

Utjecaj vodotoka Plitvice na krški vodonosnik

Mrakužić, Petar

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:925734>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-23**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

PETAR MRAKUŽIĆ

UTJECAJ VODOTOKA PLITVICE NA KRŠKI
VODONOSNIK

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2022.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva
za 14. 07. 2022. u 9 sa
Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu
Varaždin, 30. 06. 2022.

Predsjednik
ispitnog povjerenstva:

izr. prof. dr. sc. Sanja Kovč

Članovi povjerenstva

- 1) izr. prof. dr. sc. Hrvoje Meaški
- 2) prof. dr. sc. Ranko Bičević
- 3) doc. dr. sc. Jelena Labrec

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

UTJECAJ VODOTOKA PLITVICE NA KRŠKI
VODONOSNIK

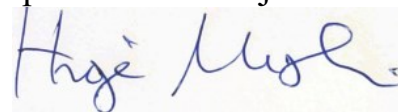
KANDIDAT:

Petar Mrakužić



MENTOR:

izv.prof.dr.sc. Hrvoje Meaški



VARAŽDIN, 2022.

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

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

Utjecaj vodotoka Plitvice na krški vodonosnik

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom izv.prof.dr.sc Hrvoja Meaškog.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 29.6.2022.

Petar Mrakužić



(Vlastoručni potpis)

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

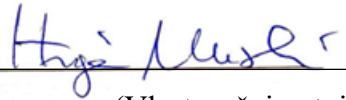
Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom:

Utjecaj vodotoka Plitvice na krški vodonosnik

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

U Varaždinu, 29.6.2022.

Izv.prof.dr.sc. Hrvoje Meaški, mentor



(Vlastoručni potpis)

SAŽETAK

Ime i prezime: Petar Mrakužić

Naslov rada: Utjecaj vodotoka Plitvice na krški vodonosnik

Rad prikazuje određivanje utjecaja vodotoka Plitvice na krški vodonosnik koji se nalazi na području Nacionalnog parka Plitvičkih jezera. Za prikaz utjecaja su izrađene karte prirodne ranjivosti, opasnosti i rizika. Metoda pomoću koje su izrađene karte je KAVA metoda koja spada u multiparametarske metode, a parametri koji se koriste se su: pokrovne naslage – O, oborine – P, infiltracija – I, svojstva vodonosnika – A. Za manipulaciju podacima koristio se programski paket ArcGIS. Istraživanjima i provedenim analizama je dokazano da vodotok Plitvica ima utjecaja na vodonosnik koji se nalazi na prirodno ranjivom području te da ranjivost vodonosnika može znatno utjecati i na izvor Klokot koji se nalazi u susjednoj Bosni i Hercegovini.

KLJUČNE RIJEČI:

Krški vodonosnik, prirodna ranjivost, karta ranjivosti, karta opasnosti, karta rizika, zaštita vodonosnika

ABSTRACT

Name and surname: Petar Mrakužić

Title: The influence of the Plitvice watercourse on the karst aquifer

The paper presents the determination of the impact of the Plitvice watercourse on the karst aquifer located in the area of the Plitvice Lakes National Park. Natural vulnerability, hazard and risk maps have been developed to show this impact. The method used to make the maps is the KAVA method, which belongs to the multiparameter methods, and the parameters used are: cover deposits - O, precipitation - P, infiltration - I, aquifer properties - A. The ArcGIS software package was used to manipulate the data. Research and analysis have shown that the Plitvice watercourse has an impact on the aquifer located in a naturally vulnerable area and that the vulnerability of the aquifer can significantly affect the source Klokot located in neighboring Bosnia and Herzegovina.

KEYWORDS:

Karst aquifer, natural vulnerability, vulnerability map, danger map, risk map, aquifer protection

SADRŽAJ

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | UVOD..... | 1 |
| 2. | OPIS ISTRAŽIVANOG PODRUČJA | 3 |
| 2.1. | GEOLOŠKI I TEKTONSKI OPIS ISTRAŽIVANOG PODRUČJA..... | 4 |
| 2.2. | HIDROGEOLOŠKI OPIS | 6 |
| 2.3. | PODLIV PLITVICE | 8 |
| 3. | PROCJENA PRIRODNE RANJIVOSTI VODOTOKA PLITVICE..... | 11 |
| 3.1. | OPĆENITO O PROCJENI PRIRODNE RANJIVOSTI | 11 |
| 3.2. | KAVA METODA | 15 |
| 3.3. | UPOTREBA GIS-a U PRIMJENI KAVA METODE..... | 17 |
| 3.4. | PODACI POTREBNI ZA IZRADU KARATA RANJIVOSTI POMOĆU KAVA METODE | 18 |
| 3.5. | PROCJENA PRIRODNE RANJIVOSTI POMOĆU KAVA METODE | 19 |
| 3.5.1. | Pokrovne naslage – parametar O | 19 |
| 3.5.2. | Oborine – parametar P | 21 |
| 3.5.3. | Površinska slivna područja | 23 |
| 3.5.4. | Infiltracija – parametar I | 24 |
| 3.5.5. | Svojstva vodonosnika – parametar A | 26 |
| 3.6. | INDIKATORI RANJIVOSTI | 29 |
| 3.6.1. | RV indikator | 29 |
| 3.6.2. | SV indikator..... | 30 |
| 4. | PROCJENA ANTROPOGENOG UTJECAJA U SLIVNOM PODRUČJU | 32 |
| 4.1. | PROCJENA OPASNOSTI (HAZARDA) | 32 |
| 4.2. | PROCJENA RIZIKA | 34 |
| 5. | PROCJENA UTJECAJA NA KRŠKI VODONOSNIK | 36 |
| 6. | ZAKLJUČAK..... | 40 |
| 7. | LITERATURA | 42 |
| | POPIS SLIKA..... | 46 |
| | POPIS TABLICA | 48 |

1. UVOD

Diplomski rad izrađen je sa svrhom sinteze znanja stečenih na fakultetu, a koja uključuju poznavanje geologije, hidrogeologije, izrade karti ranjivosti, opasnosti i rizika primjenom geografskog informacijskog sustava (skraćeno GIS) te poznavanje ponašanja onečišćivala na određenom području.

Navedene karte služe kao koristan alat za izradu prostornih planova te njihova izrada može biti ključna u budućoj zaštiti vodonosnika s obzirom da su svakim danom sve veći pritisci na vodne resurse, posebice zbog antropogenih aktivnosti koje uključuju promet, korištenje energije, poljoprivredne aktivnosti, rad industrijskih postrojenja i slično. Iz navedenih izvora u okoliš, a samim time i u vodonosnike i pitku vodu, dolaze različite vrste onečišćenja koja mogu u većoj ili manjoj mjeri ugroziti vodonosnik te pitku vodu. Prema Okvirnoj direktivi o vodama (2000/60/EC) voda se smatra općim dobrom te ograničenim resursom kojeg je potrebno zaštititi i upotrebljavati na održiv način.

Područje Republike Hrvatske karakteriziraju velike količine kvalitetne pitke vode, a samo područje može se podijeliti na dva velika vodna područja. Ta područja su vodno područje rijeke Dunav te jadransko vodno područje. Prvo vodno područje karakteriziraju stijene međuzrnske poroznosti, a drugo stijene pukotinske i pukotinsko-kavernozne poroznosti. Specifičan tip reljefa koji se prostire proučavanim područjem je krš kojeg karakteriziraju veliki krški vodonosnici. Jedan takav vodonosnik nalazi se i na području Plitvičkih jezera koja slove kao najljepši nacionalni park Hrvatske (Zakon o vodama NN 66/19, Plan upravljanja vodnim područjima 2016-2021).

Krška područja karakteriziraju manje površinske naslage te brz protok vode s površine terena dublje u podzemne vode zbog čega su vodonosnici na tom području izrazito ranjivi te ih je potrebno zaštititi. Iz navedenog razloga, različita onečišćenja mogu brzo doputovati u podzemlje te onečistiti pitku vodu (Biondić, B. i Biondić, R., 2014.). Kako bi se odredio stupanj zaštite, neizostavan je proces određivanje karata ranjivosti, opasnosti i rizika. Proces zaštite krških vodonosnika prikazan je u projektu COST620 pod nazivom Kartiranje ranjivosti i rizika u svrhu zaštite karbonatnih (krških) vodonosnika (engl. *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*), 2004. godine (u daljnjem tekstu COST 620). U navedenom projektu su sintetizirana znanja

različitih istraživača te je predložen konceptualni model Europskog pristupa na temelju kojeg je moguće provesti kvalitetnu analizu ranjivosti, opasnosti i rizika za krški vodonosnik.

Kao područje istraživanja odabran je sliv vodotoka Plitvice na području Plitvičkih jezera koja su smještena na krškom području Republike Hrvatske. Plitvička jezera su najstariji nacionalni park u Hrvatskoj te ih je zbog prirodne ljepote potrebno zaštititi.

U radu su prikazane i objašnjene karte ranjivosti, opasnosti i rizika za vodotok Plitvica (Slika 1) te je prikazan utjecaj vodotoka na krški vodonosnik. Za izradu karata korišteni su hidrološki, hidrogeološki, topografski podaci, podaci o vegetaciji na istraživanom području. Podaci su obrađeni uz pomoć programskog paketa ArcGIS.



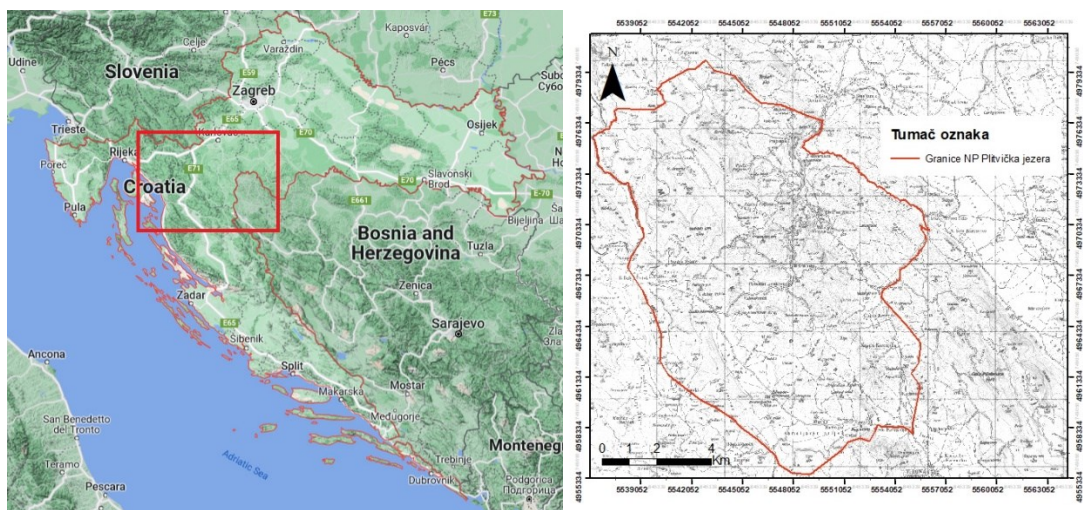
Slika 1. Vodotok Plitvica (osobna arhiva, listopad 2021.)

2. OPIS ISTRAŽIVANOG PODRUČJA

Područje istraživanja je vodotok Plitvica te njegovo slivno područje koje se nalazi na području sliva Plitvičkih jezera. Plitvička jezera imaju status najvećeg i najstarijeg nacionalnog parka još od 1949. godine. Dio su planinskog masiva Dinarida, odnosno smještena su na krškom području Republike Hrvatske te su vodni sustavi na istraživanom području vezani uz procese okršavanja karbonatnih stijena mezozojske starosti.

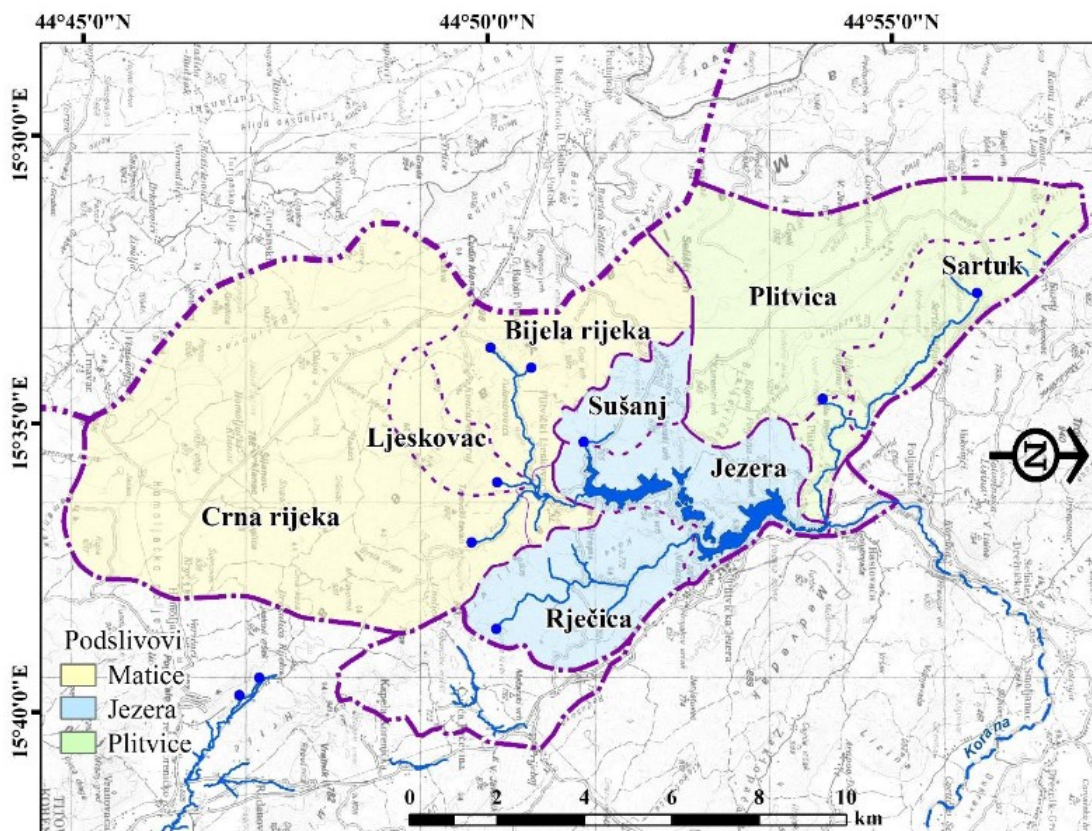
Sliv Plitvičkih jezera zauzima površinu od oko 150 km², dio je tijela podzemnih voda „Korana“ te pripada crnomorskom slivu. Sliv Plitvičkih jezera je jedinstvena cjelina zbog činjenice da su sve vode usmjerene prema jezerskom sustavu Plitvičkih jezera, odnosno izvorišnoj zoni rijeke Korane.

Morfološki gledano, Plitvička jezera spadaju u brdsko-planinsko područje čiji je smjer pružanja sjeverozapad-jugoistok (SZ-JI). Plitvička jezera smještena su između planinskog područja Male Kapele (JZ) najviše nadmorske visina 1279 m te Ličke Plješivice (SI), čiji se vrh Gola Plješivica nalazi na 1646 m n. m. (Slika 2).



Slika 2. Geografski položaj Plitvičkih jezera (lijevo), karta Plitvičkih jezera s ucrtanom administrativnom granicom nacionalnog parka (desno) (modificirano prema Meaški, 2011)

Sliv Plitvičkih jezera dijeli se na manje podslove: Plitvica, Jezera, Matica (Meaški, 2011). Područje istraživanja u ovom radu je podslov Plitvice koji se dalje dijeli na manje podslove: potok Plitvica, Sartuk i Plitvica (Slika 3).



Slika 3. Kartografski prikaz podjele sliva Plitvičkih jezera (Meaški et al., 2022)

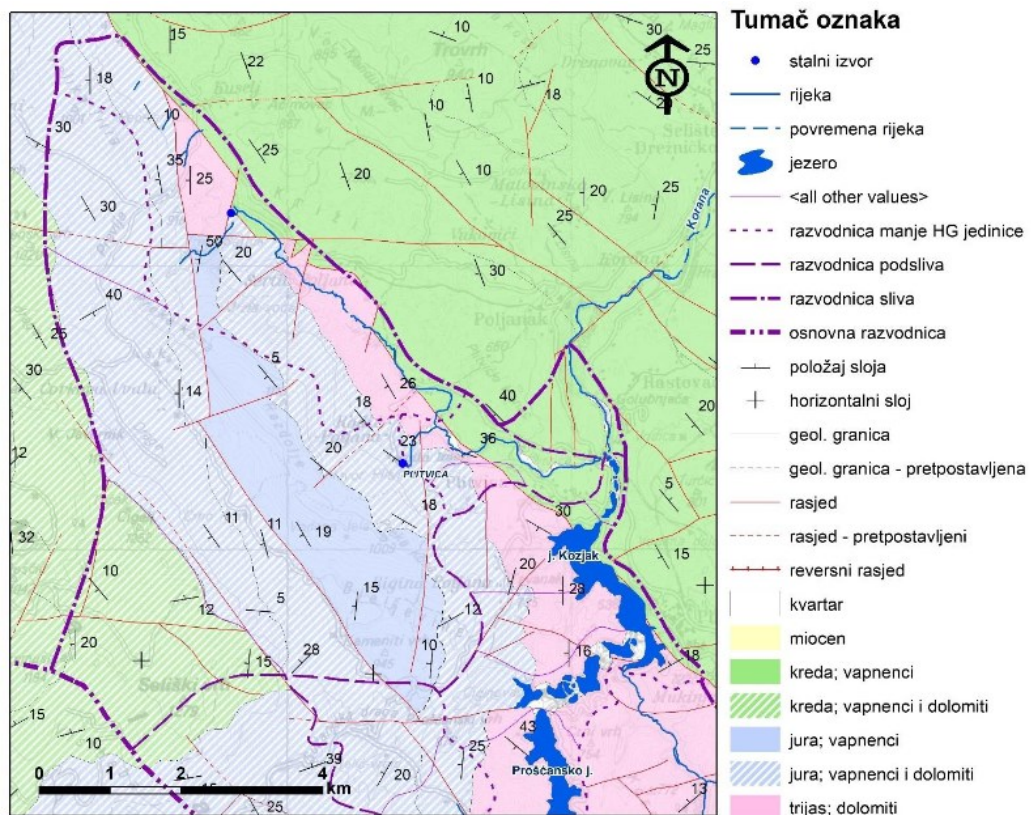
2.1. GEOLOŠKI I TEKTONSKI OPIS ISTRAŽIVANOG PODRUČJA

Stijene koje prevladavaju na podslivu Plitvice su mezozojske starosti uz manje pojave naslaga miocenske i kvartarne starosti. Na sjevernom dijelu nalaze se stijene gornjotrijaske starosti koje su najstarije stijene na površini. Navedene stijene pretežito čine dolomiti koji izgrađuju jezgre antiklinala.

Središnji dio područja čine stijene jurske starosti, odnosno lijas, doger i malm. Navedene stijene su od iznimnog značaja jer izgrađuju glavne vodonosnike sliva Plitvička jezera. U glavnim vodonosnicima se zapravo radi o izmjeni vapnenaca i dolomita (stariji dio jure), dok u srednjoj juri prevladavaju vapnenačke naslage.

Sjeveroistočne dijelove Plitvičkih jezera te jugozapadne dijelove podsliva Plitvice (oko Seliškog vrha) izgrađuju naslage kredne starosti koje su litološkim opisom karbonatne stijene te variraju sastavom vapnenca: od vapnenačko-dolomitnih izmjena pa do čistih

dolomita nastalih kasno dijagenetskom dolomitizacijom. Navedene naslage izgrađuju uže područje vodotoka Plitvice (Slika 4) (Meaški, 2011).

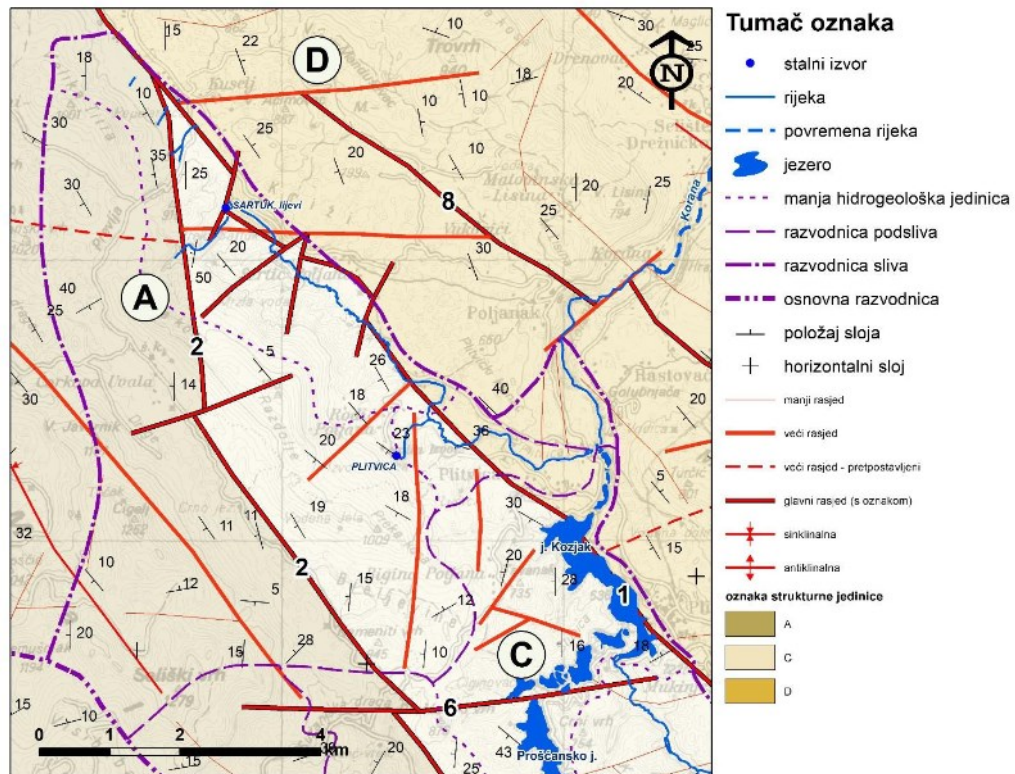


Slika 4. Pregledna geološka skica podsliva Plitvice (Meaški 2011; modificirano prema Polšak et al., 1967; Velić et al., 1970)

Podsliv Plitvice je dio složenog tektonskog razvoja borano-navlačnog pojasa Dinarida, karakterističnog dinaridskog smjera pružanja, odnosno pružanja sjeverozapad-jugoistok. U istraživanom području je izražena rasjedna tektonika, a karbonatni kompleksi su dezintegrirani. S obzirom da je baza okršavanja rijeka Korana, podzemne vode su relativno visoko.

Područje Plitvičkih jezera spada u dio tektonske jedinice Mala Kapela – Lička Plješivica unutar kojih se izdvajaju strukturne jedinice Veliki Javornik, „tektonski prodor“ gornjotrijaske starosti te strukturna jedinica Trovrih – Gola Plješivica (Slika 5). Strukturna jedinica Veliki Javornik dio je planinskog masiva Male Kapele (na slici 5 označeno s „A“) te predstavlja dio sinklinale). „Tektonski prodor“ gornjotrijaske starosti je zasebna strukturna jedinica Plitvička jezera (na slici 5 označeno s „C“) te je dio antiklinale.

Strukturalna jedinica Trovrh – Gola Plješivica je dio strukture planinskog masiva Ličke Plješivice (na slici 5 označeno s „D“) te predstavlja sinklinorij dinaridskog pružanja (Meaški, 2011). Ova strukturalna jedinica ima vrlo važnu hidrogeološku ulogu u sustavu Plitvičkih jezera jer omogućava pronos dijela vode prema slivu rijeke Une, odnosno stvaranje bifurkacijskih uvjeta (Meaški, 2011).



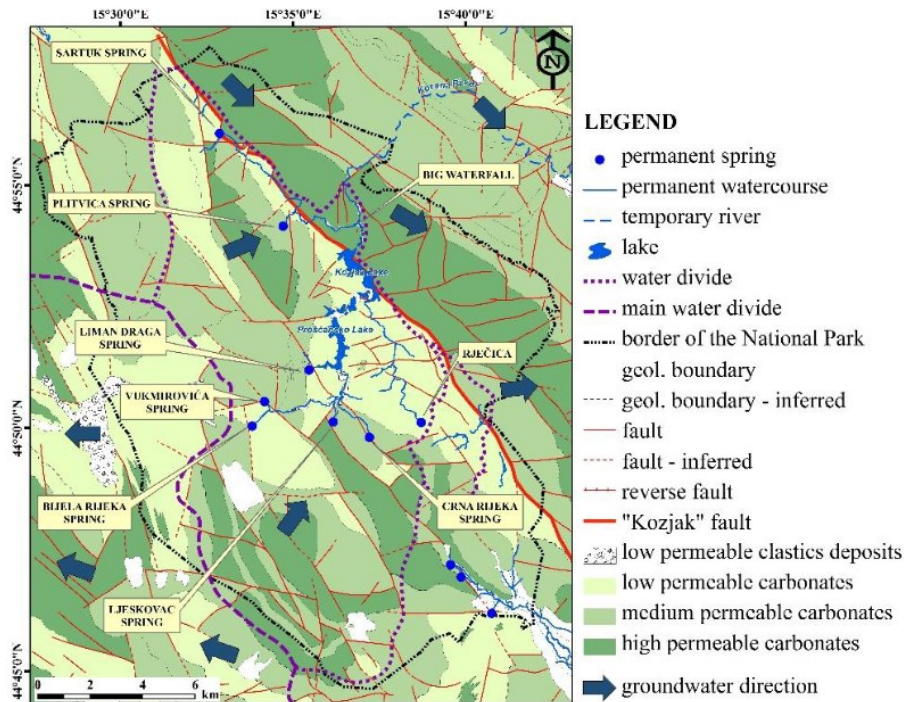
Slika 5. Pregledna tektonska skica Plitvičkih jezera

Oznake strukturalnih jedinica: A – Veliki Javornik, C – Plitvička jezera, D – Trovrh – Gola Plješivica. Oznake većih rasjeda: 1 – Saborsko – Kozjak – Korenica, 2 – Kuselj – Čorkova uvala – Pl. Leskovac – Korenica; 6 – Prošćanski vrh – Mukinje, 8 – Kuselj – Rastovača – Zaklopača (Meaški, 2011)

2.2. HIDROGEOLOŠKI OPIS

Na istraživanom području mogu se izdvojiti dobro vodopropusne, srednje vodopropusne i slabo vodopropusne karbonatne stijene kao i naslage promjenjivih vodopropusnih svojstava te u vodonepropusne klastične stijene (Slika 6). U nastavku je kratki opis pojedinih hidrogeoloških vrsta stijena koje su prisutne na istraživanom području (Meaški, 2011).

Dobro vodopropusne karbonatne stijene su zastupljene s pretežitom čistim ili mjestimice dolomitiziranim vapnencima, a njihova propusnost ovisi o razlomljenosti. Stijene predstavljaju regionalno ili lokalno vrlo propusna područja, a pripadaju stijene senonske starosti (K_2^3) te stijene dogerske starosti (J_2).



Slika 6. Hidrogeološki prikaz sliva Plitvičkih jezera (prema Meaški et al., 2016)

Srednje vodopropusne karbonatne stijene su zastupljene izmjenama vapnenaca i dolomita te dolomitno-vapnenačke breče. Stijene imaju izraženu sekundarnu poroznost te su im pukotine ispunjene crvenicom, dolomitnim pijeskom i materijalom nastalim trošenjem stijena. Ove stijene predstavljaju hidrogeološke barijere, a pripadaju im stijene lijaske starosti J_1 – dobro vodopropusne stijene, stijene starosti oksford-kimeridž ($J_3^{1,2}$) – slabo vodopropusne stijene, stijene donjokredne starosti (K_1) – slabovodopropusne stijene, stijene starosti cenoman-turon (K_2^{1+2}) (Meaški, 2011).

Slabo vodopropusne karbonatne stijene zastupljene su dolomitima, dolomitičnim vapnencima i dolomitnim brečama, odnosno to su stijene slabe sekundarne poroznosti. Ove stijene rezultiraju slabom vertikalnom i horizontalnom propusnosti i infiltracijom vode u podzemlje. Ove stijene izgrađuju potpune ili lokalne hidrogeološke barijere, a pripadaju stijene trijaskne starosti (T_3), stijene gornjolijske starosti (J_1^3), stijene starosti kimeridž-titon ($J_3^{2,3}$) te stijene cenomanske starosti (K_2^1) (Meaški, 2011).

Vodonepropusne klastične stijene su zastupljene u naslagama srednjomiocenske starosti te se lokalno javljaju u sjeveroistočnom dijelu Plitvičkih jezera. Njih pretežito čine vapnoviti lapori i lapori koji transgresivno prekrivaju starije karbonatne mezozojske starosti.

Naslage promjenjive vodopropusnosti na području Plitvičkih jezera su zapravo naslage relativno male debljine i promjenjivog litološkog sastava, a pružanje je lokalno ograničeno. Ovisno o stijenama koje se nalaze u podlozi, moguće je formiranje manjih vodonosnika. Na istraživanom području u ove stijene spadaju aluvij, proluvij te pojave sedre (Meaški, 2011).

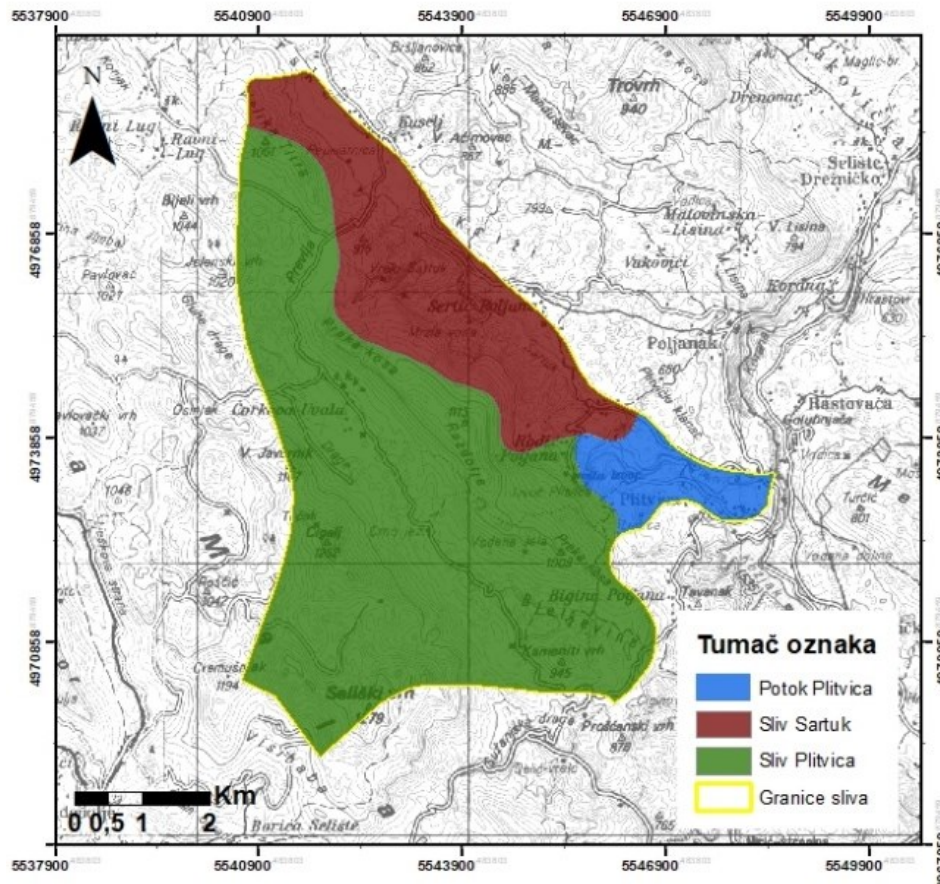
2.3. PODLIV PLITVICE

Podsliv Plitvice predstavlja sveukupno 26 % ukupne površine sliva Plitvičkih jezera, odnosno oko 40,5 km² te obuhvaća sve vode koje gravitiraju vodotoku Plitvica (Slika 7) i koje izravno preko Velikog Slapa utječu u područje Sastavka i tamo se spajaju s vodama koje dotječu iz sustava jezera. Vodotok Plitvica se jezerskom sustavu priključuje tek na izvorišnom dijelu rijeke Korane.



Slika 7. Potok Plitvica (osobna arhiva, listopad 2021)

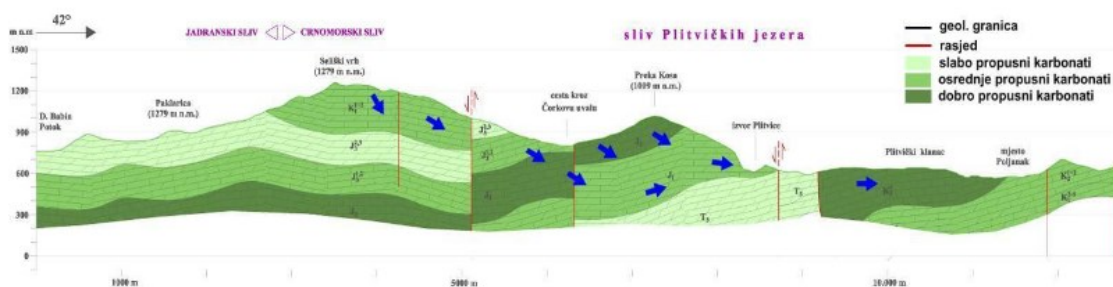
Podsliv Plitvice se dijeli na manje hidrogeološke cjeline Sartuka, izvora Plitvice i vodotoka Plitvice (Slika 8).



Slika 8. Podjela sliva Plitvice

Cjelina Sartuka zauzima površinu od oko 10 km² te obuhvaća područje koje drenira vodotok Sartuk. Cjelina se proteže od područja Kuselja prema vodotoku Plitvica. Vodotok Sartuk nastaje spajanjem više manjih izvora na području izgrađenom od slabo vodopropusnih dolomita trijaskе starosti.

Cjelina izvor Plitvice zauzima površinu od oko 28 km² te je izgrađena od naslaga donjokredne i dogerske starosti koje čine vapnenci. Na ovoj cjelini izraženi su glavni vodonosnici. Također, na ovom području je značajan uzdužni rasjed Kuselj – Čorkova Uvala – Pl. Ljeskovac – Korenica, koji razdvaja naslage dogerske i malmske starosti. U navedenom rasjedu je izvedeno trasiranje za vrijeme visokih voda iz ponora Crno jezero (829 m n.m.) pri čemu se traser pojavio nakon 48 sati jedino na izvoru Plitvice (610 m n.m.) (Slika 9) (Meaški, 2011).

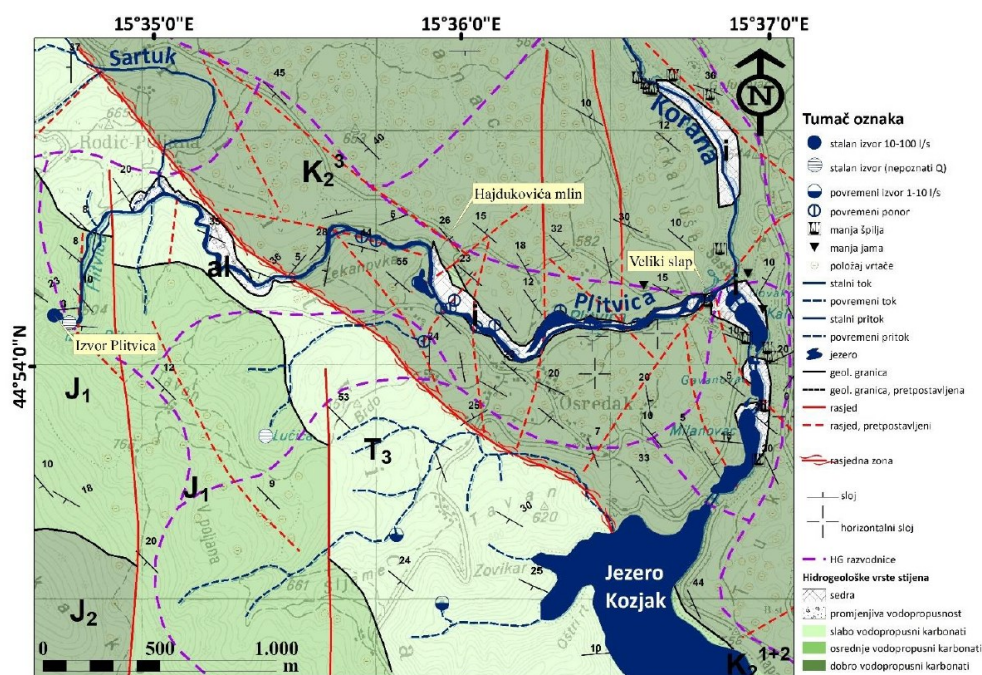


Slika 9. Hidrogeološki profil poprečno na sliv izvora Plitvice (Meaški, 2011)

Cjelina vodotoka Plitvice (

Slika 10) zauzima površinu od oko 2,5 km² te obuhvaća neposredni sliv vodotoka od izvorišta do Velikog slapa. Cjeline izvora Plitvice i vodotoka Plitvice zapravo čine jedinstvenu cjelinu, no zbog specifičnih gubitaka vode koji se javljaju na području cjeline vodotoka Plitvice, potrebno je izdvojiti navedene cjeline. Također, zbog razvijenog podzemnog otjecanja, hidrogeološka i topografska razvodnica se ne preklapaju.

Hidrogeološki gledano, na slici 10 se može uočiti i dominantan smjer pružanja geoloških struktura od sjeverozapada prema jugoistoku, a tim se smjerom proteže i tzv. Kozjački rasjed. Poprečno na rasjed smješteni su i manji rasjedi. Na dijelu područja vezanom uz naslage gornjokredne starosti detektirane su brojne vrtače, dok se u ostatku područja nalazi manji broj vrtača. Uz sam vodotok Plitvice detektirana su mjesta poniranja.



Slika 10. Hidrogeološki prikaz vodotoka Plitvice (Meaški et al., 2022)

3. PROCJENA PRIRODNE RANJIVOSTI VODOTOKA PLITVICE

3.1. OPĆENITO O PROCJENI PRIRODNE RANJIVOSTI

Ranjivost vodonosnika definira se kao relativno, nemjerljivo i bez dimenzijsko svojstvo prirodnog sustava te se može određivati za zonu izvorišta u krškom području te za krške vodonosnike. Ovakav koncept određivanja ranjivosti vodonosnik sustava razvijen je u SAD-u krajem 80-ih godina prošloga stoljeća, da bi se zatim proširio i na područje Kanade i Europe tijekom 90-ih godina (Tablica 1).

Tablica 1. Prikaz metoda određivanja ranjivosti

| NAZIV | GODINA, MJESTO | PARAMETRI |
|---|-------------------------------|---|
| DRASTIC metoda (Aller et al., 1987) | 1987., SAD | Dubina do podzemne vode (D), područje napajanja (R), značajke vodonosnika (A), svojstva tla (S), topografija (T), utjecaj nesaturirane zone (I), hidraulička vodljivost vodonosnika (C) |
| AVI metoda (Van Stempfort et al., 1993) | 1993., Kanada | Debljina svakog sedimenta iznad saturirane zone vodonosnika, procijenjena hidraulička vodljivost sedimenata |
| GOD metoda (Foster, 1987; Vrba i Zaporozec, 1994) | 1994., Velika Britanija | Tip vodonosnika, litološke karakteristike vodonosnika, dubina do podzemne vode |
| Njemačka metoda (Holting et al., 1995) | 1998., Njemačka | usmjerena je na procjenu zaštitne funkcije naslaga povrh razine podzemne vode. Ova metoda ne tretira saturiranu zonu vodonosnika i nema posebnog osvrta na krške vodonosnike. |
| ISIS metoda (Civita i De Regibus, 1995) | 1995., Italija | srednje godišnje prihranjivanje, tip tla, debljina tla, litologija nesaturirane zone, tip i debljina vodonosnika |
| EPIK metoda (Doerfliger i Zwahlen, 1995, 1999) | 1998., Švicarska | epikrške zone, pokrovnih zaštitnih naslaga, sustava infiltracije i razvitka krških formi |
| SINTACS (Civita i De Maio, 2000) | 2000., Italija | Dubina do podzemne vode, područje napajanja, značajke vodonosnika, svojstva tla, topografija, utjecaj nesaturirane zone, hidraulička vodljivost vodonosnika + četiri težinska sustava koja ovise o hidrogeološkoj građi vodonosnika |

Navedene metode (Tablica 1) u suštini u obzir uzimaju slične parametre sa sličnim sustavom bodovanja, no primjenom različitih metoda na istom području dobivaju se različite karte ranjivosti. Također, različiti istraživači mogu korištenjem iste metode na istom području dobiti različite karte ranjivosti. Odnosno, karte ranjivosti ovise i o subjektivnoj procjeni.

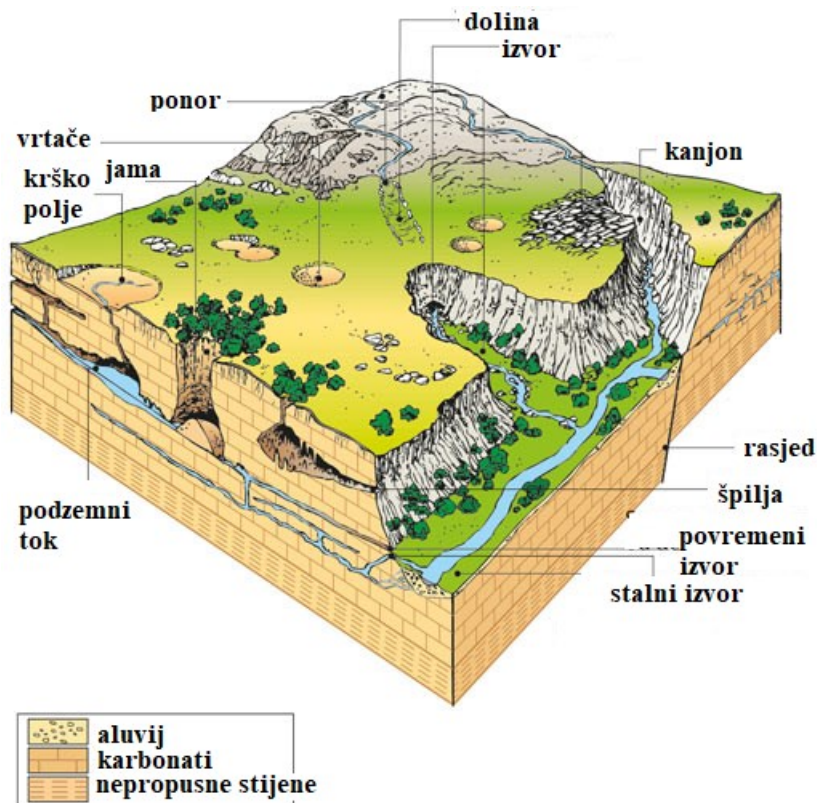
Korak dalje bila je izrada konceptualnog pristupa u zaštiti krških vodonosnika, tzv. Europski pristupa, u sklopu projekta COST 620 (2004). Projektom COST 620 koji je bio vezan uz zaštitu krških vodonosnika u Europi naglašena je potreba za složenim geološkim hidrogeološkim, hidrološkim, geofizičkim i drugim istraživanjima svih dijelova krških vodonosnih sustava čime je moguće dobiti informacije o krškoj sredini te o dinamici tečenja podzemne vode. Ne radi se o metodi, nego o pristupu u određivanju ranjivosti krških vodonosnika, tako da nisu propisane detaljne upute, formule ili tablice za iščitavanje vrijednosti već su dane smjernice za procjenu prirodne ranjivosti čime je omogućena ujednačenost, fleksibilnost i prilagodljivost različitim okolišnim uvjetima. Precizno su definirane razlike između ranjivosti i rizika, prirodne i specifične ranjivosti te između ranjivosti vodonosnika i izvorišta.

Od tada su razvijene brojne metode za procjenu ranjivosti. Iako se metode razvijaju na istom konceptu, najčešće su prilagođene državi u kojoj su razvijene, dominantom tipu vodonosnika, dostupnim podacima te zakonskoj regulativi države.

U ovom radu naglasak je na prirodnu ranjivost krških vodonosnika, a koncept takve ranjivosti se temelji na pretpostavci da fizička, kemijska i biološka svojstva okoliša mogu doprinijeti zaštiti podzemnih voda od antropogenog utjecaja.

Kako bi se bolje razumjela procjena prirodne ranjivosti krških područja, za početak je potrebno objasniti pojmove krš te krški vodonosnik. Prema literaturi, pojam krš se definira kao „specifičan reljef topljivih stijena s posebnom (pretežito podzemnom) cirkulacijom vode (vapnenac, dolomit, gips)“ (Hrvatska enciklopedija, 2022). Krška područja su na području Republike Hrvatske većim dijelom vezana uz geološke strukture Dinarida, a tamo prevladavaju karbonatne stijene. U takvim područjima postoje brojni krški vodonosnici koji su od velikog značaja jer sadrže dovoljne količine vode koja je iznimne kakvoće te samim time imaju „status strateških rezervi pitke vode“ za Hrvatsku.

Na krškom području se razvijaju specifični površinski i podzemni morfološki oblici (Slika 11). Za ovaj rad je bitno opisati krške vodonosnike koji imaju primarni, pukotinski te pukotinosko-kavernozni porozitet. Primarni porozitet je nastao za vrijeme taloženja stijena, pukotinski je nastao otapanjem ili lomljenjem stijena što je posljedica tektonskih pokreta, a pukotinsko-kavernozni je nastao daljnjim erozijskim djelovanjem vode što je doprinijelo razvoju brojnih kanala kroz koje teče podzemna voda (Biondić, B. i Biondić, R., 2014).



Slika 11. Prikaz krškog područja (Dostupno na: <https://www.encyclopédie-environnement.org/en/water/karst-renewable-water-resource-in-limestone-rocks/>)

Zbog tankog pokrovnog sloja tla, koncentracije protoka unutar epikrške zone te međusobno povezanih pukotina koje omogućuju brzu infiltraciju vode (samim time i onečišćenja) u podzemlje te zbog brzog protjecanja vode kroz kanale i pukotine dolazi i do širenja onečišćivala na velike udaljenosti u vrlo kratkom vremenskom periodu. Iz navedenih razloga, krški vodonosnici se smatraju iznimno ranjivim područjima te su iz navedenih razloga postali područjem istraživanja za brojne znanstvenike.

Kako većina antropogenih aktivnosti može u određenoj mjeru ugroziti krške vodonosnike, vrlo je važno odrediti razinu ranjivosti krških vodonosnika zbog njihove zaštite i sanacije te budućih prostornih planova (Biondić, B. i Biondić, R., 2014).

Danas je uobičajeno da se prilikom određivanja ranjivosti vodonosnika razlikuju dvije vrste ranjivosti (COST 620, 2004):

- **prirodna ranjivost** (engl. *intrinsic vulnerability*) - uzima u obzir geološke, hidrološke i hidrogeološke osobine područja neovisno o svojstvima onečišćivača. Parametri korišteni za modeliranje ranjivosti: uvjeti infiltracije vode, osobine tla te nesaturirane i saturirane zone.
- **specifična ranjivost** (engl. *specific vulnerability*) uz prirodnu ranjivost u obzir uzima svojstva pojedinog onečišćivača (karakteristike i interakcija onečišćivača s okolinom). Parametri korišteni za modeliranje ranjivosti: vrijeme putovanja onečišćenja kroz nesaturiranu zonu, vrijeme zadržavanja u vodonosniku, kapacitet razrjeđenja onečišćenja.

Za određivanje prirodne ranjivosti, odnosno procjenu do koje mjere je krški vodonosnik osjetljiv ili ugrožen, potrebno je provesti ispitivanja osnovnih hidrogeoloških odnosa te različitih fizičkih, geokemijskih, hidrogeokemijskih i biogeokemijskih svojstava dijelova hidrogeološke cjeline. Na temelju dobivenih podataka se izrađuju karte ranjivosti, a takve karte mogu služiti kao podloga za izradu prostornih planova te biti od iznimnog značaja prilikom odlučivanja o upravljanju i korištenju područja. Na koncu, kartama ranjivosti je moguće direktno utjecati te zaštititi podzemne vode.

Uz karte prirodne ranjivosti, kartama specifične ranjivosti se nastoji izdvojiti dijelove vodonosnika na kojima se prirodna ranjivost smanjuje zbog zadržavanja onečišćenja (procesima usporavanja i razgradnje) u pokrovnim naslagama (COST 620, 2004).

Osim određivanja ranjivosti potrebno je odrediti i opasnost ili hazard koja se definira kao izvor onečišćenja koji je posljedica antropogenog djelovanja. Nakon što se odrede ranjivost i opasnost, moguće je pretpostaviti rizik od onečišćenja podzemnih voda za neko vodno područje.

U ovom radu izrađene su i prikazane karte prirodne ranjivosti i opasnosti te je prikazana i objašnjena karta rizika. Za procjenu ranjivosti korištena je KAVA metoda koja je

razvijena na području Republike Hrvatske. Razvijena je u sklopu UNESCO i *MedPartnership* projekta na području sliva Novljanske Žrnovnice u Lici i u Hrvatskom primorju pod nazivom *Karst Aquifer Vulnerability Assessment* metoda ili KAVA metoda (Biondić et al., 2014). Navedena metoda se testirala 2016. godine na području Bakarskog zaljeva (Biondić et al., 2016) te u diplomskim radovima za dio sliva Plitvičkih jezera (Matin, 2017) te područje sliva Bokanjac-Poličnik (Vedak, 2021).

3.2. KAVA METODA

KAVA metoda temelji se na konceptualno modelu Europskog pristupa (COST 620, 2004) te se temelji na modelu „porijeklo – put – cilj“ (Slika 12) .

- Porijeklo predstavlja mjesto nastanka potencijalnog onečišćenja na površini ili neposredno ispod površine terena, odnosno radi se o izvoru onečišćenja;
- Put predstavlja kretanje onečišćenja od točke infiltracije kroz prirodni sustav prema području kojeg je potrebno zaštititi;
- Cilj predstavlja vodni resurs koji je potrebno zaštititi, odnosno vodonosnik ili izvorište.



Slika 9. Model „porijeklo – put – cilj“ (modificirano prema COST 620, 2004)

Slika 12. Model „porijeklo – put – cilj“ (modificirano prema COST 620, 2004)

Bitno je razlikovati procjenu prirodne ranjivosti krškog izvorišta i krških vodonosnika koje, iako imaju slične koncepte te je nemoguće zaštititi izvorište bez zaštite vodonosnika, bitno je odrediti primarni cilj te razjasniti o kojoj ranjivosti se radi. U ovom radu je

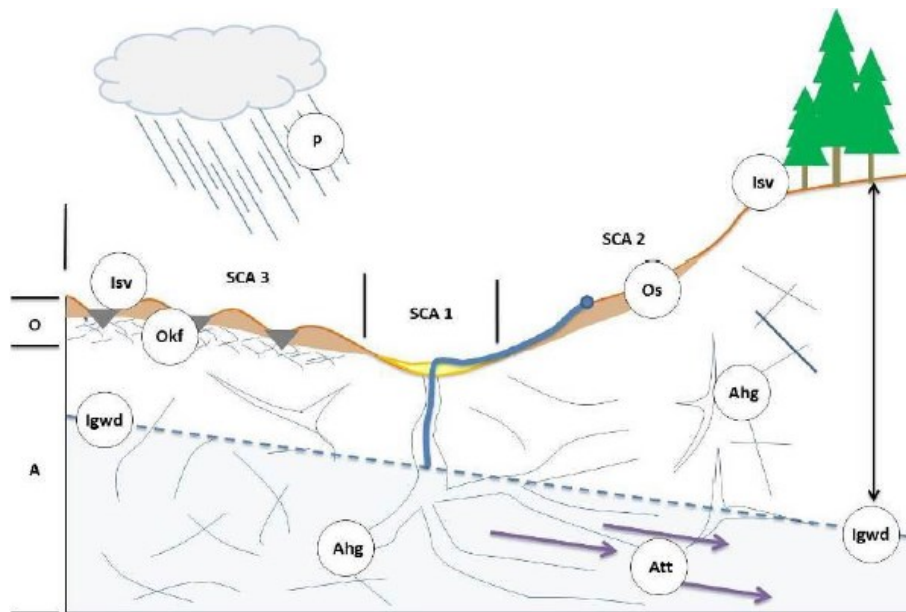
ranjivost vodonosnika određena za cijelo područje podsliva Plitvice, a što se tiče ranjivosti izvorišta, iz određivanja ranjivosti izbačen je podsliv Sartuk.

U ovom radu se KAVA metoda koristi za procjenu prirodne ranjivosti krškog vodonosnika gdje se prostorna analiza te karte ranjivosti i rizika izrađuju pomoću GIS metodologije s više parametara. S obzirom da su karakteristike krških vodonosnika heterogenost i anizotropija potrebno je odrediti razinu podzemne vode. To je teško ostvarivo u sustavima bez dovoljno istražnih bušotina te se iz tog razloga u KAVA metodi nesaturirani i saturirani dio vodonosnika obrađuju zajedno čime se pojednostavljuje cjelokupni model. Iz navedenih razloga, granica između saturiranih i nesaturiranih zona vodonosnika se često određuje empirijski, a debljina nesaturiranog dijela vodonosnika je nepouzdan podatak što je zapravo nedostatak svih metoda u kojima se koristi taj parametar (Biondić et al., 2014).

U KAVA metodi se koriste četiri osnovna parametra (Biondić et al., 2014):

1. pokrovne naslaga – O parametar,
2. utjecaj oborina – P parametar,
3. utjecaj infiltracije – I parametar,
4. svojstva vodonosnika – A parametar.

Navedenim parametrima se određuje prirodna ranjivost izvorišta, a za procjenu prirodne ranjivosti vodonosnika koriste se navedeni parametri uz podfaktor parametra A kojim se opisuju statički uvjeti u vodonosniku (A_{hg}). Također, i ostali parametri imaju podfaktore (Slika 13) koji će detaljnije biti objašnjeni kasnije u radu uz postupak izrade karata.



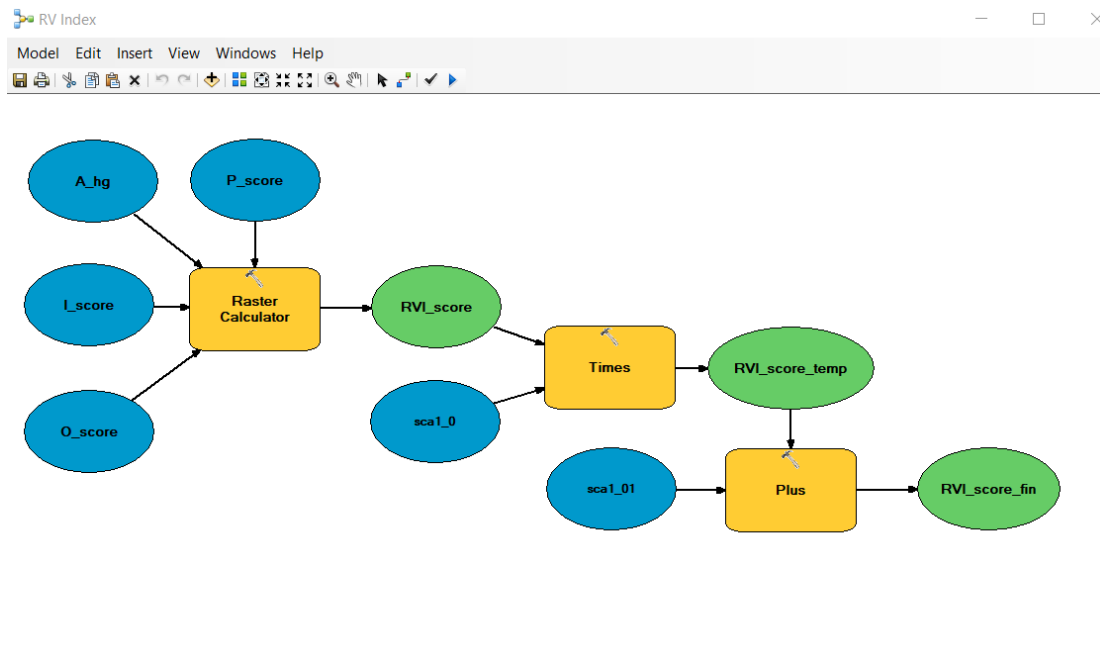
Slika 13. Konceptualni model KAVA metode (Biondić et al., 2016)

3.3. UPOTREBA GIS-a U PRIMJENI KAVA METODE

Geografski informacijski sustav (u daljnjem tekstu: GIS) je sustav hardvera, softvera te procedura kojima je omogućeno upravljanje, obrada, analiza, modeliranje, predstavljanje te prikaz georeferenciranih podataka kako bi se riješili kompleksni problemi planiranja i gospodarenja otpadom. Odnosno, GIS omogućuje formiranje prostorne baze podataka, spremanje i organizaciju velikog broja podataka, jednostavan unos podataka i atributa, raznoliku manipulaciju podacima pomoću velikog broja alata i funkcija, i ono najvažnije, krajnji rezultat korištenja GIS-a te multiparametarskih metoda je kartografski prikaz (Biondić R., 2010).

GIS se koristi u područjima različitih struka (urbanističko planiranje, zaštita okoliša, građevinarstvo, upravljanje vodnim resursima i slično) jer prilikom izrade kartografskih prikaza bazu podataka u GIS-u čini niz slojeva karata koje su georeferencirane i smještene u prostoru. Podaci se smještaju u tematske karte na kojima su sadržane određene pojave, primjerice pedološka ili hidrogeološka podloga. Podloga ili sloj je zasebna tematska karta, a GIS omogućuje je preklapanje više različitih podloga te služi kao alat za prikaz zona zaštite vodonosnika te za modeliranje ranjivosti. Odnosno, analizom i preklapanjem različitih podloga (geološki i hidrogeološki podaci, vegetacija, pedologija itd.) dobivaju se karte ranjivosti za određeno područje.

Prilikom određivanja ranjivosti KAVA metodom korišten je GIS te su provedene različite prostorne analize koje su podržane u programskom paketu, dok je za izračunavanje svih potrebnih parametara korišten ModelBuilder (Slika 14). Krajnji rezultat je karta ranjivosti na području sliva Plitvičkih jezera.



Slika 14. Primjer ModelBuilder-a za izradu RV indeksa koji je korišten u ovom radu

3.4. PODACI POTREBNI ZA IZRADU KARATA RANJIVOSTI POMOĆU KAVA METODE

Za primjenu KAVA metode na slivu Plitvice korištene su različite karte i podaci te su njihovom analizom i obradom dobivene karte ranjivosti.

- Iz Hidropedološke karte Hrvatske M 1:300 000 dobiveni su pedološki podaci koji se odnose na opis teksture i dubine pojedinih naslaga, procjenu slobodne vode u tlu, hidropedološka svojstva tla te raspodjelu pedoloških jedinica (Vidaček et al., 2007).
- Iz listova Osnovne geološke karte Hrvatske M 1:100 000 dobiveni su litološki i geološki podaci koji se odnose na opis litoloških jedinica, stanje razlomljene stijenske mase te debljinu pojedinih litoloških članova (Šikić et al., 1972).
- Iz hidrogeološke karte su dobiveni hidrogeološki podaci koji se odnose na opis hidrogeoloških jedinica, stanje okršenosti i propusnosti stijenske mase, rezultate provedenih trasiranja, zabilježene pojave izvora, špilja, vrtača (Meaški, 2011).

- Iz klimatskog atlasa Hrvatske su dobiveni hidrometeorološki podaci za tipične vremenske nizove promatranja (Zaninović et al., 2008).
- Iz digitalnog modela terena (engl. *Digital Elevation Model / DEM*) dobiveni su podaci o nagibu terena, apsolutnoj dubini podzemne vode te debljini nezasićene zone vodonosnika.
- Iz CLC baze prostornih podataka su dobiveni podaci o korištenju zemljišta te se oni odnose na procjenu utjecaja vegetacije na krški vodonosnik te procjenu razine infiltracije površinskih voda u podzemlje (CLC 2000, Hrvatska).
- Iz različitih topografskih karata dobiveni su podaci koji se odnose na osnovne slojeve podataka za prostorno prikazivanje analiziranih podataka te provjeru vrijednosti vezanih uz DEM.

3.5. PROCJENA PRIRODNE RANJIVOSTI POMOĆU KAVA METODE

U daljnjem radu su prikazani koraci dobivanja kartografskih prikaza s objašnjenima samih karata prilikom određivanja prirodne ranjivosti.

3.5.1. Pokrovne naslage – parametar O

Parametrom O su označene pokrovne naslage čija je uloga smanjenje specifičnog onečišćenja te infiltracija površinske vode u podzemlje. Pokrovne naslage imaju utjecaj na vrijeme zadržavanja vode te učinkovitost procesa degradacije potencijalnih onečišćenja u tlu. Za određivanje parametra O koriste se dva podfaktora: O_s (značajke tla) i O_{kf} (značajke krša).

O_s (značajke tla) – predstavlja zaštitnu ulogu pokrovnih naslaga koje nastaju trošenjem stijena na površini terena i mogu zadržati te degradirati onečišćenje. Parametri korišteni za ocjenu zaštitne uloge su debljina naslaga, tekstura, proznost i propusnost. Potrebno je naglasiti da su krški vodonosnici većinom bez pokrovnih naslaga.

O_{kf} (značajke krša) – predstavlja utjecaj okršenih i propusnih površinskih i podpovršinskih zona na ranjivost vodonosnika, odnosno ranjivost epikrške zone koja je često ispunjena glinovitim taložinama u pukotinama. Takve strukture doprinose

usporavanju vertikalnih tokova podzemne vode i izravno utječu na režim tečenja vode. Debljina epikrške zone varira (nekoliko metara do nekoliko desetaka metara) te ju je teško odrediti jer nije vidljiva na površini. Utvrđivanje epikrške zone moguće je provesti detaljnim geofizičkim istraživanjima ili indirektnim metodama – korištenjem prostorne analize krških geomorfoloških oblika. Jedna od metoda je određivanje gustoće vrtača na površini terena (Biondić et al., 2021).

Kako bismo dobili ukupnu vrijednost parametra O, koristi se sljedeća formula:

$$O_{ukupno} = O_s - O_{kf} \quad (1)$$

Vrijednosti parametra O mogu varirati od 0,1 do 0,2 boda pri čemu vrijednosti (Biondić et al., 2021):

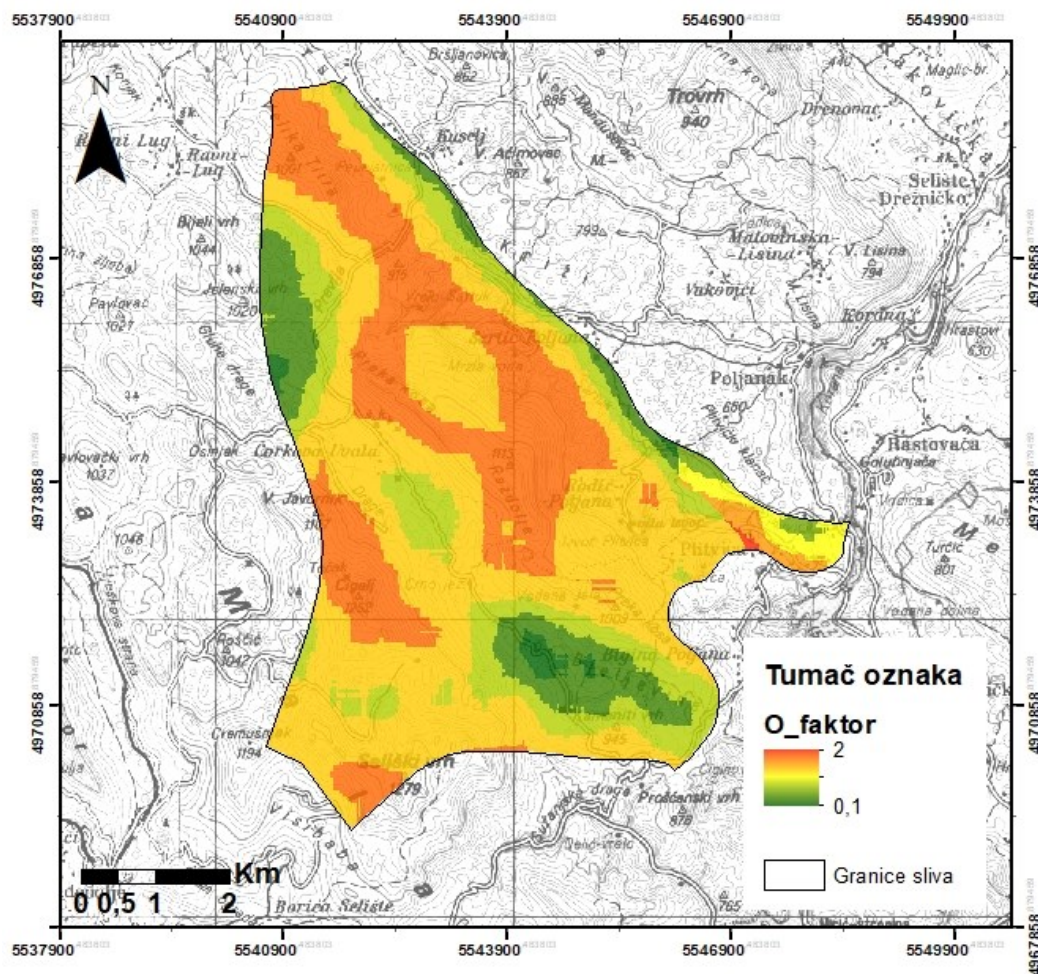
0,1 – 0,5 označavaju područja gdje je tlo slabije razvijeno ili čak ne postoji te je prisutno mnogo vrtača,

0,5 – 1 označavaju područja gdje je tlo razvijeno do dubine od jednog metra, gdje postoji mnogo vrtača te područja gdje je tlo pliće i postoji mnogo vrtača,

1 – 1,5 označavaju područja gdje tlo debljine jednog do dva metra i prisutno je malo vrtača,

> 2 označavaju područja s vrlo duboko razvijenim tlo bez pojave vrtače.

Podloge korištene prilikom određivanja parametra pokrovnih naslaga su Hidropedološka karta M 1:300 000 (za parametar O_s) te Topografska karta M 1:25 000 (za parametar O_{kf}). Slika 15 prikazuje prostornu raspodjelu parametra O. Na istraživanom području najveći dio pokrovnih naslaga pripada skupini koju karakterizira tlo debljine jednog do dva metra i prisutno je malo vrtača. Područja označena zelenom prikazuju područja na kojem su prisutne vrtače.



Slika 15. Kartografski prikaz parametra pokrovnih naslaga – O parametar na području podsliva Plitvice

3.5.2. Oborine – parametar P

Oborine imaju značajan utjecaj jer direktno utječu na način, vrstu i količinu pronosa vode i potencijalnog onečišćenja s površine terena u podzemlje te iz navedenih razloga imaju utjecaj na sve ostale parametre. Prilikom procjene parametra P koriste se efektivne količine oborina koje sudjeluju u otjecanju, odnosno dio je ukupnih oborina te s obzirom da sudjeluje u otjecanju postoji mogućnost za infiltraciju efektivnih oborina u dublje dijelove vodonosnika. Efektivna količina oborina prikazuje se kao P_e podfaktor.

Oborine kao vanjski stres mogu promijeniti ukupnu procjenu ranjivosti, primjerice u slučaju jake kiša može doći do razrjeđenja onečišćenja te kao takve, oborine imaju

pozitivan utjecaj. S druge strane, veće količine oborina mogu uzrokovati i veću ranjivost vodonosnika (Biondić et al., 2021).

Vrijednosti ukupnog parametra P dobiju se množenjem P_e podfaktora s P_i podfaktorom:

$$P = P_e \times P_i \quad (2)$$

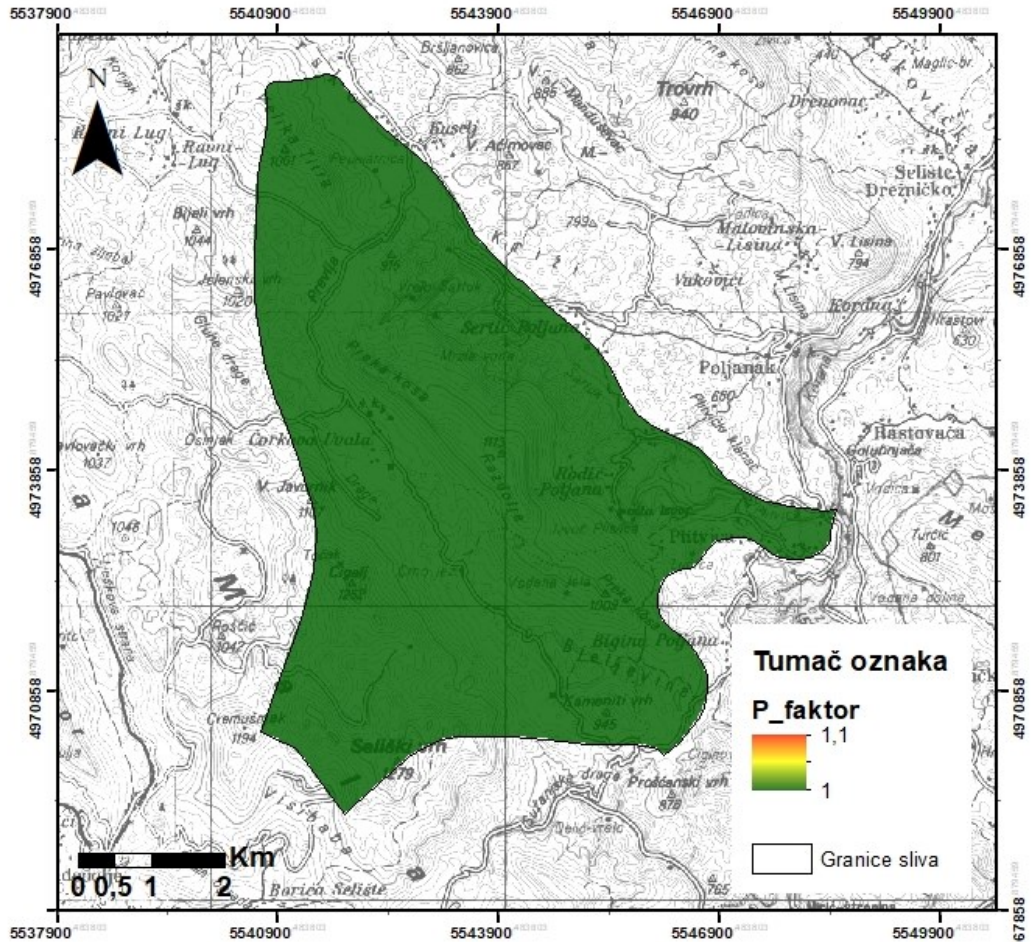
pri čemu su vrijednosti P_e podfaktora dobivene iz vrijednosti srednjih efektivnih oborina u slivnom području, dok se P_i podfaktor određuje iz vrijednosti prosječnih godišnjih oborina i ukupnog broja kišnih dana u slivu prema:

$$P_i = \frac{P \text{ (mm/god)}}{\text{broj kišnih dana}} \quad (3)$$

Vrijednosti podfaktora P_e za istraživano područje su određene iz hidrometeoroloških karata za vremenski period od 1997. do 2007. godine (DHMZ, 2009).

Za izradu konačnog rastera parametra P izrađena je reklasifikacija efektivnih oborina te množenje s konstantnim rasterom čija vrijednost iznosi 0,1 (Slika 16).

Iz dobivene karte vidljivo je da je raspodjela godišnjih oborina jednaka na cijelom istraživanom području (prikazano tamnozelenom bojom), a vrijednosti se kreću od 500 do 1500 mm godišnje.



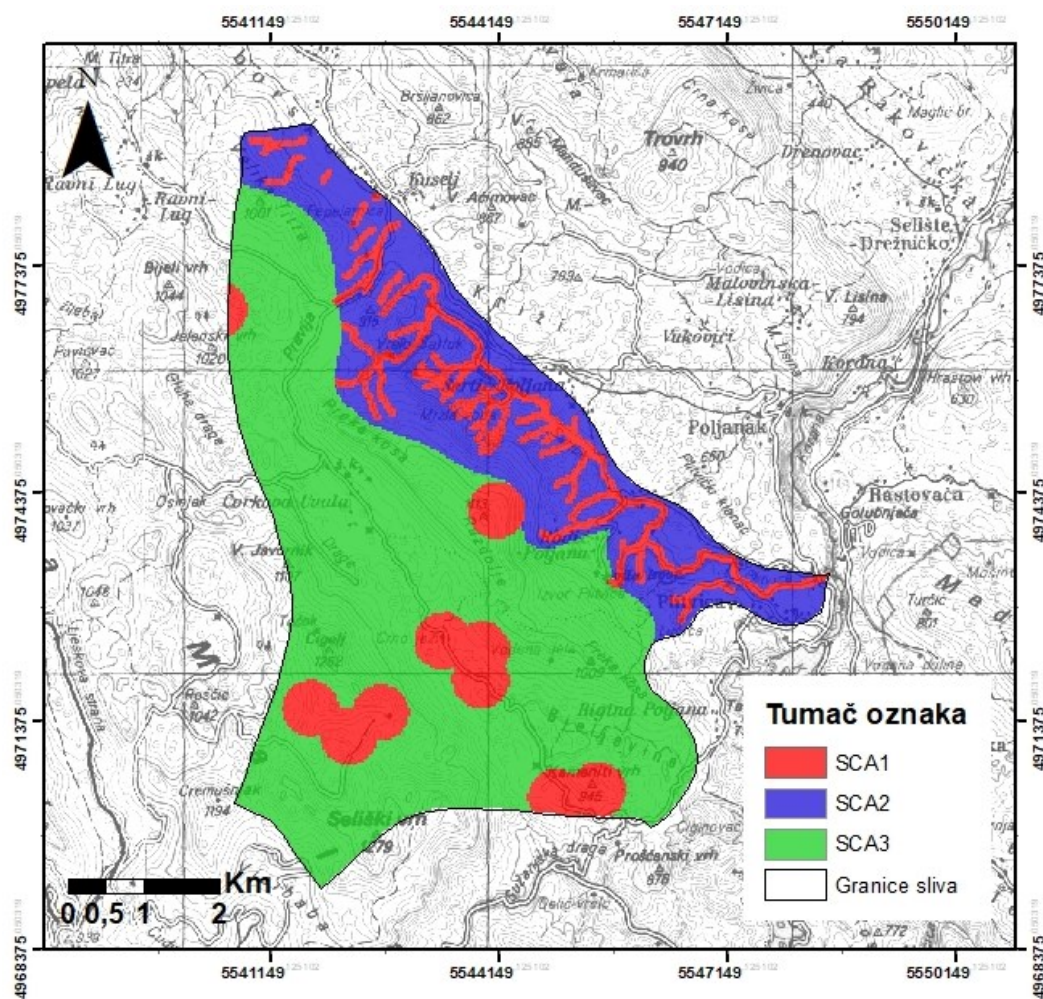
Slika 16. Kartografski prikaz utjecaja oborina – parametar P na području podsliva Plitvice

3.5.3. Površinska slivna područja

Površinska slivna područja (engl. *Surface Catchment Areas – SCA*) je potrebno odrediti prije prikazivanja parametra infiltracije te su dobivena prostornom analizom hidroloških i hidrogeoloških podataka sukladno uputama SCA parametra.

Podaci korišteni za podjelu na slivna područja su podaci iz Hidrogeološke karte M 1:300 000, Topografske karte M 1:25 000 te podaci dobiveni hidrogeološkim istraživanjima. Postupak uključuje pretvaranje točkastih i linijskih podataka u zonalne poligone, digitalizaciju podataka te izradu SCA karte na kojoj su izražena područja visoke ranjivosti u podslivu Plitvice.

Analiza hidroloških fenomena u ovom koraku je temeljena na razdvajanju glavnih slivnih područja koja gravitiraju ponorima, vrtacama i slično. Odnosno, podsliv Plitvice je podijeljen u tri manja slivna područja (SCA 1, SCA 2, SCA 3) (Slika 17): 1. SCA 1 područje je dobiveno prostornom analizom uz pomoć alata *Buffer* te izdvaja područja koja gravitiraju ponornim zonama na udaljenosti od 50 m – na karti prikazani crvenom bojom, 2. SCA 2 prikazuje izravni sliv vodotoka – na karti prikazano plavom bojom, 3. SCA 3 prikazuje ostatak slivnog područja koji nije izravno povezan s ponornim zonama – na karti prikazano zeleno bojom.



Slika 17. Kartografski prikaz SCA na području podsliva Plitvice

3.5.4. Infiltracija – parametar I

Infiltracija vode s površine ovisi o: nagibu terena, svojstvima pokrovnih naslaga, prisutnosti vegetacije i morfoloških oblika (vrtache, špilje, jame). Neki od navedenih

parametara korišteni su pri procjeni parametra O pa je parametar I razvijen na način da njegov utjecaj na ranjivost ovisi o podfaktorima I_{sv} (definira uvjete na površini zemlje i I_{gwd} (dubina do podzemne vode).

I_{sv} podfaktor – definira uvjete na površini zemlje, kombinira utjecaj nagiba terena i pokrivenost vegetacijom. Područja mogu biti pokrivena gustom vegetacijom (šume, grmlje) ili rijetkom vegetacijom (bez vegetacije). Navedeni podaci dobivaju se pomoću CLC (engl. *Corine Land Cover*) baze podataka dok se podaci o nagibu dobivaju pomoću metoda prostorne analize korištenjem digitalnog modela terena.

Podfaktor I_{sv} je pod utjecajem hidroloških uvjeta na površini sliva te se mora uskladiti sa SCA parametrom:

- u području SCA 2, gdje su dominantna površinska otjecanja povezana s protokom i koncentriranim dotokom površinske vode, pretpostavljaju se uvjeti koncentrirane infiltracije. U ovom slučaju, dobivene I_{sv} vrijednosti predstavljaju veliku ranjivost vodonosnika pod uvjetom velikih nagiba i oskudne vegetacije, što u stvarnim uvjetima karakterizira kratko vrijeme zadržavanja vode te brza infiltracija.
- u SCA 3 području, gdje dominira duže vrijeme zadržavanja vode na slivnoj površini, pretpostavljaju se difuzni uvjeti infiltracije vode u krško podzemlje. U ovom slučaju vrijede obrnuti uvjeti; veća je ranjivost u slučaju malih nagiba i oskudne vegetacije.

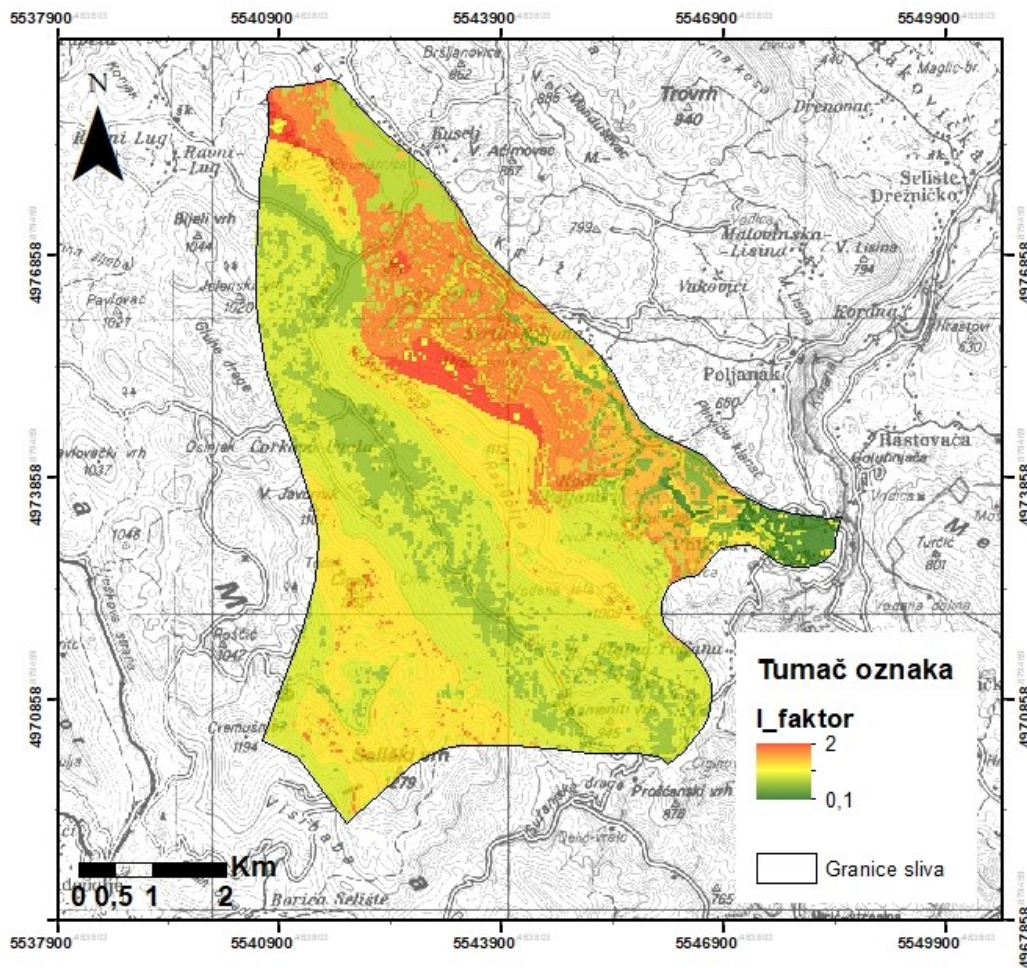
I_{gwd} podfaktor (dubina do podzemne vode) – definira utjecaj infiltrirane površinske vode na sveukupnu prirodnu ranjivost određenog područja te se odnosi na cijeli vodonosnik. Za procjenu vrijednosti ovog podfaktora potrebno je uspostaviti dobru mrežu piezometarskih bušotina kroz cijelo slivno područje jer je na temelju takvih podataka moguće odrediti položaj vodnog lica. S obzirom na nedostatak podataka, podfaktor je moguće procijeniti na temelju hidrogeoloških odnosa korištenjem znanja o apsolutnoj razini podzemne vode u vodonosniku. Odnosno, potrebno je iz digitalnog modela terena oduzeti karte apsolutne dubine podzemne vode. Ovaj podfaktor je značajan jer plića razina vodnog lica znači da je utjecaj infiltrirane površinske vode biti veći zbog kraćeg vremena zadržavanja onečišćivala (Biondić et al., 2021).

Konačno, parametar I dobije se zbrajanjem I_{sv} i I_{gdw} podfaktor:

$$I = I_{sv} + I_{gdw} \quad (4)$$

Dobivene vrijednosti mogu biti u rasponu od 0,1 do 2.

Na području vodotoka Plitvice izrađena je karta utjecaja infiltracije na kojoj su crvenom bojom označena područja visoke infiltracije, a zelenom niske. Na području veće infiltracije nalaze se ponorne zone koje su dokazane i provedenim trasiranjem (Meaški et al., 2022) (Slika 18).



Slika 18. Kartografski prikaz utjecaja infiltracije - I parametar na području podsliva Plitvice

3.5.5. Svojstva vodonosnika – parametar A

Parametar A definira uvjete krškog vodonosnika, a određuje se kroz podfaktore A_{hg} i A_{tt} .

A_{hg} podfaktor – odnosi se na hidrogeološki opis te se procjenjuju statički uvjeti u vodonosniku. Vrijednosti statičkih uvjeta se procjenjuju na temelju geoloških, litoloških i hidrogeoloških podataka pri čemu su osnovni kriteriji litološki sastav stijena i stupanj

okršenosti. Bodovanje ovog podfaktora predstavlja relativnu vrijednost te govori o tome da je jedna hidrogeološka formacija više ili manje prirodno ranjivija od druge.

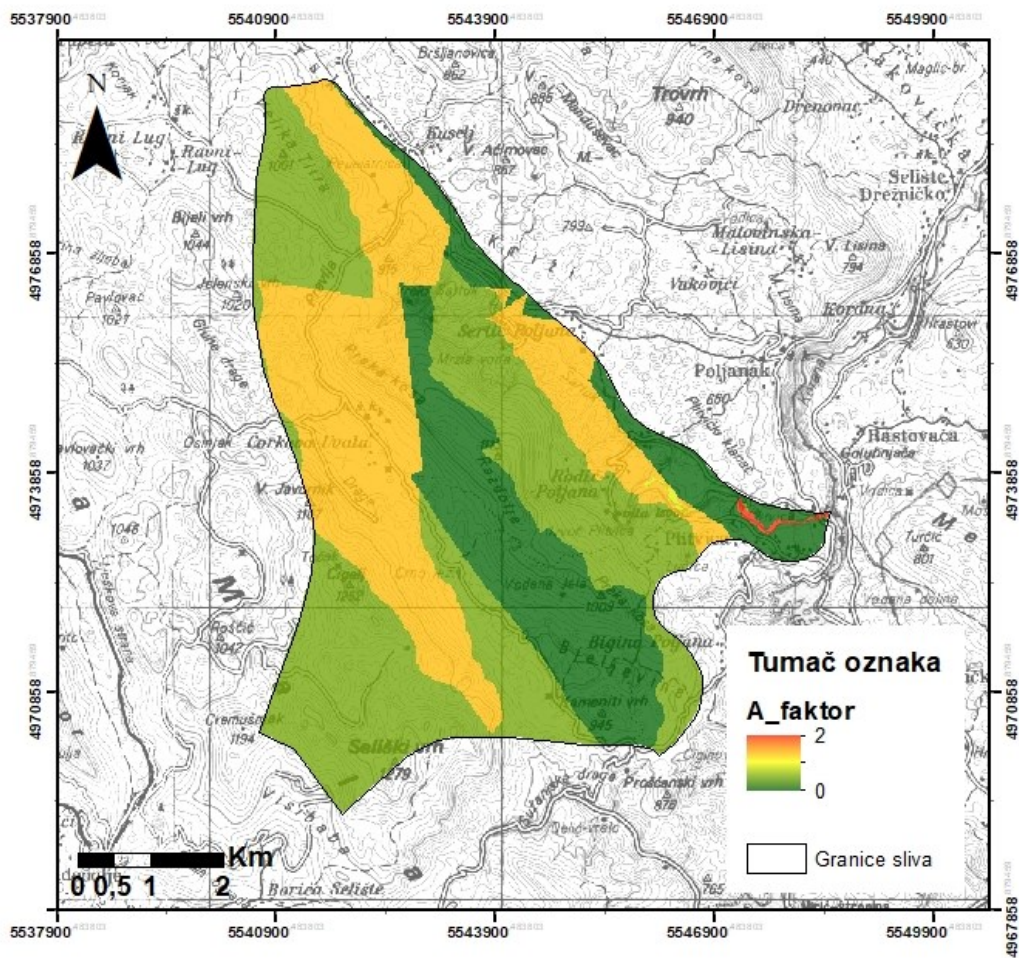
A_{tt} podfaktor – odnosi se na testove trasiranja i procjenjuju se dinamički uvjeti u vodonosniku. Testovi trasiranja se moraju provoditi za vrijeme kišnih razdoblja kada su brzine protoka podzemnih voda najveće, a podaci se dobivaju analizom diskretnih očitanih vremenskih vrijednosti. Koristeći GIS prostorne analize i metode interpolacije moguće je dobiti kontinuiranu raspodjelu vrijednosti. Manja vrijednost podfaktora A_{tt} sugerira bolju „povezanost“ određenih dijelova sliva s krškim izvorom ili izvornim zonama što zapravo povećava ukupnu ranjivost tog dijela slivnog područja u odnosu na ostatak područja (Biondić et al., 2021).

Vrijednost parametra A dobije se zbrajanjem podfaktora A_{hg} i A_{tt} :

$$A = A_{hg} + A_{tt} \quad (5)$$

Vrijednosti parametra A kreću se od 0 do 2. Niže vrijednosti označavaju veću ranjivost krškog sustava, odnosno prikazuju područja veće okršenosti, bolje propusnosti naslaga i bolje povezanosti s krškim izvorom. Više vrijednosti parametra A prikazuju dijelovi koji nemaju izravnu poveznicu s krškim izvorima te imaju ograničenu propusnost.

Izradom parametra dobiven je kartografski prikaz (Slika 19) iz koje je vidljivo da je veći dio podsliva veće ranjivosti, odnosno istraživano područje je područje veće okršenosti.



Slika 19. Kartografski prikaz utjecaja svojstava vodonosnika – parametar A

3.6. INDIKATORI RANJIVOSTI

Ukupni rezultati procjene ranjivosti prikazuju se pomoću dva indikatora:

- RV indikator (engl. *Resource Vulnerability*) – odnosi se na procjenu prirodne ranjivosti krških vodonosnika,
- SV indikator (engl. *Source Vulnerability*) – odnosi se na prirodnu ranjivost krških izvora.

Kritičan parametar prilikom izračuna oba indikatora je parametar A.

3.6.1. RV indikator

Pri izračunu RV indikatora potrebno je razdvojiti parametar A te u obzir uzeti samo podfaktor A_{hg} jer su u ovim slučaju bitni statički uvjeti u vodonosniku. RVI se izračunava prema sljedećoj formuli:

$$RVI = (O + I + A_{hg}) \times P \quad (6)$$

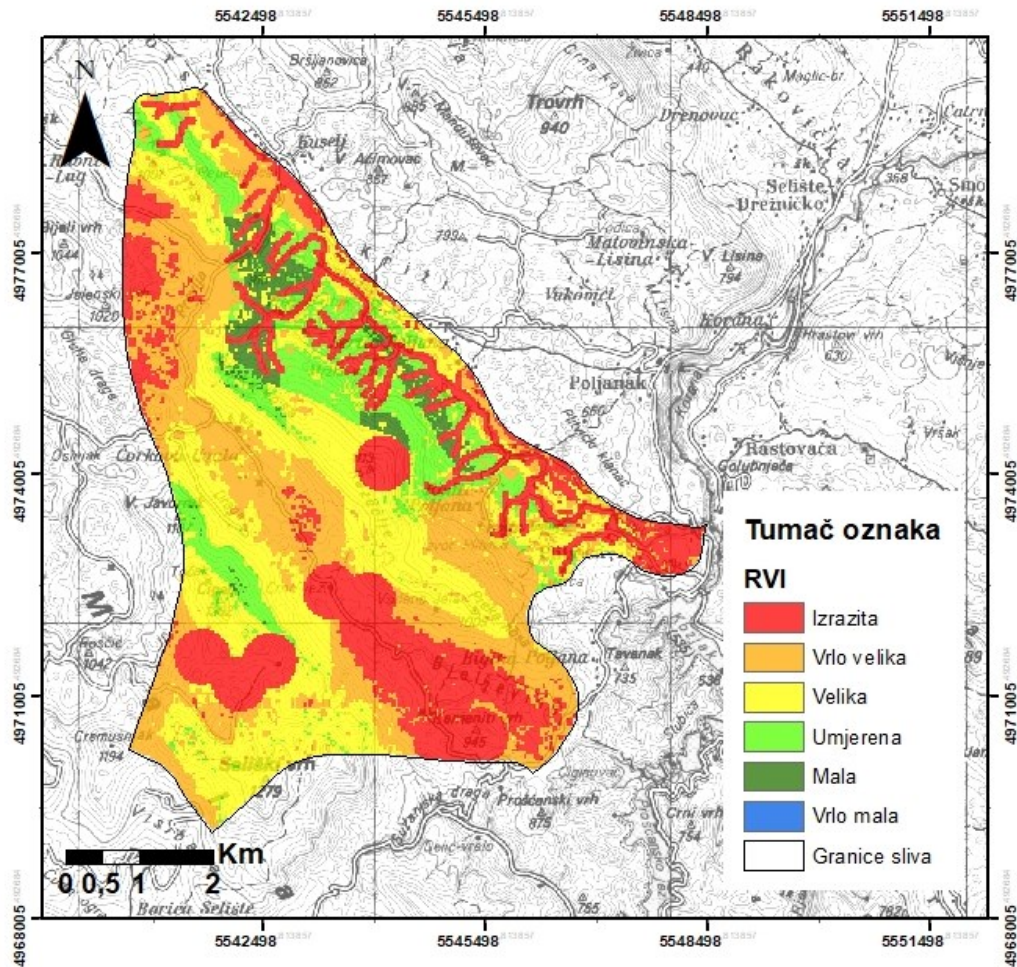
RVI ima vrijednosti od 0,1 do 7,5.

Prema literaturi, RV indikator je izrađen za područje sliva Plitvičkih jezera (Matin, 2017) no u obzir nije uzeto područje podsliva Plitvice i Sartuka jer nije bilo dokazno da na navedenom području ima vodonosnika već da se na području nalaze samo površinski tokovi. Odnosno, smatralo se da na tom području nema gubitaka u toku vode te da KAVA metoda nije primjenjiva.

Međutim, novijim istraživanjima (Meaški et al., 2022) dokazano je suprotno. Na području podsliva Plitvice dolazi do velikih gubitaka vode. Samim time je dokazano da je to područje puno ponornih zona, a traseri ubačeni poslije izvora Plitvice detektirani su u Bosni i Hercegovini na izvoru Klokot. Navedeno je detaljnije prikazano u poglavlju 5.

U sklopu ovog rada izrađen je kartografski prikaz RV indikatora (Slika 20) iz kojeg je vidljivo da je veći dio istraživanog područja, odnosno vodonosnika izrazito ranjiv (označeno crvenom bojom). Najranjivija područja nalaze se na područjima SCA 1 te se mogu smatrati izvorima potencijalnog onečišćenja. Područja se odnose na korito rijeke Plitvice, vrtače i područja veće okršenosti. Potencijalna onečišćenja mogu putovati kroz

pokrovne naslage koje su manjih debljina te u kratkom vremenskom periodu doći do vodnog lica i onečistiti vodonosnik.



Slika 20. Kartografski prikaz RV indikatora na području podsliva Plitvice

3.6.2. SV indikator

Pri izračunu SV indikatora, odnosno prilikom procjene ranjivosti izvora koriste se vrijednosti ukupnog parametra A jer su u tom slučaju uključeni i statički i dinamički uvjeti. SVI se izračunava prema sljedećoj formuli (Biondić et al., 2021):

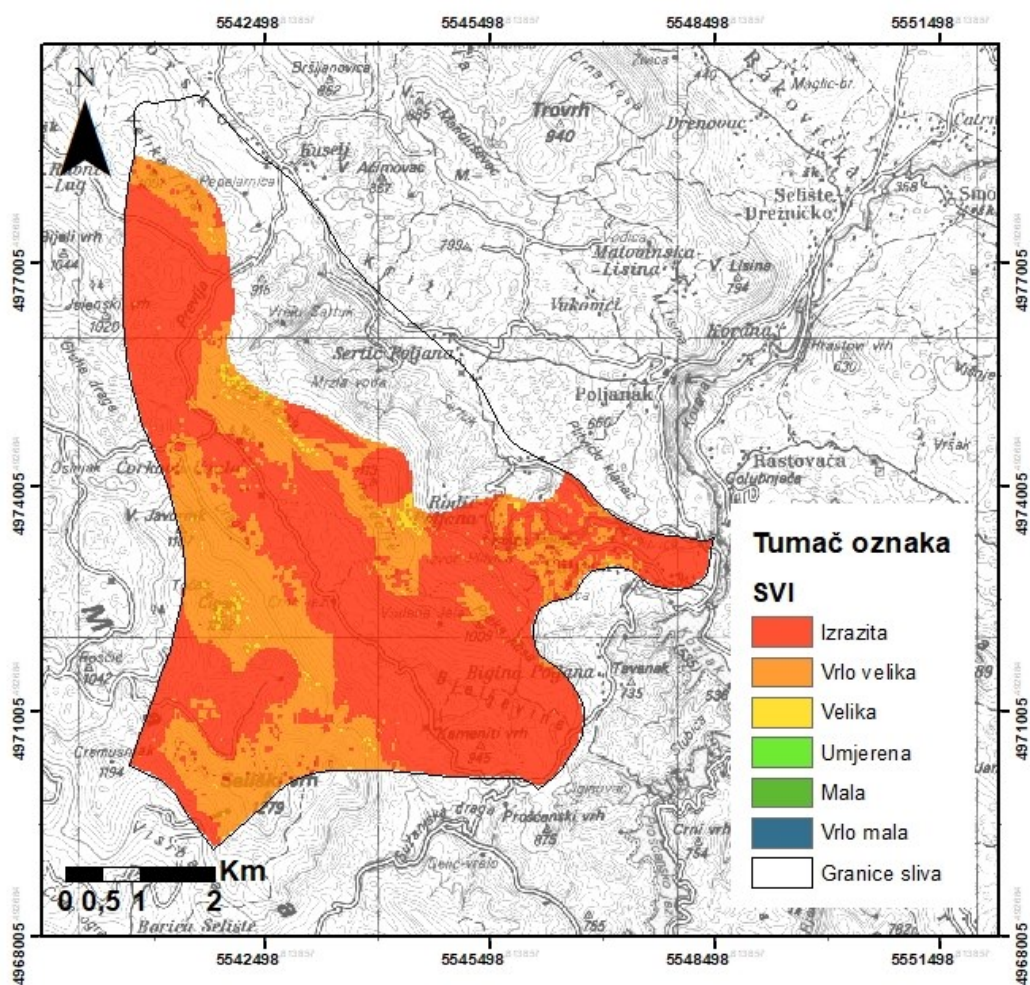
$$SVI = (O + I + A) \times P \quad (7)$$

SVI ima vrijednosti od 0,1 do 9.

Zatim je potrebno napraviti dodatnu podjelu ranjivih dijelova u slivnom području. Navedeno se odrađuje tako da SCA 1 dijelovi slivnog područja automatski imaju

vrijednost 0,1. Na krajnjem prikazu prirodne ranjivosti, vrijednosti opisanih indikatora podijeljene su u 6 kategorija.

Slika 21 prikazuje kartografski prikaz SV indikatora. Iz karte je vidljivo da je izbačen podsliv Sartuka jer je on primarno površinskog toka što nije područje ovog rada. Također, mjerenjima na terenu dokazano je da nema gubitaka na navedenom području. Iz karte je vidljivo da je cjelokupno područje označeno crvenom bojom te da potencijalna onečišćenja mogu utjecati na izvorište Plitvice.



Slika 21. Kartografski prikaz indikatora SV na potoku Plitvice

Na temelju izrađenih karata zaključuje se da je podsliv Plitvice na području velike ranjivosti, a objašnjenje navedene tvrdnje leži u karbonatnim stijenama velike propusnosti te tanjim pokrovnim naslagama.

4. PROCJENA ANTROPOGENOG UTJECAJA U SLIVNOM PODRUČJU

4.1. PROCJENA OPASNOSTI (HAZARDA)

Antropogeni utjecaj je sve izraženiji svakim danom zbog različitih aktivnosti kao što su poljoprivredne aktivnosti, ispuštanje nepročišćenih otpadnih voda u prirodne prijemnike, odbacivanje otpada u okoliš, promet i slično. Sve aktivnosti imaju utjecaj na vodonosnik, najčešće štetan, kojeg je potrebno smanjiti ili ukoliko je moguće i spriječiti.

Uz procjenu prirodne ranjivosti vodonosnika, potrebno je odrediti i moguće opasnosti na istraživanom području. Opasnost se može definirati kao „mogući izvor onečišćenja od ljudskog djelovanja“ pri čemu se misli na onečišćenje s površine ili pripovršinske zone terena. Analiza opasnosti je drugi korak kod analize rizika od onečišćenja (COST 620, 2004).

Kako bi se izradila karta opasnosti potrebno je pratiti protokol propisan prema COST 620:

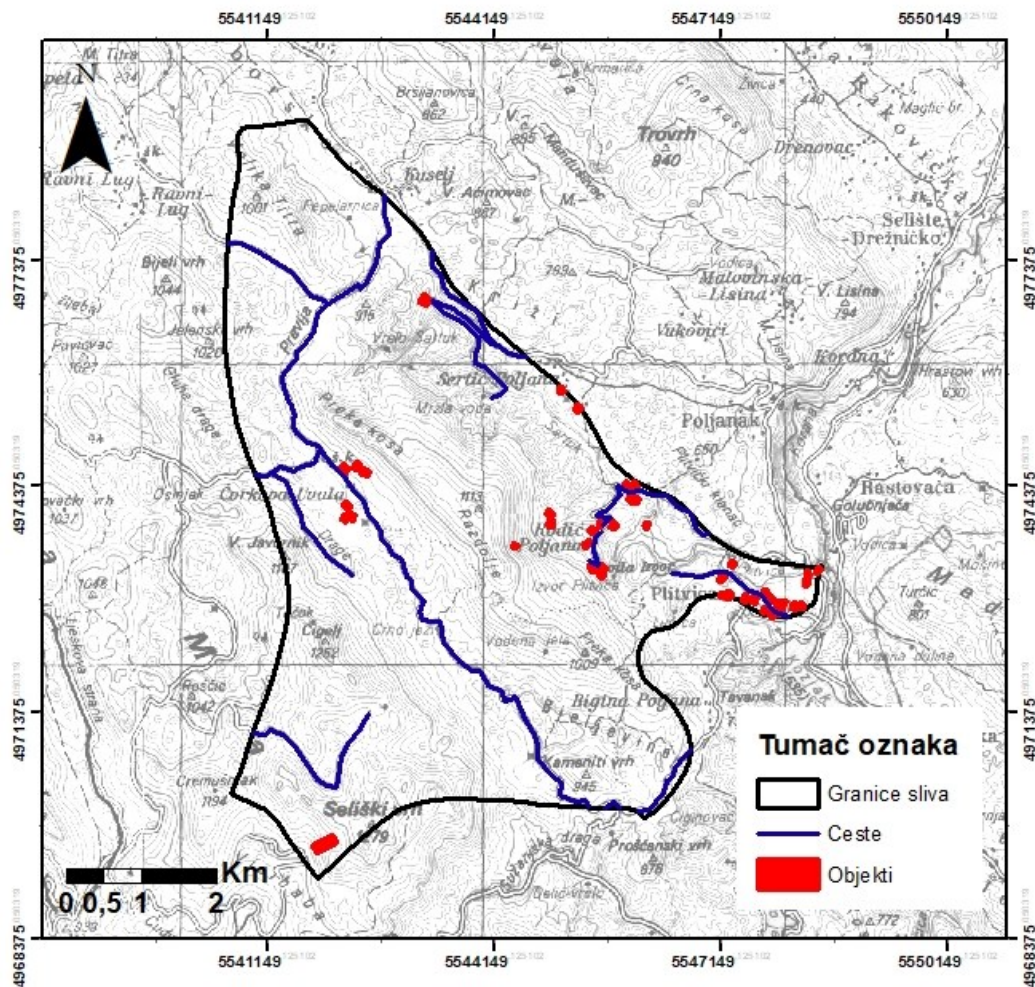
1. odrediti opasnosti ili hazarde,
2. definirati bazu podataka za izradu karte opasnosti,
3. digitalizacija podataka,
4. odrediti težinske vrijednosti za svaku izdvojenu opasnost,
5. kartografski prikazati opasnosti (Slika 22),
6. valorizirati podatke,
7. izraditi konačnu kartu opasnosti (Slika 23).

Podaci o mogućim izvorima opasnosti se mogu preuzeti iz različitih izvora: topografske karte, avio i satelitske snimke, različita izvješća, arhive, terensko rekognosciranje, izravno prikupljanje podataka od onečišćivača, lokalne uprave i slično.

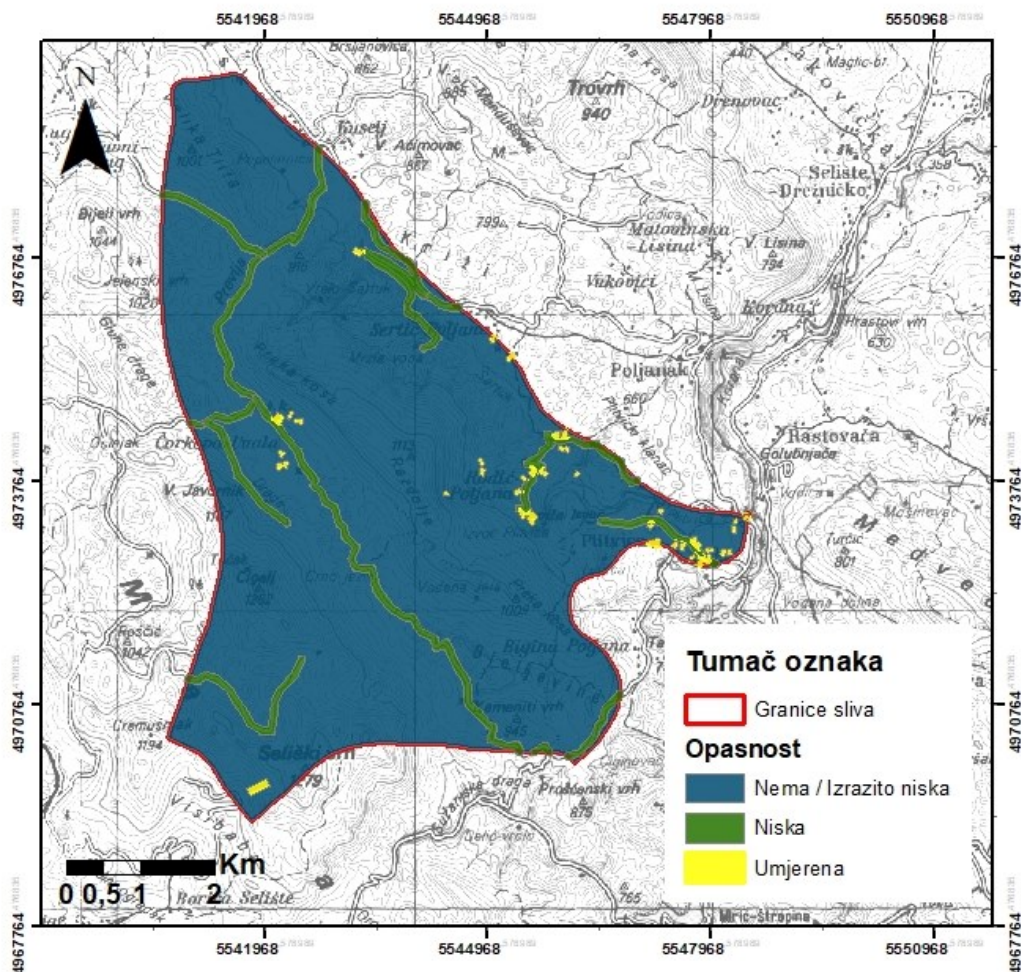
Opasnosti koje su određene na istraživanom području su prometnice i nekolicina objekata (seoske kuće, apartmani – turizam). Podaci su digitalizirani te je izrađena karta neklasificiranih opasnosti na kojoj je prikazana prostorna raspodjela mogućih onečišćivača (Slika 22).

Zatim je slijedila klasifikacije podataka, odnosno određivanje težinskih vrijednosti. Korišteni su podaci prema COST 620 pri čemu je za objekte (kuće) korištena težinska vrijednost 50 zbog pretpostavke ispuštanja septičkih voda, dok je za prometnice uzeta vrijednost 35.

Karta neklasificiranih opasnosti je korištena kao temeljna podloga za detaljnu klasifikaciju, odnosno za izradu konačne karte opasnosti (Slika 23). Iz karte opasnosti vidljivo je da se na području objekata nalazi umjerena opasnost, a na području prometnica niska opasnost.



Slika 22. Kartografski prikaz neklasificiranih opasnosti



Slika 23. Kartografski prikaz razreda opasnosti na području vodotoka Plitvice

4.2. PROCJENA RIZIKA

Posljednji korak u procjeni utjecaja na krški vodonosnik je izrada karte rizika. Intenzitet rizika procjenjuje se kombiniranjem karata prirodne ranjivosti te karata opasnosti za određeno područje, odnosno potrebno je analizirati sve faktore vezane uz pojavu opasnosti te faktore prirodnog okruženja koji mogu ili pogodovati širenju opasnosti ili je mogu spriječiti.

Preklapanje karata se vrši prema sljedećoj formuli:

$$R = \frac{1}{HI} \times RVI \quad (8)$$

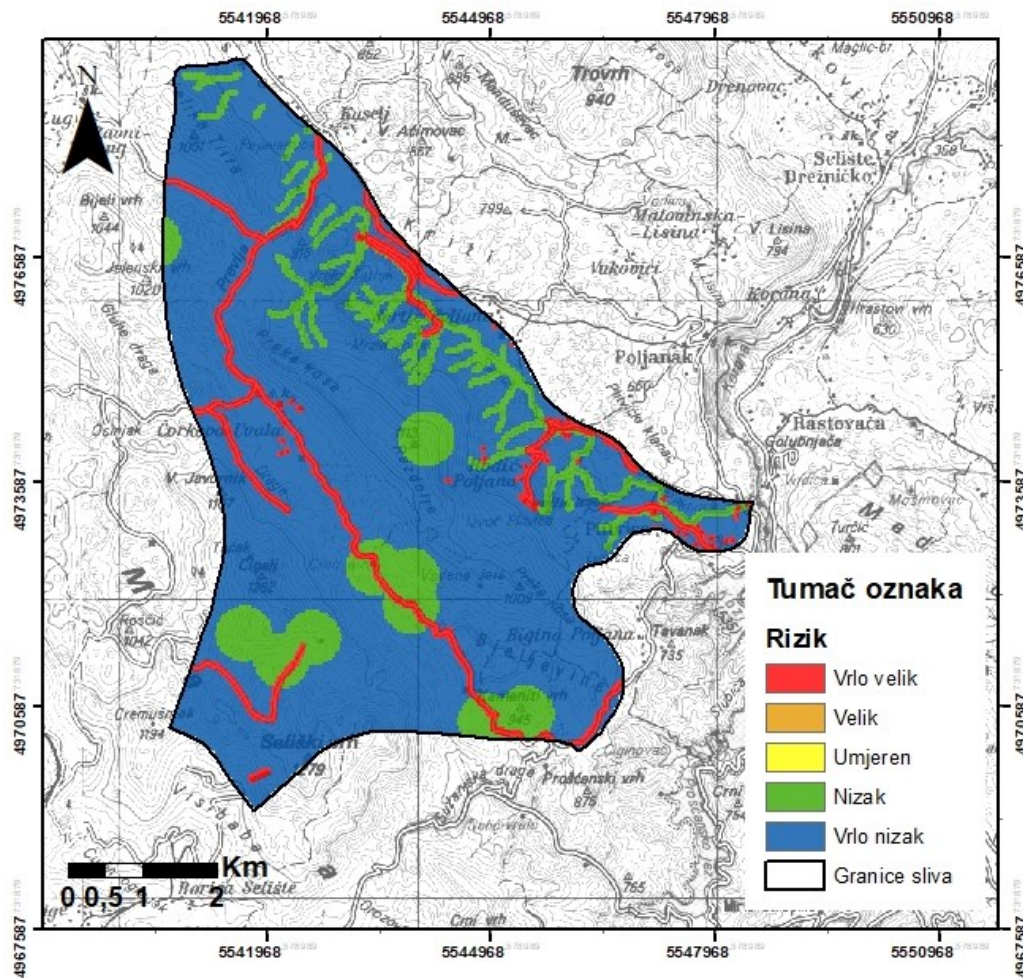
Pri čemu R označava rizik, HI označava indeks opasnosti (50 za objekte, 35 za prometnice) te RVI označava indikator prirodne ranjivosti (COST 620, 2004).

Dobivene vrijednosti naknadno se klasificiraju u pet kategorija prema tablici 2.

Tablica 2. Prikaz određivanja rizika (COST 620, 2004)

| RVI | HI | 1/HI | RVI x (1/HI) | kategorija rizika | razina rizika | boja |
|-----|--------|-------------|--------------|-------------------|---------------|-------------|
| 4-5 | 0-24 | >0,042 | >0,167 | 1 | vrlo nizak | plava |
| 3-4 | 24-48 | 0,042-0,021 | 0,167-0,063 | 2 | nizak | zeleno |
| 2-3 | 48-72 | 0,021-0,014 | 0,063-0,028 | 3 | umjeren | žuto |
| 1-2 | 72-96 | 0,014-0,010 | 0,028-0,010 | 4 | velik | narandžasto |
| 0-1 | 96-120 | <0,010 | <0,010 | 5 | vrlo velik | crveno |

Iz dobivene karte rizika (Slika 24) vidljivo je da je rizik od onečišćenja na većem dijelu istraživanog područja vrlo nizak, uz vrtače i vodotoke je nizak, dok je uz prometnice i same objekte vrlo velik.



Slika 24. Kartografski prikaz rizika od onečišćenja na području podsliva Plitvice

5. PROCJENA UTJECAJA NA KRŠKI VODONOSNIK

U sklopu hidrogeoloških istraživanja podsliva Plitvice u Nacionalnom parku Plitvičkih jezera (Meaški et al., 2022) provedena su trasiranja kako bi se preciznije definirali hidrogeološki uvjeti te mogući utjecaj na područje Velikog slapa (Slika 25). Razlog provođenja istraživanja su uočeni gubici vode na samom slapu koji mogu biti posljedica crpljenja, klimatskih promjena te urbanizacije u okolini slapa.



Slika 25. Veliki slap, lipanj 2021. (Meaški et al., 2022)

Istraživanja su uključivala hidrološku analizu protoka Plitvice, hidrogeološko istraživanje sliva vodotoka Plitvice koji izravno utječe na područje Velikog slapa te dijela sliva rijeke Korane do sela Korana, zatim trasiranje tokova podzemne vode iz ponorne zone vodotoka Plitvice te su na kraju predložene mjere za ublažavanje negativnih utjecaja gubitaka vode iz vodotoka Plitvice, a detalji provedenih istraživanja navedeni su u nastavku ovog poglavlja (Meaški et al., 2022).

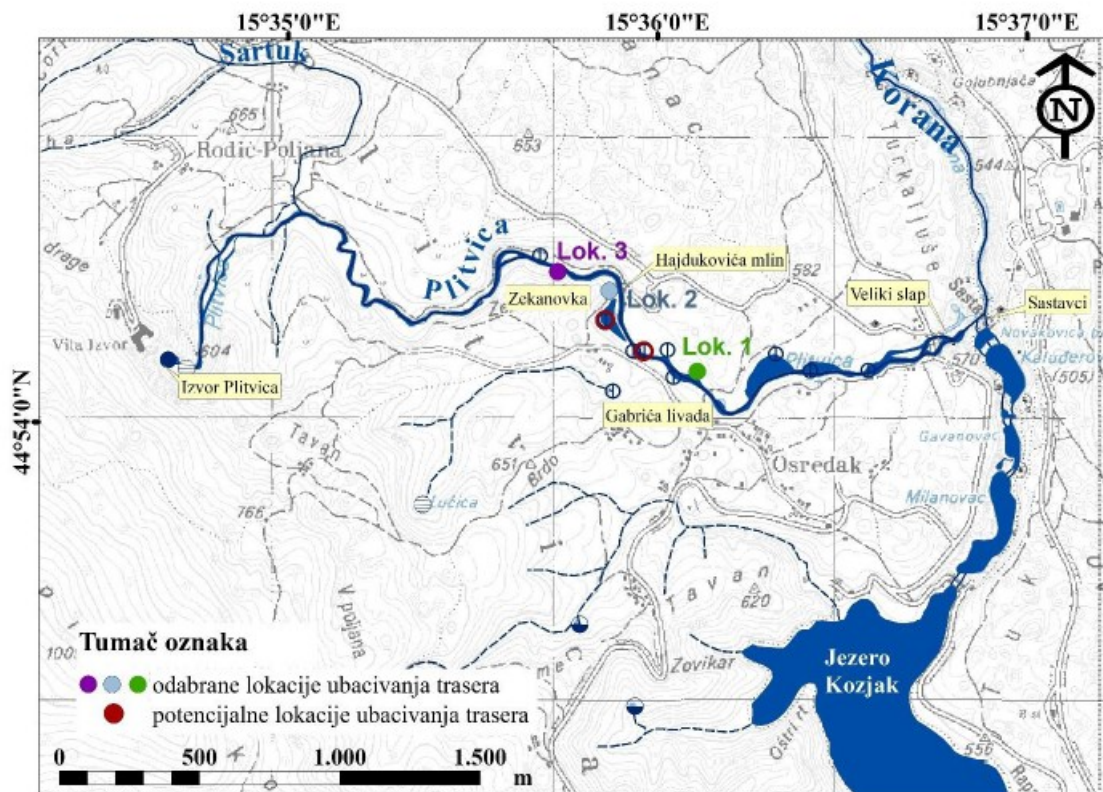
Nakon određivanja hidrogeoloških uvjeta postavljene su pretpostavke pomoću kojih je su određena mjesta mogućih pojava trasera. Prva pretpostavka objašnjava ponorne zone koje omogućuju povrat dijela ili sveukupne vode natrag u vodotok Plitvice u nizvodnijim dijelovima vodotoka. Druga pretpostavka objašnjava da se površinska voda koja ponire kreće u smjeru regionalnog kretanja podzemnih voda prema izvorištu Klokot. Treća pretpostavka objašnjava da lokalni hidrogeološki uvjeti usmjeravaju vodu prema rijeci

Korani te da bi se traseri trebali pojaviti u rijeci Korani prije sela Korana (Meaški et al., 2022).

Trasiranja su provedena u listopadu i studenom 2021. godine. Sukladno hidrogeološkim uvjetima te nakon terenskih pregleda, odabrane su sljedeće lokacije za ubacivanje traseru (Slika 26):

1. Nizvodno od Hajdukovića mlina – lokacija A.
2. Neposredno uz ponornu zonu Hajdukovića mlina – lokacija D.
3. Uzvodno od Hajdukovića mlina (područje Zekanovke) – lokacija E

Korišteni traseri su natrijev fluorescein (uranin) na lokaciji A, tinopal (CBS-X) na lokaciji D, 20% koncentrat Rodamina WT na lokaciji E. Traseri su ubačeni u manjim količinama koje se mogu lako detektirati na laboratorijskim instrumentima čime se smanjuje njihov mogući utjecaj na okoliš.

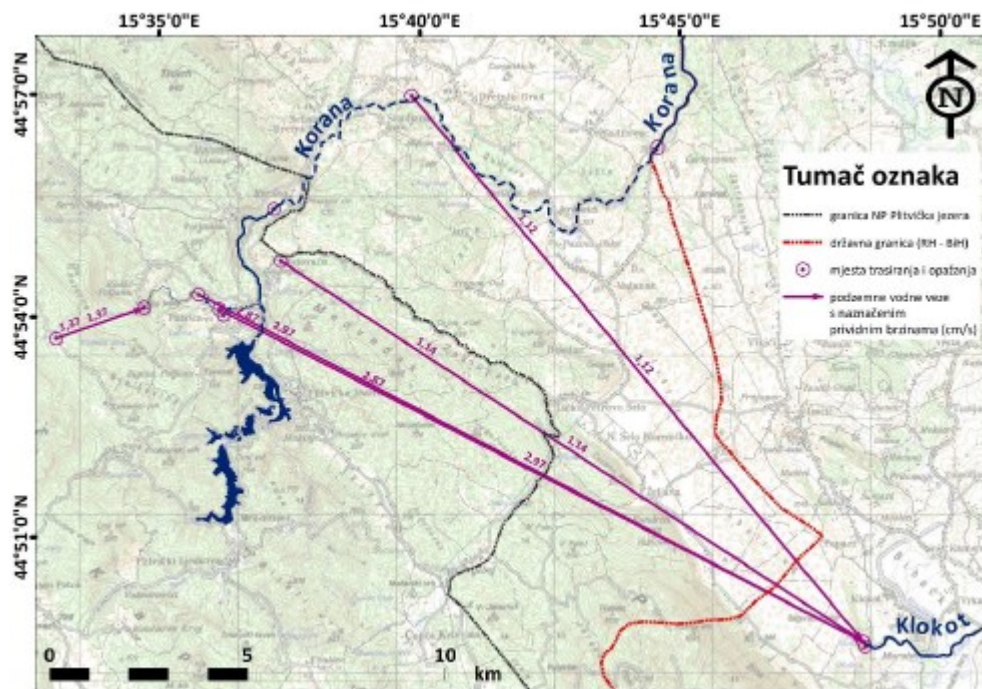


Slika 26. Položaj potencijalnih i odabranih lokacija za trasiranje (Meaški et al., 2022)

Odabrane su i tri mjesta opažanja, tj. mjesta uzimanja uzoraka vode. Na rijeci Korani kod limnigrafa u Luketićima je postavljen instrument C3 potopni fulorometar pomoću kojeg

se automatski detektira traser. Za ručno uzimanje uzoraka su odabrane tri lokacije. Dvije u Hrvatskoj: vodotok Plitvice kod Gabrića livade te rijeka Korana. Jedna lokacija je izvor Klokot u susjednoj Bosni i Hercegovini. Analize uzoraka su provedene u Laboratoriju za geokemiju okoliša na Geotehničkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Uz lokacije ručnog i automatskog mjerenja, na niz lokacija duž vodotoka Plitvice i na rijeci Korani su ubačene vrećice s aktivnim ugljenom. Pomoću vrećica se ne može detektirati točno vrijeme pojave traser, već se detektira samo pojava što može biti koristan podatak.

Nakon provedenih istraživanja zaključeno je da ne postoji izravna veza između ponornih zona vodotoka Plitvice s početnim dijelom rijeke Korane te da ne ponorni dijelovi nemaju podzemnu vezu s povrat prema nizvodnijem dijelu vodotoka Plitvice, a ubačeni traseri detektirani su jedino na izvorištu Klokot (Meaški et al., 2022) (Slika 27).



Slika 27. Karta s ucrtanim podzemnim vezama za područje vodotoka Plitvice i početni tok rijeke Korane (Meaški et al., 2022)

Izvorište Klokot se nalazi između 18-19 km od mjesta ubacivanja traser. S obzirom da vrijeme do prve pojave traser, određena je prividna brzina podzemnog toka od gotovo 3 cm/s (Meaški et al., 2022).

Iako je bilo očekivano da će se pokazati izravna veza između ponornih dijelova Plitvice s početnim dijelom Korane, trasiranje je pokazalo dobru povezanost hidrogeoloških

formacija vodotoka Plitvice i izvora Klokot koji se nalazi u susjednoj državi Bosni i Hercegovini. Sukladno tome, područje vodotoka Plitvice predstavlja ponornu zonu izvora Klokot (Meaški et al., 2022).

Ako se u obzir uzmu provedeno trasiranje te prikazi ranjivosti, opasnosti i rizika na području Plitvice prikazani u ovom radu, može se zaključiti da potencijalna onečišćenja na području vodotoka Plitvice izravno utječu na onečišćenje izvora Klokot. S obzirom da se radi o vrlo ranjivom području potrebno je provoditi zadovoljavajuće mjere zaštite podzemnih voda koje bi trebale uključivati bilateralnu suradnju BiH i RH posebice ukoliko se radi o izvorima koji se koriste u vodoopskrbnim sustavima što zapravo i jest slučaj u ovom primjeru.

Ukoliko bi navedeno izvorište bilo na području RH tada je potrebno primjenjivati Pravilnik o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta (NN 66/2011, 47/2013) prema kojem su ponorne zone vodotoka Plitvice obuhvaćene II. zonom zaštite, dok je priljevno područje obuhvaćenom III. zonom zaštite (zbog utvrđenih prividnih brzina podzemnih tečenja većih od 3,0 cm/s i brzina između 1,0-3,0 cm/s). Zabrane koje su propisane Pravilnikom uključuju primjerice: svako privremeno i trajno odlaganje otpada, izgradnju benzinskih postaja bez spremnika s dvostrukom stjenkom, uređajem za automatsko detektiranje i dojavu propuštanja te zaštitnom građevinom (tankvanom), poljoprivrednu proizvodnju, osim ekološke proizvodnje bez primjene stajskog gnoja, gnojovke i gnojnice, gradnja groblja i proširenje postojećih, ispuštanje pročišćenih i nepročišćenih otpadnih voda s prometnica, građenje svih industrijskih postrojenja koje onečišćuju vode i vodni okoliš, građenje drugih građevina koje mogu ugroziti kakvoću podzemne vode, sječu šume osim sanitarne sječe. Budući da se izvorište Klokot nalazi u BiH te ne postoji međudržavni sporazum, navedene zabrane mogu biti samo preporuka za zaštitu podzemnih voda i izvorišta.

Što se tiče područje izravnog sliva vodotoka Plitvice, već je ranije određena zona velike ranjivosti (II. zona) jer se radi o području koje ima utjecaj na kakvoću vode Velikog slapa (Meaški, 2011).

6. ZAKLJUČAK

Posljednjih godina je sve veća pozornost stavljena na klimatske promjene te na njihov utjecaj koji se može izraziti i na krške vodonosnike koji su zbog svoje prirode ranjivi.

Krške vodonosnike karakteriziraju vrlo propusne karbonatne stijene, brza infiltracija vode te manje pokrovne naslage što sveukupno omogućuje lako širenje mogućih onečišćenja s površine terena duboko u podzemlje i tako onečistiti podzemne vode. Kako bi se osigurale dovoljne količine podzemne vode zadovoljavajuće kakvoće potrebno je zaštititi vodonosnike. Jedna od metoda koja se koristi pri zaštiti voda je izrada karata prirodne ranjivosti, opasnosti i rizika.

U ovom radu je kao područje istraživanja odabrano zaštićeno krško područje sliva vodotoka Plitvice koji je dio većeg sustava Plitvičkih jezera. Metoda koja je korištena za određivanje ranjivosti, opasnosti i rizika je KAVA metoda (Karst Aquifer Vulnerability Assessment) koja u obzir uzima utjecaj pokrovnih naslaga, infiltracije, oborina i uvjeta vodonosnika.

Analizom dobivenih karata zaključeno je da je veći dio područja sliva Plitvice izrazito ranjiv, a ta područja se nalaze uz vodotok Plitvice te uz vrtače.

Što se tiče opasnosti na istraživanom području, zabilježene su prometnice koje imaju nisku opasnost, dok objekti poput kuća i apartmana imaju umjerenu opasnost od onečišćenja vodonosnika.

Karta rizika dobivena je preklapanjem karata prirodne ranjivosti i opasnosti te su tim putem dobivena područja s većim ili manjim rizikom od onečišćenja podzemnih voda. Zaključeno je da je na većem dijelu istraživanog područja rizik od onečišćenja vrlo nizak, uz vrtače i vodonosnike je nizak, dok je uz prometnice i objekte vrlo velik.

Provedenim istraživanjima dokazano je da se sve aktivnosti na području podsliva Plitvice mogu očitovati i na području sliva izvora Klokot, odnosno rizik od onečišćenja na području podsliva Plitvice može se preslikati i na izvor Klokot.

Karte dobivene u ovom radu mogu koristiti za zaštitu vodonosnika i podzemnih voda uz brojne druge metode. Bitno je uspostaviti i odgovarajući monitoring te pravovremeno

utjecati, smanjiti ili spriječiti moguće emisije različitih onečišćujućih tvari. Također, potrebno je kontinuirano provoditi kvalitetna hidrološka, hidrogeološka, geokemijska i ostala istraživanja. Potrebno je definirati i zone zaštite, sanacijske zahvate i uskladiti prostorne planove te donijeti odgovarajuće pravilnike i zakone. Iz ovog primjera vidljivo je da voda ne poznaje postavljene granice između dviju država zbog čega je ključno zaštitu voda provoditi bilateralno. Uz poštivanje svih metoda možemo se pridržavati cilja prema Okvirnoj direktivi o vodama da je voda „nasljeđe koje treba čuvati, zaštititi i shodno tome postupati“.

7. LITERATURA

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.

Biondić, R. (2010). *Uvod u GIS (Geografski informacijski sustav)*. Skripta iz kolegija Geografski informacijski sustav. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet,

Biondić, B., Biondić, R. (2014): *Hidrogeologija dinarskog krša u Hrvatskoj*, Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

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

Biondić, R., Meaški, H., Biondić, B. & Loborec, J. (2016): *Karst aquifers vulnerability assessment (KAVA) method applied to the Bakar Bay catchment area in Croatia*. Final technical report. University of Zagreb, Faculty of geotechnical engineering, Croatia.

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

Civita, M., De Regibus, C. (1995): *Sperimentazione di alcune metodologie per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi*. Quaderni di Geologia Applicata, Pitagora Ed., 3, 63 – 71, Bologna.

Civita, M., De Maio, M. (2000): *Valutazione e cartografia automatica dell vulnerabilità degli acquiferi all' inquinamento con il sistema parametrico SINTACS R5*. Pitagora Ed., 248 str., Bologna.

CORINE Land Cover — Copernicus Land Monitoring Service. Dostupno na: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>. Preuzeto dana: 26.04.2022.

COST action 620 (2004): Finalreport. In: Zwahlen, F. (ed): *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*. European Commission, Directorate-General for Research, EUR 20912, Luxemburg, 297 p.

Direktiva o podzemnim vodama (2006/118/EC). Dostupno na: <https://www.voda.hr/hr/okvirna-direktiva-o-vodama>. Datum pristupa: 21.5.2022.

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

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, 69 – 8.

Hölting, B., Haertle, T., Hohberger, K.-H., Nachtigall, K. H., Villinger, E., Weinzierl, W., Wrobel, J.-P. (1995): *Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung*. – Geol. Jb., C63, 5 – 24, Hannover.

Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje Leksikografskog zavoda Miroslav Krleža (2021): *krš*. Dostupno na: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=34221>. Datum pristupa: 20.5.2022.

Karst, a renewable water resource in limestone rocks. Dostupno na: <https://www.encyclopédie-environnement.org/en/water/karst-renewable-water-resource-in-limestone-rocks/>. Datum pristupanja: 20.05.2022.

Matin, J. (2017): *Procjena ranjivosti krških vodonosnika na primjeru sliva Plitvičkih jezera*, diplomski rad, Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

Meaški, H. (2011): *Model zaštite krških vodnih resursa na primjeru Nacionalnog parka „Plitvičkih jezera“*, doktorski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

Meaški, H., Biondić, B., Biondić, R. (2016): *Delineation of the Plitvice Lakes karst catchment area*. Karst without Boundaries, 269-284 str.

Meaški, H., Biondić, R., Kapelj, S., Loborec, J., Leskovar, K., Biondić, B., Kranjčić, N., Mrakužić, P. (2022): *Hidrogeološka istraživanja podsliva Plitvice u Nacionalnom parku „Plitvička jezera“ – Završno izvješće*, Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

Plan upravljanja vodnim područjima 2016.-2021. (2016). Narodne novine. Broj 66. (6.7.2016).

Pravilnik o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta (2011). Narodne novine. Broj 66. (15.6.2011).

Šikić, K., Basch, O., Šimunić, A., Šikić, L., Brkić, M., Jamičić, D., Pavičić, A., Pikija, M., Juriša, M., Jović, B., Crnko, J., Šparica, M., Grimani, I. (1972): *Osnovna geološka karta SFRJ 1: 100 000, list Zagreb L 38-80*. Institut za geološka istraživanja Zagreb.

Okvirna direktiva o vodama (2000/60/EC). Dostupno na: <https://www.voda.hr/hr/okvirna-direktiva-o-vodama>. Datum pristupa: 19.5.2022.

Van Stempfort D., Ewert L., Wassenaar L. (1993): *Aquifer vulnerability index. A GIScompatible method for groundwater vulnerability mapping*. Canadian Water Resources Jnl, Vol.18, no.1, 25 – 37

Vedak, D. (2021): *Procjena utjecaja poljoprivredne proizvodnje na podzemne vode sliva Bokanjac-Poličnik korištenjem GIS analize*, diplomski rad, Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

Vidaček, Željko; Bogunović, Matko; Husnjak, Stjepan, Sraka, Mario; Bensa, Aleksandra (2007): *Hidropedološka karta vodnih područja Primorsko-istarskih i dalmatinskih slivova*. Hrvatske vode i Europska unija-izazovi i mogućnosti, 647-655 str., Zagreb.

Vrba J., Zaporozec A. (1994): *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*.

International Contributions to Hydrology. IAH. vol.16, 131 str., Hannover.

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

POPIS SLIKA

| | |
|--|-----------|
| Slika 1. Vodotok Plitvica (osobna arhiva, listopad 2021.) | 2 |
| Slika 2. Geografski položaj Plitvičkih jezera (lijevo), karta Plitvičkih jezera s ucrtanom administrativnom granicom nacionalnog parka (desno) (modificirano prema Meaški, 2011) | 3 |
| Slika 3. Kartografski prikaz podjele sliva Plitvičkih jezera (Meaški et al., 2022) | 4 |
| Slika 4. Pregledna geološka skica podsliva Plitvice (Meaški 2011; modificirano prema Polšak et al., 1967; Velić et al., 1970) | 5 |
| Slika 5. Pregledna tektonska skica Plitvičkih jezera Oznake strukturnih jedinica: A – Veliki Javornik, C - Plitvička jezera, D – Trovrh – Gola Plješivica. Oznake većih rasjeda: 1 – Saborsko – Kozjak – Korenica, 2 – Kuselj – Čorkova uvala – Pl. Leskovac – Korenica; 6 – Prošćanski vrh – Mukinje, 8 – Kuselj – Rastovača – Zaklopača (Meaški, 2011) | 6 |
| Slika 6. Hidrogeološki prikaz sliva Plitvičkih jezera (prema Meaški et al., 2016) | 7 |
| Slika 7. Potok Plitvica (osobna arhiva, listopad 2021) | 8 |
| Slika 8. Podjela sliva Plitvice | 9 |
| Slika 9. Hidrogeološki profil poprečno na sliv izvora Plitvice (Meaški, 2011) | 10 |
| Slika 10. Hidrogeološki prikaz vodotoka Plitvice (Meaški et al., 2022) | 10 |
| Slika 11. Prikaz krškog područja (Dostupno na: https://www.encyclopedia-environment.org/en/water/karst-renewable-water-resource-in-limestone-rocks/) | 13 |
| Slika 12. Model „porijeklo – put – cilj“ (modificirano prema COST 620, 2004) | 15 |
| Slika 13. Konceptualni model KAVA metode (Biondić et al., 2016) | 17 |
| Slika 14. Primjer ModelBuilder-a za izradu RV indeksa koji je korišten u ovom radu . | 18 |
| Slika 15. Kartografski prikaz parametra pokrovnih naslaga – O parametar na području podsliva Plitvice | 21 |
| Slika 16. Kartografski prikaz utjecaja oborina – parametar P na području podsliva Plitvice | 23 |
| Slika 17. Kartografski prikaz SCA na području podsliva Plitvice | 24 |
| Slika 18. Kartografski prikaz utjecaja infiltracije - I parametar na području podsliva Plitvice | 26 |
| Slika 19. Kartografski prikaz utjecaja svojstava vodonosnika – parametar A | 28 |
| Slika 20. Kartografski prikaz RV indikatora na području podsliva Plitvice | 30 |
| Slika 21. Kartografski prikaz indikatora SV na potoku Plitvice | 31 |
| Slika 22. Kartografski prikaz neklasificiranih opasnosti | 33 |

| | |
|---|----|
| Slika 23. Kartografski prikaz razreda opasnosti na području vodotoka Plitvice | 34 |
| Slika 24. Kartografski prikaz rizika od onečišćenja na području podsliva Plitvice | 35 |
| Slika 25. Veliki slap, lipanj 2021. (Meaški et al., 2022) | 36 |
| Slika 26. Položaj potencijalnih i odabranih lokacija za trasiranje (Meaški et al., 2022) | 37 |
| Slika 27. Karta s ucrtanim podzemnim vezama za područje vodotoka Plitvice i početni tok rijeke Korane (Meaški et al., 2022) | 38 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Prikaz metoda određivanja ranjivosti | 11 |
| Tablica 2. Prikaz određivanja rizika (COST 620, 2004) | 35 |