivu ( $\approx 560 \text{ km}^2$ ) koji, iako je prilično dobro istražen, još uvijek predstavlja područje na kojem je teško procijeniti kretanja podzemne vode. Zbog navedenog, određivanje K parametra predstavlja grubu procjenu, koja mora biti na strani sigurnosti jer se uključivanjem K parametra u ocjenu ranjivosti izvora smanjuje ranjivost u odnosu na onu procijenjenu za vodonosnik. Zato nije bilo moguće primijeniti "Slovenski pristup" za definiranje parametra K (slika 7.62), već ju je u određenoj mjeri bilo potrebno modificirati.

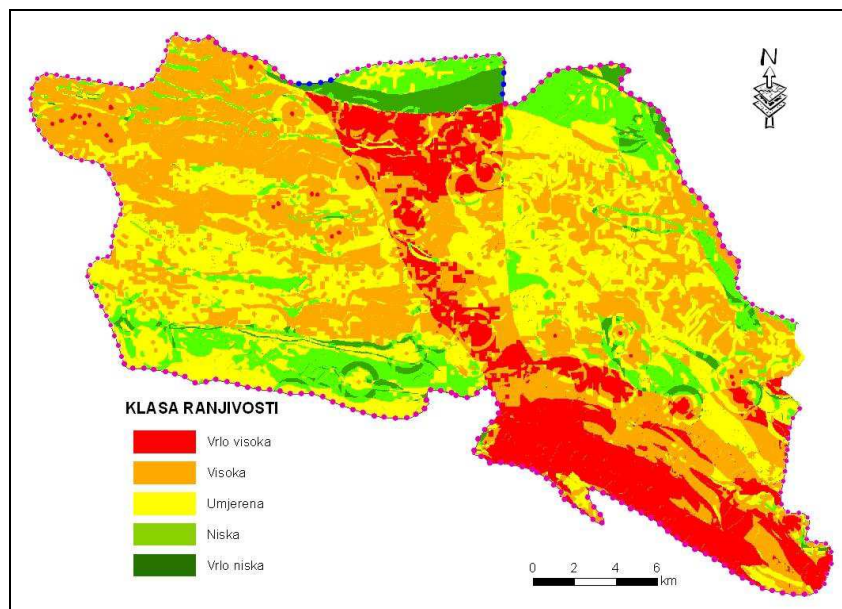


Na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice granice različitih vrijednosti K parametra (slika 7.63) definirane su prema podacima iz geološke karte sliva, posebno na temelju rasporeda najznačajnijih pukotinskih sustava i rasjednih zona. Takav raspored K parametra potvrđen je podacima iz hidrogeološke karte (propusnost stijena, hidrogeološka funkcija stijena i rezultati trasiranja podzemnih tokova) te na temelju podataka dostupnih iz istražno-eksploatacijskih bušotina (mjerene razina i oscilacija podzemnih voda), sliv je podijeljen u zone različite ranjivosti izvorišta pod utjecajem stupnja okršavanja vodonosnika. Središnji i jugoistočni dio sliva predstavlja područje u kojem nema nikakve osnove smanjiti ranjivost izvora, budući da su prema rezultatima trasiranja upravo ta područja najvećih brzina podzemnih tokova. Iako su brzine podzemnih tokova veće od 10 cm/s, zbog velikih udaljenosti vremenski dotok je veći od jednog dana, čime ovo područje ispada iz prve klase ranjivosti Slovenskog pristupa, što nije opravdano. U prilog tome ide i činjenica da se na tom području nalaze istražne bušotine i da je izmjerena oscilacija razina podzemnih voda od čak stotinjak metara na obje bušotine. Također, područje je određeno izdvajanjem većih i važnijih rasjeda koji definiraju pretpostavljen dominantni smjer tečenja podzemnih voda. Druga zona je izdvojena na području gdje postoje dokazane podzemne vodne veze, ali s mnogo manjim brzinama i mnogo duljim vremenom putovanja. Treća zona ona koja je potpunim ili relativnim barijerama izdvojena iz sliva i samo u određenim hidrološkim uvjetima voda se preljeva preko barijera i izlazi na izvorima Jadro i Žrnovnica.



Slika 7.63. Izdvojene klase ranjivosti izvora ovisno o stupnju okršivosti vodonosnika

Ako se ovako definiran parametar K rasterski pribroji već određenoj ranjivosti vodonosnika (slika 7.61) rezultirajuća karta predstavlja kartu ranjivosti izvora Jadra i Žrnovnice dobivena pomoću modificirane COP+K metode. Ova karta shematski je prikazana na slici 7.64, a u mjerilu 1:50 000 prikazana u Prilogu 1.



Slika 7.64. Karta prirodne ranjivosti izvora modificiranom COP+K metodom

Na ovaj način analiza ranjivosti izvora je usklađena s preporukama COP+K metode, ali je i modificirana kako bi bila pogodnija za promatrano područje, te se može smatrati prijedlogom hrvatskog pristupa za procjenu prirodne ranjivosti izvorišta u kršu. Uz već istaknute modifikacije COP metode koje su primijenjene u ovoj analizi, predloženi su i prilagođeni pokazatelji za određivanje parametra K, tj. za ocjenu okršene mreže kanala. U prvom redu nije promatrano vrijeme dotoka podzemne vode do izvora, već prividna brzina toka jer zbog velikih udaljenosti vrijeme dotoka ne izdvaja visoku klasu ranjivosti. Osim toga, hrvatska zakonska regulativa zaštite izvorišta pitke vode kao kriterij uzima vrijeme dotoka ili brzinu toka, ovisno što je nepovoljnije. Također je u procjeni okršenosti i razvijenosti mreže kanala u obzir uzeta strukturno-tektonska analiza rasjeda, čime se preciznije definirala granica pojedinih klasa K parametra. I na kraju, za ukupnu prirodnu ranjivost izvora ostavljena je podjela na pet klasa ranjivosti jer detaljnije izdvaja područja koja trebaju maksimalnu zaštitu i područja koja su prirodno zaštićenija. Odnos površina pojedinih klasa za sve tri metode (standardna COP, modificirana COP i modificirana COP+K) prikazane su u tablici 7.10.

Ova metoda pogodnija je za procjenu ranjivosti izvora u kršu zato što za razliku od SINTACS metode koristi dostupnije i vjerodostojnije podatke (SINTACS koristi parametar hidrauličke vodljivosti vodonosnika koje je u kršu teško mjeriti i procijeniti njegov prostorni raspored), a za razliku od EPIK metode mnogo je detaljnija i preciznija jer zonira parametar K.

Tablica 7.10. Odnos površina

KLASA RANJIVOSTI	STANDARDNA COP		MODIFICIRANA COP		MODIFICIRANA COP+K	
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
VRLO VISOKA	175,5	30,97	112,38	19,81	84,43	14,92
VISOKA	141,06	24,89	154,13	27,17	214,65	37,90
UMJERENA	180,54	31,86	229,61	40,47	178,74	31,56
NISKA	67,88	11,98	63,95	11,27	67,01	11,83
VRLO NISKA	1,74	0,31	7,3	1,29	21,47	3,79

## 7.8. Validacija dobivene karte ranjivosti

Vrlo važan dio procjene ranjivosti vodonosnika je analiza rezultata i ocjena njihove pouzdanosti temeljem stvarnih pokazatelja stanja. Dosad je objavljeno mnogo radova u kojima se na nekom području istraživanja primjenjivalo više metoda za procjenu ranjivosti podzemnih voda s ciljem odabira najpogodnije metode (*Gogu et al., 2003; Vias et al., 2005; Andreo et al., 2006; Neukum & Hötzl, 2007; Neukum et al., 2008; Ravbar & Goldscheider, 2009*). Pri tome se uvijek, pa tako i u ovom doktorskom radu, potvrđivalo da je ranjivost relativno svojstvo, čija procjena uvelike ovisi o korištenim parametrima, dostupnim podacima, izboru metode i subjektivnoj interpretaciji. *Neukum & Hötzl (2007)* u svom radu predlažu reklasifikaciju karata ranjivosti dobivenih različitim metodama na jednu jedinstvenu podjelu preko percentilne distribucije, čime bi se omogućilo standardiziranje postupka procjene ranjivosti bez mijenjanja ulaznih parametara. Na taj način rezultati imaju minimalna odstupanja, čime se olakšava odabir najpogodnije metode. U svakom od slučajeva testiranja metoda istaknuta je potreba za uspostavljanjem standardnog pristupa ocjene rezultata dobivenih karata ranjivosti, što se naziva validacija rezultata analize ranjivosti.

U spomenutim radovima predloženo je nekoliko metoda validacije, od kojih su učestale korištenje rezultata terenskih istraživanja (najčešće trasiranje umjetnim traserima, ali i analiza hidrodinamičnih odnosa u slivu i analize prirodnih trasera) (*Goldscheider et al., 2001; Perrin et al., 2004*). Uz to, predlažu se i različite numeričke metode (analiza osjetljivosti i sl.) kao i različite kombinacije spomenutih (*Napolitano & Fabbri, 1996; Gogu & Dassargues, 2000b; Neukum et al., 2008; Holman et al., 2005*). Pri izboru odgovarajuće metode validacije dobivene karte ranjivosti jako je važno uzeti u obzir veličinu sliva. *Goldscheider et al. (2001)* napominju da su rezultati trasiranja pogodni za validaciju manjih slivova, što je jako dobro predočeno u nekoliko radova.

*Perrin et al. (2004)* na slivu površine 20 km<sup>2</sup> koriste tri različita trasera od kojih se jedan ubacuje u ponor (na mjestu koncentrirane infiltracije), drugi se raspršuje po određenom dijelu površine (simulira se difuzna infiltracija), dok se treći nanosi po površini nepropusnih naslaga (površinsko otjecanje i alogeno napajanje vodonosnika). Opažanjem pojave sva tri trasera na promatranim izvorima testira se vjerodostojnost rezultata procijenjene ranjivosti za svaku situaciju.

Sličnu metodu koristili su *Ravbar & Goldscheider (2007)* kada su na slivu površine 9 km<sup>2</sup> validirali rezultate analize ranjivosti simultanim trasiranjem iz različitih zona ranjivosti. Međutim, za sliv veće površine (sliv izvora Jadra i Žrnovnice ima cca 560 km<sup>2</sup>) to baš i nije prikladna metoda, najprije zbog izbora pravog mjesta trasiranja (budući da se tu radi o diskretnim podacima na tako velikoj površini), zatim zbog količine trasera koji bi se trebalo ubaciti i količina vode s kojom bi se traser trebalo ispirati (posebno kod difuzne infiltracije), ali i zbog vremena dotoka i opažanja...

Za validaciju rezultata provedene analize prirodne ranjivosti na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice korišteni su dostupni podaci prethodno provedenih istraživanja koji su djelomično uključeni u samu procjenu. Rezultati trasiranja (prikazani u poglavlju 2) nedvojbeno ukazuju na to da su ponori i zone oko ponora vrlo ranjiva područja, posebno u smjerovima gdje nagib terena omogućuje stvaranje površinskih tokova koji ispiru površinu terena i koncentrirano uviru u podzemlje. Karta ranjivosti dobivena ovim pristupom razlikuje ponore kao zone vrlo visoke ranjivosti, a udaljavanjem od ponora ranjivost se smanjuje. Također je rezultatima

trasiranja (izračunom prividnih brzina podzemnih tokova) potvrđeno postojanje privilegiranih i sporednih smjerova toka podzemne vode, koji ovise o postojanju potpunih i relativnih hidrogeoloških barijera u slivu, kao i smjer pružanja glavnih rasjednih zona. Geološka građa, mnoštvo prisutnih geomorfoloških objekata na površini sliva, te podaci provedenih trasiranja ukazuju na vrlo dobro razvijenu okršenu mrežu kanala u podzemlju, što dodatno opravdava činjenicu da je preko 50% površine sliva svojim prirodnim značajkama označeno kao područje vrlo visoke i visoke ranjivosti.

## 8. Analiza opasnosti, izrada karata potencijalnih onečišćivača

U prošlosti je gotovo cijeli sliv izvora Jadra i Žrnovnice bio slabo naseljeno područje s relativno malom potrošnjom vode, što je značilo i male količine otpadnih voda. Porastom životnog standarda – gradnjom prometnica, razvojem turizma i industrije, izgradnjom komunalnih i regionalnih vodovoda, povećala se i količina otpadnih voda, posebno u područjima krških polja ili na njihovim rubovima. Budući da ondje nema prirodnog površinskog prijemnika otpadne vode, uobičajeno je da se otpadne vode ispuštaju u tlo, odnosno najčešće u morfološke depresije, vrtače, jame i ponore.

Sva obilježja krških područja, koja su već više puta istaknuta u ovom radu (brza koncentracija površinskih tokova, koncentrirano prodiranje u podzemlje i brza infiltracija do podzemnih voda, kratko vrijeme zadržavanja u podzemlju), ne omogućavaju otopljenju otpadnoj tvari pročišćavanje prirodnim načinom (disperzija, sorpcija, razgradnja i sl.), te se na krškim izvorima otpadna tvar pojavljuje vrlo često, po količini i sastavu neznatno promijenjena. Ukoliko se otpadne tvari ispuštaju u krškom području kroz dulji vremenski period, dolazi do promjene (pogoršanja) kakvoće podzemne, odnosno izvorske vode do granica njene upotrebljivosti u opskrbi stanovništva vodom za piće. To obično dovodi do potrebe primjena skupih metoda pročišćavanja, kojima se voda treba podvrći prije isporuke potrošačima, ili dopremanju potrebnih količina vode iz drugih, udaljenih slivova.

Niti jedno niti drugo rješenje nisu poželjna i ekonomski su neisplativa, bez da se uopće spominju štetne posljedice do kojih može doći usred narušavanja ekološke ravnoteže u prirodnim ekosustavima. Stoga se svim sredstvima treba posvetiti rješavanju problema porasta onečišćenja, dok još posljedice nisu trajne i nepopravljive. U poglavlju 5 prikazana je kakvoća vode na izvorima Jadro i Žrnovnica kao i trendovi onečišćenja. Prema tim pokazateljima izdvojeni su potencijalni onečišćivači koji bi mogli imati značajan negativni utjecaj na kakvoću izvorskih voda te su dalje analizirani u skladu s preporukama projekta COST 620.



## 8.1. Identifikacija izvora opasnosti za kakvoću podzemne vode u slivu

Podaci o mogućim onečišćivačima na slivu prikupljeni su kombinacijom različitih metoda. Glavni izvor podataka u početnoj fazi istraživanja bio je Prostorni plan Splitsko-dalmatinske županije (*PPSDŽ, 2002*), u kojem su na jasan i precizan način izdvojeni problemi negativnih antropogenih utjecaja od gospodarskih djelatnosti, te načini zaštite svih prirodnih resursa, pa tako i vode. Osim toga, onečišćivači su izdvojeni iz topografskih karata (prometnice, naselja) i novelirani satelitskim snimkama novijeg datuma (izdvojeni novoizgrađeni objekti – industrijske zone i sl.). Terenskim rekognosciranjem potvrđeno je postojanje izdvojenih onečišćivača, te su dopunjeni podaci o novim manjim objektima koji nisu vidljivi u dostupnim kartama (lokalna odlagališta otpada i ispusti otpadnih voda). Na temelju podataka prikupljenih i uvrštenih u bazu potencijalnih i aktivnih onečišćivača, na području sliva Jadra i Žrnovnice izdvojen je velik broj mogućih izvora onečišćenja. O nekima postoji dovoljno podataka i detaljno su istraženi, dok je utjecaj drugih u velikoj mjeri procijenjen. Kod prikupljanja podataka o onečišćivačima, i njihovog prostornog lociranja, najprije se vodilo računa o vrstama onečišćenja kojima su izložene podzemne vode u kršu, te se na temelju toga pretpostavilo postojanje mogućih onečišćivača. Takvim pristupom potencijalni onečišćivači su grupirani prema vrsti i sastavu ispuštene tvari koja onečišćuje podzemne vode, a pri tome su opisana i njihova osnovna svojstva, te ponašanje u podzemlju. U drugoj fazi podaci o onečišćivačima obrađeni su u skladu sa smjernicama COST 620 projekta opisanima u poglavlju 6.6.

### 8.1.1. Onečišćivači prema vrsti i sastavu ispuštene tvari

**Organska onečišćivala** su različiti organski spojevi, ugljikovodici poput: nafte i njezinih derivata, zatim deterdženata, pesticida, organskih otapala, raznih boja, ulja i masti, te drugih sličnih tvari. U podzemlje dolaze kao posljedica štetnog antropogenog djelovanja uslijed nezbrinjavanja i ispuštanja otpadnih voda iz kućanstava i industrije, odlaganja otpadne organske tvari iz prehrambene industrije ili iz kemijske i petrokemijske industrije, ispiranja poljoprivrednih površina tretiranih pesticidima... Na području sliva Jadra i Žrnovnice izvor

organskog onečišćenja može biti i benzinska postaja ili bilo koja servisna stanica za popravak vozila različitih namjena, kamenolomi, energetska postrojenja i slično. Problematične su i lagune za skupljanje oborinske vode s prometnica.

Ponašanjem organskog onečišćenja u tlu, u nezasićenoj i zasićenoj zoni vodonosnika, upravljaju fizikalno-kemijski procesi (sorpcija, taloženje...), te kemijske promjene izazvane kemijskim reakcijama ili biogeokemijskim procesima. Organsko onečišćenje u tlu, kao i njegovo procjeđivanje do podzemne vode, može usporiti veća količina humusa koja se može nalaziti u tlu.

**Anorganska onečišćivala** su tvari i spojevi poput: nitrata, fosfata, sulfata, klorida, teških metala, i slično. Anorgansko onečišćenje mogu uzrokovati nepročišćene sanitarne otpadne vode naselja, industrijske otpadne vode u čijem se sastavu, kao posljedica proizvodnog procesa, mogu naći neki od navedenih spojeva, te procjedne vode s poljoprivrednih površina i prometnica. U podzemlje mogu doći ispiranjem tla pripadajućeg sliva ili izravnim ispuštanjem u podzemlje, pa prema tome izvori anorganskog onečišćenja u slivu Jadra i Žrnovnice mogu biti posljedica upotrebe mineralnih gnojiva u poljodjelstvu, metalno-prerađivačkih i servisnih usluga, odlagališta otpada, otpadnih voda iz domaćinstava, zbog značajne upotrebe deterđenata, ispušni plinovi motornih vozila itd.

Ponašanjem anorganskih tvari unesenih u podzemlje upravljaju hidrodinamički procesi, ali u područjima gdje je krški vodonosnik prekriven tlom i gdje je razvijena epikrška zona, dominantniji su procesi filtracije kroz sorpciju, desorpciju, kationsku izmjenu, precipitaciju i koprecipitaciju. I ovdje nazočnost humusa i čestica dimenzija gline onemogućava ili bitno usporava procjeđivanje istih do podzemne vode.

**Mikroorganizmi (bakterije i virusi)** također predstavljaju jedan važan oblik onečišćenja. Bakterije i virusi su značajan pokazatelj zdravstvene ispravnosti vode, pa se zbog toga, prema Pravilniku o parametrima sukladnosti i metodama analize vode za ljudsku potrošnju (*NN, 2013b*), njihova prisutnost utvrđuje u vodi namijenjenoj vodoopskrbi. Osnovni izvori mogućeg mikrobiološkog onečišćenja podzemnih voda u slivu su: nedostatak kanalizacijske infrastrukture (otpadne vode iz domaćinstva), neodgovarajuće dimenzionirane i nefunkcionalne sabirne i septičke jame, nedostatak sustava za pročišćavanje otpadnih voda, peradarske i stočarske farme, te uporaba organskih gnojiva.

Kretanje mikroorganizama kroz podzemlje je složen proces koji uključuje mehanizam transporta, disperzije i filtracije, te na taj način smanjenje broja mikroorganizama u poroznoj sredini može biti značajno. U krškim vodonosnim sustavima uvjeti toka ne pružaju prirodnu zaštitu od mikrobiološkog onečišćenja kao u sredinama međuzrnske poroznosti, tj. ne postoje izraženi procesi filtracije, a voda se kratko zadržava u podzemlju, pa ne dolazi do odumiranja mikroorganizama. Zdravstvena ispravnost vode za piće u sustavima javnih vodovoda osigurava se dezinfekcijom vode koja je propisana zakonom, pa javnim vodovodima ne prijete opasnost od onečišćenja mikroorganizmima. Međutim, ljudi koji se individualno opskrbljuju vodom trebaju posebno obratiti pozornost na ovu grupu onečišćivača.

### 8.1.2. Onečišćivači prema gospodarskim djelatnostima

Grupiranje onečišćivača prema gospodarskim djelatnostima u skladu je sa smjericama COST 620 projekta i osnova je za izradu klasificiranih opasnosti. Numeracija i nazivlje opasnosti, kao i dodijeljene težinske vrijednosti opasnosti, odgovaraju **tablici 6.27**.

#### *1. Infrastrukturni objekti*

##### **1.1. Otpadna voda:**

###### 1.1.1. Naselja s kanalizacijskim sustavom (H=35)

Na području sliva zasad samo dva naselja imaju riješen sustav javne odvodnje, a to su Dugopolje i Klis. Ovi sustavi tek su odnedavno u funkciji, a idejnim rješenjem kanalizacijskog sustava Split-Solin usvojen je koncept priključenja koncentriranog dotoka kanalizacije Klis-Dugopolje na sustav Split-Solin s konačnom dispozicijom podmorskim ispustom. Time se otpadne vode iz druge zone sanitarne zaštite izvora odvođe iz sliva rijeke Jadro, čime se izvorska voda donekle rasterećuje mikrobiološkog onečišćenja.

###### 1.1.2. Naselja bez kanalizacijskih sustava (H=70)

Većina naselja na području sliva nema kanalizacijsku infrastrukturu, iako je Prostornim planom Splitsko-Dalmatinske županije (*PPSDŽ, 2002*) predviđena izgradnja zasebnih sustava odvodnje s uređajima za pročišćavanje za mnoga veća naselja (Muć, Neorić, Prugovo, Brštanovo, Sutina, itd.). Uređaji će trebati otpadnu vodu očistiti na II. vrstu, koja će se zatim upustiti u tlo, a ponegdje će se pročišćena voda moći koristiti za navodnjavanje. Za sada, ova

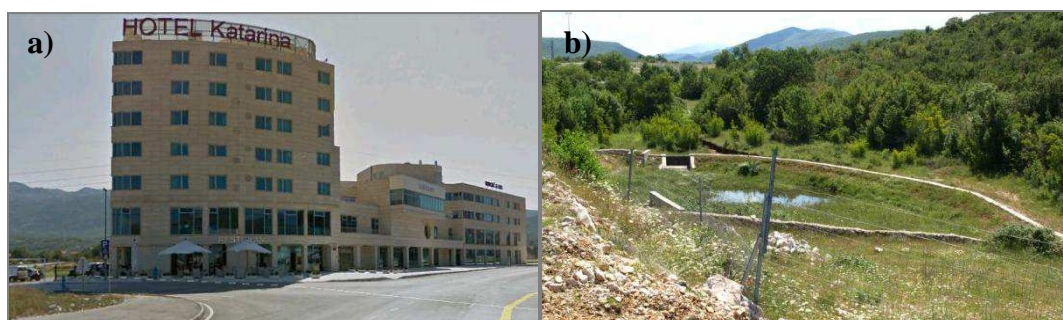
naselja predstavljaju najveći pritisak na kakvoću podzemnih voda, što je vidljivo iz povremenog bakteriološkog onečišćenja izvorske vode. Ono se najviše pojavljuje u hidrološki iznimno vlažnim razdobljima kojima prethode dugotrajna sušna razdoblja. Tada se akumulirana onečišćenja u septičkim jamama ispiru u podzemlje i jako onečišćuju podzemnu vodu. Unutar ove klase opasnosti korišten je faktor rangiranja ( $Q_n=0,8 - 1,2$ ) prema veličini naselja, tako da veća naselja predstavljaju nešto veću opasnost za podzemne vode od manjih zbog količine ispuštene štetne tvari.

### 1.1.3. Izdvojeni pojedinačni objekti bez kanalizacije (H=45)

U ovu kategoriju opasnosti izdvojen je hotel Katarina s četiri zvijezdice, koji se nalazi na području industrijske zone Dugopolje (slika 8.1. a). Ovo je novoizgrađeni objekt kapaciteta 74 smještajne jedinice i mnoštvom različitih drugih sadržaja, a nalazi se unutar druge zone zaštite izvora Jadro, te kao takav predstavlja određenu opasnost za kakvoću izvorske vode.

### 1.1.8. Otjecanje s asfaltiranih površina (H=25)

U ovu skupinu onečišćenja spadaju lagune za sakupljanje oborinske vode s trase Jadranske autoceste koja zbog prolaska zaštitnim zonama ima zatvoreni sustav odvodnje. Ove lagune za sakupljanje oborinske vode ili tzv. mastolovi (slika 8.1. b) pretvaraju linijsko opterećenje ceste u točkasti onečišćivač s jednostavnijim sustavom kontrole i nadzora.



Slika 8.1. a) hotel Katarina na području Dugopolja; b) mastolov kod odmorišta Radošić

## **1.2. Komunalni otpad:**

### 1.2.1. Odlagališta otpada (H=40)

Neodgovorno postupanje s otpadom različitog sastava i porijekla, odnosno njegovo nekontrolirano odbacivanje, također predstavlja opasnost po kakvoću podzemne vode.

U podzemlje dospijeva ispran oborinama, a također predstavlja raspršen izvor onečišćenja. U posljednje vrijeme otpadu se pridaje sve veća pažnja i za vjerovati je da će se s podizanjem svijesti o štetnim posljedicama lošeg gospodarenja otpadom smanjivati njegov negativni utjecaj na okoliš. No, kako je negativan utjecaj nagomilan, treba vremena da se saniraju postojeća odlagališta krutog otpada, posebno ona nekontrolirana. Takvih nekontroliranih odlagališta otpada u slivu ima na više mjesta (21 izdvojena lokacija), obično u zaklonjenim prostorima vrtača, makiji i uz slabo prometne makadamske puteve. Dva odlagališta su izdvojena (*Biondić et al., 2009*) zbog značajnog utjecaja na kakvoću podzemne vode (jedno u Gornjem Muću, jedno između Dugopolja i Klisa) i njima je dodijeljen faktor rangiranja 1.2 u odnosu na sva ostala divlja odlagališta.

### 1.2.3. Sanitarni deponij (H=50)

Službena sanitarna odlagališta otpada predstavljaju zasebnu kategoriju opasnosti. Odlagalište komunalnog otpada grada Splita "Karepovac", na koji se odlaže i otpad s područja Solina, Kaštela i Omiša, nalazi se nizvodno od sliva Jadra i Žrnovnice na fliškim naslagama te ne može utjecati na kakvoću podzemnih voda spomenutih izvora. Za razliku od toga, unutar sliva nalazi se odlagalište grada Sinja "Mojanka" (**slika 8.2. a**) na području Kukuzovca s desne strane regionalne ceste Split-Sinj. Odlagalište je locirano na granici III. i IV. zone vodozaštite izvora Jadro (nema podzemne vodne veze s izvorom Žrnovnice). Odlagalište je otvoreno 1964. godine, ograđeno je i čuvano. Na odlagalištu se odlaže komunalni i tehnološki otpad, a važno je spomenuti da se odlaže i životinjski otpad. Hidrogeološkim istraživanjima koja su 2007. godine provedena na tom području, detaljno je ispitan utjecaj odlagališta na podzemne vode u slivu Jadra i Žrnovnice (*Biondić B. & Biondić R., 2007*). Tom je prilikom potvrđena inertnost deponiranog otpada i uz dobro održavanje relativno mali utjecaj na podzemne vode. Odlagalište je pod upravom komunalnog poduzeća "Vodovod i čistoća" Sinj.

## **1.3. Gorivo, benzin, nafta:**

### 1.3.6. Benzinska postaja (H=60)

Na području sliva evidentirane su dvije benzinske crpke: INA d.d. – benzinska postaja Dicmo, te OMV Istrabenz Dugopolje (**slika 8.2. b**). Obje imaju vodopravnu dozvolu Hrvatskih voda, te izvedbom zadovoljavaju sve uvjete o sprječavanju negativnog utjecaja na podzemne vode stoga je za obje stavljen faktor vjerojatnosti pojave onečišćenja 0,90, a budući da se OMV

postaja nalazi na brzoj cesti prema Splitu i bilježi veći promet, njen je faktor rangiranja nešto veći u odnosu na drugu benzinsku postaju.



Slika 8.2. a) odlagalište Mojanka; b) OMV - benzinska postaja Dugopolje

## 1.4. Promet i prijevoz:

### 1.4.1. Prometnice, neosigurane (H=40)

Intenzivnu gradnju autocesta i drugih prometnica slijedi i pojačani promet, odnosno višestruki postotak povećanja prometnih vozila i sve veća degradacija područja uz prometnice.

Onečišćivači koji mogu biti posljedica prometa svrstavaju se u dvije osnovne skupine:

- prvu skupinu čine stalna onečišćenja, koja mogu potjecati od odvijanja prometa (gubitak prevoznih dobara rasipavanjem ili kapanjem), trošenjem kolovozne konstrukcije, trošenjem dijelova vozila (kočnice, gume, ispušni plinovi, ulja i masti), te od onečišćenja atmosfere (prašina, smog, aerosoli i dr.);
- drugu skupinu onečišćenja čine povremena onečišćenja do kojih dolazi u prvom redu prilikom nezgoda vozila koja prevoze opasne ili štetne tvari (to je regulirano "Zakonom o prijevozu opasnih tvari" (NN, 2007)), te uslijed održavanja prometnica u zimskom periodu (onečišćenje kloridima od soli kojom se sprječava zaleđivanje kolnika zimi).

Slivom Jadra i Žrnovnice prolazi trasa Jadranske autoceste Rijeka-Zadar-Split-Dubrovnik (JAC), te dvije državne ceste D1 Macelj-Zagreb-Karlovac-Gračac-Knin-Sinj-Split i D62 Dugopolje-Šestanovac-Vrgorac. Spoj JAC-e i brze ceste Split-Sinj ostvaruje se preko čvora Dugopolje. Tu su još dvije ceste D60 Brnaze-Trilj i D220 Trilj-Kamensko. Ovdje su još županijske i razne pristupne ceste manjeg značenja. Kako je već utvrđeno da autocesta ima zatvoreni sustav odvodnje, njoj nije dodijeljen težinski faktor opasnosti, ali je prikazana na neklasificiranoj karti opasnosti. Ostale ceste su prema važnosti i prometnom opterećenju



rangirane, te im indeks opasnosti HI iznosi u rasponu od 32 – 48 ( $Q_n = 0,8$  za lokalne, 1,0 za županijske i 1,2 za državne ceste).

## 1.6. Ostali hazardi:

### 1.6.1. Groblja (H=25)

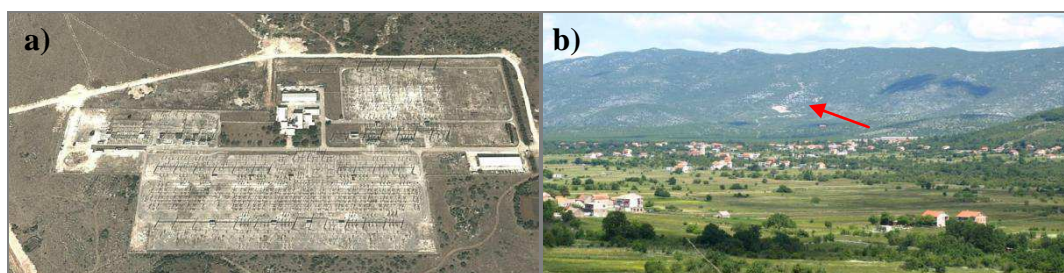
Gotovo svako malo veće naselje u slivu ima groblje, koje je s aspekta zaštite podzemnih voda također izvor onečišćenja. Ipak, kako se ovdje radi o područjima vrlo malih dimenzija, s vjerojatno neznatnim utjecajem na kakvoću podzemne vode, za potrebe ove analize naseljima nije dodijeljena dodatna vrijednost opasnosti zbog groblja.

### 1.6.4. Transformatorska stanica (H=30)

Utjecaj na kakvoću podzemnih voda mogu imati i prijenosni sustavi, tzv. transformatorske stanice, kod kojih tijekom remonta može doći do izlivanja trafo ulja i ostalih sredstava koja se koriste pri održavanju i remontu takvog postrojenja. Ovdje treba izdvojiti trafostanicu "Konjsko" (slika 8.3. a) kao najveći objekt prijenosnog sustava od državnog značenja koja se nalazi uz državnu cestu Split-Muč.

### 1.6.5. Aktivni i napušteni vojni objekti (H=35)

Na području općine Sičane, na brdu u blizini kamenoloma, nalazi se "Brodmerkur" skladište eksploziva koje spada u aktivni vojni objekt i predstavlja opasnost za podzemnu vodu (slika 8.3. b).



Slika 8.3. a) Transformatorska stanica Konjsko; b) panorama Dicmo, na brdu se vidi skladište eksploziva

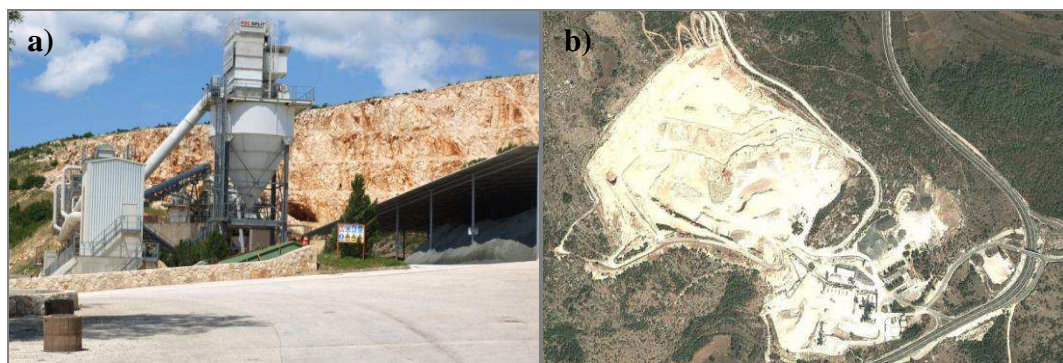
## 2. Industrijske aktivnosti

### 2.2. Kamenolomi:

#### 2.2.3. Kamenolom (H=25)

Utjecaj aktivnosti, koje se odvijaju tijekom eksploatacije kamena na podzemne vode mogući su: uslijed eventualnog razlijevanja/procjeđivanja nafte ili goriva iz vozila i mehanizacije uključene u radove na kamenolomu, te iz vozila koja odvoze kameni materijal; od otpadne vode iz prostora mehaničke radionice u sastavu kamenoloma; od otpadne vode iz sanitarnog čvora zaposlenih; uslijed ispiranja površine kamenoloma oborinama; uslijed nezgode, primjerice pri pretakanju i skladištenju goriva, itd. Međutim, ne manje značajan utjecaj kamenoloma na podzemne vode je i uklanjanje zaštitne zone trošenja (tla i epikrške zone) s površine terena čime se smanjuje mogućnost sorpcije različitih vrsta onečišćenja. Takvim zahvatima smanjuje se i dubina do podzemne vode, čime brzina procjeđivanja potencijalnog onečišćenja do podzemne vode raste. Zbog toga je nužno pridržavati se vodopravnih uvjeta te nakon prestanka eksploatacije provesti zahtjeve sanacije postojećih i budućih kamenoloma.

U slivu Jadra i Žrnovnice nalazi se nekoliko kamenoloma i to na lokacijama: Dugobabe, Križice (slika 8.4. a i b), Dicmo, Sičane i Klis-Kosa. Na svim područjima vadi se i obrađuje isključivo tehnički kamen. Često se uz kamenolome nalaze i druga industrijska postrojenja vezana uz tu djelatnost (obuhvaćena kategorijom industrijskih postrojenja). Kod Putišića na lokaciji Donji Dolac nalazi se kamenolom ukrasnog kamena i nekoliko postrojenja za piljenje i obradu tog kamena. Prostornim planom Splitsko-dalmatinske županije određeno je zatvaranje kamenoloma Klis-Kosa, tako da je vjerojatnost pojave onečišćenja na tom području smanjena ( $R_f=0,9$ ).

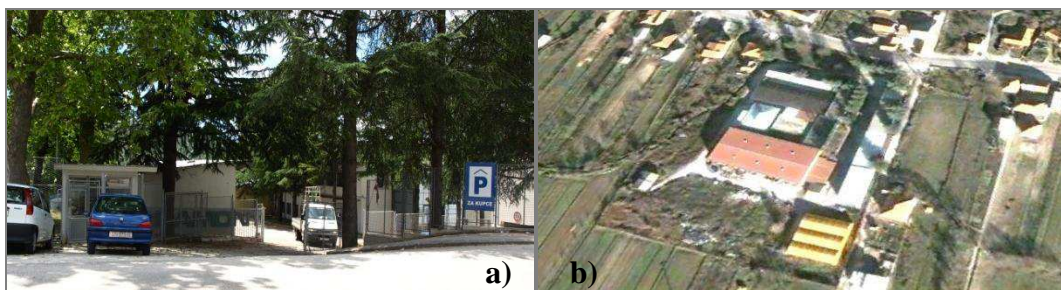


Slika 8.4. Kamenolom i betonara Križice: a) pogled sprijeda; b) pogled iz zraka

## 2.4. Industrijska postrojenja

### 2.4.4. Galvaniziranje (H=55)

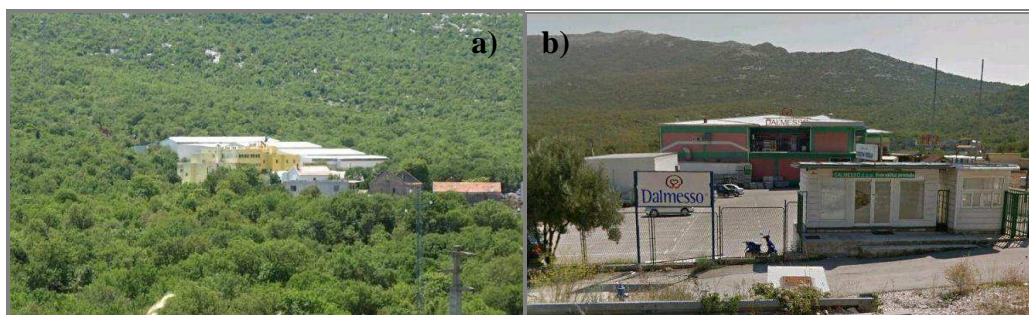
Na lokaciji Donji Muć nalazi se Metind – industrijsko postrojenje za preradu metala i galvanizaciju (slika 8.5. a i b). Velika težinska vrijednost opasnosti pokazuje da je to jedna od industrija koja predstavlja značajnu opasnost za kakvoću podzemnih voda. Ipak, iz satelitskih snimki vidljivo je da se uz postrojenje nalaze lagune za predtretman otpadnih voda, znači vode se donekle obrađuju prije upuštanja u podzemlje, što pruža određenu vrstu sigurnosti od štetnih posljedica njihovog djelovanja.



Slika 8.5. Metind, Muć - a) pogled s prijedaja; i b) pogled iz zraka

### 2.4.10. Prehrambena industrija (H=45)

Na području sliva nalazi se i nekoliko prehrambenih industrijskih pogona. Mogući ispusti otpadne tvari iz ove djelatnosti ispuštaju pretežito organsku tvar u okoliš, ali ona također nije zanemariva, već za svaki od pogona treba utvrditi količinu, sastav i ispuste kao i predtretmane otpadne vode prije ispusta. Ovdje se mogu izdvojiti dva značajnija industrijska objekta: Dalmesso – industrija mesa i mesnih prerađevina na području Klisa i SMS Kurtovići prehrambena industrija, koja se također nalazi na području Klisa (slika 8.6.a i b).



Slika 8.6. Prehrambena industrija a) SMS Klis Kurtovići; b) Dalmesso



2.4.11. Industrija – pogoni za proizvodnju građevinskog materijala (betonare i asfaltne baze) (H=40)

Utjecaji su slični prethodno nabrojenim kod kamenoloma, ali se ovdje mogu očekivati i različiti aditivi koji se koriste za postizanje određenih svojstava betona i ostalih proizvoda od betona i asfalta. Njihov sastav je vrlo različit, od sintetskih organskih spojeva do anorganskih komponenata. Na području sliva takvi objekti su: pogon betonare pokraj kamenoloma Križice, pogon betonare pokraj kamenoloma Dugobabe i asfaltna baza u Konjskom (**slika 8.7**). Kako nema izdvojene kategorije ovakve industrijske aktivnosti, dodijeljena je najniža vrijednost težinskog faktora ove kategorije, što je realno u odnosu na vrijednost ostalih industrija i kamenoloma koje su srodna djelatnost.

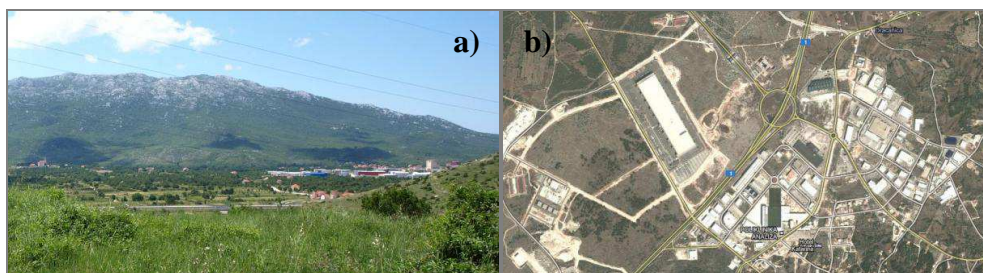


Slika 8.7. Asfaltna baza u Konjskom

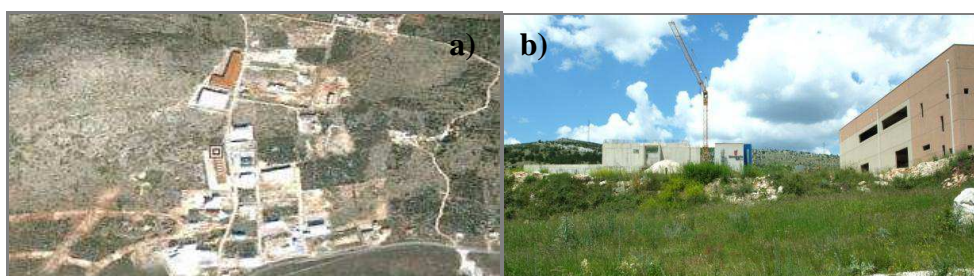
## 2.6. Industrijska skladišta

2.6.1. Skladišta raznih sirovina (H=60) – "Proizvodno-poslovne zone"

Na području sliva Jadra i Žrnovnice, ali i susjednih slivova, posljednjih godina intenziviraju se aktivnosti za izgradnju tzv. proizvodno-poslovnih zona kao centara od iznimne važnosti za razvoj gospodarstva na području Splitsko-dalmatinske županije. Takve zone već su izgrađene i u funkciji na području Dugopolja (**slika 8.8. a i b**) i Dicma (**slika 8.9. a**), a na području Muća trenutno su u fazi izgradnje Prisike 0 i 1 (**slika 8.9. b**). Općenito, proizvodno-poslovne zone obuhvaćaju različite aktivnosti. Najviše zastupljenih objekata predstavljaju skladišta raznih sirovina, ali ima i prodajnih salona, te uslužnih servisa. U planu je da popratni sadržaji takvih zona imaju i turističko-rekreacijske komponente, no zasad one još nisu zastupljene.



Slika 8.8. Poslovna zona Dugopolje a) panorama b) pogled iz zraka



Slika 8.9. a) Poslovna zona Dicmo; b) poslovna zona Prisike (kod Muća), u izgradnji

### 3. Poljoprivreda i stočarstvo

#### 3.1. Životinjske farme

##### 3.1.3. Industrijska farma (H=30)

Izdvojeno je nekoliko objekata koji predstavljaju opasnost za podzemne vode, a ulaze u ovu kategoriju. U prvom redu, radi se o peradarskoj farmi na području Gizdavca, a zatim i tri objekta napuštenih peradarskih farmi na području Dugopolja (slika 8.10). Iako ti objekti već dugo vremena nisu aktivne farme (čak su u vrijeme rata bila skladišta nepoznatog vojnog materijala), a trenutna im je funkcija nepoznata, smatra se da i dalje predstavljaju potencijalnu opasnost za kakvoću podzemnih voda.



Slika 8.10. Bivši peradarnici u Dugopolju

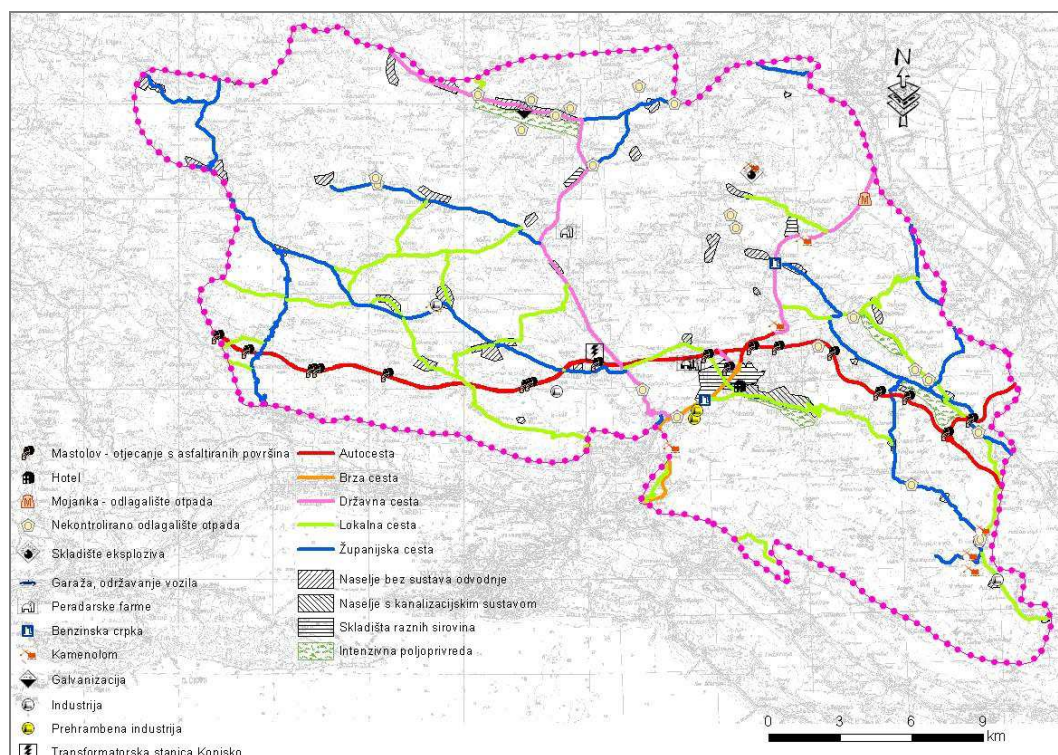
## 3.2. Poljoprivreda

### 3.2.4. Područje intenzivne poljoprivrede

Onečišćenje podzemne vode s poljoprivrednih površina može biti vrlo štetno budući da se na poljoprivrednim površinama koriste velike količine zaštitnih sredstava: pesticida, herbicida, insekticida i drugih, kao i velike količine mineralnih i organskih gnojiva. Ispiranjem tla oborinama ovi sastojci poniru u podzemlje i utječu na kakvoću vode. Ovo se događa kod navodnjavanja poljoprivrednih površina, što se u površinski bezvodnom području sliva posebno intenzivira tijekom sušnih razdoblja godine. Na području sliva značajnije poljoprivredne površine prisutne su na Dugopolju, Mućkom, Dicmanskom i Biskom polju.

## 8.2. Izrada karata neklasificirane i klasificirane opasnosti

Svi spomenuti onečišćivači pripremljeni su za kartografski prikaz. U bazi podataka razvrstani su u tri kategorije: točkasti, linijski i poligonski. Njihovim prostornim smještajem na području sliva dobivena je neklasificirana karta opasnosti (slika 8.11.) Postupak klasificiranja opasnosti prikazan je u tablici 8.1. i u skladu je s opisom iz poglavlja 8.1.2. Konačni rezultat ove analize opasnosti dan je kartom klasificiranih opasnosti (slika 8.12.).



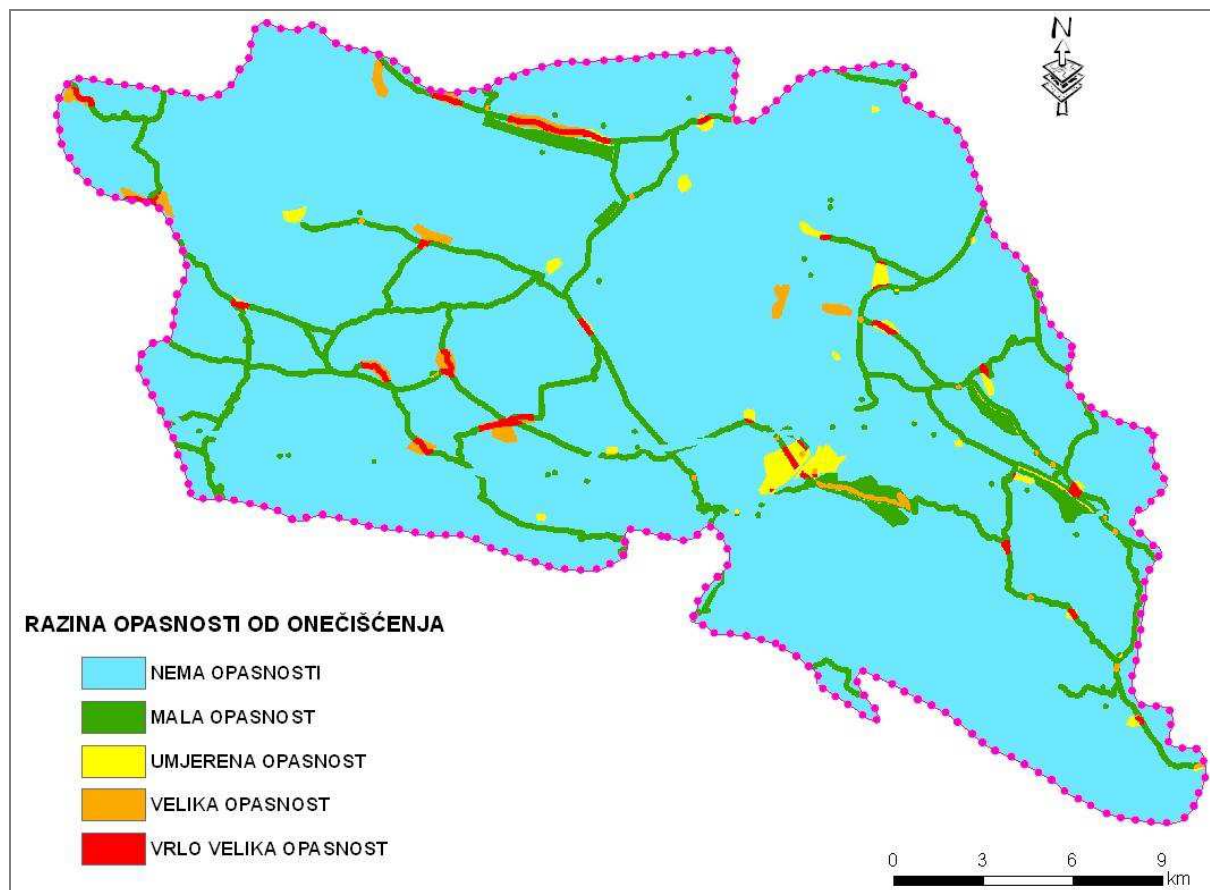
Slika 8.11. Karta neklasificiranih opasnosti na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice



Tablica 8.1. Prikaz rangiranja pojedinih onečišćivača u klasificirane opasnosti

KATEGORIJA OPASNOSTI	ONEČIŠĆIVAČ	TEŽINSKA VRIJEDNOST H	FAKTOR RANGIRANJA Q <sub>r</sub>	FAKTOR REDUKCIJE R <sub>r</sub>	INDEKS OPASNOSTI HI
<b>TOČKASTI ONEČIŠĆIVAČI</b>					
Benzinska crpka	OMV - Dugopolje	60	1	0,9	54
	INA - Dicmo	60	0,8	0,9	43,2
Industrija	Betonare, obrada kamena- Dugobabe, Križice, D.Dolac	40	1	1	40
	Asfaltna baza - Konjsko	40	1	1	40
Metalska industrija - galvanizacija	Metind, Muč	55	1	0,95	52,25
Transformatorska stanica	Konjsko	35	1	1	35
Kamenolomi	Dugobabe, Križice, Dicmo, Sičane, D.Dolac	25	1	1	25
	Klis - Kosa	25	1	0,5	12,5
Mastolov – otjecanje s asfaltiranih	17 lokacija	35	1	1	35
Sanitarni deponij	Mojanka - Kukuzovac	50	1	1	50
Nekontrolirano odlagalište otpada	Gornji Muč i Dugopolje	40	1,2	1	48
	Sva ostala (19 lokacija)	40	1	1	40
Aktivni vojni objekti	Skladište eksploziva "Brodmerkur"	35	1	1	35
Garaža, servis vozila	MAN prodajno-servisni centar	35	1	1	35
Izdvojeni objekt bez odvodnje	Hotel Katarina	45	1	1	45
Prehrambena industrija	Dalmesso i SMS Kurtovići	45	1	1	45
Životinjske farme	Peradarska farma Gizdavec	30	1	1	30
	Napuštene peradarske farme Dugopolje	30	1	0,8	24
<b>LINIJSKI ONEČIŠĆIVAČI</b>					
Cesta s odvodnjom	Autocesta i brza cesta	25	1	0,5	12,5
	Državna cesta	40	1,1	1	44
Nesigurna cesta	Županijska cesta	40	1	1	40
	Lokalna cesta	40	0,9	1	36
<b>POLIGONSKI ONEČIŠĆIVAČI</b>					
Naselja s kanalizacijskim sustavom	Dugopolje	35	1	1	35
Naselje bez sustava odvodnje	<0,1 km <sup>2</sup> - Čvrlijevo, Radošić, Osoje, Ercegovci, Blaca, Gornji Dolac, Konjsko	70	0,8	1	56
	0,1-0,2 km <sup>2</sup> - Kotlenica, Donji Dolac, Liska, Koprivno, Prugovo, Lečevica, Putišići, Gizdavec, Neorić	70	0,9	1	63
	0,2-0,3 km <sup>2</sup> - Bisko, Sutina, Gornji Muč, Krušvar, Sičane, Nisko, Prisoje	70	1	1	70
	0,3-0,5 km <sup>2</sup> - Kraj, Gornje Postinje, Vučevica, Korušce, Gornje Utore, Donje Postinje, Sušci, Dugobabe	70	1,1	1	77
	>0,5 km <sup>2</sup> - Brštanovo, Kladnjice, Veliki Bročanac i Donji Muč	70	1,2	1	84
Intenzivna poljoprivreda	Dugopolje, Bisko polje, Dicmansko polje, Muč	30	1	1	30
Skladišta raznih sirovina	Dugopolje, Dicmo	60	1	1	60
	Muč - Prisičke	60	1	0,5	30

Karta klasificiranih opasnosti izdvojila je dijelove sliva s jednakom razinom opasnosti na temelju već izgrađenih objekata koji mogu biti potencijalni onečišćivači podzemne vode. Iz karte je vidljivo da je najproblematičniji dio spoj naselja bez izgrađenog sustava javne odvodnje i prometnice. To odgovara trenutnoj realnoj situaciji, gdje su problemi u izvorskim vodama Jadra i Žrnovnice upravo posljedica mikrobiološkog onečišćenja. Osim toga, iz karte je vidljivo da je veliki dio sliva izvan opasnosti od onečišćenja, upravo zato jer nema izgrađenih objekata ili su objekti dobro izvedeni da se spriječi moguće onečišćenje (primjer autoceste). Ukoliko se analiziraju površine zastupljene pojedinom klasom opasnosti, dobije se situacija prikazana u **tablici 8.2.**, tj. potvrđeno je da gotovo 90% sliva nema opasnost od onečišćenja, a samo 0,71% površine sliva ima vrlo veliku razinu opasnosti.



Slika 8.12. Karta klasificiranih izvora opasnosti (hazarda) na području sliva

Tablica 8.2. Odnos površina sliva zastupljenih pojedinom klasom opasnosti

RAZINA OPASNOSTI	POVRŠINA SLIVA (km <sup>2</sup> )	UDIO POVRŠINE (%)
Nema opasnosti	508,92	89,65
Mala opasnost	44,42	7,82
Umjerena opasnost	5,28	0,93
Velika opasnost	5,03	0,89
Vrlo velika opasnost	4,01	0,71

Ukupnom analizom opasnosti dokazano je da stanje na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice nije alarmantno, niti su izdvojeni izrazito opasni izvori onečišćenja. Ipak, kako je trend povećanja onečišćenja u izvorskim vodama posljedica ubrzanog razvoja ovog područja, tj. širenja naselja i poslovnih zona, te povišenja životnog standarda, nužno je poduzeti mjere da se takav trend ne nastavi. Tu se u prvom redu misli na odgovarajuće zbrinjavanje otpadnih voda naselja izgradnjom sustava javne odvodnje i pročišćavanja otpadne vode, kao i na sanaciju postojećih divljih odlagališta, te modernizaciju postojeće cestovne infrastrukture. Na taj bi se način razina opasnosti mogla svesti na još manju mjeru, bez ograničenja razvoja.

## 9. Analiza rizika od onečišćenja podzemnih voda u slivu

Prema smjernicama projekta COST 620 analiza rizika podrazumijeva procjenu ukupnog rizika od onečišćenja podzemnih voda koji se dobiva preko indeksa intenziteta rizika i indeksa osjetljivosti na rizik.

Indeks intenziteta rizika predstavlja kombinaciju prirodne ranjivosti vodonosnika i procijenjene opasnosti (hazarda) na površini promatranog sliva i izdvaja one dijelove sliva koji su posebno ugroženi zbog postojećeg stanja i antropogenog utjecaja, a kao posljedica prirodnih uvjeta.

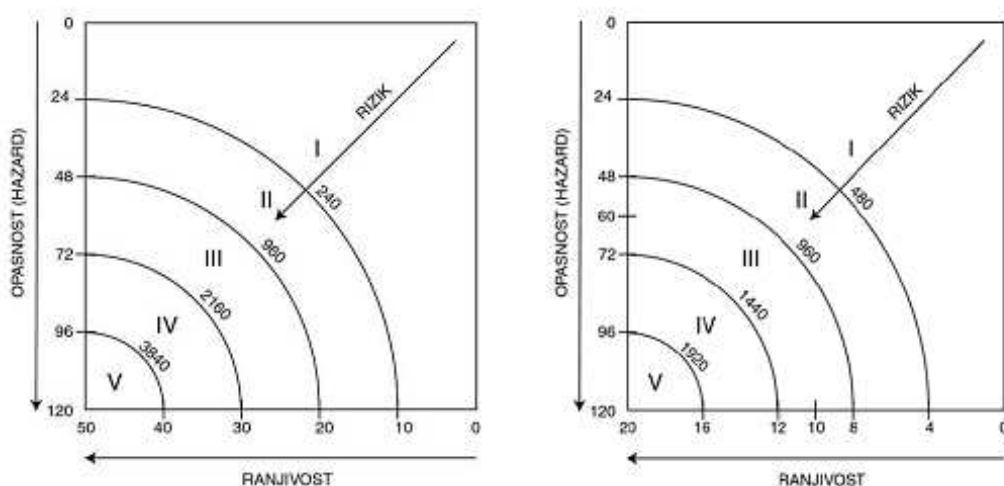
Procjena indeksa osjetljivosti na rizik temelji se na analizi štetnih posljedica do kojih bi došlo zbog narušavanja socijalno-ekonomske i ekološke vrijednosti vode, a uslijed nepovoljnog antropogenog djelovanja. U smjernicama projekta COST 620 nisu dane detaljne upute za procjenu ovog indeksa. U literaturi postoji vrlo malo primjera koji opisuju procjenu indeksa osjetljivosti na rizik. Prema *Ducci (1999)* rizik se procjenjuje kombinacijom tri sloja: ranjivosti vodonosnika, popisa opasnosti i vrijednosti vodonosnika. Pri tome se misli na socijalno-ekonomsku vrijednost vode, koja se prema *Ducci (1999)* određuje preko broja stanovnika koji se opskrbljuju vodom iz promatranog izvora, i broja radnika u industriji koja ovisi o promatranom izvoru (ovakav pristup predložen je prije Europskog pristupa, stoga terminologija nije ista, ali radi se o vrlo sličnim pojmovima). Nadogradnju ovakvog pristupa predlažu *Ravbar & Goldscheider (2007)* u sklopu Slovenskog pristupa gdje se indeks osjetljivosti na rizik dobiva kao kombinacija četiri utjecajna podfaktora: socijalna vrijednost (procjenjuje se prema broju stanovnika koji se opskrbljuju vodom iz promatranog izvora), uloga u poljoprivredi (na temelju površine koja se navodnjava), ekološka vrijednost (prema biološkoj raznolikosti i prisutnosti endemskih vrsta), te ostale aktivnosti (prema količini utrošene vode m<sup>3</sup>/god). Utjecaj pojedinih podfaktora se zbraja, a rezultat (zbroj) je indeks osjetljivosti na rizik koji razlikuje tri klase osjetljivosti (visoka, umjerena i niska). Međutim, danas postoje vrlo sofisticirane metode procjene ekonomske vrijednosti funkcija podzemnih voda, odnosno ukupne ekonomske vrijednosti vode koja je zbroj parcijalnih vrijednosti funkcija koje podzemna voda može imati (*Nakić, 2010; Görlach & Interwies, 2003; Direktiva 2006/118/EZ*). Tema je vrlo kompleksna, te zbog nedostatka potrebnih podataka i prihvatljive

metode koja bi ovu analizu provela na zadovoljavajućoj razini, u ovom radu nije procijenjen indeks osjetljivosti na rizik.

U literaturi se često može naići na slučaj procjene rizika od onečišćenja podzemne vode gdje se pod pojmom rizik ustvari ne radi razlika između pojedinih indeksa, a rizik se procjenjuje po metodologiji procjene indeksa intenziteta rizika. Tako je napravljeno i u ovom radu. **Konačni rezultat ove analize je karta rizika od onečišćenja podzemnih voda koja izdvaja dijelove sliva na kojima je nužno izvršiti prioritete sanacijske zahvate ukoliko se želi očuvati postojeća kakvoća vode.** Prikaz rizika od onečišćenja podzemnih voda na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice nalazi se u mjerilu 1:50 000 (**Prilog 2**).

Prema COST 620 projektu za procjenu rizika predložen je matematički algoritam (formula 6.9) odnosa ranjivosti i opasnosti. Ovakva jednadžba odražava situaciju u kojoj se zaštitni faktor prirodne ranjivosti množi s recipročnom vrijednosti indeksa opasnosti, čime područja velike ranjivosti (mali iznos zaštitnog faktora  $\pi$ ) i velikog indeksa opasnosti (uvrštavanjem recipročne vrijednosti dobiju se vrlo male vrijednosti) daju minimalni indeks intenziteta ranjivosti. Iz toga proizlazi: što je manja vrijednost RI indeksa, intenzitet rizika je veći. Dobivena vrijednost indeksa RI pomoću dijagrama prikazanog na **slici 6.30** omogućuje kartografski prikaz intenziteta rizika u pet klasa.

Osim ovog pristupa, postoje i drugi primjeri kombinacija ranjivosti i opasnosti za dobivanje intenziteta rizika. *Biondić et al. (2008)*, *Biondić (2005)* i *Meaški (2011)* predlažu malo modificiranu formulu procjene rizika, prema kojoj bi se rizik računao kao umnožak indeksa opasnosti i zaštitnog faktora. Za potrebe takvog izračuna modificirani su dijagrami odnosa (**slika 9.1.**) iz kojih je vidljivo da je ovaj slučaj primjenjiv za metode gdje se uvrštava indeks ranjivosti, a ne zaštitni faktor, budući da faktor kojim se izražava ranjivost s povećanjem ranjivosti raste (suprotno od prve metode). Ovom modifikacijom ipak je zadržano osnovno značenje metode i broj klasa intenziteta rizika.

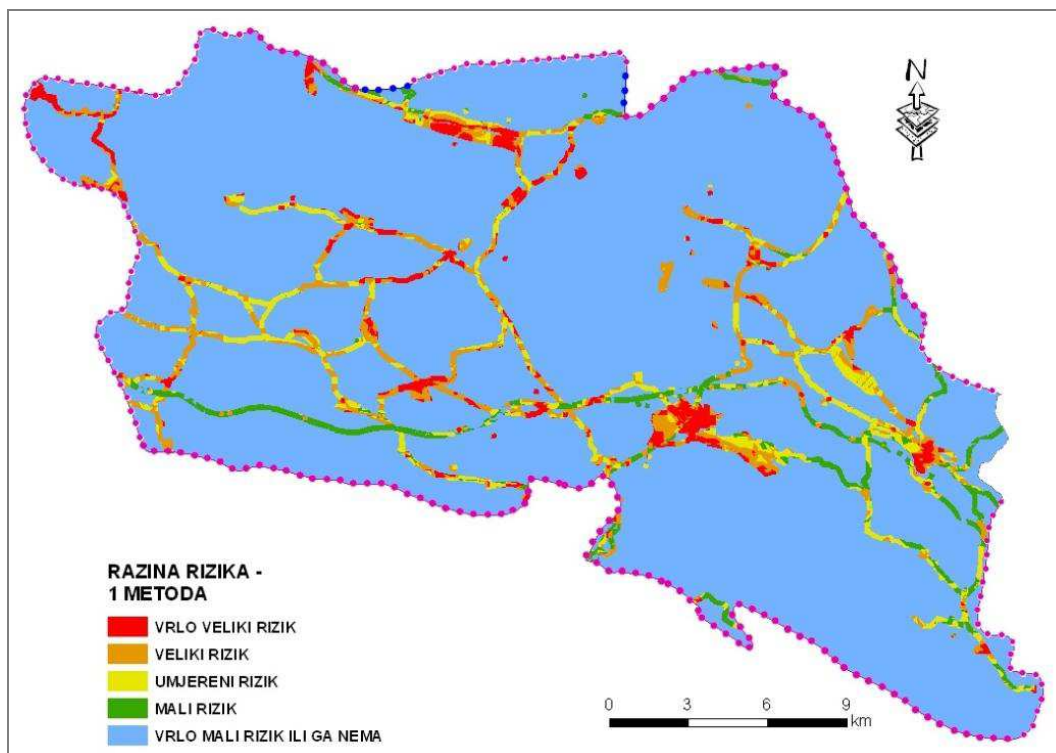


Slika 9.1. Kategorije rizika od onečišćenja krškog vodonosnika na području sliva izvora Kupice i Zelenog Vira i na području Plitvičkih jezera (prema *Biondić et al., 2008; Biondić, 2005*)

Za razliku od toga, *Ravbar & Goldscheider (2007)*, u tzv. Slovenskom pristupu procjene ranjivosti i rizika, predlažu sasvim drugačiji odnos, prema kojem se intenzitet rizika dobiva zbrajanjem indeksa ranjivosti (veći indeks ranjivosti predstavlja manju ranjivost) i indeksa opasnosti (veći indeks opasnosti predstavlja manju opasnost), te postoje samo tri klase intenziteta rizika. Na taj način rizik nije prisutan samo na području s prisutnim opasnostima, već on može biti posljedica isključivo visoke ranjivosti.

Za ovaj sliv indeks intenziteta rizika procijenjen je na oba načina i usporedbom rezultata predložen je prikladniji način.

Najprije je korištena formula COST 620 projekta, tako da je izračunat umnožak recipročne vrijednosti indeksa opasnosti i zaštitnog faktora iz modificirane COP metode i dobivene vrijednosti grupirane su u klase prema dijagramu na **slici 6.30**. Pri tome je važno napomenuti da se u ovom slučaju koriste jedinstvene vrijednosti ćelija rastera opasnosti i ranjivosti, nikako vrijednosti klase, kako bi svaka ćelija rastera izračunatog intenziteta rizika imala stvarnu vrijednost prije reklasificiranja. Rezultat ove analize prikazan je prvom kartom rizika (**slika 9.2**).



Slika 9.2. Prikaz indeksa intenziteta rizika izračunatog pomoću COST formule

Procjenom rizika po uzoru na Slovenski pristup zbrojen je raster vrijednosti klasa ranjivosti i klasa opasnosti i dobivena suma je grupirana u klase razina rizika. Pri tome je Slovenski pristup malo modificiran, jer je konačna podjela u tri klase rizika zamijenjena s ujednačenom raspodjelom od pet klasa (slika 9.3), čime su podaci ravnomjerno raspoređeni i omogućena je usporedba rezultata s ostalim metodama.

RANJIVOST	
KLASA	INDEKS
VRLO VELIKA	1
VELIKA	2
UMJERENA	3
MALA	4
VRLO MALA	5

+

OPASNOST	
KLASA	INDEKS
VRLO VELIKA	1
VELIKA	2
UMJERENA	3
MALA	4
VRLO MALA	5

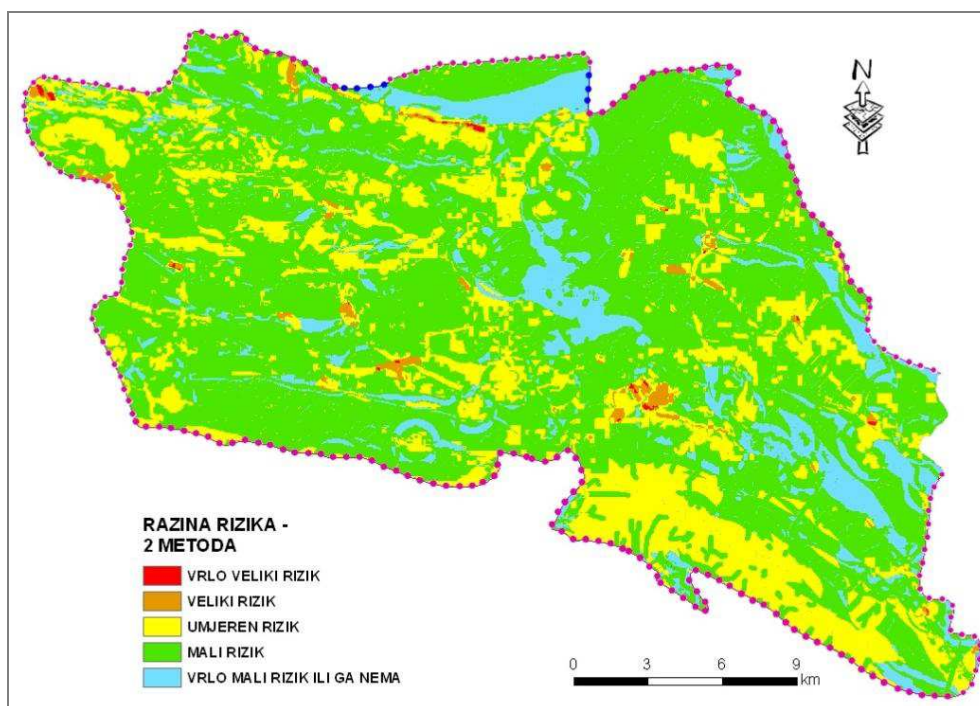
=

RIZIK		
RASPON	INDEKS	KLASA
2	1	VRLO VELIKI
3-4	2	VELIKI
5-6	3	UMJERENI
7-8	4	MALI
9-10	5	VRLO MALI

Slika 9.3. Shema procjene intenziteta rizika prema modificiranom Slovenskom pristupu

Prostornu raspodjelu rizika prema ovoj metodi prikazuje slika 9.4. Očigledna je velika razlika u odnosu na rizik dobiven prvom metodom, budući da ovdje rizikom nisu zahvaćeni samo dijelovi na kojima se već nalaze opasnosti, već je čitavom slivu dodijeljen određeni rizik bilo da opasnosti već postoje ili se radi o rizičnoj kombinaciji prirodnih uvjeta.





Slika 9.4. Intenzitet rizika prema modificiranom Slovenskom pristupu

U **tablici 9.1.** prikazan je odnos površina sliva s različitim razinama indeksa intenziteta rizika dobiven primjenom dviju različitih metoda. U prvoj metodi gotovo 90% sliva nema nikakav rizik, on je prisutan samo na području gdje postoji opasnost od onečišćenja podzemne vode, dok u drugoj metodi utjecaj prisutnih opasnosti nije moguće prepoznati, budući da ova metoda prepoznaje rizik od onečišćenja i kao posljedicu velike ranjivosti sliva. Prva metoda daje realniji prikaz trenutnog stanja s postojećim objektima na promatranom području, bilo da su oni aktivni ili samo potencijalni onečišćivači, no ne uzima u obzir druge parametre koji bi dali naslutiti kakav utjecaj bi mogao imati neki budući onečišćivač na području gdje trenutno rizika nema. Druga metoda ostavlja utjecaj ranjivosti tamo gdje trenutno nema opasnosti, što može biti vrlo korisno kod donošenja odluka o namjeni prostora i zaštiti zaliha podzemne vode.

Tablica 9.1. Odnos površina različitih razina intenziteta rizika

Indeks intenziteta rizika	POVRŠINE SLIVA			
	1. metoda		2. metoda	
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
<b>VRLO VELIKI</b>	12,61	2,22	0,69	0,12
<b>VELIKI</b>	23,29	4,10	6,4	1,13
<b>UMJERENI</b>	19,43	3,42	126,61	22,36
<b>MALI</b>	11,6	2,04	370,76	65,47
<b>VRLO MALI</b>	500,76	88,20	61,86	10,92

## 10. Zaključak

Podaci izneseni u ovom radu rezultat su složenih istraživanja, koja se već duži niz godina provode na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice, a sve zbog prepoznate velike važnosti koju vode ovih izvora imaju za okolno stanovništvo po pitanju vodoopskrbe, gospodarskih djelatnosti, ali i lokalnog ekosustava, kao i njihove sve veće ugroženosti u uvjetima gospodarskog i demografskog razvoja. Jadro i Žrnovnica su tipični krški izvori, smješteni na kontaktu propusnih karbonatnih stijena i obalnog fliškog pojasa, minimalne izdašnosti u ljetnim mjesecima i brzog reagiranja na hidrološke prilike. Jadro sa svojom srednjom količinom istjecanja od  $9 \text{ m}^3/\text{s}$  (u sušnom periodu može doseći i minimum od oko  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ ), od kojih se za potrebe vodoopskrbe zahvaća polovica ( $2,0 - 2,9 \text{ m}^3/\text{s}$ ), predstavlja nezamjenjiv izvor pitke vode dovoljnih količina i zadovoljavajuće kakvoće. Žrnovnica, iako po izdašnosti manja, ima važnu ulogu za okolno stanovništvo, a prema budućim planovima također se namjerava uključiti u vodoopskrbni sustav grada Splita.

Cilj ovog rada bio je predstaviti cjeloviti pristup zaštite vodonosnog sustava u kršu, počevši od istraživanja njegovih osnovnih geoloških, hidrogeoloških i hidroloških karakteristika, preko obrade dobivenih podataka i njihovog korištenja u modelima procjene prirodne ranjivosti, opasnosti i rizika od onečišćenja podzemnih voda. Krajnji rezultat je utvrđivanje dijelova sliva s visokom razinom rizika od onečišćenja podzemnih voda (bilo da su zbog svojih prirodnih obilježja ranjiviji ili zbog postojećih potencijalnih izvora opasnosti izloženiji negativnom antropogenom utjecaju). Na taj način olakšava se donošenje budućih odluka vezanih za planiranje prostora, određivanje prioriternih sanacijskih zahvata i odgovarajuću zaštitu vodnih resursa. Planirani znanstveni doprinos ovog rada je u primjeni postojećih modela za procjenu prirodne ranjivosti podzemnih voda na području istraživanja, usporedbi dobivenih rezultata, te prilagođavanju ulaznih parametara karakterističnim hidrogeološkim obilježjima krških terena Republike Hrvatske. Istraživanje ranjivosti ovog područja i izrada karata prirodne ranjivosti usmjerena je na prilagodbu već postojećih modela i razvoj novog pristupa za procjenu prirodne ranjivosti vodonosnih sustava.

Područje istraživanja obuhvaća slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice, koje je s površinom od preko  $560 \text{ km}^2$  jedno od većih slivnih područja dinarskog krša, a čini dio sliva rijeke

Cetine. Sliv je smješten u zaleđu grada Splita, a padinama Mosora i Kozjaka odvojen je od priobalja. Veći dio sliva građen je od dobro propusnih vapnenaca mezozoika i eocena, koji su ujedno i glavni vodonosnik ovog područja. Ovisno o udjelu dolomita i lapora u njihovoj građi mogu se izdvojiti i stijene srednje odnosno slabe propusnosti, te klastične naslage eocenskog fliša, klastiti trijasa i paleocenski lapori koji čine nepropusne stijene s ulogom potpune ili relativne hidrogeološke barijere. Naglašena je tektonska aktivnost i razlomljenost hidrogeološkog sustava, a sve navedeno pogoduje intenzivnom okršavanju i stvaranju mnoštvu krških (površinskih i podzemnih) geomorfoloških oblika (vrtača, špilja, jama i ponora..), kao i dobro razvijenu okršenu mrežu kanala. Isto tako, sliv karakterizira vrlo tanak sloj tla (klastičnih pokrovnih naslaga), nejednolikog rasprostiranja, kao i nepostojanje površinskih tokova, budući da zbog građe terena oborine vrlo brzo koncentrirano poniru kroz okršene elemente reljefa, ali i zbog difuzne infiltracije po čitavoj površini sliva. Iznimka su krška polja, zaravni i depresije ispunjene glinovito-praštinastim materijalima, s različitim udjelom kršja okolnih stijena, gdje debljina klastičnog materijala može iznositi i desetak metara. Na tim dijelovima omogućeno je formiranje povremenih površinskih tokova, povremena plavljenja polja, ali isto tako i brzo povlačenje vode u ponorima na rubnim dijelovima polja. Najveća krška polja na području sliva su: Mučko polje, Dugopolje, Konjsko i Bisko polje. Sve navedeno čini ovaj vodonosni sustav iznimno ranjivim na svaki potencijalni negativni utjecaj s površine terena (hazard), stoga se smatra da je potrebno ove ključne značajke ugraditi u model procjene prirodne ranjivosti.

Posljednjih godina procjena prirodne ranjivosti, kao i sam koncept ranjivosti, opasnosti i rizika, zauzima sve važniju ulogu u zaštiti podzemnih voda, pogotovo u kršu. U nekim zemljama (Švicarska, Španjolska, Italija) integriran je u zakonsku regulativu po pitanju definiranja zona zaštite izvorišta pitke vode, dok se u drugima koristi kao dodatna metoda istraživanja.

U ovom radu prikazana je primjena četiri postojeće metode za procjenu prirodne ranjivosti na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice, SINTACS, EPIK, PI i COP metoda. Sve metode modelirane su pomoću GIS tehnologije s bazom podataka prikupljenom prethodnim istraživanjima. Usporednim testiranjem metoda nastojalo se dokazati da su postojeće metode procjene ranjivosti samo djelomično primjenjive na području hrvatskog dinarskog krša, te da ih je potrebno prilagoditi uvjetima na terenu.

Standardna SINTACS metoda, iako vrlo detaljna, ukazala je na manje nedostatke, posebno oko definiranja vrijednosti nekih parametara. U prvom redu se tu misli na parametar hidrauličke vodljivosti vodonosnika koji je u kršu nemoguće precizno definirati. Dijagrami i tablice metode određuju taj koeficijent prema građi vodonosnika. Kako je veliki dio sliva građen od vrlo sličnih stijena, bilo je potrebno uvesti dodatni parametar definicije svojstva vodonosnika. Iz tog je razloga u analizu uveden dodatni pokazatelj propusnosti vodonosnika, a to je gustoća vrtača. Izdvajanje područja s većom gustoćom vrtača, kao vrlo indikativnog pokazatelja okršenosti, odnosno propusnosti stijena, ima vrlo važnu ulogu jer ukazuje na najranjivija područja koja je potrebno odgovarajuće štititi, dok na drugoj strani ostavlja mogućnost povećavanja površine iskoristivog prostora u kršu za neku prikladnu namjenu u područjima sa srednjim i manjim indeksom ranjivosti.

Testirana je i EPIK metoda koja, za razliku od SINTACS metode ima manji broj parametara i napravljena je baš za krška područja. Međutim, dosta je subjektivna i nema jasno izražene raspone vrijednosti, te postoji opasnost od precjenjivanja ranjivosti (radi dodatne sigurnosti). Subjektivnost metode dokazana je različitim interpretiranjem parametara razvoja epikrške zone koji uvelike mijenjaju kartu ranjivosti. Drugi problem ove metode je što precjenjuje zaštitnu funkciju pokrovnih naslaga (tla). Naime, prema EPIK metodi sustav nije ranjiv ako ima više od dva metra tla, što nikako ne može biti primjenjivo na području dinarskoga krša. Naslage tla te debljine mogu se pronaći samo na području krških polja, a poznato je da uslijed velikih kiša ta polja poplavljuju, a nakon toga voda se povlači uviranjem u ponore smještene na rubnim dijelovima polja. Jasno, pri tome voda ispere površinu terena i nakon toga koncentrirano prihranjuje vodonosnik, izbjegavajući pri tome bilo kakvu pročišćavajuću funkciju tla. Stoga je ocjena da EPIK metoda nije pogodna za dinarski krš.

PI metoda uzima u obzir samo dva parametra, no oni su vrlo detaljno i precizno definirani, što ne ostavlja mnogo mjesta za subjektivne interpretacije. Ipak, u ovoj metodi problematičan je način definiranja utjecaja tla, budući da se sustav bodovanja zasniva na podacima koji u Republici Hrvatskoj nisu dostupni (ili je jako mali broj podataka koji treba aproksimirati za cijeli sliv), a dosta veliki utjecaj na rezultate metode ima debljina nezasićene zone koja se u kršu dobiva dosta aproksimativno i treba se uzeti s rezervom.

COP metoda dosta je slična PI metodi, metodološki se radi o procjeni istih parametara, ali se oni definiraju na drugačiji način. Konkretno, kod procjene uloge pokrovnih naslaga

zanemaren je sloj podtla, kroz procjene utjecaja oborina više se ne uzima u obzir utjecaj evapotranspiracije, već samo količina i intenzitet oborina, što je u hrvatskim prilikama (zbog dostupnih podataka) mnogo prikladnije. Stoga se nakon provedenih analiza i modifikacije izvorne metode može zaključiti da je COP metoda najbolja metoda procjene ranjivosti u dinarskom kršu.

Modificiranjem COP metode u ovom je radu dan prijedlog hrvatskog pristupa u procjene prirodne ranjivosti izvora u kršu Dinarida. Najprije je modificiran faktor O, gdje je uvedena još jedna klasa debljine tla s ciljem razlikovanja područja s debljinom tla 0 - 20 cm i > 20 – 50 cm. Razlog tome je što je za hrvatska krška područja karakteristična neravnomjerna raspodjela vrlo tankog sloja tla, koji mjestimično može doseći i do 20 cm debljine, ali nije realno za očekivati da takve naslage pružaju vodonosniku jednaku razinu zaštite od onečišćenja kao i naslage debljine 40 ili 50 cm. Najveće modifikacije odnose se na faktor koncentracije toka (C). Iako je posve jasno da područja koncentrirane infiltracije vode u podzemlje treba izrazito štiti, radijus utjecaja od 5 km je svakako previše. Tako dobivene površine (zone ranjivosti) nisu realne niti bi bile održive u prostoru. Također, uveden je novi tematski sloj, modelirani smjerovi prioritarnog površinskog otjecanja, pomoću kojeg se jednostavnije izdvajaju dijelovi sliva kojim voda otječe površinski, a na kojima se voda infiltrira difuzno ili uvire koncentrirano. Uz to, modificiran je i faktor utjecaja oborina (P). Dosadašnja istraživanja na ovom području pokazala su da za vrijeme obilnih kiša i visokih voda dolazi do pogoršanja kakvoće izvorskih voda jer ona ispire čitavu nezasićenu zonu. Stoga pretpostavka da kod obilnijih kiša treba uzeti u obzir utjecaj razrjeđenja i smanjiti ranjivost nije primjenjiva. I na kraju, predložen je način definiranja faktora K uzimajući u obzir horizontalne tokove unutar zasićenog dijela vodonosnika, kroz definiranje razvoja mreže kanala za ocjenu prirodne ranjivosti krških izvora, gdje je u obzir uzeta strukturno-tektonska analiza rasjeda koja zonira dijelove sliva s dominantnim tokovima podzemnih tokova.

Rezultati (karta prirodne ranjivosti), dobivena na ovaj način, daje dosta realan uvid u ranjiva područja ovog sliva. Za konačnu potvrdu napravljena je validacija dobivene karte gdje su rezultati prethodnih istraživanja uklopljeni u procjenu ranjivosti.

Osim prirodne ranjivosti na području sliva rađena je i analiza stvarnih i potencijalnih izvora opasnosti. Tom prilikom izrađena je baza potencijalnih onečišćivača na području sliva i karta

neklasificiranih i klasificiranih izvora opasnosti. Iako je samo jedan mali dio sliva zahvaćen vrlo velikom i velikom razinom opasnosti (zajedno < 2% površine sliva), potrebno je pripaziti na izdvojene, potencijalno vrlo opasne, izvore onečišćenja kako ne bi došlo do daljnjeg povećanja onečišćenja u izvorskim vodama kao posljedica ubrzanog razvoja ovog područja.

Analiza rizika od onečišćenja podzemnih voda je rađena kao konačni postupak ocjene antropogenog utjecaja na vodonosni sustav u kršu, a rezultat je karta rizika na kojoj su izdvojeni dijelovi sliva u riziku od onečišćenja kao posljedica negativnog antropogenog utjecaja. Iako smjernice projekta COST 620 predlažu procjenu tri indeksa rizika (indeks intenziteta rizika, indeks osjetljivosti na rizik i indeks ukupnog rizika), u ovom radu rizik je procijenjen jednoznačno, po metodologiji procjene indeksa intenziteta rizika, a kao kombinacija karte prirodne ranjivosti i opasnosti. Konačna karta rizika ukazuje na dijelove sliva na kojima postoji rizik od onečišćenja podzemnih voda.

Iako je u radu naglašena potreba provedbe odgovarajućih socio-ekonomskih analiza vrijednosti vode, na temelju kojih bi se mogla odrediti prostorna raspodjela osjetljivosti na rizik, a time i procijeniti ukupni rizik, ona nije provedena jer je takva aktivnost vrlo složena i zahtijeva interdisciplinarni rad u kojem bi sudjelovali stručnjaci različitih područja (ekonomisti, sociolozi, pravnici, itd.).

Metodologija obrađena ovim radom, posebno analiza prirodne ranjivosti, može biti vrlo koristan alat u provođenju zaštite podzemnih voda u krškim vodonosnim sustavima. U nekim zemljama praksa je (čak i zakonski propis) takve multiparametarske metode koristiti kao jednu od metoda istraživanja kod definiranja zona sanitarne zaštite izvorišta pitke vode. Budući da na području sliva Jadra i Žrnovnice ne postoje novelirane zone sanitarne zaštite spomenutih izvora pitke vode, preporuka je kod definiranja istih koristiti dobivenu kartu prirodne ranjivosti jer jasno izdvaja najranjivije dijelove sliva. Također, može se koristiti kod donošenja odluka prostornog planiranja, tako da se dijelovi sliva izdvojeni kao manje ranjivi namjene za daljnji gospodarski razvoj područja uz uvažavanje općih mjera zaštite. Pri tome treba naglasiti da ovakva analiza, iako vrlo korisna, nikako ne može zamijeniti ni jednu drugu skupinu istraživanja, već ju može samo nadopuniti.

U Varaždinu, 15.11.2013.

Jelena Loborec, dipl. Ing. geotehnike



## 11. Popis literature

### OBJAVLJENI RADOVI:

**Adams, B & Foster, S.S.D. (1992):** Land-surface zoning for groundwater protection. *Water and Environment Journal*, Vol 6, Iss 4, 312 – 319.

**Aller, J.R., Bennet, T., Feheer, J.H., Petty R.J. & Hackett G. (1987):** DRASTIC, a standardised system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings. US EPA 600/2-87-035.

**Andreo, B., Goldscheider, N., Vadillo, I., Vías, J.M., Neukum, C., Sinreich, M., Jiménez, P., Brechenmacher, J., Carrasco, F., Hötzl, H., Perles, M.J. & Zwahlen, F. (2006):** Karst groundwater protection: First application of a Pan- European Approach to vulnerability, hazard and risk mapping in the Sierra de Líbar (Southern Spain). *Science of the Total Environment* 357, 54 - 73.

**Andreo, B., Ravbar, N. & Vías, J.M. (2009):** Source vulnerability mapping in carbonate (karst) aquifer by extension of the COP method: application to pilot sites. *Hydrogeology Journal* 17, 749 – 758.

**Bagarić, I. (1973):** Prilog rješavanju problema iskorištenja zaslanjenih voda priobalnog i krškog vrela Pantan, Saopštenja br. 13, Zavod za hidrotehniku građevinskog fakulteta, Sarajevo, 1-17.

**Biondić, B., Biondić, R. & Dukarić, F. (1998):** Protection of karst aquifers in the Dinarides in Croatia. *Environmental Geology* 34 (4), 309 – 319.

**Biondić B., Prestor, J., Biondić, R., Lapanje, A., Kapelj, S., Janža, M., Rikanović, R., Urbanc, J. & Singer, D. (2002):** Obmejni vodonosniki med Slovenijo in Hrvaško– Območje med Kvarnerskim in Tržaškim zalivom. *Geologija*, 45/2, Ljubljana, 311-318.

**Biondić, R. (2005):** Zaštita voda gornjeg dijela sliva Kupe. Disertacija, RGNF, Sveučilište u Zagrebu.

**Bonacci, O. (1987):** *Karst Hydrology*, Springer-Verlag, Berlin

**Božičević S. (1992):** Fenomen krš. Školska knjiga, 103 str., Zagreb.

**Božičević S. (2000):** Kamen i voda. 168 str., Zagreb.

**Civita M. & De Maio M. (2000):** SINTACS R5, a new parametric system for the assessment and automating mapping of groundwater vulnerability to contamination – Pitagora Editor (Bologna), 226 str.

**Civita M. (2010):** The Combined Approach When Assessing and Mapping Groundwater Vulnerability to Contamination. *J. Water Resource and Protection*, 14-28.

**Corniello, A., Ducci, D. & Monti, G.M. (2004):** Aquifer pollution vulnerability in the Sorrento Peninsula, Southern Italy, evaluated by SINTACS method. *Geofis. Int.* 43/4, 575-581.

**COST action 65 (1995):** Final report. "Carst groundwater protection". European Commission, Report EUR 16547 EN, Directorate - General Science, Research and Development, 446 str., Brussels.

**Daly, D., Dassargues, A., Drew, D., Dunne, S., Goldscheider, N., Neale, S., Popescu, I.C. & Zwahlen, F. (2002):** Main concepts of the European Approach for (karst) groundwater vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal* 10 (2), 340 – 345.

**DoELG/EPA/GSI (1999):** Groundwater protection schemes. Department of Environment and Local Government, Environmental Protection Agency and Geological Survey of Ireland, 24 str, Dublin.

**Doerfliger N. & Zwahlen F. (1995):** EPIK, a new method for outlining of protection areas: a water vulnerability assessment in karst environment. U: Proceedings of 5th International Symposium on karst waters and environmental impacts, Antalya, Balkema, 117 – 123.

**Doerfliger N., Jeannin P.Y. & Zwahlen F. (1999):** Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environmental Geology* 39 (2), 165-176

**Ducci, D. (1999):** GIS Techniques for Mapping Groundwater Contamination Risk. *Natural Hazards* 20: 279 - 294.

**Filipčić, A. (1998):** Klimatska regionalizacija Hrvatske po Köppenu za standardno razdoblje 1961.-1990. u odnosu na razdoblje 1931.-1960. *Acta Geographica Croatica*, 34, 1-15.

**Ford, D.C. & Williams, P.W. (2007):** Karst Hydrogeology and Geomorphology. John Wiley & Sons, UK, 562 str.

- Foster, S.S.D. (1987):** Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants ed. Proceedings and information committee for hydrological research, TNO, pp. 69-86.
- Fritz, F. (1979a):** Hidrogeološke rajonizacije priobalnog krša Hrvatske u svjetlu novih saznanja. Geološki vjesnik, br. 31, 327-336, HGI, Zagreb
- Fritz, F. (1981):** Hidrogeologija zaleđa Splita. Krš jugoslavije br. 10/5, 97-118, JAZU, Zagreb.
- Fritz, F. (1994):** Zaštita krških podzemnih voda od prometnih građevina. Zbornik radova Geotehnika prometnih građevina. 559-563 Novigrad.
- Fritz, F. & Bahun, S. (1997):** The morphogenesis of submarine springs in the bay of Kaštela, Croatia. Geologia Croatica, 50/1, 105-110. HGI Zagreb.
- Fritz, F. & Kapelj, J. (1998):** Osnovna hidrogeološka karta Republike Hrvatske M 1:100 000, listovi Split i Primošten. HGI, Zagreb.
- Ganoulis, J. (2005):** Risk Analysis of Water Pollution. Second, Revised and Expanded Edition, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 311 str.
- Gogu, R.C. & Dassargues, A. (2000a):** Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. Environmental Geology 39 (6), 549 – 559.
- Gogu, R.C. & Dassargues, A. (2000b):** Sensitivity analysis for the EPIK method of vulnerability assessment in a small karstic aquifer, southern Belgium. Hydrogeology Journal 8, 337-345.
- Gogu, R.C., Hallet, V. & Dassargues, A. (2003):** Comparison of aquifer vulnerability assessment techniques. Application to the Néblon river basin (Belgium). Environmental Geology 44, 881 – 892.
- Goldscheider, N. (2005):** Karst groundwater vulnerability mapping: application of a new method in the Swabian Alb, Germany. Hydrogeology Journal 13, 555-564.
- Goldscheider, N., Klute, M., Sturm, S. & Hötzl, H. (2000):** The PI method – a GIS – based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. Z. angew. Geol., 46 (2000) 3: 157-166; Hannover. In: *COST 620 (2004) "Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers"* Ed. Zwahlen, F., European Commission, Directorate – General for Research, European research area: structural aspects – COST, 279 str.

- Goldscheider, N., Hötzl, H., Fries, W. & Jordan, P. (2001):** Validation of a vulnerability map (EPIK) with tracer tests. 7th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media. Besançon, Francia, 167-170.
- Holman, I.P., Palmer, R.C., Bellamy, P.H. & Hollis, J.M. (2005):** Validation of intrinsic groundwater pollution vulnerability methodology using a national nitrate database. *Hydrogeology Journal*, 13, 665-674.
- Hörling, B., Haertle, T., Hochberger, K.H., Nachtigall, K.H., Vilinger, E., Weinzierl, W. & Wrobel, J.-P. (1995):** Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. *Geol. Jb.*, C63, 5 – 24, Hannover. *In: COST 620 (2004) "Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers" Ed. Zwahlen, F., European Commission, Directorate – General for Research, European research area: structural aspects – COST, 279 str.*
- Ivanović A., Sikirica V., Marković S. & Sakač K. (1977):** Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000, List Drniš K 33-9, Inst. za geol. istraž, Zagreb, Savezni geol. zavod Beograd.
- Ivanović A., Sikirica V. & Sakač K. (1978):** Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000., Tumač za List Drniš, K 33-9, 5-59, Inst. za geol. istraž, Zagreb, Sav. geol. zavod Beograd.
- Janža, M. & Prestor, J. (2002):** Ocena naravne ranjivosti vodonosnika v zaledju izvira Rižane po metodi SINTACS. *Geologija*, Ljubljana, 45/2, 401-406.
- Kapelj, J., Kapelj, S. & Singer D. (2004a):** Spatial distribution of dolinas and its significance for groundwater protection in karst terrain, *Groundwater Flow Understanding from lokal to regional scales XXXIII Congress IAH & 7th Congress ALHSUD, Zacatecas, Mexico, Ortega, A. (ur.). Zacatecas, Mexico : La Octava Casa*
- Kapelj, S., Kapelj, J., Biondić, R., Singer, D. & Picer, M. (2005):** The approach of the groundwater vulnerability assessment in the area of the Zadar town with regard to PCB and other contaminants. *Knjiga sažetaka 3. hrvatskog geološkog kongresa Opatija, HGI, Zagreb, 197-198.*
- Kapelj, S., Kapelj, J., Singer, D., Obelić, B., Horvatinčić, N., Babinka, S., Suckow, A. & Brianso, H. L. (2007):** Risk assessment of groundwater in the area of transboundary karst aquifers between the Plitvice Lakes and Una River catchment, *Second International Conference on Water in protected Areas, Nakić, Z. (ur.). Zagreb: Kopriva - graf, 86-90.*
- Kapelj, S.; Kapelj, J. & Švonja, M. (2011):** Hidrogeološka obilježja sliva Jadra i Žrnovnice. *Tusculum 5.*

- Kapelj, Sanja; Loborec, Jelena; Kapelj, Janislav (2013):** Assessment of aquifer intrinsic vulnerability by the SINTACS method. *Geologia Croatica*, Vol. 66, No. 2, doi: 10.4154/gc.2013.09.
- Kavouri, K., Plagnes, V., Tremoulet, J., Dörfliger, N., Rejiba, F. & Marchet, P. (2011):** PaPRIKa: a method for estimating karst resource and source vulnerability – application to the Ouyse karst system (southwest France). *Hydrogeology Journal* 19, 339-353.
- Kerner F. (1914):** Geologische Spezialkarte der Österr-Ungar. Monarchie 1:75.000, zone 31, kol. XV, Sinj und Spalato. Wien.
- Komatina, M. (1961):** Tumač za osnovnu hidrogeološku kartu terena Kašteli-Omiš. Geozavod, Beograd.
- Komatina M. (1967):** Stratigrafski sastav i tektonski sklop Dalmacije. *Memoires du Service Geologique et geofisque 15*, 1--77, Beograd.
- Komatina, M. (1975):** Hidrogeološke odlike slivova centralnodinarskog karsta. *Rasprave Zavoda za geološka i geofizička istraživanja, Savezni geološki zavod Beograd*, 1-105.
- Kušan, V., Crnojević, Ž., Kolačko, G., Ivić, T. & Mihulja, A. (2010):** Pokrov i namjena korištenja zemljišta u Republici Hrvatskoj – stanje i trendovi-. Agencija za zaštitu okoliša, Zagreb, 128 str.
- Longo, A., Andreo, B., Carrasco, F., Cucchi, F., Vias, J. & Jiménez, P. (2001):** Comparison of two contamination vulnerability maps obtained by the SINTACS method in two carbonate aquifers (S Spain). *7th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media*. Besançon, Francia, 233-236.
- Mali, N. & Janža, M. (2005):** Ocena ranjivosti vodonosnika s SINTACS modelom v GIS okolju. *Geologija*, 48/1, Ljubljana, 127-140.
- Margat, J. ( 1968):** Vulnérabilitié des nappes d'eau souterraine à la pollution. BRGM Publication 68 SGL 198 HYD, Orléans.
- Marinčić S., Korolija B. & Majcen Ž. (1976):** Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000, List Omiš, K 33-22, Inst. geol. istraž. Zagreb, Savezni geol. zavod, Beograd.
- Marinčić S., Korolija B., Mamužić P., Magaš N., Majcen Ž., Brkić M. & Benček Đ. (1977):** Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. Tumač za List Omiš, K 33-22, 5-51, Inst. geol. istraž. Zagreb, Savezni geol. zavod, Beograd.
- Marinčić S., Magaš N. & Borović I. (1973):** Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000, Tumač za List Split, K 33-21, Inst. geol. istraž. Zagreb, Savezni geol. zavod, Beograd.

- Marinčić S., Magaš N. & Borović I. (1971):** Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000, List Split, K 33-21, Inst. geol. istraž. Zagreb, Savezni geol. zavod, Beograd.
- Marjanac T. (1994):** Evolution of Eocene-Miocene flysch basin of Central Dalmatia, Croatia. Doctoral Thesis, University of Zagreb, 1-348.
- Meaški, H. (2011):** Model zaštite krških vodnih resursa na primjeru Nacionalnog parka "Plitvička jezera". Disertacija, RGNF, Sveučilište u Zagrebu.
- Nakić, Z (2010):** Zaštita strateških zaliha podzemnih voda Republike Hrvatske. Knjiga sažetaka, IV. Hrvatski geološki kongres/Marija Horvat (ed.)- Zagreb: Hrvatski geološki institut, 4-5.
- Napolitano, P. & Fabbri, A.G. (1996):** Single parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS. HydroGIS 96:Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management (Proceedings of the Vienna Conference, April 1996). IAHS Publ. no. 235, 559 – 566.
- Neukum, C. & Hötzl, H. (2007):** Standardization of vulnerability maps. Environmental Geology 51, 689 – 694.
- Neukum, C., Hötzl, H. & Himmelsbach, T. (2008):** Validation of vulnerability mapping methods by field investigations and numerical modelling. Hydrogeology J. 16, 641-658.
- Nguyet, V. & Goldscheider, N. (2006):** A simplified methodology for mapping groundwater vulnerability and contamination risk, and its first application in a tropical karst area, Vietnam. Hydrogeology Journal 14, pp. 1666-1675.
- NWC – National Water Commission (2012):** Assessing the value of groundwater. Marsden Jacob Associates, Waterlines Report Series, 198 str.
- Oluić, M., Romandić, S., Kasapović, S. & Burela, S. (2005):** Investigation of the landfill location in Karst area using RS and geophysical survey – Case study Lećevica, Split. New strategies for European Remote Sensing. Millpress, Rotterdam, 601-607.
- Papeš J., Marinković R., Raić V., Magaš N. & Sikirica V. (1984):** Osnovna geol. karta SFRJ 1:100.000, List Sinj, K 33-10, Savezni geološki zavod Beograd.
- Penzar, B., Penzar, I. & Orlić, M. (2001):** Vrijeme i klima hrvatskog Jadrana. Bibliotheka Geographia Croatica, knjiga 16, Split.
- Perrin, J., Pochon, A., Jeannin, P.-Y. & Zwahlen, F. (2004):** Vulnerability assessment in karstic areas: validation by field experiments. Environmental Geology 51, 689 – 694.
- Petrič, M. & Šebela, S. (2004):** Vulnerability mapping in the recharge area of the Korentan Spring, Slovenia. Acta carsologica 33/2 (8), 151 – 168.



- Pochon, A., Tripet, J.-P., Kozel, R., Meylan, B., Sinreich, M. & Zwahlen, F. (2008):** Groundwater protection in fractured media: a vulnerability-based approach for delineating protection zones in Switzerland. *Hydrogeology Journal*, vol.16, 1267-1281.
- Polemio, M., Casarano, D. & Limoni, P.P. (2009):** Karstic aquifer vulnerability assessment methods and results at a test site (Apulia, Southern Italy). *Nat. Hazard. Earth. Sys.* 9, 1461-1470.
- Raić V., Papeš J., Sikirica V. & Magaš N. (1984):** Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. Tumač za List Sinj, K 33-10, 5-52, Savezni geol. zavod Beograd.
- Ravbar, N. & Goldscheider, N. (2007):** Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia. *Acta Carsologica* 36/3, 397- 411.
- Ravbar, N. & Goldscheider, N. (2009):** Comparative application of four methods of groundwater vulnerability mapping in a Slovene karst catchment. *Hydrogeology Journal* 17, 725 - 733.
- Šegota, T. & Filipčić, A. (1996):** *Klimatologija za geografe. Šk. knjiga, Zagreb.* 471 str.
- Šegota, T. & Filipčić, A. (2003):** Köppenova podjela klima i hrvatsko nazivlje. *Geoadria*, Vol 8/1, 17-37, Zadar.
- Štambuk-Giljanović, N. (2006):** *Vode Dalmacije. Split,* 588 str.
- Šušnjara A., Sakač K., Gabrić A. & Šinkovec B. (1990):** Boksiti područja Sinja u Srednjoj Dalmaciji. *Geol. vjesnik* 43, 169-179.
- Uhan, J., Pezdič, J. & Civita, M. (2008):** Assessing groundwater vulnerability by SINTACS method in the Lower Savinja Valley, Slovenia. *RMZ-Materials and Geoenvironment*, 55/3, 363-376.
- Van Stempvoort, D., Ewert, L. & Wassenaar, L (1993):** Aquifer vulnerability index. A GIS-compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal*, Vol. 18, no.1, 25-37.
- 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,* 33 str.
- 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 and B. Andreo, Eds.), 75-83.

**Vías, J.M., Andreo, B., Perles, M.J. & Carrasco, F. (2005):** A comparative study of four schemes for groundwater vulnerability mapping in a diffuse flow carbonate aquifer under Mediterranean climatic conditions. *Environmental Geology* 47, 586 – 595.

**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.

**Vías, J., Andreo, B., Ravbar, N. & Hötzl, H. (2010):** Mapping the vulnerability of groundwater to the contamination of four carbonate aquifers in Europe. *Journal of Environmental Management* 91, 1500 – 1510.

**Vrba J. & Zaporozec A. (eds.) (1994):** Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability, International Contribution to Hydrogeology (IAH), 131 p., Hannover.

**Vujnović, T. (2010):** Hidrogeološke značajke parka prirode "Žumberak – Samoborsko gorje". Disertacija. RGNF, Sveučilište u Zagrebu.

**Werz, H. & Hötzl, H. (2007):** Groundwater risk intensity mapping in semi-arid regions using optical remote sensing data as an additional tool. *Hydrogeology J.*, 15, 1031-1049.

**Zaninović, K., Gajić-Čapka, M., Perčec Tadić, M., Vučetić, M., Milković, J., Bajić, A., Cindrić, K., Cvitan, L., Katušin, Z., Kaučić, D., Likso, T., Lončar, E., Lončar, Ž., Mihajlović, D., Pandžić, K., Patarčić, M., Srnec, L. & Vučetić, V. (2008):** Klimatski atlas Hrvatske, 1961.-1990. : 1971.-2000. DHMZ, Zagreb, 200 p.

**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, 279 p.

## TEHNIČKA IZVJEŠĆA I NEOBJAVLJENI RADOVI

**Agencija za zaštitu okoliša, AZO (2008):** CORINE Land Cover Hrvatska (baza podataka) i podloge

**Biondić, B. & Biondić, R. (2007):** Odlagalište otpada grada Sinja (Mojanka) – Hidrogeološka istraživanja – Izvješće. Geo Info d.o.o. Zagreb.

**Biondić, B., Zojer, H., Yehdeghe, B., Biondić, R., Kapelj, S., Meaški, H. & Zwicker, G. (2008):** Održivo korištenje i zaštita vodnih resursa na području plitvičkih jezera, Završno izvješće. Arhiv Geotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Varaždin.

- Biondić, R., Biondić, B. & Rubinić, J. (2009):** Ocjena stanja i rizika cjelina podzemnih voda na krškom području u Republici Hrvatskoj. Završno izvješće. Arhiv Geotehničkog fakulteta Sveučilište u Zagrebu, Varaždin.
- Bonacci, O. (1978):** Hidrološka studija Žrnovnice. Fond stručne dokumentacije Građevinskog instituta, Split.
- Bonacci, O. & T. Roje-Bonacci (1996):** Određivanje biološkog minimuma rijeke Jadra – Studija. IV. Određivanje biološkog minimuma. Fond str. dok. Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Splitu.
- Državni zavod za statistiku, DZS (2011)**
- Fritz, F. & Bahun, S. (1960):** Geološka, hidrogeološka, inženjerskogeološka istraživanja područja Dugo Polje. Fond str.dok.HGI Zagreb, br. 3262.
- Fritz, F. (1970):** Geološka građa i hidrogeološki odnosi sabirnog područja izvora Pantan. Fond str.dok. HGI, Zagreb, br. 4917.
- Fritz, F. (1979b):** Općina Split - Hidrogeološka studija. Fond str.dok. HGI, Zagreb, br. 191/79.
- Fritz, F., Pavičić, A. & Renić, A. (1984):** Hidrogeološka studija područja Trogir -Šibenik-Drniš-Knin. Fond str.dok. HGI, Zagreb, br. 248/84.
- Fritz, F., Pavičić, A., Renić, A. & Kapelj, J. (1988):** Izvori Jadro i Žrnovnica. Dio hidrogeoloških istražnih radova potrebnih za prijedlog zona sanitarne zaštite. Fond str. dok. HGI br. 140/88, Zagreb.
- Fritz, F. (1990):** Trasiranje provedeno za potrebe izrade Osnovne hidrogeološke karte RH 1:100 000. Hrvatski geološki institut, Fond stručne dokumentacije. Zagreb.
- Fritz, F., Pavlin, B. & Mijatović, B. (1990):** Konzultantsko mišljenje za desalinizaciju vode vrela Pantan. Fond Hrvatske vodoprivrede, Split.
- Fritz, F., Renić, A. & Buljan, R. (1991):** Izvor Pantan kod Trogira - Hidrogeološka osnova za eksploataciju pitkih podzemnih voda. Fond str.dok. HGI, Zagreb, br. 95/91.
- Fritz, F., Kapelj, J. & Braun, K. (1992):** JAC-čvorište Šibenik-čvorište Split sa spojnim cestama. Konačna studija utjecaja na okolinu. Hidrogeološke i inženjerskogeološke značajke terena. Fond stručne dok. HGI br. 41/92, Zagreb.
- Fundurulja, D., Mužinić, M., Domanovac, T., Novak-Mujanović, S., Orašanin, R., Čurko, S., Jurkić, I., Mayer, D., Dragičević, I., Bukvić, V., Kalambura, D. & Radalj, Ž. (2005):** Studija utjecaja na okoliš Centra za gospodarenje otpadom Splitsko-dalmatinske županije u Lećevici. IPZ Uniprojekt MCF, Zagreb.

**Görlach, B. & Interwies, E. (2003):** Economic Assessment of Groundwater Protection: A survey of the Literature. Berlin: Ecologic.

**Kapelj, J. (1997):** Jadranska autocesta – Dionica Šibenik - km 102+000 (sjeverna i južna varijanta), Konačna studija utjecaja na okolinu - Hidrogeološke značajke stijena. Fond str. dok. HGI br.24/97. Zagreb

**Kapelj, J., Renić, A. & Kapelj, S. (1999):** Jadranska autocesta – Dionica Prgomet - Dugopolje, Hidrogeološko konceptijsko rješenje dispozicije kolničkih voda. Fond str. dok. HGI, br.30/99. Zagreb

**Kapelj, S., Kapelj, J., Novosel, A. & Singer, D. (2001):** Hidrogeološka istraživanja slivnog područja izvora Jadra i Žrnovnice - preliminarni izvještaj, I faza istraživanja. Fond str. dok. HGI, br. 42/01, Zagreb. (Fond str. dok. Vodovod i kanalizacija, Split)

**Kapelj, J., S. & Terzić, J. (2001):** Jadranska autocesta. Sektor Zadar-Split. Podsektor Šibenik-Split. Dionica Prgomet-Dugopolje. Stacionaža (km 108+237,70 do km 136+200,00) Hidrogeološki istražni radovi za potrebe odvodnje otpadnih voda. Fond str. dok. HGI, br. 006/01, Zagreb.

**Kapelj, S., Kapelj, J. & Singer, D. (2002):** Hidrogeološka istraživanja slivnog područja izvora Jadro i Žrnovnica - II faza istraživanja, A) Hidrogeokemijska i izotopna istraživanja; B) Organizacija hidrogeološkog informatičkog sustava. Fond str. dok. HGI, br. 43/02, Zagreb.(Fond str. dok. Vodovod i kanalizacija, Split).

**Kapelj J., Kapelj S. & Terzić J. (2004):** Jadranska autocesta. Sektor Split-Ploče. Podsektor Dugopolje-Zagvozd. Dionica Dugopolje-Bisko. HG istražni radovi za potrebe odvodnje otpadnih voda, Fond str. dok. HGI, br. 043/04, Zagreb.

**Kapelj, S., Kapelj, J., Biondić, R., Biondić, B., Kovač, I., Tušar, B., Prelogović, E., Marjanac, T., Andrić, M., Kovačić, D., Strelec, S. & Gazdek, M. (2006):** Studija upravljanja vodama sliva Jadra i Žrnovnice – Prva faza studijsko istraživačkih radova EVV:1/2005. Hrvatske vode, Split.

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

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

**Kapelj, S., Kapelj, J., Dogančić, D. & Loborec, J. (2012):** Studija upravljanja vodama sliva Jadra i Žrnovnice – Četvrta faza studijsko istraživačkih radova EVV:21/2008. Hrvatske vode, Split.

**Korbar, T., Fuček, L., Palenik, D., Matičec, D., Kuhta, M. & Stroj, A. (2006):** Geološka i hidrogeološka istraživanja na području predložene lokacije Centra za gospodarenje otpadom Splitsko-dalmatinske Županije kod Lećevica. Fond str. dok HGI, br. 68/06, Zagreb.

**Magdalenić, A. & Fritz, F. (1959):** Geološke i hidrogeološke prilike u području Splita. Fond str.dok. HGI. Zagreb, br.3064.

**Oluić, M., Vasiljević, R. & Burela, S. (2004):** Elaborat o kompleksnim geoistraživanjima lokacije "Kladnjice" - Lećevica, Kniga I i II, ECOINA, Zagreb.

**Renić, A. (1992):** Određivanje zona sanitarne zaštite crpilišta Studenci. Hrvatski geološki institut, Fond stručne dokumentacije. Zagreb.

**Soil Survey Staff, (1951):** Soil Survey Manual, Soil Survey Division Staff, Washington

**U.S. EPA Environmental Protection Agency (1993):** A review of methods for assessing aquifer sensitivity and groundwater vulnerability to pesticide contamination. – Washington, 147 p.

**U.S. EPA Environmental Protection Agency (1996):** Groundwater use and value determination Guidance. A resource-based approach to decision making. – EPA, Region 1, New England, Final Draft, April 1996, Washington.

#### **ZAKONSKA REGULATIVA:**

Narodne novine 79/07 (NN, 2007): Zakon o prijevozu opasnih tvari

Narodne novine 066/11 (NN, 2011): Pravilnik o utvrđivanju zona sanitarne zaštite izvorišta

Narodne novine 047/13 (NN, 2013a): Pravilnik o izmjenama pravilnika o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta

Narodne novine 125/13 (NN, 2013b): Pravilnik o parametrima sukladnosti i metodama analize vode za ljudsku potrošnju

Okvirna direktiva o vodama Europske unije (2000/60/EZ)

Direktiva (2006/118/EZ): Protection of groundwater against pollution

Prostorni plan Splitsko – Dalmatinske županije, PPSDŽ (2002): Službeni glasnik Splitsko-Dalmatinske županije, 1/03, 8/04, 5/05, 5/06, 13/07

# **ILUSTRACIJE**



## **POPIS SLIKA:**

**Slika 1.1.** Rasprostranjenost karbonatnih stijena u Europi s posebno označenim područjem krša u Hrvatskoj (prema: *Zwahlen, 2004*)

**Slika 3.1.** Položaj sliva izvora Jadra i Žrnovnice

**Slika 3.2.** Geografska raspodjela Köppenovih klimatskih tipova u Hrvatskoj za razdoblje 1961. – 1990. s označenim područjem sliva (prema: *Filipčić, 1998*)

**Slika 4.1.** Karta litostratigrafskih jedinica i tektonike u slivu (*Prelogović & Kapelj, 2006* preuzeto iz *Kapelj et al., 2006*)

**Slika 4.2.** Skica strukturnog sklopa i tektonske aktivnosti na području sliva (*Prelogović & Kapelj, 2006* preuzeto iz *Kapelj et al., 2006*)

**Slika 4.3.** Jedinice strukturnog sklopa

**Slika 4.4.** Duboki seizmotektonski refleksijski profil

**Slika 4.5.** Speleološki objekti u slivu

**Slika 5.1.** Shematska hidrogeološka karta sliva

**Slika 5.2.** Prikaz prostorne raspodjele hidrogeološke funkcije u slivu

**Slika 5.3.** Prikaz provedenih trasiranja na području sliva

**Slika 5.4.** a) Izvor Jadro; b) gornji tok rijeke Jadro

**Slika 5.5.** a) Izvor Žrnovnice; b) rijeka Žrnovnica

**Slika 5.6.** Pokazatelji antropogenog onečišćenja u izvorskoj vodi Jadra (1975. – 2005.)

a) broj fekalnih koliforma; b) biološka potrošnja kisika; c i d) trend hranjivih soli dušika, nitrati (c) i nitriti (d)

**Slika 5.7.** Pokazatelji antropogenog onečišćenja u izvorskoj vodi Žrnovnice (1975. – 2004.)

a) broj fekalnih koliforma; b) trend hranjivih soli dušika - nitrata

**Slika 5.8.** Presjek bušotina: a) B-1 Dugopolje; b) B-3 Gizdovac

**Slika 5.9.** Dijagram mjerenih razina podzemnih voda u bušotinama B-1 i B-3 i mjereni vodostaji na rijekama Jadro i Žrnovnica

**Slika 5.10.** Dijagram mjerenja mutnoće u bušotini B-3

- Slika 6.1.** Model "porijeklo – put – cilj" (prema: *Zwahlen, 2004*)
- Slika 6.2.** Shema izrade karata ranjivosti kombinacijom parametara O, C, P i K (prema: *Zwahlen, 2004*)
- Slika 6.3.** Konceptualni model krškog vodonosnika koji se koristi kod procjene prirodne ranjivosti (prema: *Doerfliger & Zwahlen, 1995*)
- Slika 6.4.** Dijagram određivanja parametra S – dubina do podzemne vode (prema: *Civita & De Maio, 2000*)
- Slika 6.5.** Dijagram određivanja koeficijenta X ovisno o vrsti stijene (prema: *Civita & De Maio, 2000*)
- Slika 6.6.** Dijagram određivanja koeficijenta X ovisno o teksturi tla (prema: *Civita & De Maio, 2000*)
- Slika 6.7.** Dijagram određivanja parametra I (prema: *Civita & De Maio, 2000*)
- Slika 6.8.** Dijagram određivanja parametra N (prema: *Civita & De Maio, 2000*)
- Slika 6.9.** Dijagram određivanja parametra T (prema: *Civita & De Maio, 2000*)
- Slika 6.10.** Dijagram određivanja parametra A (prema: *Civita & De Maio, 2000*)
- Slika 6.11.** Dijagram određivanja parametra C (prema: *Civita & De Maio, 2000*)
- Slika 6.12.** Raspon vrijednosti hidrauličke vodljivosti, K za najčešće vrste vodonosnika (prema: *Civita & De Maio, 2000*)
- Slika 6.13.** Dijagram određivanja parametra S – utjecaj nagiba terena (prema: *Civita & De Maio, 2000*)
- Slika 6.14.** Dijagram određivanja klasa parametra E (prema: *Doerfliger et al., 1999*)
- Slika 6.15.** Dijagram određivanja klasa parametra P (prema: *Doerfliger et al., 1999*)
- Slika 6.16.** Dijagram određivanja klasa parametra I (prema: *Doerfliger et al., 1999*)
- Slika 6.17.** Dijagram određivanja klasa parametra K (prema: *Doerfliger et al., 1999*)
- Slika 6.18.** Shematski prikaz procesa procjene faktora P (prema: *Goldscheider et al., 2000*)
- Slika 6.19.** Shematski prikaz procjene faktora I (prema: *Goldscheider et al., 2000*)
- Slika 6.20.** Legenda za kartu ranjivosti te P i I karte (prema: *Goldscheider et al., 2000*)
- Slika 6.21.** Prikaz određivanja O faktora (prema: *Vias et al, 2006*)

- Slika 6.22.** Prikaz određivanja C faktora za scenarij 1 (prema: *Vias et al., 2006*)
- Slika 6.23.** Prikaz određivanja C faktora u scenarij 2 (prema: *Vias et al., 2006*)
- Slika 6.24.** Prikaz klasifikacije C faktora (prema: *Vias et al., 2006*)
- Slika 6.25.** Prikaz određivanja P faktora (prema: *Vias et al., 2006*)
- Slika 6.26.** Prikaz određivanja COP indeksa i klasa ranjivosti (prema: *Vias et al., 2006*)
- Slika 6.27.** Težinske vrijednosti za pojedine tipove opasnosti (prema: *Zwahlen, 2004*)
- Slika 6.28.** Shematski prikaz ukupnog rizika (prema: *Zwahlen, 2004*)
- Slika 6.29.** a i b. Različiti načini procjene intenziteta rizika bez matematičkih izračuna (prema *Zwahlen, 2004*)
- Slika 6.30.** Dijagram procjene intenziteta rizika prema matematičkom modelu (prema *Zwahlen, 2004*)
- Slika 7.1.** Shema listova topografske karte M 1:25 000
- Slika 7.2.** DMR "grid" sa sjenama u podlozi
- Slika 7.3.** Karta nagiba terena
- Slika 7.4.** Karta prioriternih površinskih tokova
- Slika 7.5.** Područja jače okršenosti unutar sliva
- Slika 7.6.** Karta raspodjele gustoće vrtača
- Slika 7.7.** Slojevi korišteni za statističku obradu prostornih podataka
- Slika 7.8.** Ocjena teksture tla (prema *Soil Survey Staff, 1951*; iz *Vidaček et al., 2004*)
- Slika 7.9.** Prikaz pojedinih klasa tala izdvojenih na području sliva
- Slika 7.10.** Prikaz pojedinih klasa pokrova na području sliva
- Slika 7.11.** Prikaz prostorne raspodjele srednjih godišnjih oborina u periodu od 1961. – 1990. godine (prema: *Zaninović et al., 2008*)
- Slika 7.12.** Karta dubina do podzemne vode kod visokih razina podzemne vode
- Slika 7.13.** Karta dubina do podzemne vode kod niskih razina podzemne vode
- Slika 7.14.** Prostorni raspored parametra S
- Slika 7.15.** Prostorni raspored parametra I
- Slika 7.16.** Prostorni raspored parametra N
- Slika 7.17.** Prostorna raspodjela parametra T
- Slika 7.18.** Prostorni raspored parametra A

- Slika 7.19.** Prostorni raspored parametra C(a)
- Slika 7.20.** Prostorni raspored parametra C(b)
- Slika 7.21.** Prva kombinacija C(a) i C(b) parametra
- Slika 7.22.** Druga kombinacija C(a) i C(b) parametra
- Slika 7.23.** Prostorni raspored parametra S (nagib terena)
- Slika 7.24.** Karta prirodne ranjivosti vodonosnika prema standardnoj SINTACS metodi i težinskim faktorima za krš
- Slika 7.25.** Karta prirodne ranjivosti vodonosnika prema modificiranoj SINTACS metodi (uključujući gustoću vrtača) i težinskim faktorima za krš (1. modifikacija)
- Slika 7.26.** Karta prirodne ranjivosti vodonosnika prema modificiranoj SINTACS metodi (uključujući gustoću vrtača) i težinskim faktorima za krš (2. modifikacija)
- Slika 7.27.** Prostorna raspodjela parametra E
- Slika 7.28.** Prostorna raspodjela parametra P
- Slika 7.29.** Prostorna raspodjela parametra I
- Slika 7.30.** Karta prirodne ranjivosti vodonosnika prema EPIK metodi
- Slika 7.31.** Karta prirodne ranjivosti vodonosnika prema EPIK metodi, uključujući utjecaj klase P<sub>4</sub>
- Slika 7.32.** Prostorni raspored parametra E ovisno o gustoći vrtača
- Slika 7.33.** Karta prirodne ranjivosti vodonosnika EPIK metodom uz uvažavanje gustoće vrtača
- Slika 7.34.** Prostorni raspored podfaktora T
- Slika 7.35.** Prostorni raspored podfaktora S
- Slika 7.36.** Prostorni raspored podfaktora L
- Slika 7.37.** Prostorni raspored podfaktora F
- Slika 7.38.** Debljina nezasićene zone na slivu kod maksimalne razine podzemne vode
- Slika 7.39.** Debljina nezasićene zone na slivu kod minimalnih razina podzemne vode
- Slika 7.40.** Prostorni raspored podfaktora R

**Slika 7.41.** a) i b) P karta – zaštitna funkcija pokrovnih naslaga

**Slika 7.42.** Procjena dominantnog procesa tečenja na slivu

**Slika 7.43.** Prostorni raspored faktora  $\Gamma$

**Slika 7.44.** I karta – stupanj zaobilaženja pokrovnih naslaga

**Slika 7.45.** Karta ranjivosti dobivena PI metodom za visoke razine podzemnih voda

**Slika 7.46.** Karta ranjivosti dobivena PI metodom za niske razine podzemnih voda

**Slika 7.47.** Prostorni raspored podfaktora  $O_S$

**Slika 7.48.** Prostorni raspored podfaktora  $O_L$

**Slika 7.49.** O karta – prikaz zaštitne uloge pokrovnih naslaga

**Slika 7.50.** Prikaz podfaktora **dh**

**Slika 7.51.** Prikaz podfaktora **ds**

**Slika 7.52.** Prikaz podfaktora **sv** za scenarij 1

**Slika 7.53.** Prikaz podfaktora **sf**

**Slika 7.54.** Prikaz podfaktora **sv** za scenarij 2

**Slika 7.55.** C karta – smanjenje zaštite vodonosnika uslijed uvjeta tečenja

**Slika 7.56.** P karta – smanjenje zaštite vodonosnika pod utjecajem oborina

**Slika 7.57.** Karta prirodne ranjivosti vodonosnika dobivena COP metodom

**Slika 7.58.** Prostorni raspored parametra O prema modificiranoj COP metodi

**Slika 7.59.** Prostorni raspored parametra C prema modificiranoj COP metodi

**Slika 7.60.** Prostorni raspored parametra P prema modificiranoj COP metodi

**Slika 7.61.** Karta ranjivosti vodonosnika dobivena modificiranom COP metodom

**Slika 7.62.** Procjena parametra K i konačni izračun COP+K metode (prema: *Ravbar & Goldscheider, 2007*)

**Slika 7.63.** Izdvojene klase ranjivosti izvora ovisno o stupnju okršnosti vodonosnika

**Slika 7.64.** Karta prirodne ranjivosti izvora modificiranom COP+K metodom

**Slika 8.1.** a) hotel Katarina na području Dugopolja; b) mastolov kod odmorišta Radošić

**Slika 8.2.** a) odlagalište Mojanka; b) OMV - benzinska postaja Dugopolje

**Slika 8.3.** a) Transformatorska stanica Konjsko; b) panorama Dicmo, na brdu se vidi skladište eksploziva

**Slika 8.4.** Kamenolom i betonara Križice - a) pogled sprijeda; i b) pogled iz zraka

**Slika 8.5.** Metind, Muć - a) pogled sprijeda; i b) pogled iz zraka

**Slika 8.6.** Prehrambena industrija a) SMS Klis Kurtovići; b) Dalmesso

**Slika 8.7.** Asfaltna baza u Konjskom

**Slika 8.8.** Poslovna zona Dugopolje a) panorama b) pogled iz zraka

**Slika 8.9.** a) Poslovna zona Dicmo; b) poslovna zona Prisike (kod Muća) u izgradnji

**Slika 8.10.** Bivši peradarnici u Dugopolju

**Slika 8.11.** Karta neklasificiranih opasnosti na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice

**Slika 8.12.** Karta klasificiranih izvora opasnosti (hazarda) na području sliva

**Slika 9.1.** Kategorije rizika od onečišćenja krškog vodonosnika na području sliva izvora Kupice i Zelenog Vira i na području Plitvičkih jezera (prema *Biondić et al., 2008*; *Biondić, 2005*)

**Slika 9.2.** Prikaz indeksa intenziteta rizika izračunatog pomoću COST formule

**Slika 9.3.** Shema procjene intenziteta rizika prema modificiranom Slovenskom pristupu

**Slika 9.4.** Intenzitet rizika prema modificiranom Slovenskom pristupu



## **POPIS TABLICA:**

*Tablica 4.1. Zastupljenost pojedinih stratigrafskih članova u slivu Jadra i Žrnovnice*

*Tablica 5.1. Provedena trasiranja*

*Tablica 6.1. Težinski koeficijenti SINTACS metode*

*Tablica 6.2. Klase ranjivosti SINTACS metode*

*Tablica 6.3. Vrijednosti E, P, I i K parametara ovisno o klasama (Doerfliger et al., 1999)*

*Tablica 6.4. Vrijednosti težinskih faktora  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  i  $\delta$  (prema: Doerfliger et al., 1999)*

*Tablica 6.5. Raspodjela klasa ranjivosti vodonosnika ovisno o vrijednostima zaštitnog faktora i prijedlog propisane zone zaštite (prema: Doerfliger et al., 1999)*

*Tablica 6.6. Određivanje faktora P*

*Tablica 6.7. Kategorije opasnosti od mogućeg onečišćenja i njihov način prikaza na karti*

*Tablica 7.1. Odnos hidrogeoloških jedinica, distribucije vrtača, prioriternih površinskih tokova i nagiba reljefa*

*Tablica 7.2. Odnos broja vrtača i dužine prioriternog površinskog otjecanja po kategorijama nagiba terena*

*Tablica 7.3. Izdvojene klase tala na području sliva Jadra i Žrnovnice*

*Tablica 7.4. Klase pokrova zemljišta na području sliva*

*Tablica 7.5. Usporedba površina klasa ranjivosti prema standardnoj metodi i modificiranim metodama koje uzimaju u obzir gustoću vrtača.*

*Tablica 7.6. Usporedba vrijednosti površina pojedine klase ranjivosti (slike 7.24. i 7.25)*

*Tablica 7.7. Izračun površina klasa ranjivosti (slika 7.33)*

*Tablica 7.8. Odnos površina klasa ranjivosti vodonosnika*

*Tablica 7.9. Prikaz klasa ranjivosti COP metodes pripadajućom površinom sliva*

*Tablica 7.10. Odnos površina*

*Tablica 8.1. Prikaz rangiranja pojedinih onečišćivača u klasificirane opasnosti*

## **POPIS PRILOGA:**

**Prilog 1:** Karta prirodne ranjivosti sliva izvora Jadra i Žrnovnice

**Prilog 2:** Karta rizika od onečišćenja podzemnih voda u slivu izvora Jadra i Žrnovnice

## ŽIVOTOPIS

**Jelena Loborec, dipl. ing. geotehnike**, rođena je 02. kolovoza 1983. godine u Varaždinu. Po završetku Prirodoslovno – matematičke gimnazije 2002. godine upisuje Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, gdje je diplomirala 2007. godine na hidrotehničkom smjeru. 2008. godine upisala je sveučilišni poslijediplomski doktorski studij geološkog inženjersva na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Od 2007. godine pa do danas radi u Varaždinu na Geotehničkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu na radnom mjestu znanstveni novak. Kao asistentica uključena je u nastavu na preddiplomskom i diplomskom studiju geoinženjerstva i inženjerstva okoliša na Geotehničkom fakultetu izvodeći vježbe iz kolegija „Hidrogeologija“, „GIS“, „GIS u geotehnici“ i „Zaštita podzemnih voda“. Pomagala je studentima u izradi nekoliko diplomskih radova i bila je neposredni voditelj u izradi nekoliko završnih radova. Osim nastavne djelatnosti uključena je i u izvedbu više znanstvenih i stručnih projekata iz područja hidrogeologije i zaštite podzemnih voda uz koje su vezani i objavljeni radovi.

### POPIS OBJAVLJENIH RADOVA:

**Kapelj, S., Loborec, J., Kapelj, J. (2013):** Assessment of aquifer intrinsic vulnerability by the SINTACS method. *Geologia Croatica*, Vol. 66, No. 2.

**Kapelj, S., Loborec, J., Kapelj, J., Švonja, M. (2010):** Application of SINTACS method in the recharge area of the Jadro and Žrnovnica springs. 4. Hrvatski geološki kongres, Šibenik (poster, sažetak, znanstveni).

**Kapelj, S., Dogančić, D., Tepeš P., Loborec, J., Kapelj, J. (2010):** Uloga geokemijskih obilježja tla u ocjeni specifične ranjivosti krških podzemnih voda /Perspektiva gospodarenja tлом u budućnosti / S. Husnjak (ur.). Zagreb : Hrvatsko tloznanstveno društvo, 145-146 (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)

**Kapelj, S., Kapelj, J., Jukić, D., Denić-Jukić, J., Švonja, M., Tepeš, P., Loborec, J., Dogančić, D., Biondić, B., Leis, A. (2009):** Integral approach for the protection of the Jadro and Žrnovnica springs catchment - Dalmatia, Croatia. Sustainability of the Karst environment - Dinaric Karst and other Karst regions / O. Bonacci (ur.). Gospić/Plitvička jezera : Sveučilišna tiskara d.o.o. 79-80 (predavanje, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni).

**Kapelj, S., Tepeš, P., Kapelj, J., Loborec, J., Dogančić, D.(2009):** Integralni pristup zaštiti sliva izvora Jadra i Žrnovnice – Dalmacija, Hrvatska. XXI Hrvatski skup kemičara i kemijskih inženjera, Knjiga sažetaka / P. Novak (ur.). Petrokemija (poster, sažetak, znanstveni).

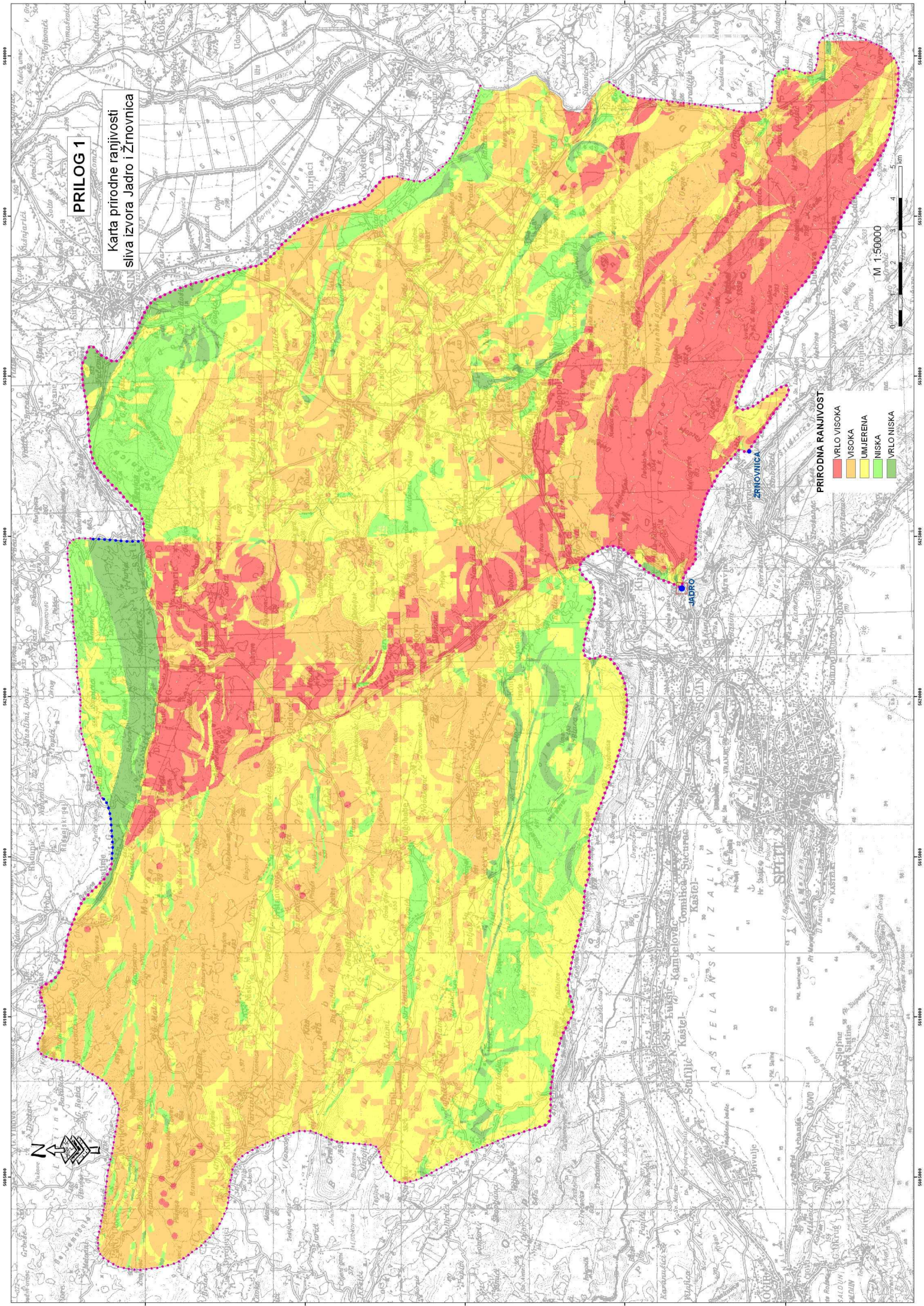


# PRILOG 1

Karta prirodne ranjivosti  
sliva izvora Jadro i Žrnovnica



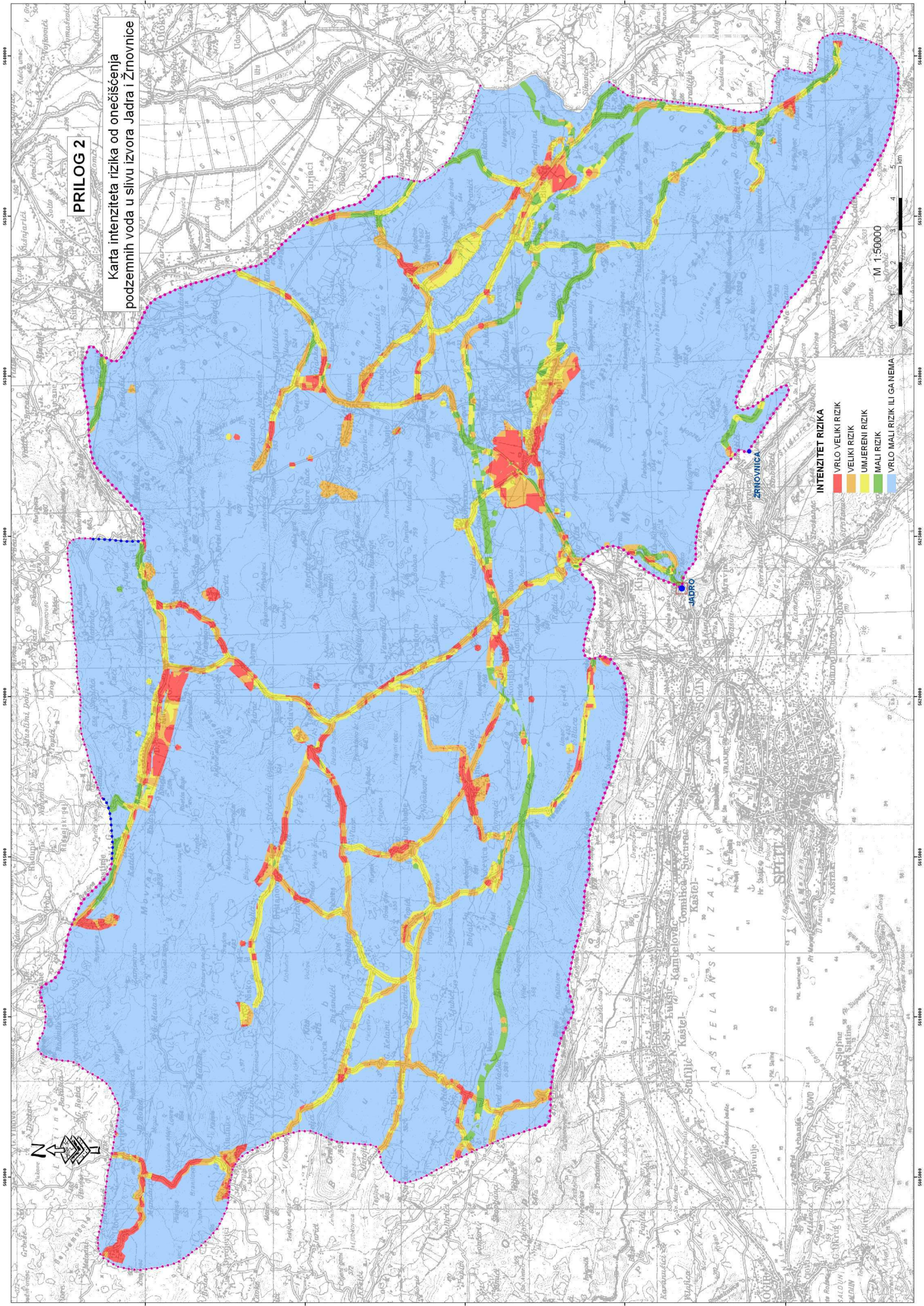
M 1:50000





# PRILOG 2

Karta intenziteta rizika od onečišćenja  
podzemnih voda u slivu izvora Jadra i Zrnovnice



## INTENZITET RIZIKA

- VRLO VELIKI RIZIK
- VELIKI RIZIK
- UMJERENI RIZIK
- MALI RIZIK
- VRLO MALI RIZIK ILI GANEMA

M 1:50000