

# Procjena ranjivosti krških vodonosnika na primjeru sliva Plitvičkih jezera

---

**Matin, Josip**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2017**

*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:130:617852>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-11**



*Repository / Repozitorij:*

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



# Procjena ranjivosti krških vodonosnika na primjeru sliva Plitvičkih jezera

---

**Matin, Josip**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2017**

*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:130:617852>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2020-11-04**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

Josip Matin

Procjena ranjivosti krških vodonosnika na primjeru  
sliva Plitvičkih jezera

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

Procjena ranjivosti krških vodonosnika na primjeru  
sliva Plitvičkih jezera

DIPLOMSKI RAD

KANDIDAT:

Josip Matin

MENTOR:

Doc.dr.sc. Hrvoje Meški

VARAŽDIN, 2017.



## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: JOSIP MATIN  
Matični broj: 137 - 2015./2016.  
Smjer: UPRAVLJANJE VODAMA

### NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

PROCJENA RANJIVOSTI KRŠKIH VODONOSNIKA NA PRIMJERU SLIVA  
PLITVIČKIH JEZERA

Rad treba sadržati: 1. Uvod  
2. Opis istraživane područja  
3. Metoda procjene ranjivosti krških vodonosnika (KAVA metoda)  
4. Primjena KAVA metode na slivu Plitvičkih jezera  
5. Zaključak  
6. Literatura

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

Zadatak zadan: 06.06.2017.

Rok predaje: 11.09.2017.

Mentor:

  
Doc.dr.sc. Hrvoje Meaški



Predsjednik Odbora za nastavu:

  
Doc.dr.sc. Igor Petrović

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom

Procjena ranjivosti kišnih vodonosnika na primjeru sliva Plitničkih jezera

(naslov diplomskog rada)

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom doc.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, 11.09.2017

JOSIP NATIN

(Ime i prezime)

Josip Natin

(Vlastoručni potpis)

## SAŽETAK

Krški vodonosnici predstavljaju vrlo vrijedne izvore podzemne vode koji su zbog svoje specifične hidrogeološke građe osjetljivi na moguća onečišćenja. Isto tako zahtijevaju posebne metode zaštite gdje se sve više koristi koncept temeljen na prirodnoj ranjivosti vodonosnika koji pretpostavlja da fizička, kemijska i biološka svojstva mogu doprinijeti do nekog stupnja zaštite podzemnih voda od antropogenih utjecaja. Jedna od takvih metoda je i KAVA metoda koja je u ovom diplomskom radu testirana na području sliva Plitvičkih jezera. Metoda prvenstveno služi za procjenu prirodne ranjivosti vodonosnika i/ili izvorišta gdje se konačna prostorna analiza i karte ranjivosti izrađuju pomoću GIS programskog paketa. Metoda se sastoji od 4 osnovna parametra i to su: pokrovne naslage (O faktor), utjecaj infiltracije (I faktor), utjecaj oborina (P faktor) i uvjeti vodonosnika (A faktor). Ukupni rezultati analize prikazani su s dva indeksa ranjivosti, SV (Source Vulnerability) indeks odnosi se na procjenu prirodne ranjivosti krških izvora, a RV (Resource Vulnerability) indeks odnosi se na procjenu prirodne ranjivosti krških vodonosnika.

**Ključne riječi:** KAVA metoda, krški vodonosnici, GIS, podzemna voda, karta ranjivosti

## Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Opis istraživanih područja .....	2
2.1.	Područje Nacionalnog parka Plitvička jezera .....	2
2.2.	Pregled dosadašnjih istraživanja.....	6
2.3.	Sliv Plitvičkih jezera.....	8
3.	Metoda procjene krških vodonosnika (KAVA metoda).....	12
3.1.	Postojeće metode procjene ranjivosti korištene u svijetu .....	13
3.2.	Razvoj <i>Karst Aquifers Vulnerability Assessment</i> (KAVA) metodologije .....	15
3.3.	Opis KAVA metodologije.....	17
4.	Primjena KAVA metode na slivu Plitvičkih jezera .....	28
4.1.	Upotreba GIS-a u primjeni KAVA metode .....	28
4.2.	Podaci korišteni za primjenu KAVA metode na slivu Plitvičkih jezera.....	29
4.3.	Određivanje glavnih parametara u KAVA metodi .....	30
4.3.1.	Pokrovne naslage – O karta .....	31
4.3.2.	Utjecaj oborina – P karta .....	34
4.3.3.	Površinska slivna područja – SCA karta.....	35
4.3.4.	Utjecaj infiltracije (I karta) .....	37
4.3.5.	Uvjeti vodonosnika (A karta) .....	39
4.4.	Karte ranjivosti dobivene KAVA metodom .....	42
5.	Zaključak .....	46
6.	Literatura.....	47



## 1. Uvod

Voda je jedinstven i nezamjenjiv prirodni resurs, ograničenih količina i neravnomjerne prostorne i vremenske raspodjele. Svi oblici života i sve ljudske aktivnosti na neki način vezane su uz korištenje vode, a ubrzani gospodarski razvoj i urbanizacija dovode do velikog porasta potrebe za vodom što dovodi do ugrožavanja vodnih resursa i vodenog okoliša. Radi očuvanja količine i kakvoće vode danas se sve veća pažnja stavlja na zaštitu podzemnih voda gdje krški vodonosnici predstavljaju vrlo vrijedne izvore podzemne vode. Krški vodonosnici zbog svojih specifičnih hidrogeoloških karakteristika izuzetno su osjetljivi na moguća onečišćenja. Imaju tanak sloj pokrovnih naslaga, koncentriranu infiltraciju vode u podzemlje te velike brzine tečenja kroz kanale i pukotine što pogoduje širenju potencijalnog onečišćenja s površine terena u kratkom vremenu na velike udaljenosti.

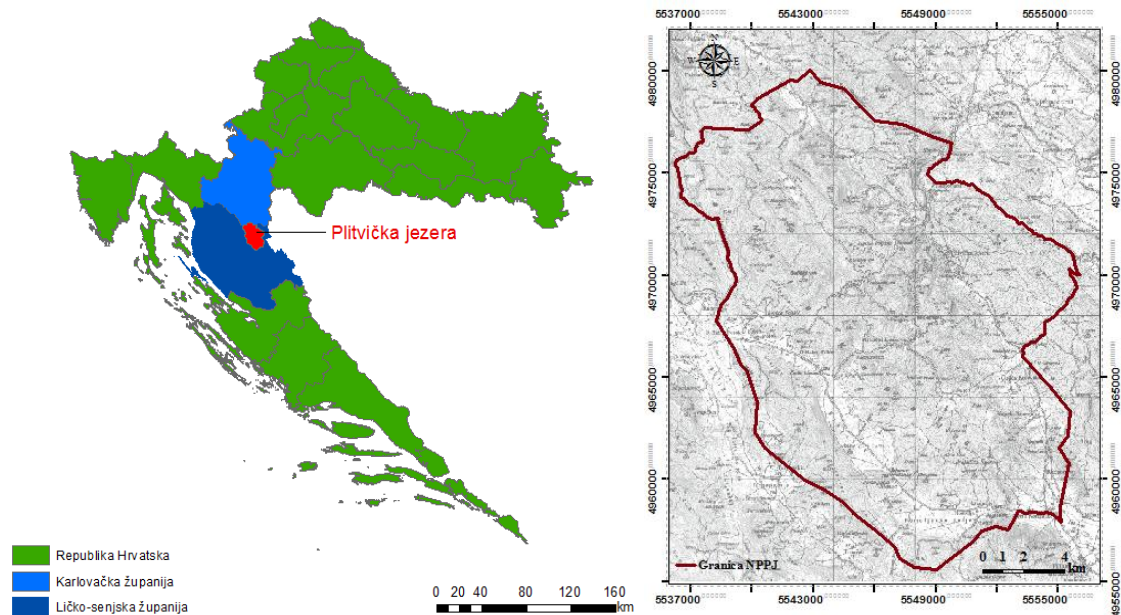
Hrvatska se ubraja u skupnu relativno vodom bogatih zemalja, a gotovo polovicu kopnenog teritorija čine krške karbonatne stijene koje pripadaju području Dinarida. Takvom području pripadaju i Plitvička jezera koja su zbog svoje posebne geološke i hidrogeološke građe i atraktivnosti proglašena nacionalnim parkom 1949. godine, a UNESCO ih je 1979. godine uvrstio na Listu svjetske prirodne baštine (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*).

Za zaštitu krških vodnih resursa u svijetu se sve više koristi koncept temeljen na prirodnoj ranjivosti vodonosnika gdje se pretpostavlja da fizička, kemijska i biološka svojstva mogu doprinijeti do nekog stupnja zaštite podzemnih voda od antropogenog utjecaja. Na sličnom konceptu zasniva se KAVA (*eng. Karst Aquifers Vulnerability Assessment*) metoda koja je u ovom radu testirana na području sliva Plitvičkih jezera. KAVA metoda prvenstveno je namijenjena za procjenu prirodne ranjivosti krških vodonosnika ili/i izvorišta gdje se konačna prostorna analiza i karte ranjivosti izrađuju pomoću GIS metodologije s više parametara. Kao rezultat KAVA metode dobivene su karte ranjivosti vodonosnika i izvorišta na slivu Plitvičkih jezera.

## 2. Opis istraživanog područja

### 2.1. Područje Nacionalnog parka Plitvička jezera

Nacionalni park Plitvička jezera (u nastavku NPPJ) jedan je od najstarijih i najposjećenijih nacionalnih parkova u Republici Hrvatskoj. Zbog svoje izuzetne prirodne ljepote, područje Plitvičkih jezera proglašeno je Nacionalnim parkom 1949. godine, a UNESCO ih je 1979. godine stavio na Listu svjetske kulturne i prirodne baštine. Granice zaštićenog područja proširene su 1997. godine današnju ukupnu površinu od 298,85 km<sup>2</sup>.



Slika 1. Geografski položaj NPPJ (lijevo) i administrativna granica NPPJ (desno)

NPPJ se nalaze većim dijelom na području Ličko-senjske županije (90,3%), a manjim dijelom na području Karlovačke županije (9,3%) (Plan upravljanja, 2007). Plitvička jezera nalaze se između planina Male Kapele na zapadu i Plješivice na istoku usred Dinarskog planinskog masiva te se sastoje od 16 jezera međusobno odijeljenih sedrenim barijerama. Najviša točka čitavog prostora Nacionalnog parka je Seliški vrh (1279 m), a najniža točka je u kanjonu rijeke Korane (367 m). Prostor Nacionalnog parka izgrađen je od karbonatnih stijena mezozojske starosti, a prema litološkim karakteristikama može se izdvojiti nekoliko cjelina koja imaju različita hidrogeološka i geomorfološka obilježja (Meaški, 2011).

Područje NPPJ dio je Dinarskog krškog područja sa specifičnim geomorfološkim i hidrološkim osobinama gdje prevladavaju mezozojski vapnenci s ulošcima dolomita, ali i sami dolomiti. Odnos slabije propusnih dolomita prema okršenim i vodopropusnim naslagama vapnenca uvjetovao je današnji izgled čitavog područja (Polšak et al., 1964).

Vodni sustavi u krškim terenima često imaju velike slivove i izdašne krške izvore s povremenim ili stalnim istjecanjem vode iz podzemlja te višestruka poniranja površinske vode u krško podzemlje. Osnovu napajanja vodnog sustava Plitvičkih jezera čine tri velika krška izvora (izvor Crne rijeke, Bijele rijeke i Plitvica) kao i veći broj manjih stalnih ili povremenih izvora, ali za jezerski sustav glavni izvori su Crna rijeka i Bijela rijeka, čiji su slivovi smješteni u južnom dijelu NPPJ. Izvori Crne i Bijele rijeke nastali su u dubokim kanjonima izgrađenim od karbonatnih stijena kao posljedica kontakta vodopropusnih vapnenačkih naslaga i slabo vodopropusnih dolomitnih naslaga.

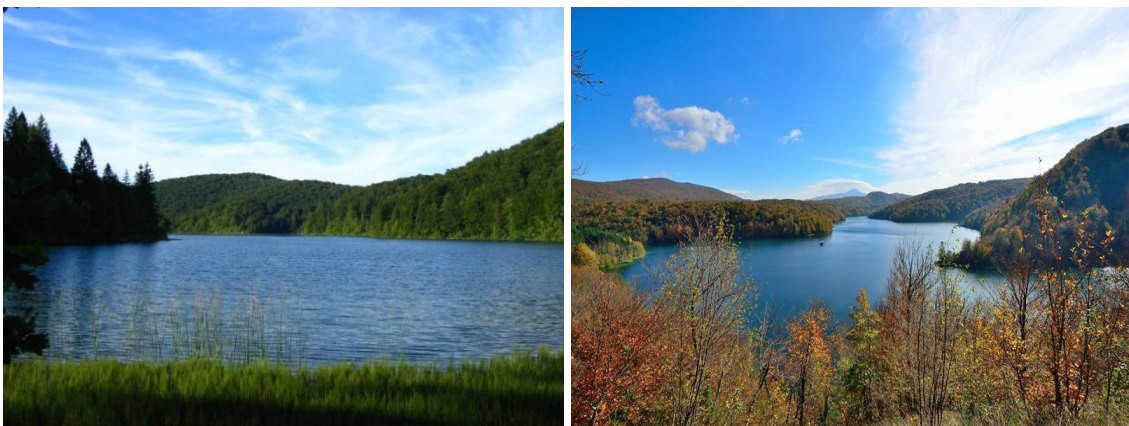
Izvor Crne rijeke predstavlja najveći izvor na području Plitvičkih jezera koji nikada ne presuše i u vrijeme sušnih razdoblja daje najveći dio vode u sustav Plitvičkih jezera. Na krškom izvoru Bijele rijeke voda izvire u rubu doline na više mjesta, dosta raspršeno i bez velike snage. U Bijelu rijeku se ulijeva vodotok Ljeskovac nakon otprilike 900 m stalnog toka. Vode Bijele rijeke, Crne rijeke i vodotoka Ljeskovac spajaju se u mjestu Plitvički Ljeskovac i formiraju vodotok Maticu koji se nakon otprilike 600 m ulijeva u Prošćansko jezero.



*Slika 2. Izvor Bijele rijeke (lijevo) i izvor Crne rijeke (desno) (izvor:*

*<http://www.posjetiliku.com>)*

Od ušća vodotoka Matice u Prošćansko jezero započinje sustav Plitvičkih jezera (na oko 640 m n.m.) dužine oko 8,2 km koji se sastoji od 16 jezera odvojenih sedrenim barijerama i slapovima među jezerima. Jezerski sustav dijeli se na Gornja i Donja jezera. Gornja jezera čini sustav od 12 jezera međusobno odijeljenih sedrenim barijerama. To su redom: Prošćansko jezero, Ciginovac, Batinovac, Okrugljak, Veliko jezero, Malo jezero, Vir, Galovac, Milino jezero, Gradinsko jezero, Veliki Burget i jezero Kozjak. Jezera su smještena na slabo vodopropusnim dolomitima. Prošćansko jezero ima površinu oko 0,68 km<sup>2</sup>, a nalazi se na nadmorskoj visini od 636 m i drugo je po veličini u sustavu Gornjih jezera s dubinom od 37 m i dužinom otprilike 2,1 km (Božičević et al., 2013). Voda se iz Prošćanskog jezera prelijeva preko barijera na području Labudovca u sustav Gornjih jezera ukupne površine oko 0,36 km<sup>2</sup>. Gornja jezera su formirana duž poprečnog rasjeda Prošćanski vrh-Labudovac koji je omogućio prodor vode u nizvodni dio Plitvičkih jezera, a povećana erozija i dezintegracija podloge bila je bitna za procese otvaranja Prošćanskog jezera prema jezeru Kozjak, sedrenja i stvaranja manjih jezera (Gornja jezera). U Gornjim jezerima dužine oko 2 km, voda se prelijeva preko niza sedrenih barijera sve do slapova Burgeta preko kojih se s 540 m n.m. ulijeva u jezero Kozjak.

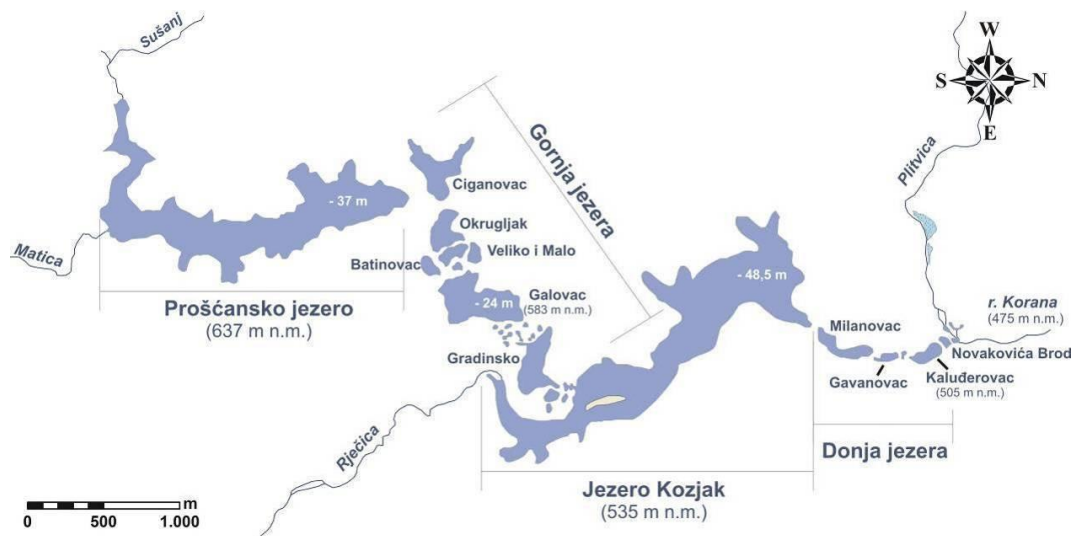


*Slika 3. Prošćansko jezero (desno) i jezero Kozjak (lijevo) (izvor: <http://www.np-plitvicka-jezera.hr>)*

Jezero Kozjak je posljednje u nizu Gornjih jezera na nadmorskoj visini od 535 m, površine 0,83 km<sup>2</sup> i dužine 2350 m te je najveće jezero u sustavu Plitvičkih jezera. Najveća dubina jezera je oko 48 m i nalazi se između potopljene sedrene barijere koja je ranije dijelila jezero na dva dijela odvojena slapom visine oko 40 m (Pribičević et al., 2008). Međutim, sedrena barijera na kraju jezera Kozjak (Kozjački mostovi) rasla je

puno brže nego barijera koja ga je razdvajala te se na taj način podizala razina vode jezera i postupno prekrivala slap. U konačnici, kada je slap potopljen, jezero se spojilo u jedno kakvim ga danas vidimo. Jezero Kozjak najvećim dijelom je formirano na vodonepropusnim dolomitima, što ima za posljedicu veću razvedenost jugozapadne obale.

Sjeverozapadnom obalom pruža se Kozjački rasjed koji razdvaja dolomitne stijene od karbonatnih stijena, tako da je i dio jezera formiran na dobro i osrednje vodopropusnim vapnencima i izmjeni dolomita i vapnenaca. Rasjed je velikim dijelom potopljen jezerom Kozjak zbog čega je ovo jezero duž sjeveroistočne obale došlo u izravni kontakt s dobro vodopropusnim područjem „otvorenim“ prema susjednim slivovima. Zbog ove činjenice, odnos jezera Kozjak i krškog podzemlja postao je izuzetno važan radi procjene stupnja održivosti jezera. Jezero ima mnoge sedre i jezerskih sedimenata koji najvjerojatnije sprječavaju veće gubitke vode u dijelu jezera smještenom na vodopropusnim stijenama (Biondić et al., 2008).



Slika 4. Jezerski sustav Plitvičkih jezera (Meaški, 2011)

Sustav Donjih jezera čine jezera Milanovac, Gavanovac, Kaluđerovac i Novakovića brod koja su formirana u kanjonu izgrađenom od dobro vodopropusnih vapnenaca. Osim opisanih glavnih sustava napajanja i dotoka vode u sustav Plitvičkih jezera, postoje još i brojni manji izvori i vodotoci čije vode utječu u jezera kao što je vodotok Sušanjski koji se ulijeva u Prošćansko jezero na njegovom početku. Većina dotoka je formirana na području izravnih jezerskih slivova te se radi uglavnom o manjim dotocima tijekom malih i srednjih voda, ali kod visokih voda moguće je očekivati i veće

količine vode. Jedan od značajnijih pritoka je vodotok Rječica koji drenira veliki dio područja izgrađenog od slabo vodopropusnih dolomita i izravno utječe u jezero Kozjak (slika 3).

Vodeni sustav bez izravnog utjecaja na jezera je vodotok Plitvica koji utječe u vodni sustav Plitvičkih jezera tek u izvorišnom dijelu rijeke Korane. Vodotok Plitvica drenira sjeverozapadni dio NPPJ i započinje uzlaznim krškim izvorom Plitvice. U vodotok Plitvicu ulijeva se njen najznačajniji prtok – vodotok Sartuk. Na kraju svog toka, vodotok Plitvica „pada“ niz 78 m vapnenačku liticu, formirajući Veliki slap, najveći u Republici Hrvatskoj. Vode iz jezerskog sustava i vodotoka Plitvice spajaju se u depresiji, promjera 150 m poznatoj kao Sastavci što je ujedno i izvorišno područje rijeke Korane (slika 5).



*Slika 5. Veliki slap (desno) i Sastavci (lijevo) (izvor: <http://www.zastita-priode.hr>)*

## **2.2. Pregled dosadašnjih istraživanja**

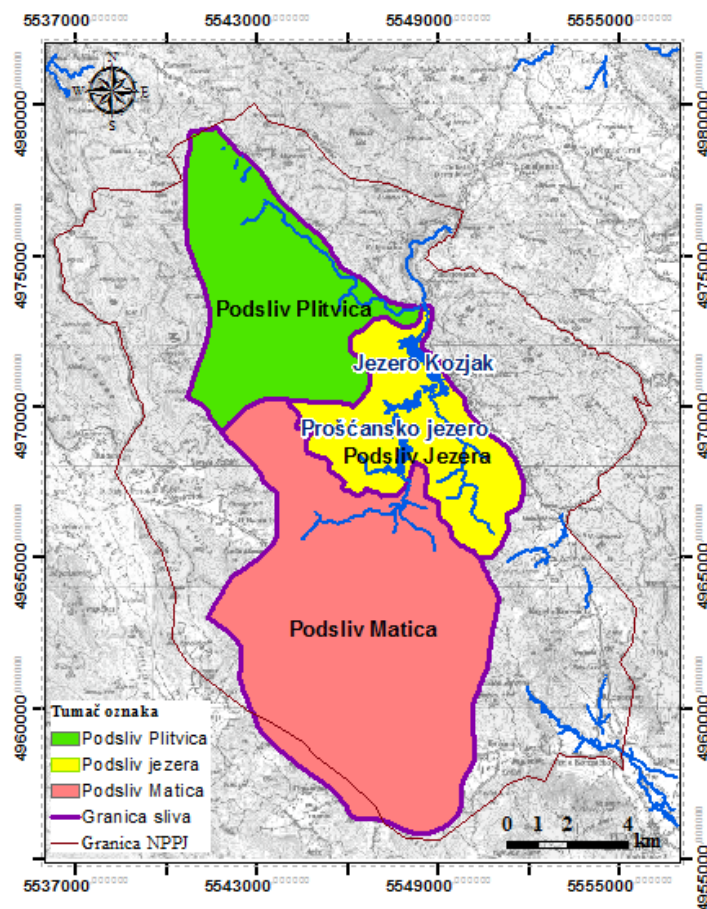
Nacionalni park Plitvička jezera zbog svojih specifičnih hidrogeoloških osobina istraživala su se već u 20. stoljeću gdje su se proučavale klimatske značajke zbog formiranja sedrenih barijera (Gavazzi, 1904, 1919). Također se proučavao položaj i postanak Plitvičkih jezera kada se utvrdilo da su jezera nastala tektonskim pokretima za vrijeme Alpske orogeneze (Petrik, 1958). Pisalo se i o mijenjaju kemijskog sastava vode, kao i o klimatološkim značajkama područja Plitvičkih jezera (Makjanić, 1958).

Područje Plitvičkih jezera geološki je obrađeno u sklopu izrade Osnovne geološke karte Jugoslavije u mjerilu 1:100 000. Dešković (1981) je obavljao hidrološka i hidrokemijska istraživanja i trasiranja podzemnih tokova koja su kasnije poslužila za određivanje granica NPPJ. Što se tiče sedrenih barijera, Srdoč i ostali (1985, 1986) detaljno su proučavali procese taloženja kalcita na sedrenim barijerama i utvrdili znatno brži rast sedrenih barijera nego jezerskog sedimenta. Temeljem redovitih opažanja vodostaja i povremenim mjerenjem protoka određenih vodotoka, Sumina (1988) ukazuje na mjesta mogućih gubitaka vode, posebice u vodotoku Plitvica. Istraživanjem ekološkog stanja Plitvičkih jezera ukazuje se na onečišćenja u području Bijele rijeke i Plitvičkog Ljeskovca (Stilinović, et al., 1985, 1989, 2004). Također su se istraživali i vodni resursi u svrhu procjene mogućih zahvata pitke vode (Kapelj et al., 2003).

Od novijih istraživanja ističe se studija ANTHROPOL.PROT (2005) gdje su podaci prikupljeni ovim projektom poslužili kao podloga za objašnjenje hidrogeoloških odnosa i prirodne ranjivosti, opasnosti i procjene rizika površinskih i podzemnih krških vodonosnika. Dobiveni rezultati prikazani su kartama u mjerilu 1:100 000. U razdoblju od 2005. do 2008. godine na području NPPJ se provodio međunarodni znanstveno-istraživački projekt *Sustainable utilization of water in the pilot area Plitvice Lakes* (Biondić et al., 2008), financiran od strane NPPJ, Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske, Fonda za zaštitu i energetska učinkovitost Republike Hrvatske te Vlade Republike Austrije, kroz WaterPool organizaciju iz Graza. Istraživanja su rađena u suradnji Geotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Joanneum Research instituta iz Graza i Znanstveno-stručnog centra „Ivo Pevalek“ Nacionalnog parka „Plitvička jezera“. Provedena su istraživanja imala tri osnovna cilja – poboljšanje zaštite sliva velikih krških izvora koji daju najveći dio vode jezerskom sustavu, zatim zaštita jezera i slapova opterećenih brojnim posjetiteljima i turističkim sadržajima te dopisno zaštitu šireg krškog okoliša od utjecaja samog Nacionalnog parka Plitvička jezera. Tijekom 2011. godine je u sklopu doktorske disertacije napravljen i konceptualni model zaštite krških vodnih resursa na primjeru sliva Plitvička jezera (Meaški, 2011). Sva spomenuta detaljna istraživanja imala su za cilj bolje razumijevanje područja Plitvičkih jezera.

### 2.3. Sliv Plitvičkih jezera

Na području Nacionalnog parka Plitvička jezera nalazi se više slivova od kojih su neki smješteni u granicama nacionalnog parka, a neki neposredno blizu granica NPPJ. Jedan od njih je i sliv Plitvičkih jezera koji pripada crnomorskom slivu i smješten je u graničnom području prema slivu Jadranskog mora. Sliv Plitvičkih jezera je jedinstven sliv jer su sve vode usmjerene u graničnom području prema slivu Jadranskog mora.



Slika 6. Tri osnovna podsliva u slivu Plitvičkih jezera

Nacionalni park Plitvička jezera godišnje posjeti preko milijun turista te je u nekim dijelovima Nacionalnog parka ljudski utjecaj izražen zbog čega je potrebno zaštitne zone proširiti na cijeli sliv Plitvičkih jezera. U tom slučaju, potrebno je sliv Plitvičkih jezera promatrati kao jedinstvenu hidrogeološku cjelinu sastavljenu od više međusobno povezanih manjih slivnih područja. Izdvajanje manjih hidrogeoloških cjelina u slivu Plitvičkih jezera izvršeno je na temelju hidrogeoloških značajki područja,

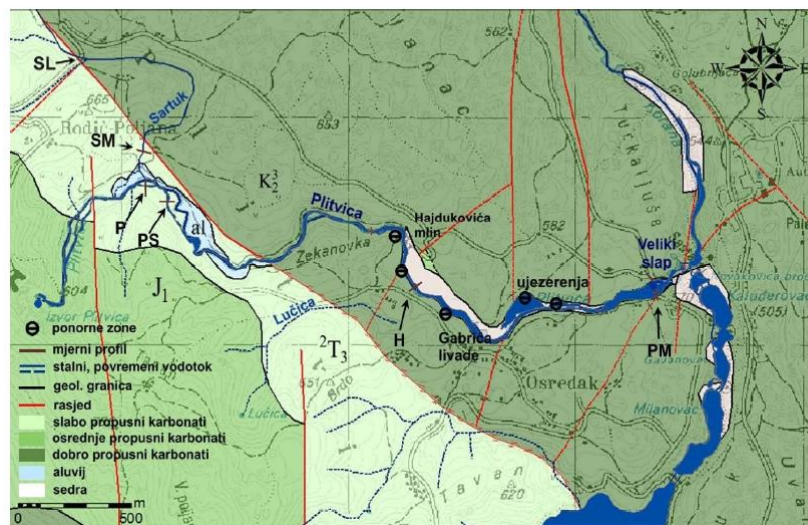


hidrokemijskih i izotopnih analiza voda, hidroloških značajki vodnog sustava i drugim podacima koji su pomogli što boljoj delineaciji pojedinih dijelova sliva. Delineacijom Plitvičkih jezera izdvojila su se tri osnovna podsliva: podsliv Matice, podsliv Plitvice i podsliv Jezera unutar kojih se mogu izdvojiti i manje hidrogeološke cjeline (Meaški et al., 2016). Razdvajanjem slivova na manje hidrogeološke cjeline pruža se učinkovitija zaštita vodnih resursa na određenom slivnom području.

Podsliv Matica obuhvaća sve izvore i vodotoke koji gravitiraju vodotoku Matica i koji zatim utječu u Prošćansko jezero. Obuhvaća oko 55 % sliva Plitvičkih jezera i količinski daje oko 2/3 ukupne količine vode koja utječe u sustav jezera. U podslivu Matice dodatno se mogu izdvojiti i tri manje hidrogeološke cjeline: Crna rijeka, Bijela rijeka i Ljeskovac (Meaški, 2011). Hidrogeološku cjelinu Crne rijeke izgrađuju naslage vapnenaca i dolomita različitog stupnja vodopropusnosti. Glavno mjesto istjecanja vode je istoimeno izvorište od kojeg se formira površinski tok dužine oko 2,5 km koji se u Plitvičkom Ljeskovcu spaja s Bijelom rijekom i formira vodotok Maticu. Duž svog toka Crna rijeka ne prima značajne površinske dotoke. Hidrogeološka cjelina Bijele rijeke je složeno slivno područje zbog nedostatka pouzdanih podataka o smjerovima kretanja podzemne vode. Izgrađena je od naslaga u kojima prevladavaju dolomiti. Glavno mjesto istjecanja sliva je izvorište Bijele rijeke od koje se formira površinski tok dužine oko 4,5 km koji se spaja s Crnom rijekom i formira vodotok Maticu koja utječe u Prošćansko jezero. Vodotok Ljeskovac započinje nizom manjih krških izvora, otprilike 2 km prije spoja s Bijelom rijekom i koji duž svog toka prima niz manjih, povremenih tokova. Viši dijelovi cjeline izgrađeni su od karbonatnih naslaga, a niži dijelovi cjeline pretežito od vapnenačkih naslaga.

Podsliv Plitvice obuhvaća sve vode koje gravitiraju vodotoku Plitvica koji izravno preko Velikog slapa utječe u područje Sastavaka gdje se spaja s vodama koje dotječu Plitvičkim jezerima čime se formira rijeka Korana. Podsliv Plitvice obuhvaća oko 26 % ukupne površine sliva te se dijeli još na tri manje hidrogeološke cjeline - izvor Plitvice, Sartuk i vodotok Plitvice (Meaški, 2011). Dio sliva koji drenira vodotok Sartuk nalazi se u sjevernom dijelu sliva Plitvičkih jezera na području izgrađenom od slabo vodopropusnih dolomita. Odvojen je od dijela koji drenira vodotok Plitvica temeljem razvodnice koja je dijelom površinska, a dijelom je na kontaktu slabije vodopropusnih karbonatnih stijena. U ovom dijelu sliva ima mnogo gubitaka vode. Dio izvora Plitvice

nalazi se na području koje čine vapnenci koji su ovdje glavni vodonosnici. Hidrogeološke prilike u ovom dijelu uvjetovane su Kozjačkim rasjedom koji razdvaja slabo vodopropusne i dobro vodopropusne naslage. Vodotok Plitvica obuhvaća područje od izvorišta vodotoka do Velikog slapa. Zbog svojeg specifičnog hidrogeološkog smještaja, vodotok Plitvica predstavlja umanjeni prikaz čitavog sustava Plitvičkih jezera (slika 7). Ova cjelina je odvojena zbog specifičnih problema gubitaka vode koji se javljaju u ovom području.



Slika 7. Hidrogeološka skica vodotoka Plitvica (izvor: Meaški, 2011)

Vodotok Plitvica započinje krškim izvorom koji se nalazi u području izgrađenom od osrednje vodopropusnih karbonatnih stijena i protječe preko slabo vodopropusnih dolomita gdje je u ovom dijelu toka vodotok Plitvica stabilan. Kada se vode vodotoka Plitvica počnu prelijevati preko slabo vodopropusnih stijena u područje izgrađenom od dobro vodopropusnih stijena, tada počnu poniranja i smanjenje količine vode u vodotoku Plitvica. Razlog smanjenju količine vode jest pretjerani rast sedrenih barijera gdje se voda izliva u obližnji teren s brojnim vrtačama i sufozijama uz korito vodotoka. Sedra ima pozitivnu hidrogeološku funkciju vodoodrživosti cijelog korita, ali kada dođe to pretjeranog rasta sedrenih barijera dolazi do problema gubitka vode koje se na kraju očituje smanjenjem protoka vode na Velikom slapu.

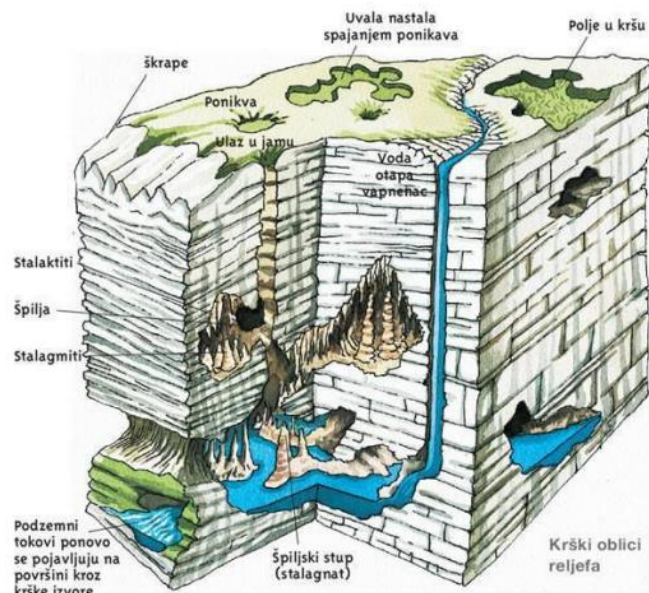
Podsliv jezera obuhvaća sve izravne dotoke vode u jezera, a najznačajniji dotoci su Rječica i Sušanjski. Ovo područje izgrađeno je od slabo vodopropusnih stijena koja također formiraju Gornja jezera i veliki dio jezera Kozjak. Prema vodotoku Sušanjski,

vode se najvećim dijelom površinski dreniraju i u uzvodnom dijelu toka vodotok je povremen, a u nizvodnom dijelu poprima karakter stalnog vodotoka. Vodotok Rječica ima stalan tok i nema velikih krških izvora, već niz manjih izvorišnih zona i pritoka te završava ušćem u jezero Kozjak na otprilike 535 m n.m. (Meaški et al., 2016).

### 3. Metoda procjene krških vodonosnika (KAVA metoda)

Krški vodonosnici su već u prošlom stoljeću bili područje interesa mnogim znanstvenicima jer je prepoznata njihova vrijednost za različite namijene za ljudsku upotrebu kao i izrazita osjetljivost na antropogene utjecaje. Pojam krša povezuje se s terenima specifičnog krajolika, površinskih i podzemnih morfoloških oblika i vrijednih vodonosnika koji su uglavnom razvijeni u karbonatnim stijenama. U Hrvatskoj 90 % vodoopskrbe ostvaruje se iz podzemnih voda te skoro polovicu državnog teritorija čine okršene karbonatne stijene.

U krškim vodonosnicima nalaze se dovoljne količine podzemne vode iznimne kakvoće koje su neravnomjerno raspodijeljene tijekom hidrološke godine. Krški vodonosnici za razliku od ostalih vodonosnika imaju trostruki porozitet, primarni, pukotinski i pukotinsko-kavernozni (pojava krških kanala, okršavanje). Primarna poroznost nastala je za vrijeme taloženja stijena, sekundarna poroznost karakteristična je za krške stijene, a ono što je značajno za krške vodonosnike jest tečenje podzemne vode kroz sustav kanala koji čine tercijarnu poroznost. Infiltracija vode u krško podzemlje može biti difuzna kroz pokrovno tlo ili koncentrirana kroz ponore i jame.



Slika 8. Konceptualni model krškog vodonosnika (Božičević, 1991)

Karbonatne okršene stijene zbog svojih karakterističnih obilježja zahtijevaju specifičan pristup u upravljanju i zaštiti vodnih resursa. Obično imaju tanak sloj tla

nekontinuiranog rasprostiranja po površini, mnoštvo međusobno povezanih pukotina što omogućava brzu infiltraciju vode (onečišćenja) u podzemlje gdje voda teče kroz kanale i pukotine velikom brzinom i zadržava se kratko vrijeme. Sve to omogućuje širenje potencijalnog onečišćenja s površine terena u kratkom vremenu na velike udaljenosti. Zato se krški vodonosnici smatraju iznimno ranjivim područjima i gotovo svaka ljudska aktivnost u određenoj ih mjeri ugrožava.

### **3.1. Postojeće metode procjene ranjivosti korištene u svijetu**

Suvremeni koncept ranjivosti podzemnih voda temelji se na pretpostavci da fizička, kemijska i biološka svojstva okoliša mogu doprinijeti do nekog stupnja zaštite podzemnih voda od antropogenog utjecaja. Ranjivost se pri tome definira kao relativno, nemjerljivo i bez-dimenzijsko svojstvo nekog prirodnog sustava. Za ocjenu u kojoj je mjeri neki hidrogeološki sustav u kršu osjetljiv ili ugrožen, nužno je provesti ispitivanja osnovnih hidrogeoloških odnosa na nekom području, prirodnih fizičkih svojstava, geokemijskih, hidrogeokemijskih i biogeokemijskih svojstava svih dijelova hidrogeološke cjeline. Rezultat takvih istraživanja je karta ranjivosti podzemnih voda koja se kasnije koristi za upravljanje i zaštitu zaliha podzemnih voda na nekom području i služi kao nezamjenjiva podloga pri odlukama o upravljanju, korištenju i namijeni prostora.

Prve procjene prirodne ranjivosti vodonosnika napravljene su u Francuskoj sredinom prošlog stoljeća (Margat 1968) i od tada su razvijene brojne metode koje imaju isti koncept, ali su najčešće prilagođene državi u kojoj su razvijene, dominantnom tipu vodonosnika, dostupnim podacima i zakonskoj regulativi države. Prvi europski projekt vezan isključivo za zaštitu krških vodonosnika pokrenut je 1995. godine nazvan COST 65 (COST 65), kojim je naglašena potreba za složenim geološkim, hidrogeološkim, hidrološkim, geofizičkim i drugim istraživanjima svih dijelova krškog vodonosnog sustava u svrhu dobivanja informacija o krškoj sredini i dinamici tečenja vode u podzemlju. Kao posljedica projekta COST 65 razvijene su brojne metode za procjenu prirodne ranjivosti.

DRASTIC metoda (Aller et al., 1987) razvijena je 1987. godine u Geološkoj službi SAD-a i zasniva se na 7 parametara: dubini do podzemne vode (D), području napajanja (R), značajkama vodonosnika (A), svojstvima tla (S), topografiji (T), utjecaju nesaturirane zone (I) i hidrauličkoj vodljivosti vodonosnika (C). Metoda je prikladna za ocjenu regionalne ugroženosti područja. AVI metoda (Van Stempfort et al., 1993) razvijena je 1993. godine u Kanadi i koristi dvije varijable za definiranje indeksa ranjivosti – debljinu svakog sedimenta iznad saturirane zone vodonosnika i procijenjenu hidrauličku vodljivost svakog od tih sedimenata. GOD metoda (Foster, 1987; Vrba i Zaporozec, 1994) razvijena je 1994. godine u Velikoj Britaniji i uzima u obzir tri osnovna parametra – tip vodonosnika, litološke karakteristike vodonosnika i dubinu do podzemne vode. Njemačka metoda (Holting et al., 1995) razvijena je 1998. godine od strane Njemačkog državnog geološkog instituta (GLA) i Federalnog instituta za geoznanosti i prirodne resurse, a 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) razvijena je u Italiji (1995. godine) i koristi 8 parametara: srednje godišnje prihranjivanje, tip tla, debljinu tla, litologija nesaturirane zone, tip i debljinu vodonosnika. Sustav se još sastoji od tri razine vezano uz korištenje tla – normalni uvjeti, jako onečišćena poljoprivredna površina i jako drenažno područje. EPIK metoda (Doerfliger i Zwahlen, 1995, 1999) razvijena je u Švicarskoj (1998.) i temelji se na proučavanju epikrške zone, pokrovnih zaštitnih naslaga, sustava infiltracije i razvitka krških formi. SINTACS metoda (Civita i De Maio, 2000) razvijena je također u Italiji (2000.) i vrlo je slična DRASTIC metodi jer koristi iste parametre, ali ima četiri težinska sustava koji ovise o hidrogeološkoj građi vodonosnika. COP metoda razvijena je u Hidrogeološkom odjelu Sveučilišta u Malagi tijekom 2001. – 2002. godine i koristi podatke o pokrovnim naslagama, koncentraciji tokova vode i padalinama.

Često su navedene metode promatrale slične parametre i imale slične sustave bodovanja, ali se znalo dogoditi da se primjenjivanjem nekoliko različitih metoda na istom području dobile vrlo različite karte ranjivosti. Značajni pomak u zaštiti krških vodonosnika napravljen je konceptualnom metodom Europski pristup (eng. European Approach) u sklopu izrade projekta COST 620 (2004). Cilj projekta je bio predložiti objektivnu metodologiju i okvirne smjernice za ujednačeni pristup u procjeni prirodne ranjivosti. Za razliku od ranije spomenutih metoda, Europski pristup ne pripisuje

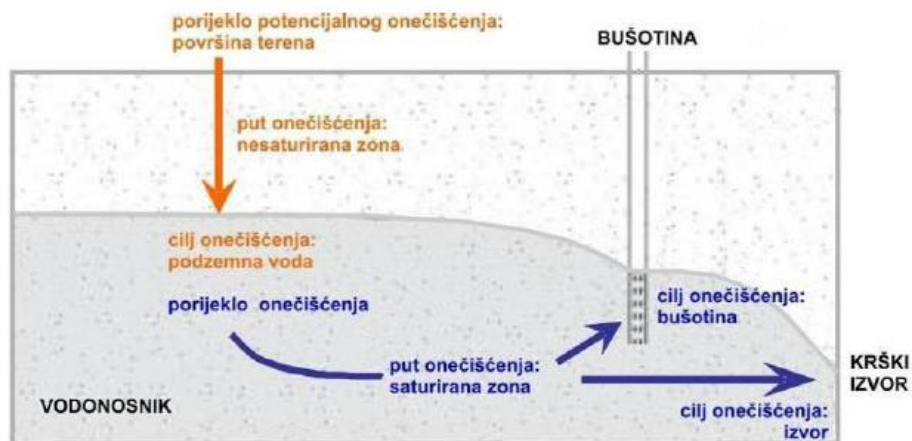
detaljne upute, formule za izračun ili tablice za iščitavanje vrijednosti za određivanje prirodne ranjivosti, već daje smjernice za njenu procjenu. Na taj se način postigla željena ujednačenost i zadržala fleksibilnost i mogućnost prilagodbe različitim okolišnim uvjetima. Također su precizno definirane razlike između ranjivosti i rizika, između prirodne i specifične ranjivosti i između ranjivosti vodonosnika i izvorišta. U procjeni prirodne ranjivosti predlažu se četiri osnovna parametra: pokrovne naslage (O), koncentracije tokova (C), režim padalina (P) i razvoj krške mreže (K). Pri procjenu prirodne ranjivosti i rizika za podzemne vode u kršu vrlo bitno je imati detaljne geološke, hidrogeološke i hidrološke informacije koje su osnovni preduvjet za izradu karte ranjivosti jer je samo na taj način moguće prepoznati individualna obilježja krškog sustava.

U posljednjih nekoliko godina na Geotehničkom fakultetu razvile su se dodatne dvije metode procjene ranjivosti krških vodonosnika. Jedan model je razvijen na području sliva Jadra i Žrnovnice u Dalmaciji pod nazivom *Hrvatski pristup* (Loborec, 2013), a drugi je razvijen u sklopu UNESCO i *MedPartnership* projekta na slivu Novljanske Žrnovnice u Lici i Hrvatskom primorju pod nazivom *Karst Aquifer Vulnerability Assessment metoda* (Biondić et al., 2014). KAVA metoda testirala se još i u Bakarskom zaljevu 2016. godine (Biondić et al., 2016) te se u ovom diplomskom radu testira na području sliva Plitvičkih jezera.

### **3.2. Razvoj *Karst Aquifers Vulnerability Assessment* (KAVA) metodologije**

Proučavanjem nekoliko široko rasprostranjenih metoda za procjenu prirodne ranjivosti krških vodonosnika navedenih u prethodnom poglavlju, razvijen je novi način procjene ranjivosti krških vodonosnika, *Karst Aquifers Vulnerability Assessment* (KAVA) metoda. Metoda je razvijena i testirana na krškom slivnom području Novljanska Žrnovnica u Hrvatskoj gdje je ovo slivno područje odabrano kao istraživano područje zbog toga što je tipično za krško područje Dinarida. Druga faza razvoja KAVA metode usmjerena je na verifikaciju same metodologije, a za tu svrhu odabran je sliv izvora u Bakarskom zaljevu. Istraživanjem je došlo do promjena načina bodovanja pojedinih kategorija koje su se usvojile i koristile na primjeru sliva Plitvičkih jezera.

KAVA metoda temelji se na konceptualnom modelu prirodne ranjivosti predložen projektom COST 620 (2004) koji se temelji na odnosu „porijeklo – put – cilj“ onečišćenja (slika 9). U predloženom modelu prirodne ranjivosti porijeklo predstavlja mjesto nastanka potencijalnog onečišćenja na površini ili neposredno ispod površine terena (izvor onečišćenja), put predstavlja kretanje potencijalnog onečišćenja od točke infiltracije kroz prirodni sustav prema području koje treba štititi, a cilj je vodni resurs koji treba zaštititi (vodonosnik ili izvor). Projektom COST 620 predlaže se razlikovanje zaštite izvorišta i zaštite vodonosnika i bez obzira na sličnost oba koncepta i nemogućnosti zaštite izvorišta bez zaštite vodonosnika, važno je odrediti primarni cilj zaštite, odnosno naglasiti radi li se o zaštiti krškog vodonosnika ili izvorišta (voda koja istječe iz krškog vodonosnika, svaka pojava podzemne vode na površini terena, zahvat vode u obliku bušotine ili kaptaže i sl.).



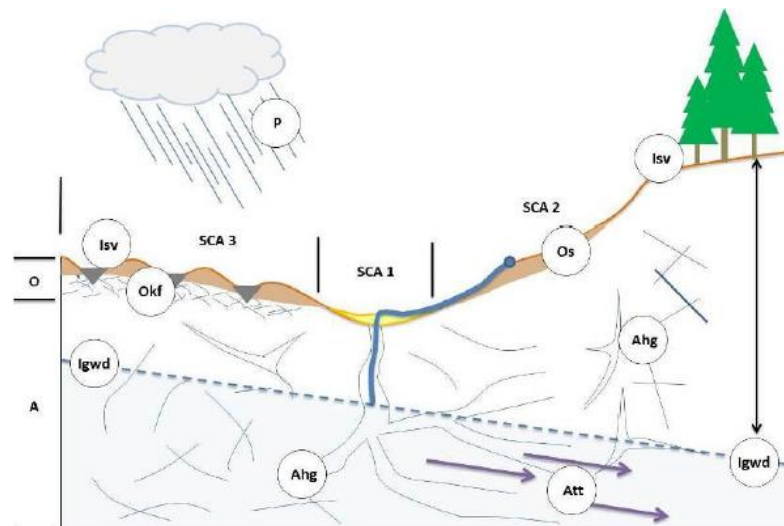
Slika 9. Model „porijeklo – put – cilj“ (modificirano prema COST 620, 2004)

Za razliku od Europskog pristupa i drugih postojećih metoda procjene prirodne ranjivosti vodonosnika, u KAVA metodi nesaturirani i saturirani dio vodonosnika obrađuju se zajedno. Postoji nekoliko razloga za to, ali prvenstveno se radi o pojednostavljenju cjelokupnog modela. S obzirom da su krški vodonosnici vrlo heterogeni i anizotropni sustavi bez dovoljnog broja prilično skupih istražnih bušotina s kojima bi se relativno lako odredila razina podzemne vode, odvajanje nesaturiranog i saturiranog dijela vodonosnika teško je moguće. Iz tih razloga, granica između saturiranih i nesaturiranih zona vodonosnika često se određuje empirijski, a debljina nesaturiranog dijela vodonosnika općenito je nepouzdan parametar što je nedostatak svih metoda koje ga koriste.



### 3.3. Opis KAVA metodologije

KAVA metoda prvenstveno je namijenjena procjeni prirodne ranjivosti krških vodonosnika/izvorišta gdje se konačna prostorna analiza i karte ranjivosti izrađuju pomoću GIS metodologije s više parametara. U KAVA metodi koriste se četiri osnovna parametra za procjenu prirodne ranjivosti krških vodonosnika i to su: pokrovne naslage (O parametar), utjecaj oborina (P parametar), utjecaj infiltracije (I parametar) i svojstva vodonosnika (A parametar) (Biondić et al., 2014). Svi parametri koriste se za procjenu prirodne ranjivosti izvorišta, a za procjenu prirodne ranjivosti vodonosnika koriste se parametri O, P i I te podfaktor parametra A koji opisuje statičke uvjete u vodonosniku ( $A_{hg}$  podfaktor). Također, svi parametri imaju svoje podfaktore koji će detaljno biti objašnjeni u nastavku.



Slika 10. Konceptualni model KAVA (Biondić et al., 2014)

#### Pokrovne naslage (O parametar)

O parametar definira pokrovne naslage čija je uloga smanjenje specifičnog onečišćenja i infiltracije površinske vode u dublje dijelove vodonosnika. Potencijalna onečišćenja u zoni tla mogu biti u znatnoj mjeri degradirana mehaničkim, fizikalno – kemijskim ili mikrobiološkim procesima, a u idealnim slučajevima i potpuno neutralizirana. Učinkovitost tih procesa uglavnom je određena vremenom zadržavanja vode u tlu. Pri određivanju O parametra, koriste se dva osnovna podfaktora: podfaktor  $O_s$  (tlo) i podfaktor  $O_{kf}$  (značajke krša).

Podfaktor  $O_s$  (tlo) predstavlja zaštitnu ulogu pokrovnih naslaga koje nastaju trošenjem stijena na površini terena. To je litološki aktivna zona vodonosnika na površini terena koja može zadržavati i/ili degradirati potencijalno onečišćenje. Iz tog razloga, kod modeliranja prirodne karte ranjivosti uvijek je potrebno procijeniti zaštitnu ulogu pokrovnih naslaga prema raspoloživim podacima o tlu. Neki od ključnih parametara kod ocjene zaštitne uloge pokrovnih naslaga jesu njihova debljina, tekstura, poroznost i propusnost tla. Podfaktor  $O_s$  izvorno je predložen u COP metodi u kojoj su pokrovne naslage podijeljene u četiri osnovne kategorije ovisno o teksturi tla i veličini čestica (zrna) tla. U KAVA metodi, kategorije tla su pojednostavljene (tablica 1).

Tablica 1. Vrijednosti podfaktor  $O_s$  (Biondić et al., 2014)

Vrsta tla	Dubina tla	$O_s$	Dubina tla	$O_s$	Dubina tla	$O_s$	Dubina tla	$O_s$
Glinovito	> 2 m	<b>2</b>	1-2 m	<b>1.9</b>	0,5-1 m	<b>1.6</b>	< 0,5 m	<b>1.3</b>
Glinovito-pjeskovito				<b>1.8</b>		<b>1.5</b>		<b>1.2</b>
Ilovasto				<b>1.7</b>		<b>1.4</b>		<b>1.1</b>
Goleti (bez pokrova)	- 1							

Podfaktor  $O_{kf}$  (značajke krša) definira utjecaj okršenih i jako propusnih površinskih i pod površinskih zona krškog vodonosnika na ranjivost vodonosnika (ranjivost epikrške zone). Epikrš je dio prostora krša s vrlo raspucanim, ali nerijetko i glinovitim taložinama djelomično ispunjenim pukotinskim strukturama. Takve strukture dijelom usporavaju brze vertikalne tokove podzemnih voda te tako mogu dominantno utjecati na režim tečenja podzemnih voda. Debljina epikrških zona može varirati od nekoliko metara do nekoliko desetaka metara i procesi koji se u epikršu događaju strukturno su različiti od ostatka krškog područja. Problem kod određivanja epikrške zone je taj da one nisu vidljive na površini i njihova debljina i distribucija može se utvrditi jedino detaljnim geofizičkim istraživanjima i istražnim bušotinama, a češće korištenjem prostorne analize geomorfoloških pojava na površini terena. Najčešće korištena analiza jest određivanje gustoća vrtača na površini terena (tablica 2). Osnovna pretpostavka je da epikrška zona postoji čak i kada nije vidljiva na površini terena, ali je dovoljno da postoje uvjeti koji omogućuju njezin razvoj (vapnenci s otvorenim pukotinama, geomorfološke značajke kao što su vrtače i sl.).

Tablica 2. Vrijednosti podfaktora Okf (Biondić et al., 2014)

Gustoća vrtača po 1 km <sup>2</sup>	Okf
5 – 25	<b>0.2</b>
25 – 50	<b>0.4</b>
50 – 75	<b>0.6</b>
75 – 100	<b>0.8</b>
>100	<b>0.9</b>

Ukupna vrijednost parametra O dobije se oduzimanjem podfaktora  $O_s$  od podfaktora  $O_{kf}$ .

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

Dobivene O vrijednosti mogu se dalje klasificirati kako bi se dobila zasebna O karta koja predstavlja prostornu raspodjelu pokrovnih naslaga u krškim vodonosnicima.

### Utjecaj oborina (P parametar)

Padaline predstavljaju vanjski stres koji utječe na sve ostale parametre korištene u procjeni prirodne ranjivosti. One određuju način, vrstu i količinu pronosa vode, ali i potencijalnog onečišćenja s površine terena u krško podzemlje. U procjeni P parametra u obzir je uzeta efektivna količina padalina koja je dio ukupnih padalina i za koju postoji mogućnost infiltracije s površine terena u dublje dijelove krških vodonosnika. Efektivna količina padalina izražena je u obliku  $P_e$  podfaktora. Veće količine padalina uzrokuju veće napajanje vodonosnika i brži protok vode i potencijalnog onečišćenja s površine terena kroz nesaturiranu zonu vodonosnika, ali utječu i na veće razrjeđenje potencijalnog onečišćenja. Veće količine i intenziteti generalno uzrokuju veću ranjivost vodonosnika. S obzirom na činjenicu da raspodjela ukupnih godišnjih oborina također može utjecati na ranjivost krških vodonosnika za određivanje ukupnog P parametra koristi se još jedan dodatni  $P_i$  (intenzitet padalina) podfaktor.

Vrijednosti  $P_e$  podfaktora određene su iz vrijednosti srednjih efektivnih oborina u slivnom području. Rasponi vrijednosti od 1000 – 1500 mm/god uzeti su kao neutralni, dok sve ostale vrijednosti mogu mijenjati ukupnu prirodnu ranjivost krških vodonosnika (tablica 3). Podaci o efektivnim oborinama mogu se dobiti iz prijašnjih istraživanja, meteoroloških karata i sl. kao i korištenjem različitih empirijskih formula koje uzimaju u obzir ukupne godišnje padaline, temperaturu zraka i druge parametre koji su relevantni za procjenu efektivnih padalina.

Tablica 3. Vrijednosti podfaktora  $P_e$  (Biondić et al., 2014)

Efektivne padaline	$P_e$
< 500 mm/god	<b>1.2</b>
500 – 1000	<b>1.1</b>
1000 - 1500	<b>1</b>
1500 – 2000	<b>0.95</b>
2000 - 2500	<b>0.9</b>
>2000 mm/god	<b>0.85</b>

Podfaktor  $P_i$  određuje se iz vrijednosti prosječnih godišnjih oborina i ukupnog broja kišnih dana u slivnom području prema formuli:

$$P_i = \frac{P \text{ (mm/god)}}{\text{broj kišnih dana}} \quad (2)$$

Manje kišnih dana za istu ukupnu količinu padalina uzrokuje veće intenzitete padalina što rezultira povećanom prirodnom ranjivosti vodonosnika. U skladu s time, intenzivnije padaline pogoduju koncentriranoj infiltraciji vode u krško podzemlje te se ispire nesaturirana zona vodonosnika.

Više kišnih dana uzrokuje niži intenzitet padalina i ravnomjerniju raspodjelu ukupnih oborina tijekom godine. Time se smanjuje prirodna ranjivost vodonosnika zbog povećane difuzijske (sporije) infiltracije vode u krško podzemlje. Da bi se procijenio ukupni utjecaj  $P_i$  podfaktora koriste se 3 kategorije intenziteta oborina (tablica 4).

Tablica 4. Vrijednosti podfaktora  $P_i$  (Biondić et al., 2014)

Ukupni intezitet padalina	$P_i$
< 10 mm/god	<b>1.25</b>
10 - 30	<b>1</b>
> 30 mm/god	<b>0.75</b>

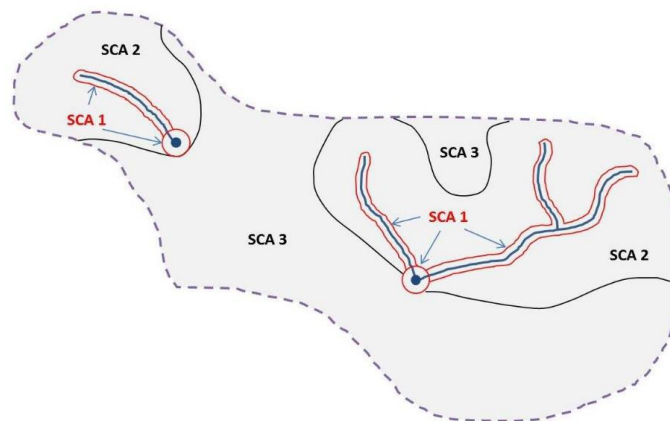
P faktor razvijen je na temelju smjernica projekta COST 620 s određenim pojednostavljenjima cijelog postupka i imajući na umu da oborine predstavljaju vanjski stres što u konačnici izmjenjuje ukupnu procjenu ranjivosti – u slučaju jake kiše koja može pozitivno utjecati na razrjeđenje onečišćenja. Vrijednosti ukupnog P parametra dobiju se množenjem  $P_e$  podfaktora s  $P_i$  podfaktorom:

$$P = P_e \cdot P_i \quad (3)$$

Moguće vrijednosti P faktora variraju od 0,6 do 1,5 bodova. Dobivene vrijednosti P faktora mogu se dalje klasificirati kako bi se stvorila zasebna P karta koja predstavlja prostornu raspodjelu utjecaja padalina na cjelokupnu ranjivost krških vodonosnika.

### **Površinska slivna područja (eng. *Surface Catchment Areas – SCA*)**

Površinska slivna područja dobivaju se analizom hidroloških fenomena na površini određenog krškog sliva. Analiza se temelji na razdvajanju glavnih slivnih područja koji gravitiraju ponorima, vrtačama i sličnim hidrogeološkim pojavama.



*Slika 11. Shema određivanja površinskih slivnih područja (Biondić et al., 2014)*

Nakon analize, krški slivovi mogu se podijeliti na tri glavna područja (SCA 1, SCA 2 i SCA 3). U daljnjim prostornim analizama, ovisnima o ovim područjima, procijenjeni su uvjeti difuzne ili koncentrirane infiltracije površinske vode u krško podzemlje i konačna karta prirodne ranjivosti naglašava područja visoke ranjivosti koja uključuju vrtače, podvodne zone i površinske vodne površine koje utječu na njih.

### **Utjecaj infiltracije (I parametar)**

Procjena stupnja infiltracije površinskih voda u dublje dijelove krškog vodonosnika ovisi o mnogim parametrima koji kontroliraju procese površinskog i podzemnog toka vode. Najbitniji su: nagib terena, svojstva pokrovnih naslaga, prisutnost vegetacije i prisutnost morfoloških pojava koje uzrokuju infiltraciju u podzemlje (vrtače, špilje, jame...). Uzevši u obzir činjenicu da su neki od tih parametara već korišteni u procjeni O parametra (svojstva pokrovnih naslaga i krški geomorfološki oblici), I faktor je razvijen na takav način da njegov utjecaj na ranjivost krškog vodonosnika ovisi o dva

različita, ali međusobno povezana faktora:  $I_{sv}$  podfaktor (nagib i vegetacija) i  $I_{gwd}$  faktor (dubina do podzemne vode) (Biondić et al., 2014).

$I_{sv}$  podfaktor definira uvjete na površini zemlje koji mogu utjecati na infiltraciju površinske vode u podzemlje. Preko ovog podfaktora kombinirani su utjecaji nagiba terena i pokrivenost područja vegetacijom koja utječe na infiltraciju vode u krško podzemlje. Parametar vegetacije služi za određivanje područja koja su prekrivena gustom ili rijetkom vegetacijom. Područja obuhvaćena gustom vegetacijom uključuju dijelove sliva koji su prekriveni šumama i grmljem, dok područja obuhvaćena rijetkom vegetacijom uključuju ostatak slivnog područja kao i ona područja na kojima nema vegetacijskog pokrova. Takve informacije o stanju i promjenama zemljišnog pokrova mogu se dobiti u CLC Hrvatska (*Corine Land Cover Hrvatska*) bazi podataka. Parametar nagiba (s) može se relativno lako dobiti pomoću metoda prostorne analize korištenjem digitalnog modela terena (eng. DEM). Nakon provedene analize, dobivene vrijednosti mogu se dalje svrstati u jednu od četiri predložene kategorije nagiba (tablica 5). Kategorije nagiba i klasifikacija vegetacije u samo dvije kategorije preuzeto je iz COP metode jer je to najprikladnija metoda za slivna područja u Dinarskom kršu.

Tablica 5. Kategorizacija parametara nagiba i vegetacija (Biondić et al., 2014)

Nagib (s)	Vegetacija (v)
< 8°	sve vrste vegetacije
8 - 31°	gusta ili rijetka vegetacija
31 - 76°	gusta ili rijetka vegetacija
> 76°	sve vrste vegetacije

S obzirom na činjenicu da je  $I_{sv}$  podfaktor izravno kontroliran hidrološkim uvjetima na površini sliva, prije svoje ukupne procjene za ranjivost slivova mora se uskladiti sa SCA područjima.

Prilikom procjene  $I_{sv}$  podfaktora u području SCA 2, pretpostavljaju se uvjeti koncentrirane infiltracije vode u krško podzemlje jer su na tim područjima dominantna površinska otjecanja koja su povezana s protokom i koncentriranjem površinske vode do vodotoka i njegovih ponora. U takvim uvjetima, kombinacija nagiba i vegetacije daje takvu  $I_{sv}$  vrijednost koja ukazuje na veliku ranjivost vodonosnika u slučajevima velikih nagiba i oskudne vegetacije. To u stvarnim uvjetima znači kraće vrijeme zadržavanja i brza infiltracija vode u krško podzemlje. Prilikom procjene  $I_{sv}$  podfaktora u SCA 3

području, pretpostavljaju se difuzni uvjeti infiltracije vode u krško podzemlje jer na tom području prevladava duže vrijeme zadržavanja vode na slivnoj površini. Stoga je procjena utjecaja nagiba i vegetacije određena u obrnutom smjeru nego u prethodnom slučaju. Vrijednosti  $I_{sv}$  podfaktora su takve da pokazuju veću ranjivost u slučajevima malih nagiba i oskudne vegetacije (tablica 6).

Tablica 6. Vrijednosti  $I_{sv}$  podfaktora u ovisnosti o površinskom slivnom području  
(Biondić et al., 2014)

Nagib i vegetacija	Isv u slučaju SCA 2 područja		Isv u slučaju SCA 3 područja	
< 8°	1		0	
8 - 31°, gusta /rijetka veget.	0.8	0.6	0.2	0.4
31 - 76°, gusta/rijetka veget.	0.4	0.2	0.6	0.8
>76°	0		1	

$I_{gwd}$  podfaktor (dubina do podzemne vode) definira utjecaj (važnost) infiltrirane površinske vode na sveukupnu prirodnu ranjivost određenog krškog slivnog područja gdje se vrijednosti podfaktora  $I_{gwd}$  ne odnose samo na nesaturiranu zonu vodonosnika, već na cijeli vodonosnik. Iako je taj faktor teško odrediti, on nije zanemariv (tablica 7). Dublja razina vodnog lica znači da će utjecaj infiltrirane površinske vode biti manji zbog dužeg vremena zadržavanja onečišćenja ili produljenog vremena transporta potencijalnog onečišćivača prema zasićenom dijelu krškog vodonosnika. Za najbolju procjenu vrijednosti  $I_{gwd}$  podfaktora potrebno je imati dobru mrežu piezometarskih bušotina na cijelom slivnom području. S takvim podacima i dobrom prostornom analizom moguće je odrediti položaj vodnog lica u krškom vodonosniku i napraviti kartu dubine podzemnih voda. Zbog nedostataka takvih podataka u krškim područjima, vrlo je teško napraviti točne karte dubina podzemnih voda. U tom slučaju,  $I_{gwd}$  podfaktor moguće je procijeniti na temelju dobrog poznavanja hidrogeoloških odnosa u krškom slivu, korištenjem znanja o apsolutnoj razini podzemne vode u vodonosniku. Za dobivanje konačne karte dubine podzemnih voda, iz digitalnog modela terena oduzimaju se karte apsolutne razine podzemne vode.

Tablica 7. Vrijednosti podfaktora  $I_{gwd}$  (Biondić et al., 2014)

Dubina do podzemne vode	$I_{gwd}$
< 10 m	<b>0.1</b>
10 - 50	<b>0.2</b>
50 - 100	<b>0.4</b>
100 – 200	<b>0.6</b>
200 – 400	<b>0.8</b>
>400 m ili bez vodonosnika	<b>1</b>

U opisu KAVA metode istaknuto je da neke od postojećih metoda procjene prirodne ranjivosti vodonosnika često dijele zasićenu i nezasićenu zonu vodonosnika što je općenito razumno u slučaju intergranularnih vodonosnika, ali ne u slučaju krških vodonosnika. U KAVA metodi nisu određene točne dubine podzemne vode, već raspon vrijednosti što za istraživače znači jednostavnije empirijsko vrednovanje tog parametra. To je u biti modificirani i pojednostavljeni pristup koji se koristi u SINTACS metodi koji također ne uzima točne vrijednosti, već raspon vrijednosti dubina podzemnih voda. Konačna vrijednost i faktora dobije se zbrajanjem  $I_{sv}$  i  $I_{gdw}$  podfaktora (koji su specifično definirani za SCA 2 i SCA 3 dijelove slivnog područja) jer u konačnici svaki od ova dva podfaktora nadopunjuju jedan drugog:

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

Moguće vrijednosti su u rasponu od 0,1 do 2 boda što znači da ovaj čimbenik utječe na ukupnu prirodnu ranjivost vodonosnika na način da ju uvijek smanjuje samo je pitanje u kojoj mjeri. Dobivene vrijednosti  $I$  parametra mogu se dalje klasificirati kako bi se dobila zasebna  $I$  karta koja predstavlja prostorni prikaz utjecaja infiltracije na ukupnu ranjivost određenog slivnog područja.

### Uvjeti krškog vodonosnika (A parametar)

Uvjeti samog krškog vodonosnika važni su za procjenu prirodne ranjivosti vodonosnika, a definira ih A parametar čiji se ukupni utjecaj procjenjuje kroz dva sloja podataka: s  $A_{hg}$  podfaktorom (hidrogeološki opis) procjenjuju se statički, a s  $A_{tt}$  podfaktorom (testovi trasiranja) dinamički uvjeti u krškim vodonosnicima. Kod određivanja  $A_{hg}$  podfaktora, vrijednosti statičkih uvjeta u krškom vodonosniku procjenjuju se na temelju raspoloživih geoloških, litoloških i hidrogeoloških podataka, dok su osnovni kriteriji litološki sastav stijena i stupanj okršenosti slivnog područja. Ostale informacije koje



moгу pomoći u procjeni ovog podfaktora mogu biti geomorfološke analize, rezultati speleoloških istraživanja, rezultati ispitivanja bušotina, hidrološke analize, hidrokemijske analize, geofizička ispitivanja kao i sve druge informacije koje mogu pomoći u procjeni svojstava stijena u krškim vodonosnicima. Bodovanje  $A_{hg}$  podfaktora prilagođeno je cjelokupnoj metodologiji i predstavlja relativnu nemjerljivu vrijednost (tablica 8). Te vrijednosti ukazuju samo na činjenicu da je jedna hidrogeološka formacija više ili manje prirodno ranjivija od druge.

Tablica 8. Vrijednosti podfaktora  $A_{hg}$  (Biondić et al., 2014)

Opis hidrogeoloških formacija i stupnja okršenosti slivnog područja	$A_{hg}$
Bez vodonosnika	<b>1</b>
Slabo vodopropusne međuzrske naslage	<b>0.7</b>
Srednje vodopropusne međuzrske naslage	<b>0.4</b>
Slabo vodopropusne okršene stijene	<b>0.5</b>
Umjereno vodopropusne okršene stijene	<b>0.3</b>
Dobro vodopropusne okršene stijene	<b>0.2</b>

Prilikom određivanja vrijednosti  $A_{tt}$  podfaktora, dinamički uvjeti u krškom vodonosniku procijenjeni su na osnovi rezultata stvarno provedenih trasiranja u promatranom području. Testovi trasiranja moraju se provoditi tijekom kišnih razdoblja kada su brzine protoka podzemnih voda najveće. Podaci se mogu dobiti analizom diskretnih očitanih vremenskih vrijednosti. Te se vrijednosti mogu dobiti za svako trasiranje, obradom i analizom svih relevantnih trasiranja – brzina podzemnih voda i udaljenost od ubacivanja trasera do mjesta pojave trasera (Biondić et al., 2014).

Koristeći GIS prostornu analizu i prikladne metode interpolacije moguće je dobiti od diskretnih očitanih vremenskih vrijednosti kontinuiranu prostornu raspodjelu vrijednosti trasiranja za određeno krško područje (tablica 9).

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.

Tablica 9. Vrijednosti podfaktora  $A_{tt}$  (Biondić et al., 2014)

Testovi trasiranja	$A_{tt}$
0 dana	0
▲ ▼	▲ ▼
25 dana	2

Pri procjeni vrijednosti podfaktora  $A_{hg}$  i podfaktora  $A_{tt}$  treba uzeti u obzir pretpostavku da su u relevantnom vremenu te vrijednosti fiksirane, tj. njihova potencijalna varijabilnost ne može značajno utjecati na ukupnu prirodnu ranjivost krških vodonosnika (Biondić et al., 2014). To je važno napomenuti jer krški sustavi mogu biti vrlo dinamički hidrogeološki sustavi kao što je slučaj krškog područja Dinarida u Hrvatskoj. U takvim uvjetima, neki dijelovi krških vodonosnika mogu promijeniti hidrogeološku funkciju u vremenu (npr. povremeni ili trajni krški izvori) i prostoru (fluktuacije vodnog lica).

Zbog pojednostavljenja modela te se promijene prema KAVA metodologiji uzimaju u obzir samo kada postoje opravdani razlozi ili nova saznanja za to (npr. nove hidrogeološke studije, novi testovi trasiranja i sl.). U takvim slučajevima, oba podfaktora moraju se ponovno procijeniti te se ponovno mora procijeniti njihov utjecaj na ukupnu ranjivost krškog sustava.

Vrijednost faktora  $A$  dobije se zbrajanjem podfaktora  $A_{hg}$  i  $A_{tt}$  jer se učinci ovih dvaju podfaktora međusobno nadopunjuju:

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

Moguće vrijednosti kreću se u rasponu od 0 do 2. Dobivene vrijednosti  $A$  parametra mogu se dalje klasificirati kako bi se stvorila zasebna  $A$  karta koja predstavlja prostorni prikaz stanja u krškom vodonosniku i njihov utjecaj na ukupnu ranjivost određenog slivnog područja.

## Indikatori ranjivosti

Ukupni rezultati analize prikazani su s dva indeksa ranjivosti. SV (*Source Vulnerability*) indeks odnosi se na procjenu prirodne ranjivosti krških izvora, a RV (*Resource Vulnerability*) indeks odnosi se na procjenu prirodne ranjivosti krških vodonosnika. U izračunu oba indeksa kritični parametar je A faktor.

Kada se procjenjuje ranjivost krških izvora tada se koriste vrijednosti ukupnog faktora A vezane uz opažачke izvore, budući da u tom slučaju faktor uzima u obzir statičke i dinamičke uvjete u krškom sustavu. Razdvajanjem faktora A na dva glavna podfaktora ( $A_{hg}$  i  $A_{tt}$ ) i uzimajući u obzir samo faktor  $A_{hg}$  dobiva se procjena ranjivosti krških vodonosnika jer u ovom slučaju A faktor uzima u obzir samo statičke uvjete u krškom vodonosniku.

$$SVI = (O + I + A) \cdot P \quad (5)$$

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

Izračun oba indeksa radi se na takav način da se bodovi dobiveni izračunom svakog faktora (O, A i I) zbroje zajedno i pomnože s P faktorom koji predstavlja vanjski stres u KAVA metodi. Nakon toga treba napraviti dodatnu podjelu najranjivijih dijelova u slivnom području (ponori, vrtače...) na način da SCA 1 dijelovi slivnog područja automatski imaju vrijednost 0,1. Na kraju indeks ranjivosti izvora (SV) ima vrijednost između 2 i 9, a indeks ranjivosti vodonosnika (RV) između 1 i 4,5. Za konačnu kartu ranjivosti dobivene vrijednosti tih dvaju indeksa razvrstane su u 6 kategorija.

## 4. Primjena KAVA metode na slivu Plitvičkih jezera

### 4.1. Upotreba GIS-a u primjeni KAVA metode

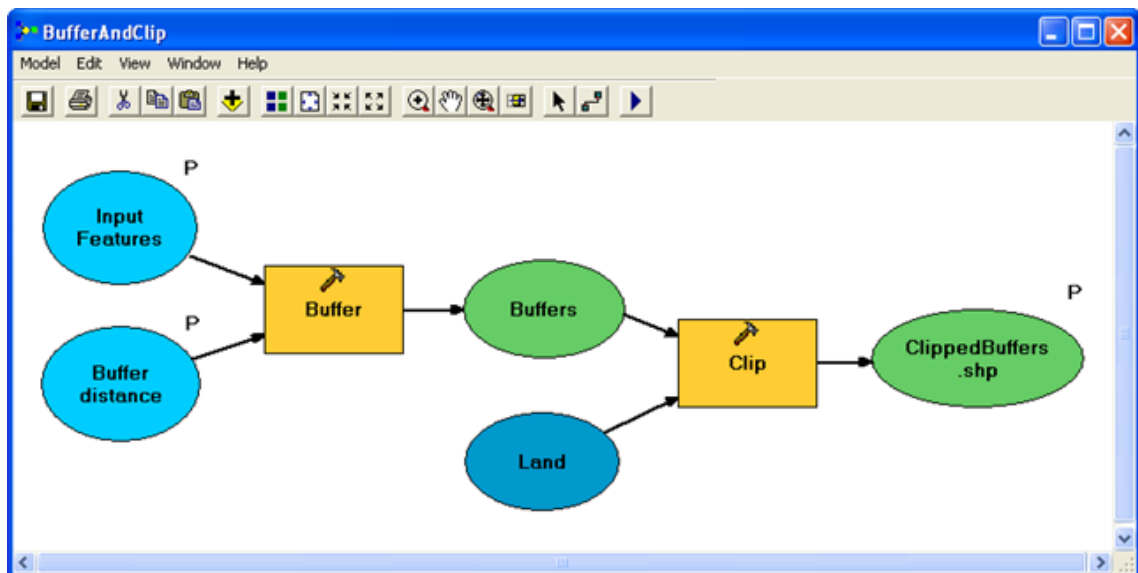
Geografski informacijski sustav (GIS) je prema jednoj od definicija sustav hardvera, softvera i procedura koje omogućuju upravljanje, obradu, analize, modeliranje, predstavljanje i prikaz georeferenciranih podataka sa svrhom rješavanja kompleksnih problema planiranja i gospodarenja prostorom (Biondić R., 2010). GIS je postao jedan od najvažnijih alata za razumijevanje i donošenje odluka s problemima vezanim uz upravljanje vodama i sličnih resursa u svijetu koji se sastoji od tri segmenta: računalne znanosti, geografije i područja primjene u kojem želimo koristiti GIS. Primjena GIS-a obuhvaća područja različitih struka, od urbanističkog planiranja, istraživanja i zaštite okoliša, građevinarstvo, upravljanje poljoprivredom, upravljanje šumskim i vodnim resursima i drugo.

Jedna od najraširenijih primjena GIS-a je izrada kartografskih prikaza gdje GIS bazu podataka čini niz slojeva karata koje su georeferencirane i smještene u prostoru. Takvi podaci organiziraju se u tematske karte koje sadrže informacije o određenim pojavama (npr. pedološka ili hidrogeološka podloga). Zasebna tematska karta naziva se slojem (podlogom) gdje se podaci na različitim podlogama mogu kasnije međusobno preklapati.

GIS također ima široku primjenu kod upravljanja podzemnim vodama gdje služi kao alat za prikaz zaštitnih zona ili se koristi kao alat za modeliranje ranjivosti. Svi podaci za potrebe izrade jedne karte ranjivosti spremaju se u okviru GIS sustava i integriraju u okviru formiranog GIS modela. Podaci su sadržani u osnovnim slojevima modela (geološki i hidrogeološki podaci, vegetacija i pedologija) u koje su dodani hidrometeorološki podaci, satelitske snimke i drugo. Analizom i preklapanjem različitih podloga dobiju se karte ranjivosti određenog područja.

Korištenjem GIS-a u KAVA metodi provele su se različite prostorne analize koji programski paket pruža te je korišten *ModelBuilder* za izračunavanje svih potrebnih parametara za dobivanje karte ranjivosti sliva Plitvičkih jezera. *ModelBuilder* je program koji se koristi za stvaranje, uređivanje i upravljanje modelima (alatima) koji

izvršavaju niz naredbi na temelju rezultata prethodnih koraka. Podaci u *ModelBuilderu* prikazani su u obliku dijagrama (hodograma) gdje su ulazni podaci i alati povezani stvarajući tako novi izlazni (dobiveni) podatak. Često, dobiveni podaci iz jednog procesa postaju ulazni podaci za drugi proces. Nakon što su svi parametri u *ModelBuilderu* definirani, proces je spreman za pokretanje i bojama označava pojedine dijelove toka dijagrama. Žutom bojom prikazani su alati, plavom bojom ulazni podaci, a nakon uspješno izvršenog procesa, novi dobiveni rezultat je osjenčan i označen zelenom bojom. Na ovaj način *ModelBuilder* pruža brzu i učinkovitu obradu podataka kao i spremanje i uređivanje modela koji kasnije može poslužiti za prikaz dobivanja određenog rezultata.



Slika 12. Primjer upotrebe ModelBuildera (izvor: <http://pro.arcgis.com>)

#### 4.2. Podaci korišteni za primjenu KAVA metode na slivu Plitvičkih jezera

Za primjenu KAVA metode na slivu Plitvičkih jezera korišteni su različiti hidrogeološki podaci kojima su nakon pripreme i obrade dobivene karte prirodne ranjivosti sliva Plitvičkih jezera. U nastavku će biti opisani neki od osnovnih podataka koji su korišteni u KAVA metodi.

- Pedološke informacije dobivene su iz Hidropedološke karte Hrvatske mjerilu 1:300 000 i odnose se na opis teksture i dubine pojedinih naslaga, procjenjivanje slobodne

vode u tlu, hidropedološka svojstva tla i raspodjelu pojedinih pedoloških jedinica (Vidaček et al., 2004)

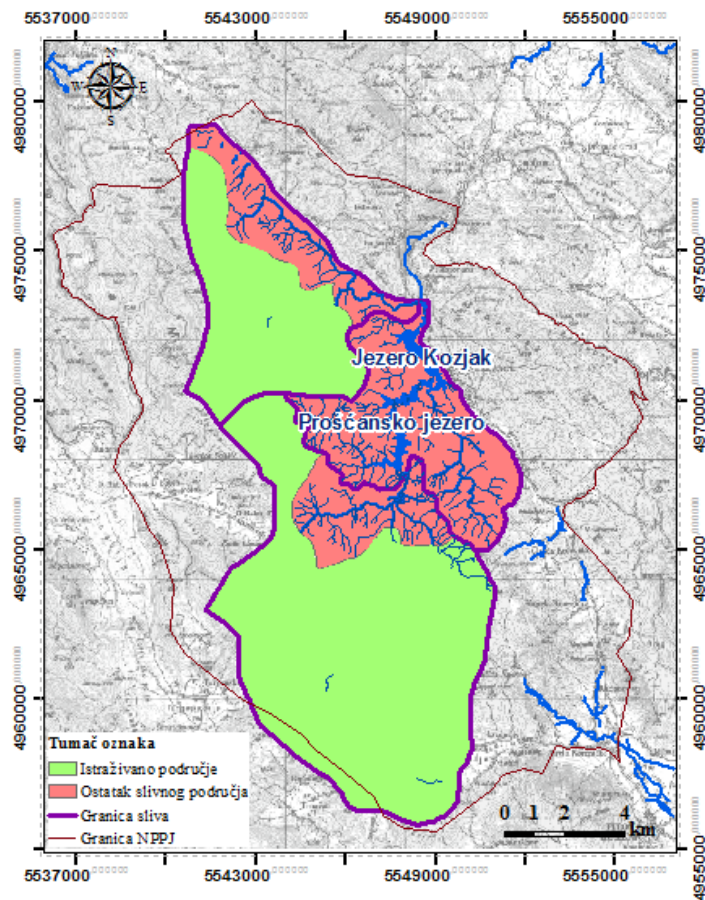
- Litološki i geološki podaci dobiveni su iz listova Osnovne geološke karte Hrvatske u mjerilu 1:100 000 i odnose se na opis litoloških jedinica, stanje razlomljene stijenske mase i debljinu pojedinih litoloških članova (Šikić et al., 1972)
- Hidrogeološki podaci dobiveni iz hidrogeološke karte odnose se na opis hidrogeoloških jedinica, stanje okršenosti i propusnosti stijenske mase, rezultate testova trasiranja, zabilježene pojave izvora, špilja, vrtača... (Meaški, 2011)
- Hidrometeorološki podaci dobiveni su iz klimatskog atlasa Hrvatske (Zaninović et al., 2008) te su korišteni podaci za tipične vremenske nizove promatranja.
- Iz digitalnog modela terena (eng. *Digital Elevation Model* – DEM) dobiveni su podaci o nagibu terena, neizravno podaci o apsolutnoj dubini podzemne vode i debljini nezasićene zone vodonosnika.
- Podaci o korištenju zemljišta dobiveni su iz CLC baze prostornih podataka koji se odnose na procjenu utjecaja vegetacije na prirodnu ranjivost krških vodonosnika i procjenu razine infiltracije površinskih voda u krško podzemlje (CLC 2000, Hrvatska)
- Topografske karte dobivene su iz različitih topografskih karti i odnose se na osnovne slojeve podataka za prostorno prikazivanje analiziranih podataka i provjeru vrijednosti vezanih uz DEM

### **4.3. Određivanje glavnih parametara u KAVA metodi**

Primjenom KAVA metode na slivu Plitvičkih jezera dobivene su karte ranjivosti izvorišta i vodonosnika u skladu s 4 osnovna parametra koji su se u metodologiji koristili. Bitno je napomenuti da se karta ranjivosti vodonosnika odnosi samo na dio sliva u kojemu su razvijeni krški vodonosnici (zelena boja na slici 13) i gdje su podaci prikupljeni na temelju prijašnjih istraživanja, a ne i na dio u kojem je razvijena hidrografska mreža i gdje se odvija pretežito površinsko tečenje vode (crvena boja na slici 13) za čije određivanje služe druge metode procjene ranjivosti površinskih voda.

Točnije, KAVA metoda odnosi se na podsliv Plitvice, izuzev dijela hidrogeološke cjeline Sartuka te na najveći dio podsliva Matice koji obuhvaća hidrogeološku cjelinu

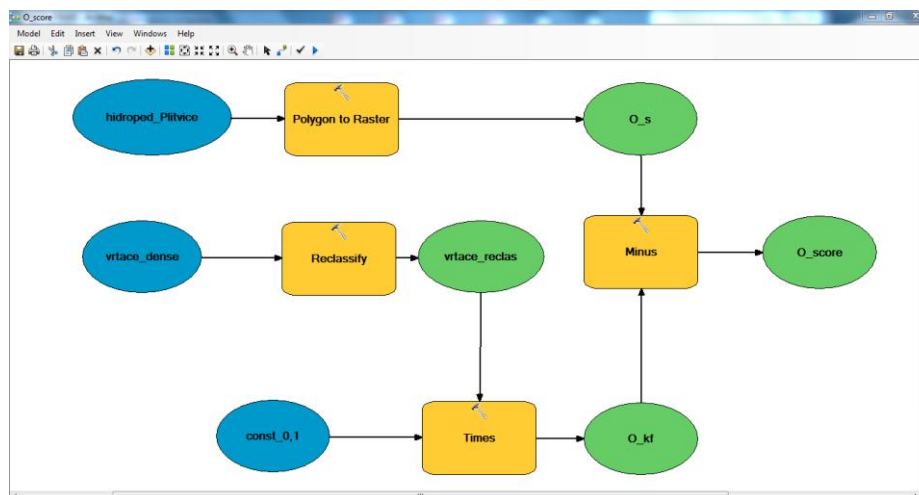
Crne rijeke i dio hidrogeološke cjeline Bijele rijeke i Ljeskovca. Podsliv Jezera i jezerski sustav ovo istraživanje nije obuhvatilo (slika 13).



Slika 13. Područje primjene KAVA metode

#### 4.3.1. Pokrovne naslage – O karta

Parametar O je u skladu s KAVA metodom određen na osnovi podfaktora koji se odnose na tlo ( $O_s$ ) i na značajke krša ( $O_{kf}$ ) prema formuli (1) koristeći program *ModelBuilder* (slika 14).



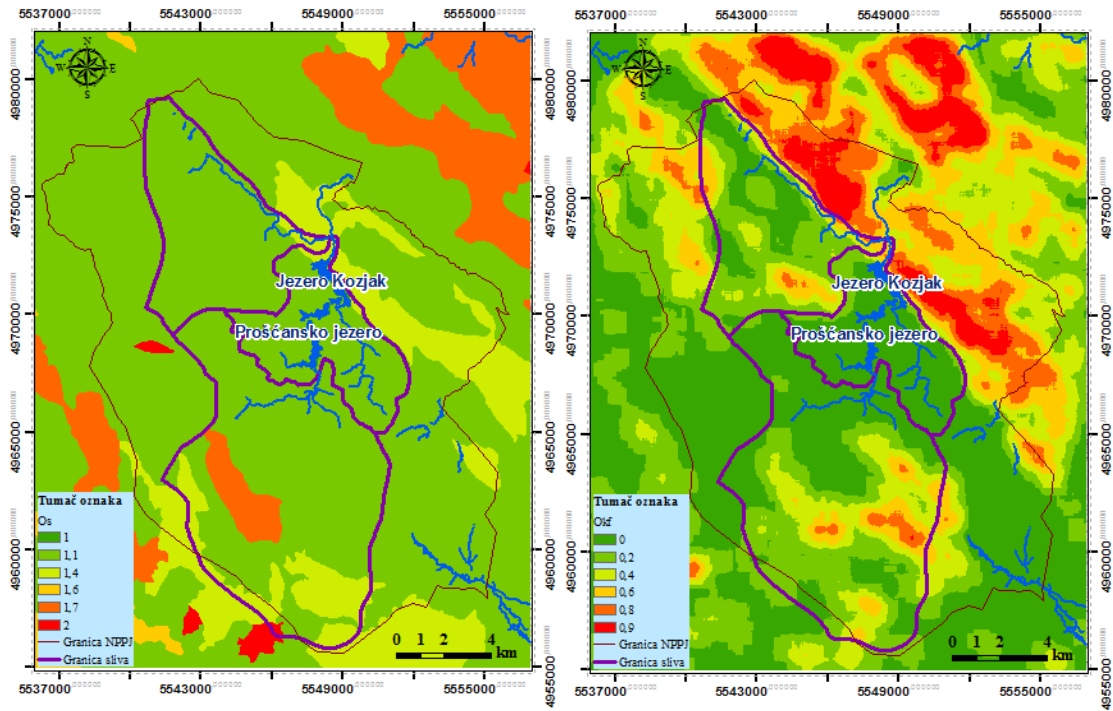
Slika 14. Računanje O faktora pomoću ModelBuildera

Podfaktor  $O_s$  definiran je s dva kriterija: debljinom pokrovnih naslaga koje su razvrstane u 4 kategorije i debljinom tla (tablica 1). Podaci koji su poslužili za opis vrste tla i njegove debljine preuzeti su iz Hidropedološke karte u mjerilu 1:300 000. Temeljem ovih kriterija dobivene su poligonske vrijednosti gdje se nakon reklasifikacije ulaznih podataka dobio  $O_s$  raster razvrstan u 6 kategorija s bodovnim vrijednostima. Zelena boja prikazuje područja gdje je tlo slabo razvijeno, a crvena prikazuje područja s dobro razvijenim tlom ( $> 2$  m).

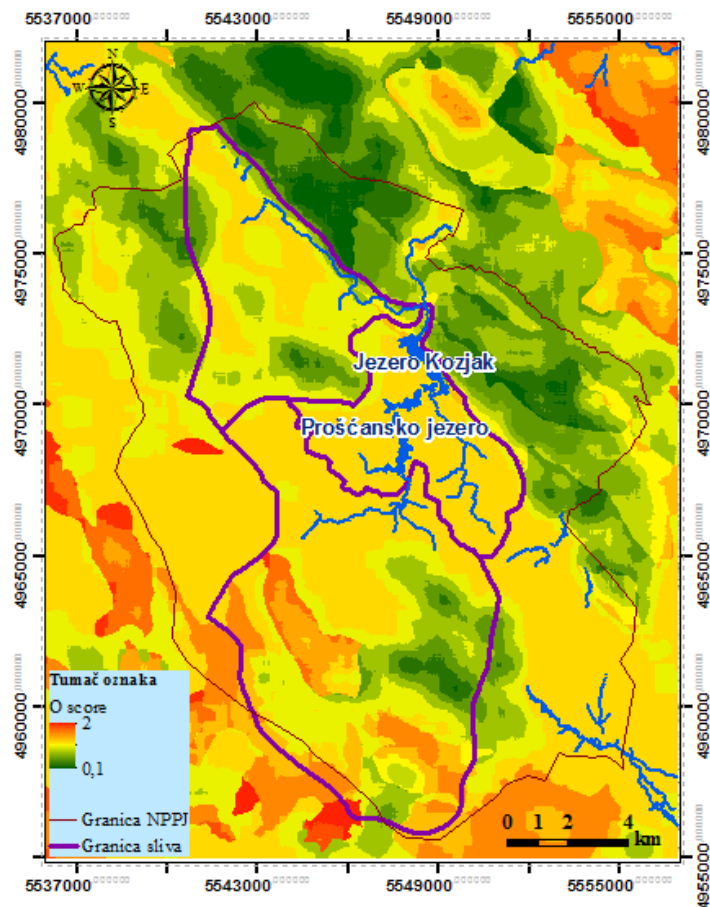
Podfaktor  $O_{kf}$  odnosi se na utjecaj epikrške zone na prirodnu ranjivost vodonosnika koji je procijenjen na temelju prostorne analize gustoće vrtača. Podaci o gustoći vrtača digitalizirali su se s topografske karte u mjerilu 1:25 000 za cijelo područje Plitvičkih jezera. Koristeći programski paket ArcGIS dobio se raster koji se temelji na gustoći vrtača po  $1 \text{ km}^2$ , razvrstan u 6 kategorija gdje svaka kategorija ima svoju bodovnu vrijednost. Zelena boja na karti prikazuje područja s malim brojem vrtača, a crvena s preko 100 vrtača na  $1 \text{ km}^2$  (slika 15).

Konačna karta pokrovnih naslaga dobila se oduzimanjem  $O_s$  rastera od  $O_{kf}$  rastera. Nakon reklasifikacije O faktora u pet kategorija dobio se prostorni prikaz vrijednosti pokrovnih naslaga na području Plitvičkih jezera (slika 16).





Slika 15. Karta podfaktora  $O_s$  i  $O_{kf}$

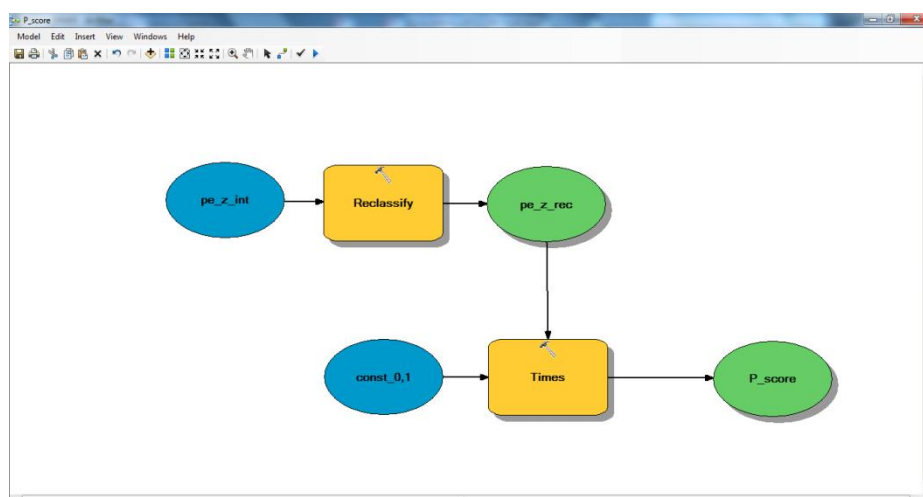


Slika 16. Karta pokrovnih naslaga (O karta)

Moguće vrijednosti parametra O variraju od 0,1 do 2 boda. Vrlo male vrijednosti (0,1 – 0,5) odgovaraju područjima gdje je tlo vrlo slabo razvijeno ili ne postoji i gdje je prisutno mnogo vrtača. Male do umjerene vrijednosti (0,5 – 1) odgovaraju područjima gdje je tlo razvijeno do dubine 1 m i gdje je prisutno mnogo vrtača kao i područja gdje je tlo malo pliće i gdje je prisutno mnogo vrtača po 1 km<sup>2</sup>. Umjerene do visoke vrijednosti (1 – 1,5) odgovaraju područjima gdje je tlo debljine 1 – 2 metra i gdje je prisutno malo vrtača kao i područja s vrlo duboko razvijenim tlom (> 2 m) bez pojave vrtača. Iz priložene O karte vidi se da područje sliva Plitvičkih jezera prekriva slabo razvijeno tlo s malim i umjerenim vrijednostima što je u skladu s hidrogeologijom područja.

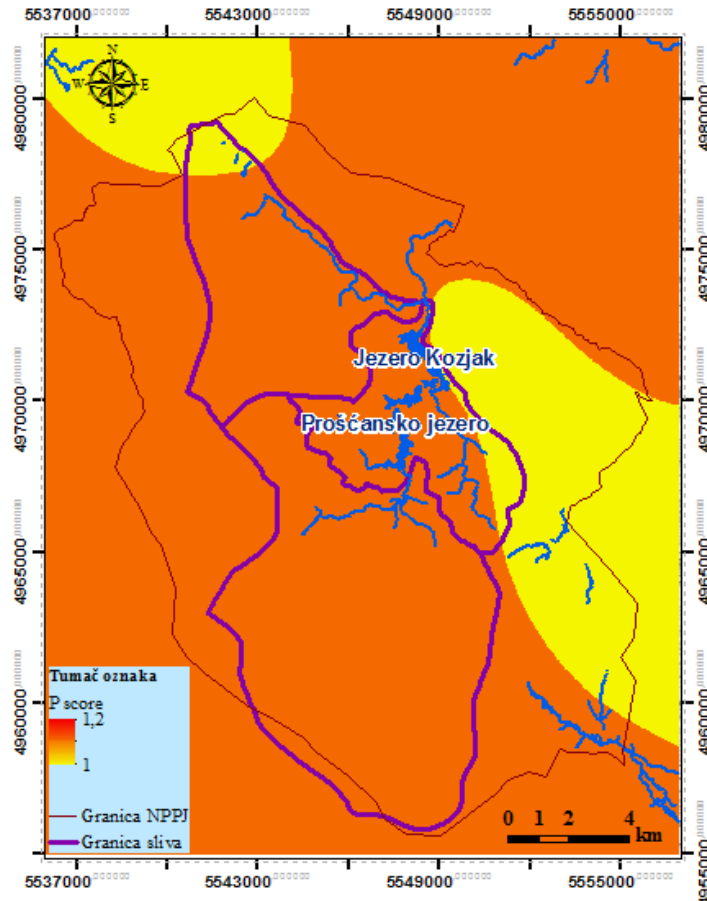
#### 4.3.2. Utjecaj oborina – P karta

U procjeni P parametra, u ovom slučaju korištena je efektivna količina padalina ( $P_e$ ) za koju postoji mogućnost infiltracije s površine terena u dublje dijelove vodonosnika. Vrijednosti podfaktora  $P_e$  za područje Plitvičkih jezera određene su iz hidrometeoroloških karata za razdoblje od 1997. do 2007. godine (DHMZ, 2009). Korištenjem programskog paketa ArcGIS i programa *ModelBuilder*, nakon reklasifikacije efektivnih padalina i množenja s konstantnim rasterom vrijednosti 0,1 dobio se konačni P raster (slika 17).



Slika 17. Računanje P faktora pomoću ModelBuildera

Takav P raster nakon interne reklasifikacije predstavlja prostornu raspodjelu utjecaja padalina na ranjivost sliva Plitvičkih jezera gdje su dobivene vrijednosti u rasponu od 500 – 1500 mm/godišnje (slika 18).

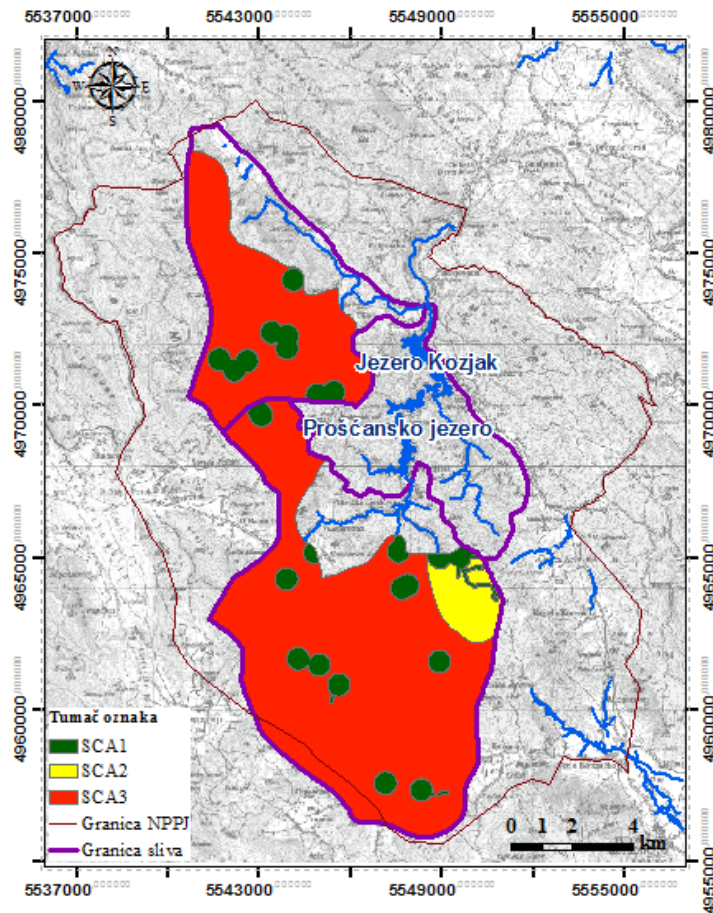


Slika 18. Karta utjecaja padalina (P karta)

#### 4.3.3. Površinska slivna područja – SCA karta

Prostornom analizom hidroloških i hidrogeoloških podataka, dio sliva Plitvičkih jezera na kojem se primjenjuje KAVA metoda podijeljen je u tri manja slivna područja prateći upute SCA parametra. Za takvu analizu poslužili su podaci iz Hidrogeološke karte u mjerilu 1:300 000, Topografske karte u mjerilu 1:25 000 i podaci iz prijašnjih hidrogeoloških istraživanja. Točkasti i linijski podaci pretvoreni su u zonalne poligone korištenjem alata za prostornu analizu u programskom paketu ArcGIS. Podaci su zatim

digitalizirani da bi se u konačnosti dobila SCA karta koja naglašava područja visoke ranjivosti u dijelu sliva Plitvičkih jezera (slika 19).

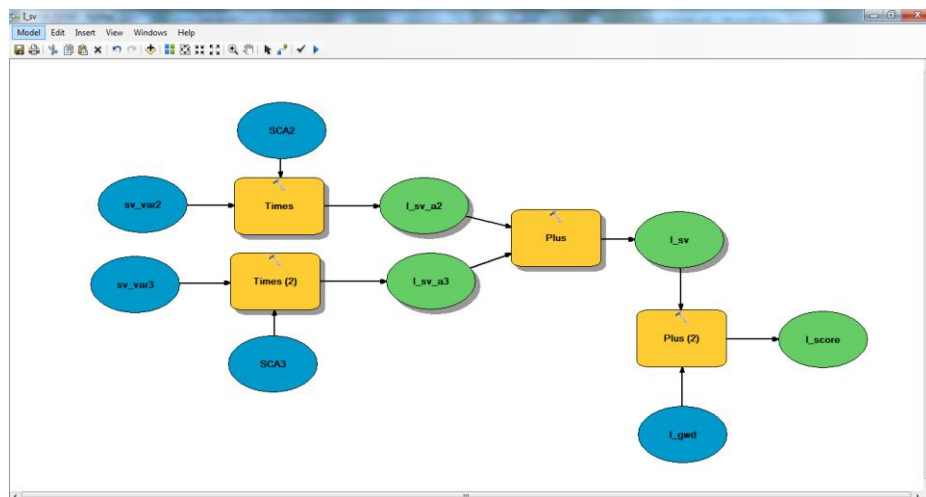


Slika 19. Karta površinskih slivnih područja (SCA karta)

Površinska slivna područja dobila su se analizom hidroloških fenomena gdje se analiza temelji na razdvajanju glavnih slivnih područja koji gravitiraju ponorima, vrtačama i sličnim hidrogeološkim pojavama. Tako je SCA 1 područje dobiveno iz prostorne analize pomoću alata *Buffer* gdje su se izdvojila područja koja gravitiraju ponornim zonama na udaljenosti od 50 m. SCA 2 područje u ovom slučaju prikazuje izravni sliv vodotoka koji se nalazi blizu izvora Crne rijeke. SCA 3 područje prikazuje ostatak slivnog područja koji nije izravno povezan s ponornim zonama.

#### 4.3.4. Utjecaj infiltracije (I karta)

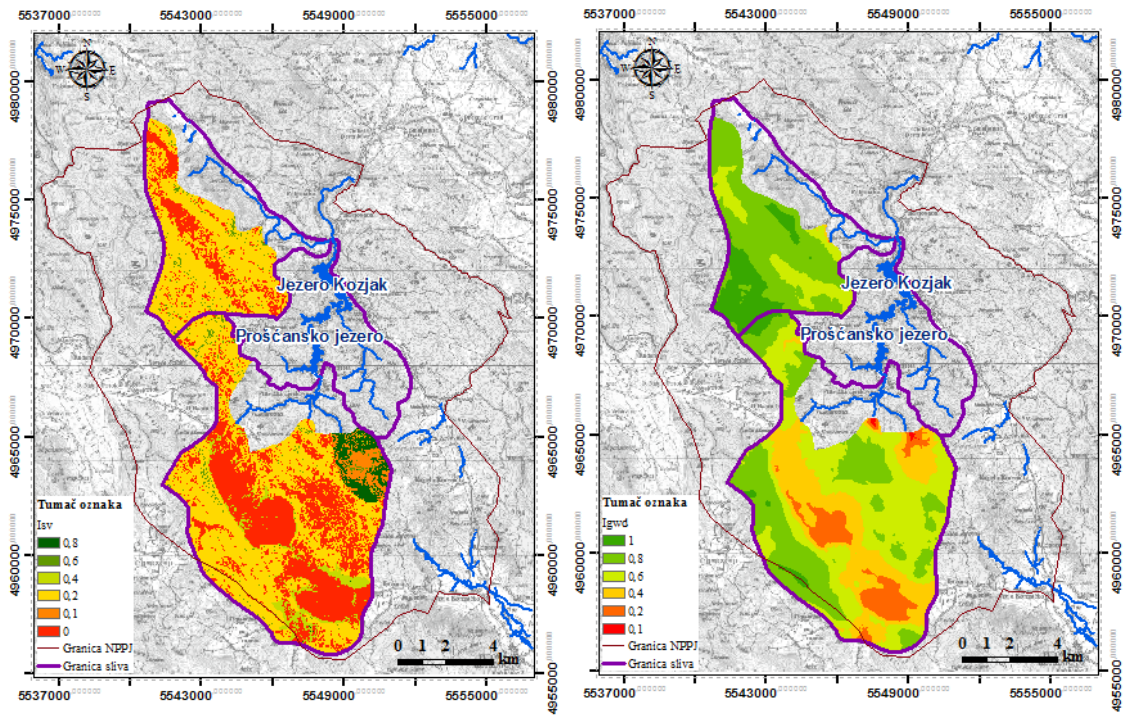
Vrijednosti utjecaja infiltracije površinskih voda u dublje dijelove vodonosnika dobivene su temeljem vrijednosti  $I_{sv}$  i  $I_{gwd}$  podfaktora. Cijeli izračun I faktora napravio se u *ModelBuilderu* (slika 20).



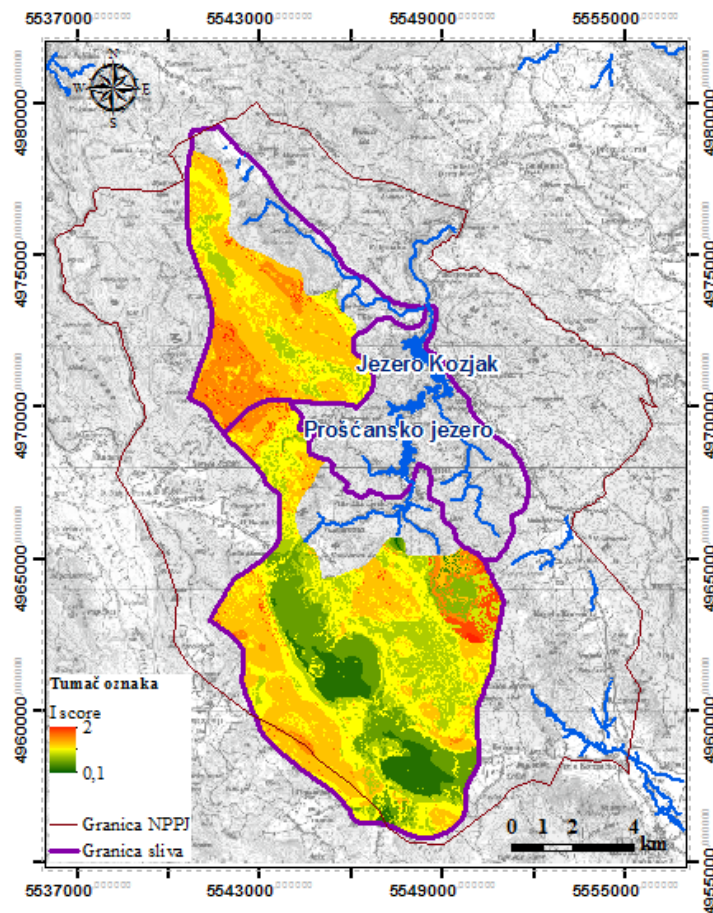
Slika 20. Računanje A faktora pomoću ModelBuildera

Karta nagiba terena dobivena je pomoću metoda prostorne analize iz digitalnog modela terena (DEM) koristeći konture terena digitaliziranih iz topografske karte u mjerilu 1:25 000. Da bi se utvrdio utjecaj vegetacije na prirodnu ranjivost krških vodonosnika korišteni su podaci o upotrebi zemljišta iz CLC digitalne baze podataka. Vrijednosti nagiba i utjecaja vegetacije usklađeni su sa SCA parametrom (tablica 6) gdje se nakon reklasifikacije dobio  $I_{sv}$  raster koji prikazuje prostornu raspodjelu nagiba i vegetacije na istraživanom području (slika 21).

$I_{gwd}$  podfaktor procijenjen je na temelju poznavanja hidrogeoloških odnosa u krškom slivu Plitvičkih jezera i korištenjem znanja o apsolutnoj razini podzemne vode u vodonosniku. Za dobivanje karte dubine podzemnih voda potrebno je bilo iz digitalnog modela terena oduzeti karte apsolutne razine podzemne vode da bi se dobio  $I_{gwd}$  raster koji nakon reklasifikacije predstavlja prostornu raspodjelu dubina do podzemnih voda na slivu Plitvičkih jezera (slika 21).



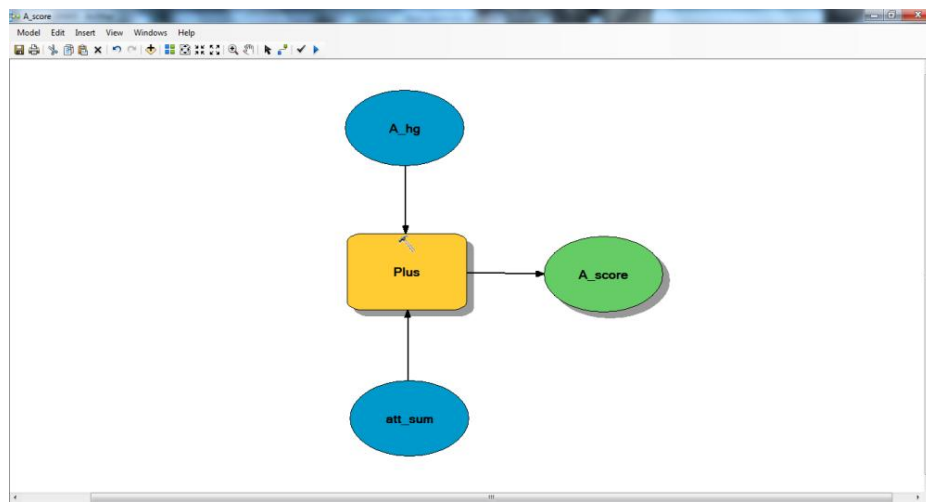
Slika 21.  $I_{sv}$  karta (lijevo) i  $I_{gwa}$  karta (desno)



Slika 22. Karta utjecaja infiltracije (I karta)

#### 4.3.5. Uvjeti vodonosnika (A karta)

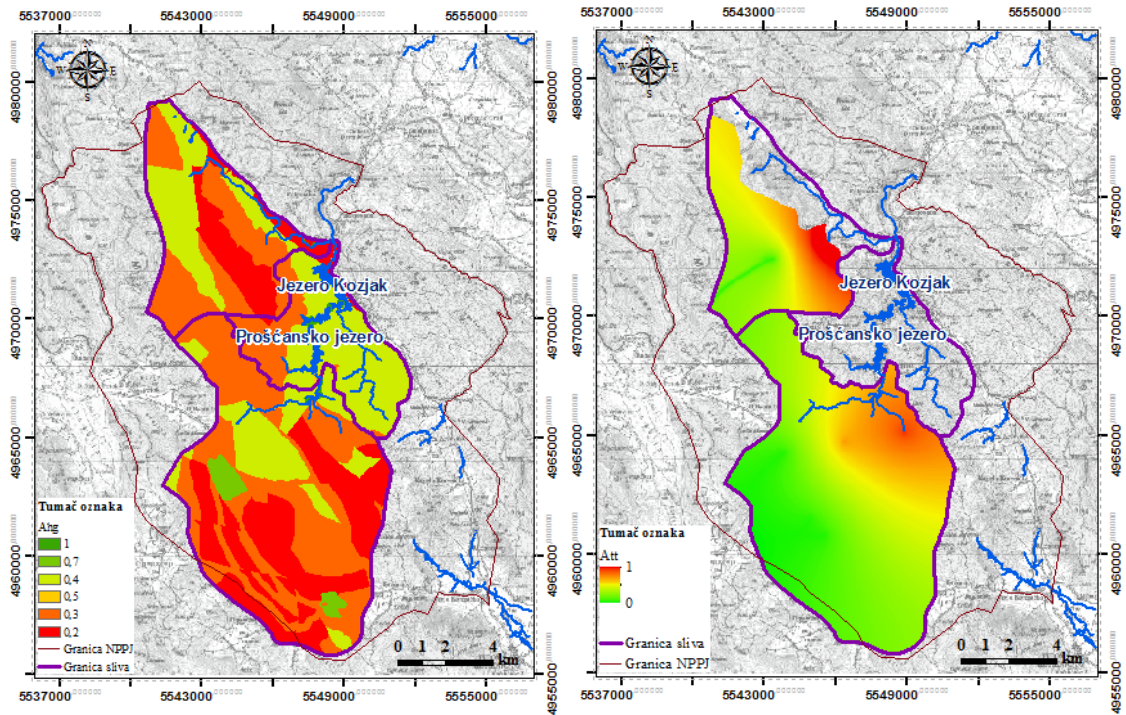
Vrijednosti parametra  $A$  dobivene su na osnovi podfaktora  $A_{hg}$  koji služi za hidrogeološki opis područja (statički uvjeti) i podfaktora  $A_{tt}$  koji ovisi o analizi rezultata trasiranja podzemnih tokova vode u krškom vodonosniku (dinamički uvjeti). Prije konačnog izračuna koji je napravljen u *ModelBuilderu* (slika 23) potrebno je bilo napraviti dodatne korake za izračun oba podfaktora.



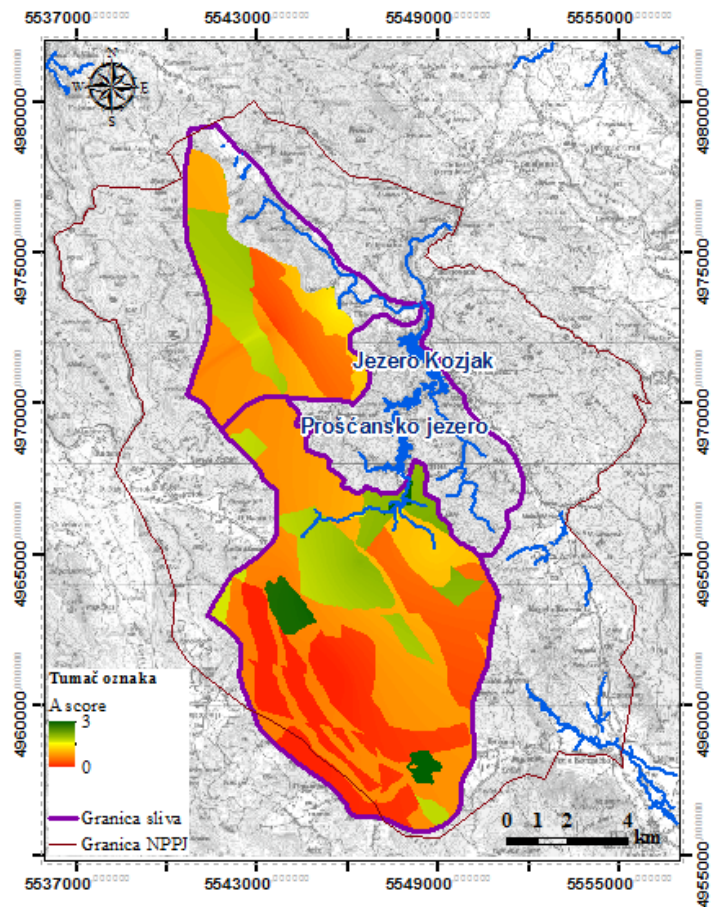
Slika 23. Računanje konačnog  $I$  faktora pomoću ModelBuildera

Za hidrogeološki opis sliva Plitvičkih jezera korišteni su podaci o litološkim jedinicama iz prijašnjih hidrogeoloških istraživanja. Nakon digitalizacije i klasifikacije (tablica 8) dobiven je  $A_{hg}$  raster koji ukazuje na činjenicu da je jedna hidrogeološka formacije više ili manje prirodna ranjivija od druge.

Vrijednosti testova trasiranja procijenjeni su na osnovu rezultata stvarnih trasiranja u istraživanom području. Obradom i analizom svih relevantnih trasiranja dobivene su diskretne vremenske vrijednosti za svako pojedino trasiranje (brzina podzemnih voda i udaljenost od ubacivanja trasera do mjesta pojave trasera). Koristeći GIS prostornu analizu i prikladne metode interpolacije, od diskretnih očitanih vremenskih vrijednosti dobivena je kontinuirana prostorna raspodjela vrijednosti trasiranja za određeno krško područje. Manja vrijednost podfaktora  $A_{tt}$  ukazuje na 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 (slika 24).



Slika 24.  $A_{hg}$  karta (lijevo) i  $A_t$  karta (desno)



Slika 25. Karta uvjeta vodonosnika ( $A$  karta)



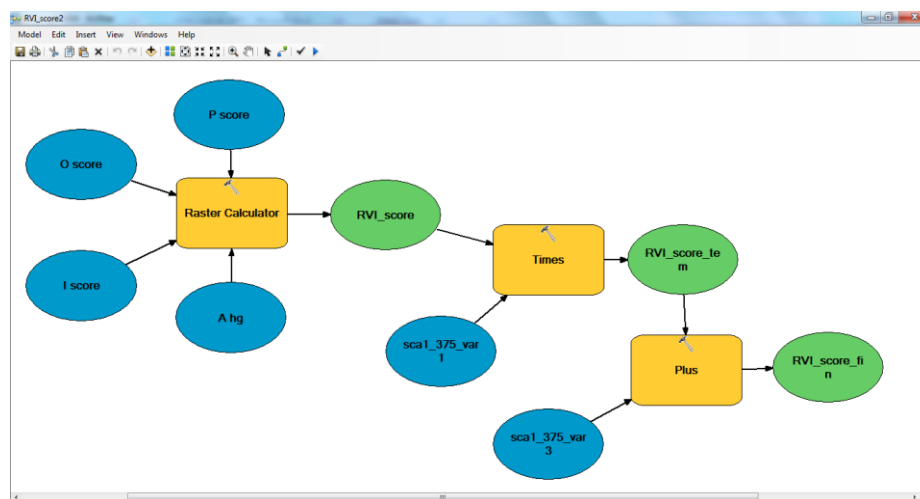
Vrijednosti parametra A za konačnu A kartu dobivene su zbrajanjem podfaktora  $A_{hg}$  i  $A_{tt}$  gdje se moguće vrijednosti kreću u rasponu od 0 do 2 (slika 25).

Manja vrijednost ukazuje na veću ranjivost krškog sustava uvjetovanog većom okršenosti sustava, potencijalnoj boljoj propusnosti naslaga i rezultatima ispitivanja koji pokazuju bolju i bržu povezanost s krškim izvorom. Visoke vrijednosti faktora A upućuju na dijelove slivnog područja koji nisu izravno povezani s krškim izvorima ili dijelovi slivnog područja čija je propusnost ograničena. To su vrlo često površine od nekarbonatnih stijena na kojima bi se mogli razviti plitki podpovršinski vodonosnici s ograničenim širenjem.

#### 4.4. Karte ranjivosti dobivene KAVA metodom

Temeljem provedenih analiza i dobivenih parametara izrađene su dvije karte ranjivosti prema KAVA metodi. To su karta ranjivosti vodonosnika i karta ranjivosti izvorišta.

**Karta ranjivosti vodonosnika** dobivena je zbrajanjem faktora O, I i  $A_{hg}$  te množenjem s faktorom P koji predstavlja vanjski stres u KAVA metodi. U slučaju ranjivosti vodonosnika, koristi se  $A_{hg}$  podfaktor jer on opisuje statičke uvjete u krškom vodonosniku. Nakon zbrajanja treba napraviti dodatnu podjelu najranjivijih dijelova u slivnom području na način da SCA 1 dijelovi slivnog područja imaju vrijednost 0,1. Konačno zbrajanje i dobivanje karte ranjivosti krških vodonosnika dobiveno je pomoću *ModelBuildera* (slika 26).

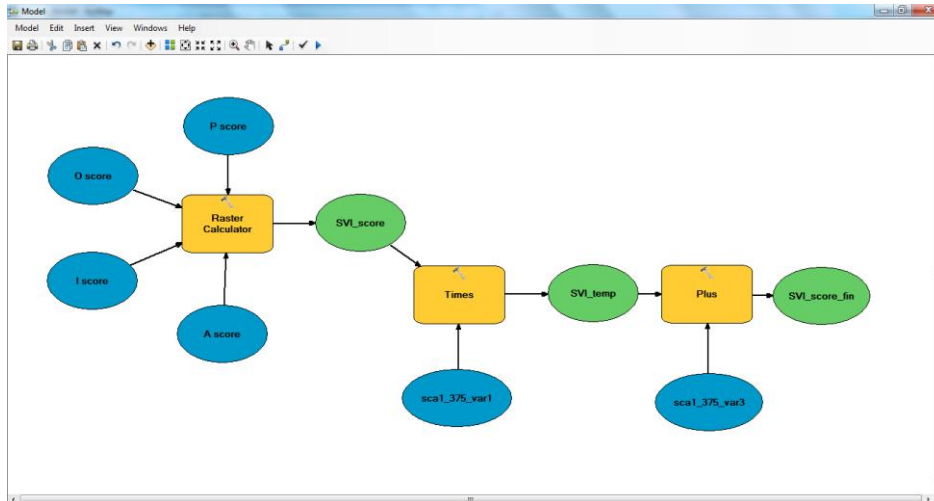


Slika 26. Računanje ranjivosti vodonosnika pomoću ModelBuildera

Iz dobivene karte ranjivosti krških vodonosnika vidljivo je da je područje Plitvičkih jezera u izrazito velikom stupnju ranjivosti koje obuhvaća podsliv Plitvicu i podsliv Maticu.

**Karta ranjivosti izvorišta** dobivena je zbrajanjem osnovnih faktora (O, I i A faktora) te množenjem s faktorom P koji predstavlja vanjski stres u KAVA metodi. Cijeli izračun ranjivosti izvorišta dobiven je u programu *ModelBuilder* (slika 28). U slučaju ranjivosti izvorišta, koristi se konačan rezultat A faktora, koji osim  $A_{hg}$  podfaktora uključuje i  $A_{tt}$  podfaktor, odnosno analize testova trasiranja dobivenih u istraživanom

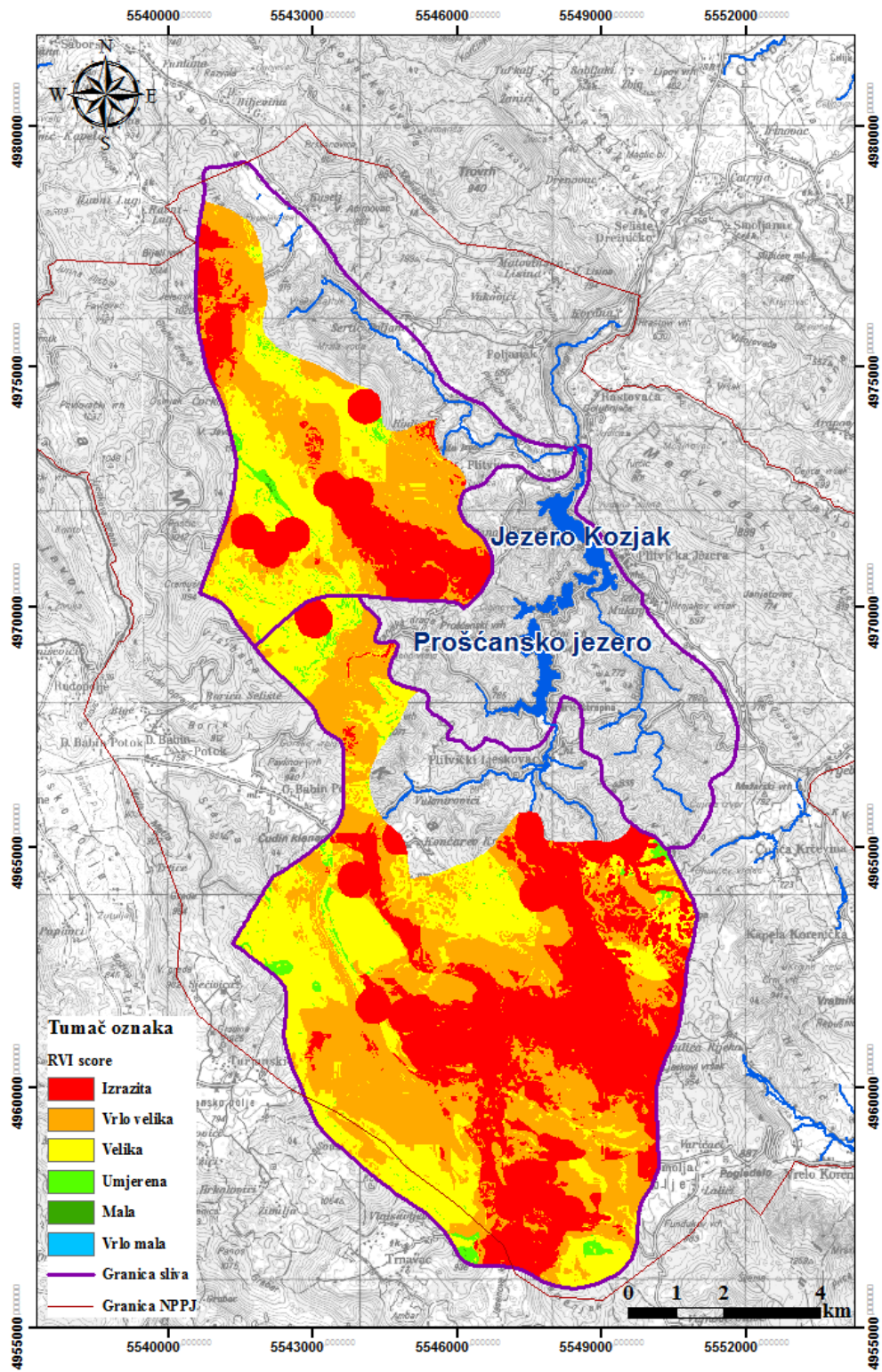
području. U podslivu Matice, rezultati testova trasiranja pokazali su jako dobru povezanost što u konačnosti utječe na veliku ranjivost podsliva Matice. Također, u podslivu Plitvice, ranjivost izvorišta je vrlo velika.



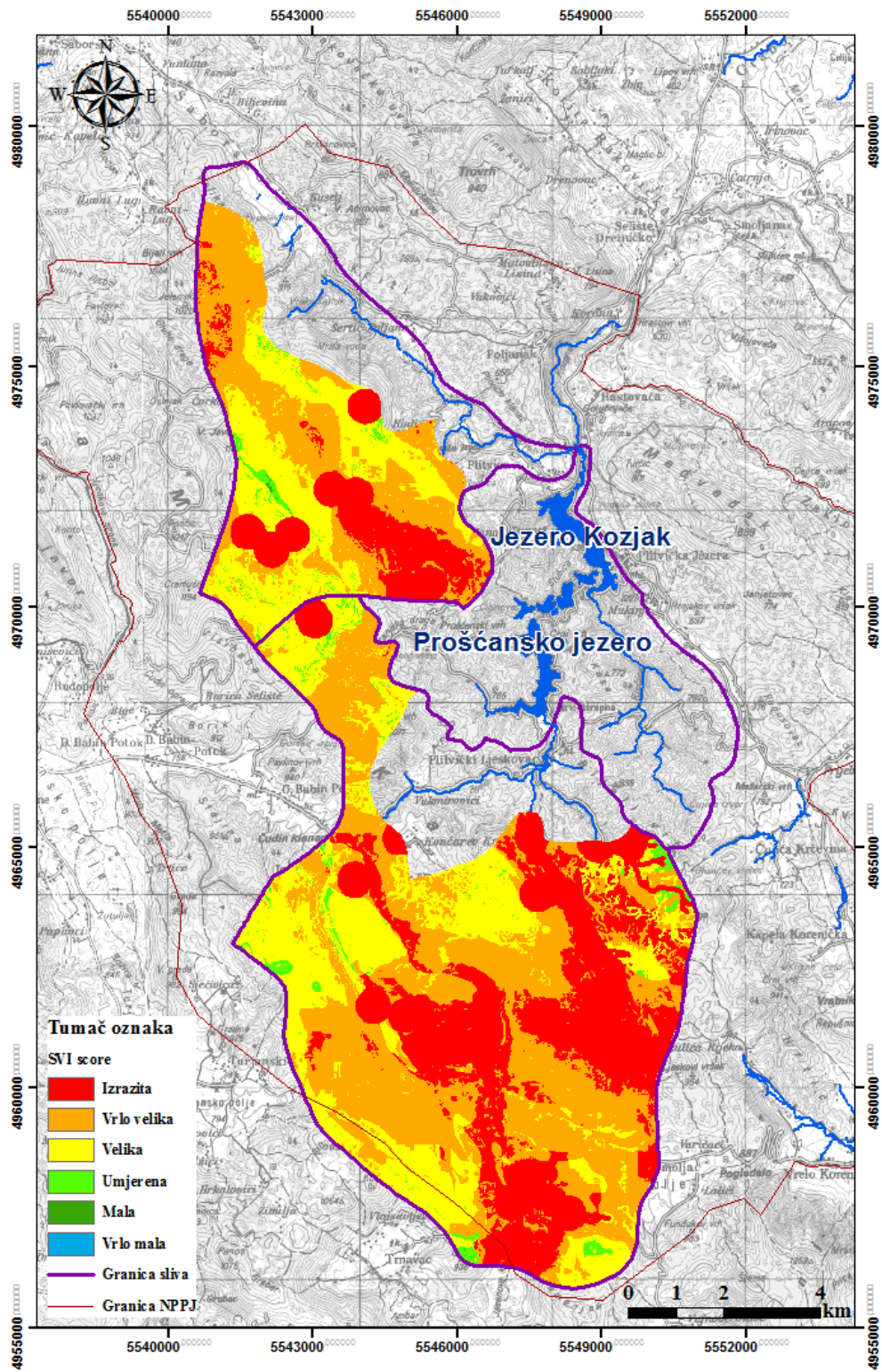
Slika 27. Računanje ranjivosti izvorišta pomoću ModelBuildera

Iz dobivenih karti ranjivosti krškog vodonosnika i izvorišta vidi se da se sliv Plitvičkih jezera u kojem je korištena KAVA metoda nalazi u području velike ranjivosti. KAVA metoda obuhvaća podsliv Plitvice i podsliv Matice koji su dio sliva Plitvičkih jezera i na čijem su dijelu razvijeni krški vodonosnici. Razlog velike ranjivosti navedenih podslivova jest taj da se nalaze u području karbonatnih stijena s tankim pokrovnim naslagama i vrlo dobrom povezanosti hidrogeoloških formacija. KAVA metoda nije obuhvatila područje jezerskog sustava jer je u tom dijelu razvijeno pretežito površinsko tečenje vode s razvijenom hidrografskom mrežom za čiju procjenu služe druge metode procjene ranjivosti površinskih voda.

Dobivene karte ranjivosti mogu se dalje koristiti za upravljanje i zaštitu zaliha podzemnih voda kao i pri određivanju prioriternih sanacijskih zahvata i pri odlukama o korištenju i namjeni prostora.



Slika 28. Karta ranjivosti vodonosnika na primjeru sliva Plitvičkih jezera



Slika 29. Karta ranjivosti izvorišta na primjeru sliva Plitvičkih jezera

## 5. Zaključak

U posljednje vrijeme sve se više ističe neprocjenjiva vrijednost zaliha podzemnih voda visoke kakvoće koje se nalaze u krškim područjima Republike Hrvatske. Isto tako raste i spoznaja da su krški vodonosnici iznimno ranjivi zbog svoje specifične hidrogeološke građe. Imaju tanak sloj pokrovnih naslaga, koncentriranu infiltraciju vode u podzemlje te velike brzine tečenja kroz kanale i pukotine što pogoduje širenju potencijalnog onečišćenja s površine terena u kratkom vremenu na velike udaljenosti. Takvom krškom području pripadaju i Plitvička jezera koja su zbog svoje atraktivnosti proglašena nacionalnim parkom još 1949. godine. Nacionalni park Plitvička jezera osim svojih prirodnih atraktivnosti predstavljaju i područje koje obiluje velikim zalihama podzemne vode visoke kakvoće o kojima ovisi cijela vodoodrživost jezerskog sustava.

U ovom radu opisana je *Karst Aquifer Vulnerability Assessment* (KAVA) metoda (Biondić et al., 2016) koja u obzir uzima četiri osnovna parametra: utjecaj pokrovnih naslaga (O parametar), utjecaj infiltracije (I parametar), utjecaj oborina (P parametar) i uvjeti vodonosnika (A parametar). Na osnovu tih parametara dobiju se karte ranjivosti izvorišta i/ili karte ranjivosti vodonosnika za određeno krško područje. Analizom prirodne ranjivosti krških vodonosnika izdvajaju se dijelovi sliva koji su zbog svojih prirodnih značajki ranjiviji na vanjske utjecaje od ostalih dijelova sliva. Karte ranjivosti dobivene KAVA metodom u ovom radu odnose se na podsliv Plitvice i podsliv Matice koji pripadaju slivu Plitvičkih jezera.

Na temelju dobivenih karata može se zaključiti da je sliv Plitvičkih jezera iznimno ranjivo područje na kojem je potrebno raditi dodatna nova istraživanja da bi se utvrdila povezanost cijelog hidrogeološkog sustava u svrhu zaštite zalihe podzemnih voda kao i zaštite vodoodrživosti cijelog sustava Plitvičkih jezera. Ovakve karte ranjivosti mogu se dalje koristiti za upravljanje i zaštitu zaliha podzemnih voda kao i pri određivanju prioriternih sanacijskih zahvata i pri odlukama o korištenju i namjeni prostora.

## 6. 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

ANTHROPOL.PROT (2005): *Study of anthropogenic pollution after the war and establishing the measures for protection for the protection of Plitvice National Park and Bihac Region at the border area of Croatia and Bosnia-Herzegovina (1998 – 2002)*. Final Report, INCO Projects – mrežna veza: [http://www.irb.hr/en/research/projects/intl/euprojects/ICA2/Reports/Final\\_report/](http://www.irb.hr/en/research/projects/intl/euprojects/ICA2/Reports/Final_report/).

Biondić, B. (1982): *Hidrogeologija Like i južnog dijela Hrvatskog primorja*. Doktorska disertacija. PMF Sveučilišta u Zagrebu, 214 str., 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, Sveučilište u Zagrebu, Varaždin

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

Biondić, R. (2010). *Uvod u GIS (Geografski informacijski sustav)*. Skripta iz kolegija Geografski informacijski sustav. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, 114 str.

Biondić, R., Meaški, H., Biondić, B. & Loborec, J. (2014): *Vulnerability mapping of Novljanska Žrnovnica karstic spring catchment area in Croatia*. Final technical report, Faculty of geotechnical engineering, University of Zagreb, 357-363 str. 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.

Božičević, S. (1991): *Fenomen krš*. Školska knjiga, 104 str., Zagreb

Božičević, S., Sremac, J., Marković, I. (2013): *Plitvička jezera-Desetljeća svjedočenja znanstvenika*. Vijesti Hrvatskoga geološkog društva

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 della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico SINTACS R5*. Pitagora Ed., 248 str., Bologna

COST Action 65 (1995): *Hydrogeological Aspects of Groundwater Protection in Karstic Areas, Final Report* (COST action 65). Report EUR 16547 EN. Brussels, European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development

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.

Dešković, I., Pedišić, M., Marušić, R., Milenković, V. (1981): *Značaj, svrha i neki rezultati hidrokemijskih, hidroloških i sanitarnih istraživanja površinskih i podzemnih voda Nacionalnog parka Plitvička jezera*. Vodoprivreda 13 (69-71) 1-3, 7 – 19, Beograd

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



Doerfliger N, Jeannin PY, Zwahlen F (1999): *Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multiattribute approach and GIS tools (EPIK method)*. Environ. Geol. 39 (2), 165 – 176

Državni hidrometeorološki zavod, DHMZ (2009): *Hidrološki i meteorološki podaci za područje Plitvičkih jezera, razdoblje od 1997. do 2007. godine*

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 – 86

Gavazzi, A. (1904): *Geneza Plitvičkih jezera*. Naravoslovni glasnik Hrv.prir.društva, God. XV, 1 – 9

Gavazzi, A. (1919): *Prilozi limnologiji Plitvica*. Prirodoslovna istraživanja Hrvatske i Slovenije, 14, 26 str.

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

Kapelj, J., Pavičić, A., Kapelj, S., Singer, D. (2003): *Hidrogeološka istraživanja za ocjenu mogućnosti zahvata pitke vode na širem području Plitvičkih jezera*. Arhiv HGI-CGS, Zagreb

Loborec, J. (2013): *Procjena rizika od onečišćenja podzemnih voda u kršu na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice*-doktorska disertacija. Rudarsko-geološko naftni fakultet, Zagreb, 191 str.

Makjanić, B. (1958): *Prilog klimatologiji područja Plitvičkih jezera*. Nacionalni park Plitvička jezera, 357 – 388, Zagreb

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

Marušić, R., Ćuruvija, M. (1991): *Istraživanja podzemnih vodnih veza Nacionalnog parka Plitvička jezera*. Plitvički bilten br. 3 – 4, 19 – 29

Markowska, J. (2004): *Erozijski procesi uz obale jezera Kozjak*. Plitvički bilten, 6, 241 – 252

Meaški, H. (2011): *Model zaštite krških vodnih resursa na primjeru Nacionalnog parka „Plitvička jezera“*/ doktorska disertacija. Rudarsko-geološko naftni fakultet, Zagreb, 210 str

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

Petrik, M. (1958): *Prinosi hidrologiji Plitvica*. Poljoprivredni nakladni zavod, Zagreb

Polšak, A. (1964): *Geološki i hidrogeološki odnosi Nacionalnog parka „Plitvička jezera“*. Zagreb

Pribičević, B., Medak, D. (2008): *Snimanje jezera Kozjak kombinacijom GPS-a i ultrazvučnog dubinomjera*. Elaborat o izvršenim radovima. Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb

Srdoč, D., Horvatinčić, N., Obelić, B., Krajcar, I., Sliepčević, A. (1985): *Procesi taloženja kalcita u krškim vodama s posebnim osvrtom na Plitvička jezera*. Krš Jugoslavije 11/4 – 6, JAZU, 101 – 204

Srdoč, D., Obelić, B., Horvatinčić, N., Krajcar Bronić, I., Marčenko, E., Merkt, S., Wong, H., Sliepčević, A. (1986): *Radiocarbon dating of lake sediments from two karstic lakes in Yugoslavia*. Radiocarbon 28, 495 – 502

Sumina, P. (1988): *Izveštaj o mjerenjima protoke vode na slivu Plitvičkih jezera radi utvrđivanja gubitaka u razdoblju od 1979. do 1988. godine.* Arhiv DHMZ, Zagreb

Stilinović, B., Futač, N. (1985): *Prilog poznavanju sanitarne vrijednosti vodenih sustava Plitvičkih jezera.* Ekologija, vol. 20 (1), 47 – 54, Acta Biologica Iugoslavica, Beograd

Stilinović, B., Futač, N. (1989): *Prilog poznavanju sanitarne vrijednosti nekih opskrbnih voda i jezera na području Nacionalnog parka Plitvice od 1977. do 1986. godine.* Plitvički bilten, 2, 7 – 16

Stilinović, B., Habdija, I., Dujmović, A. (2004): *Kakvoća vode ekosustava Plitvičkih jezera od godine 1977. do 2003. temeljem bakterioloških analiza.* Plitvički bilten, 6, 83 – 92

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

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

Vrba J., Zaporozec A. (1994): *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. International Contributions to Hydrology.* IAH. vol.16, 131 str., Hannover

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

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. Geografski položaj NPPJ (lijevo) i administrativna granica NPPJ (desno) .....	2
Slika 2. Izvor Bijele rijeke (lijevo) i izvor Crne rijeke (desno) .....	3
Slika 3. Prošćansko jezero (desno) i jezero Kozjak (lijevo) .....	4
Slika 4. Jezerski sustav Plitvičkih jezera .....	5
Slika 5. Veliki slap (desno) i Sastavci (lijevo).....	6
Slika 6. Tri osnovna podsliva u slivu Plitvičkih jezera.....	8
Slika 7. Hidrogeološka skica vodotoka Plitvica .....	10
Slika 8. Konceptualni model krškog vodonosnika .....	12
Slika 9. Model „porijeklo – put – cilj” .....	16
Slika 10. Konceptualni model KAVA .....	17
Slika 11. Shema određivanja površinskih slivnih područja .....	21
Slika 12. Primjer upotrebe ModelBuildera .....	29
Slika 13. Područje primjene KAVA metode .....	31
Slika 14. Računanje O faktora pomoću ModelBuildera .....	32
Slika 15. Karta podfaktora $O_s$ i $O_{kf}$ .....	33
Slika 16. Karta pokrovnih naslaga (O karta) .....	33
Slika 17. Računanje P faktora pomoću ModelBuildera.....	34
Slika 18. Karta utjecaja padalina (P karta) .....	35
Slika 19. Karta površinskih slivnih područja (SCA karta) .....	36
Slika 20. Računanje A faktora pomoću ModelBuildera .....	37
Slika 21. $I_{sv}$ karta (lijevo) i $I_{gwd}$ karta (desno).....	38
Slika 22. Karta utjecaja infiltracije (I karta) .....	38
Slika 23. Računanje konačnog I faktora pomoću ModelBuildera .....	39
Slika 24. $A_{hg}$ karta (lijevo) i $A_{tt}$ karta (desno) .....	40
Slika 25. Karta uvjeta vodonosnika (A karta).....	40
Slika 26. Računanje ranjivosti vodonosnika pomoću ModelBuildera.....	42
Slika 27. Računanje ranjivosti izvorišta pomoću ModelBuildera .....	43
Slika 28. Karta ranjivosti vodonosnika na primjeru sliva Plitvičkih jezera.....	44
Slika 29. Karta ranjivosti izvorišta na primjeru sliva Plitvičkih jezera .....	45

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijednosti podfaktor $O_s$ .....	18
Tablica 2. Vrijednosti podfaktora $O_{kf}$ .....	19
Tablica 3. Vrijednosti podfaktora $P_e$ .....	20
Tablica 4. Vrijednosti podfaktora $P_i$ .....	20
Tablica 5. Kategorizacija parametara nagiba i vegetacija .....	22
Tablica 6. Vrijednosti $I_{sv}$ podfaktora u ovisnosti o površinskom slivnom području .....	23
Tablica 7. Vrijednosti podfaktora $I_{gwd}$ .....	24
Tablica 8. Vrijednosti podfaktora $A_{hg}$ .....	25
Tablica 9. Vrijednosti podfaktora $A_{tt}$ .....	26