# Primjena SINTACS metode procjene ranjivosti podzemnih voda na području Varaždinskog vodonosnika

**Lisičak, Aleksandra**

**Master's thesis / Diplomski rad**

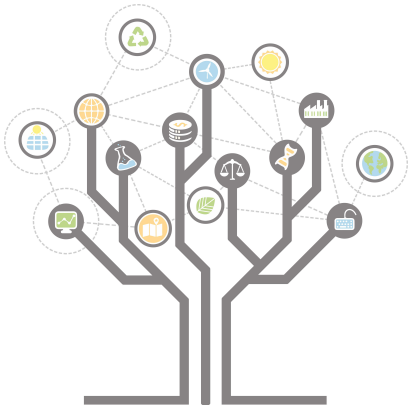
**2018**

*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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:816930

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-04-27**



*Repository / Repozitorij:*

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

# Primjena SINTACS metode procjene ranjivosti podzemnih voda na području Varaždinskog vodonosnika

**Lisičak, Aleksandra**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2018**

*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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:816930

*Rights / Prava:* In copyright

*Download date / Datum preuzimanja:* **2020-10-27**

*Repository / Repozitorij:*

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

ALEKSANDRA LISIČAK

# PRIMJENA SINTACS METODE PROCJENE RANJIVOSTI PODZEMNIH VODA NA PODRUČJU VARAŽDINSKOG VODONOSNIKA

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

# PRIMJENA SINTACS METODE PROCJENE RANJIVOSTI PODZEMNIH VODA NA PODRUČJU VARAŽDINSKOG VODONOSNIKA

KANDIDAT:

ALEKSANDRA LISIČAK

MENTOR:

Doc. dr. sc. JELENA LOBOREC

VARAŽDIN, 2018.

**IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI**

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom

PRIMJENA SINTACS METODE PROCJENE RANJIVOSTI PODZEMNIH VODA NA PODRUČJU VARAŽDINSKOG VODONOSNIKA

Rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom doc. dr. sc. Jelene Loborec.

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

U Varaždinu, 06.09.2018.

Aleksandra Lisičak

Lisičak Aleksandra

SAŽETAK

Količina i kakvoća podzemnih voda kao i njihova zaštita od strateške su važnosti za mnoge regije svijeta pa tako i za Republiku Hrvatsku. One su vrijedan prirodan resurs te glavni izvor zaliha pitke vode za vodoopskrbu. Urbanizacija i poljoprivredne djelatnosti na površini iznad vodonosnika mogu se smatrati hazardima i potencijalnim izvorom onečišćenja podzemne vode, koji mogu utjecati na kvalitetu vode i umanjiti njenu vrijednost za krajnjeg korisnika. Termin ranjivost podzemnih voda prvi je puta spomenut 1960-tih u Francuskoj kako bi se skrenula pozornost na onečišćenje podzemnih voda. SINTACS metoda je parametarska metoda procjene ranjivosti koju su razvili Civita i De Maio 1997. godine u Italiji po uzoru na američku metodu DRASTIC. Varaždinski vodonosnik je aluvijalni vodonosnik izgrađen od šljunaka i pijesaka kvartarne starosti i nalazi se na krajnjem zapadnom dijelu heterogenih kvartarnih naslaga dravske doline. Kao granica istraživanog područja u ovome radu uzeta je linija treće zone sanitarne zaštite tri najvažnija crpilišta podzemnih voda grada Varaždina. Dosadašnja istraživanja pokazala su da postoji problematika onečišćenja podzemnih voda ovoga područja te je važno tome posvetiti dodatnu pažnju. SINTACS metodom ranjivost podzemnih voda procjenjuje se bodovanjem sedam parametara: dubina do podzemne vode (S), djelovanje efektivne infiltracije (I), kapacitet razrjeđenja u nezasićenoj zoni (N), kapacitet razrjeđenja u tlu/pokrovnim naslagama (T), hidrogeološka obilježja vodonosnika (A), hidraulička vodljivost vodonosnika (C), hidrološka uloga nagiba terena (S). Konačni indeks ranjivosti SINTACS metode dobiven je množenjem težinskih koeficijenata s vrijednošću parametara. Za težinske koeficijente u ovom radu korišteni su koeficijenti za scenarij „veliko opterećenje“ upravo zbog velikog broja izvora opasnosti od onečišćenja podzemnih voda u obliku peradarskih farmi, poljoprivrednih površina, prometnica, urbanizacije i slično na području varaždinskog vodonosnika.

**Ključne riječi:** podzemna voda, prirodna ranjivost, SINTACS metoda, varaždinski vodonosnik, GIS

# Sadržaj


1. Uvod ..... 1
2. Opis korištene metode – SINTACS metoda ..... 3
   2.1. Razvoj SINTACS metode ..... 3
   2.2. Opis parametara ..... 4
      2.2.1. Dubina do podzemne vode (parametar S) ..... 4
      2.2.2. Djelovanje efektivne infiltracije (parametar I) ..... 5
      2.2.3. Kapacitet razrjeđenja u nezasićenoj zoni (parametar N) ..... 8
      2.2.4. Kapacitet razrjeđenja u tlu/pokrovnim naslagama (parametar T) ..... 10
      2.2.5. Hidrogeološka obilježja vodonosnika (parametar A) ..... 11
      2.2.6. Raspon hidrauličke vodljivosti vodonosnika (parametar C). ..... 12
      2.2.7. Hidrološka uloga nagiba terena (parametar S) ..... 13
   2.3. Težinski koeficijenti SINTACS metode ..... 14
3. Opis Varaždinskog vodonosnika ..... 16
   3.1. Geografski smještaj ..... 18
   3.2. Geološke značajke ..... 19
   3.3. Hidrogeološke značajke ..... 21
      3.3.1. Prvi vodonosni sloj ..... 22
      3.3.2. Slabopropusni međusloj ..... 22
      3.3.3. Drugi vodonosni sloj ..... 23
      3.3.4. Krovina vodonosnog sustava ..... 23
      3.3.5. Podina vodonosnog sustava ..... 24
   3.4. Klimatološke značajke ..... 24
      3.4.1. Temperatura ..... 25
      3.4.2. Oborine ..... 25
      3.4.3. Tlak zraka ..... 26
      3.4.4. Relativna vlažnost zraka ..... 27
   3.5. Kakvoća vode ..... 27
4. Izrada karte prirodne ranjivosti SINTACS metodom za područje varaždinskog vodonosnika ..... 28
   4.1. Priprema podataka ..... 28
   4.2. Ocjena prirodne ranjivosti vodonosnika SINTACS metodom ..... 32
      4.2.1. Parametar $S_1$ ..... 32

4.2.2. Parametar I ..... 33
4.2.3. Parametar N ..... 34
4.2.4. Parametar T ..... 35
4.2.5. Parametar A ..... 36
4.2.6. Parametar C ..... 37
4.2.7. Parametar $S_2$ ..... 38
4.2.8. Analiza ranjivosti pomoću SINTACS metode ..... 39
4.2.9. Analiza rezultata procjene ranjivosti SINTACS metodom ..... 41
5. Zaključak ..... 43
6. Literatura ..... 45
7. Popis slika ..... 48
8. Popis tablica ..... 50

# 1. Uvod

Voda je uz kisik jedan od najvažnijih elemenata na Zemlji za održavanje života, ona nije komercijalni proizvod već je nasljeđe koje treba štititi te racionalno i mudro koristiti. Vodama se mora upravljati po načelu održivog razvoja, kojim se zadovoljavaju potrebe sadašnje generacije i ne ugrožavaju pravo i mogućnosti budućih generacija [1]. Dobra kvaliteta vode ključna je za ljudsko zdravlje, gospodarski i društveni razvoj i ekosustav nekog područja. Međutim, porastom ljudske populacije, razvojem industrije, poljoprivrede i sve većeg utjecaja klimatskih promjena, prirodni okoliš postaje degradiran, a osiguranje dovoljne i sigurne vodoopskrbe postaje sve izazovnije. Oko 700 milijuna ljudi u 43 zemlje danas pati od nestašice vode, dok 1,8 milijardi ljudi koristi kao izvor pitke vode vodu koja je onečišćena fekalijama, izlažući se pri tome riziku od kolere, dizenterije, tifusa i polio virusa [2].

Podzemne vode su vrijedan prirodan resurs i glavni su izvor zaliha vode za javnu vodoopskrbu u mnogim regijama te ih je zbog toga nužno zaštititi od pogoršanja kakvoće i kemijskog onečišćenja [3]. Hrvatska se svrstava među rijetke zemlje koje imaju značajne rezerve čiste pitke vode. Između 188 zemalja u svijetu po bogatstvu i dostupnosti vodnih izvora po stanovniku, Hrvatska se nalazi na 5. mjestu u Europi i 42. mjestu u svijetu. U Hrvatskoj značajno vodno bogatstvo predstavljaju podzemne vode (12 %) i upravo je oko 90 % vode koju koristimo za vodoopskrbu zapravo podzemna voda [4].

Urbanizacija i poljoprivredne djelatnosti na površini iznad vodonosnika mogu se smatrati hazardima i potencijalnim izvorom onečišćenja podzemne vode, koje može utjecati na kvalitetu vode i umanjiti njenu vrijednost za krajnjeg korisnika. Termin ranjivost podzemnih voda prvi je puta spomenut 1960-tih u Francuskoj kako bi se skrenula pozornost na onečišćenje podzemnih voda [5]. Pojam ranjivost definiran je kao nemjerljivo, relativno i bez dimenzijsko svojstvo nekog prirodnog sustava. Suvremeni koncept ranjivosti podzemnih voda pretpostavlja da fizička, kemijska i biološka svojstva okoliša na neki način mogu utjecati na stupanj zaštite podzemnih voda od antropogenog utjecaja. Ranjivost se dijeli na prirodnu i specifičnu. Prirodna ranjivost isključivo je vezana za hidrogeološke značajke vodonosnika i ne ovisi o vrsti ni o

načinu kretanja onečišćenja. Specifična ranjivost uključuje sve značajke jednog i/ili grupe onečišćivača i njihov odnos i međudjelovanje s hidrogeološkim sustavom [6].

Razvijeno je mnogo pristupa za procjenu ranjivosti vodonosnika. Pristupi uključuju metode temeljene na procesu, statističke metode i metode preklapanja i indeksa (parametarske metode). Metode temeljene na procesu koriste simulacijske modele za procjenu pronosa onečišćenja, ali su ograničene nedostatkom podataka i računalnim poteškoćama. Statističke metode koriste statistiku za određivanje povezanosti između prostornih varijabli i stvarne pojave onečišćivača u podzemnim vodama. Njihova ograničenja uključuju nedovoljna promatranja kakvoće vode, točnost podataka i pažljiv odabir prostornih varijabli. Parametarske metode kombiniraju čimbenike koji kontroliraju kretanje onečišćenja s površine u zasićenu zonu, a rezultati su indeksi ranjivosti za različite lokacije. Glavna prednost parametarskih metoda je da neki od čimbenika kao što su oborine i dubina do podzemnih voda mogu biti dostupni za velike površine što ih onda čini prikladnim za regionalne procjene [5]. Parametarske metode dijele se na [6]:

- Metode matričnog sustava - kombinira se mali broj odabranih parametara (npr. Irska metoda)
- Metode jednostavnog vrednovanja - svaki parametar ima neki svoj konstantni raspon vrijednosti (klase), a konačna procjena ranjivosti dobiva se zbrajanjem ili množenjem tih parametara (npr. GOD metoda)
- Metode bodovanja s dodjeljivanjem težinskih vrijednosti – težinski bodovi množe parametre i na taj se način naglašava utjecaj nekog parametra u odnosu na druge, a u ovu skupinu metoda pripada i SINTACS metoda koja je korištena u ovom radu kako bi se procijenila ranjivost podzemnih voda na području varaždinskog vodonosnika.

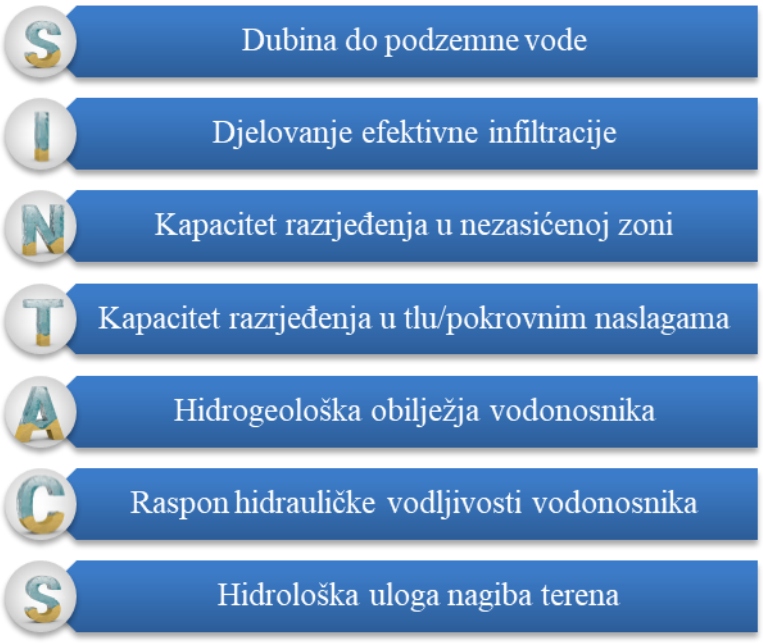
Cilj ovog diplomskog rada je ocjena ranjivosti podzemnih voda na području varaždinskog vodonosnika. Varaždinski vodonosnik aluvijalni je vodonosnik izgrađen od šljunka i pijesaka kvartarne starosti. Domenu modela varaždinskog vodonosnika uvjetuju rijeka Drava i Ormoško te Varaždinsko jezero na sjeveru, nepropusne naslage na jugu i zapadu prema Varaždinsko-topličkom gorju, Ravnoj gori i Maceljskom gorju te područje utjecaja najistočnijeg crpilišta Bartolovec. Kakvoća podzemne vode na području varaždinskog vodonosnika odraz je prirodnih uvjeta koji vladaju u aluvijalnom

vodonosniku, odnosno opće obilježje kakvoće podzemne vode promatranog vodonosnika je oksidativnost sredine [7]. U ovom radu korištena je SINTACS metoda procjene ranjivosti te je kao granica istraživanog područja uzeta granica III. zone sanitarne zaštite izvorišta Varaždin, Vinokovščak i Bartolovec. Priprema ulaznih podataka, analize i interpretacije napravljene su uz pomoć GIS alata koristeći ESRI ArcGIS softver, verziju 10.1, licencu Geotehničkog fakulteta.

# 2. Opis korištene metode – SINTACS metoda

## 2.1. Razvoj SINTACS metode

SINTACS metoda je parametarska metoda procjene ranjivosti koju su razvili Civita i De Maio 1997. godine u Italiji po uzoru na američku metodu DRASTIC koja je prilagođena mediteranskim uvjetima [5]. SINTACS je razvijen zbog želje autora za predlaganjem modela za procjenu ranjivosti koji bi bio primjenjiv na području cijele Italije (neovisno o tipu vodonosnika) kako bi se rezultati mogli uspoređivati. Godinama se taj sustav nadopunjavao na temelju iskustva s provedenih ispitivanja sve do 2000. godine kada je predložena verzija SINTACS R5. Prema verziji iz 2000. godine procjena ranjivosti temelji se na vrednovanju sedam parametara koji su prikazani na slici 1.2. SINTACS ima pet težinskih sustava koji su ovisni o hidrogeološkoj građi vodonosnika i površinskim uvjetima antropogenog opterećenja. Parametri koji se pojavljuju u modelu SINTACS konvertiraju se pomoću predloženih dijagrama, tablica, raspona i izračuna u SINTACS parametre, svaki u rasponu od 1 do 10 gdje veća vrijednost parametra označava veću ranjivost vodonosnika [6].




Slika 2.1. Parametri procjene ranjivosti prema SINTACS metodi

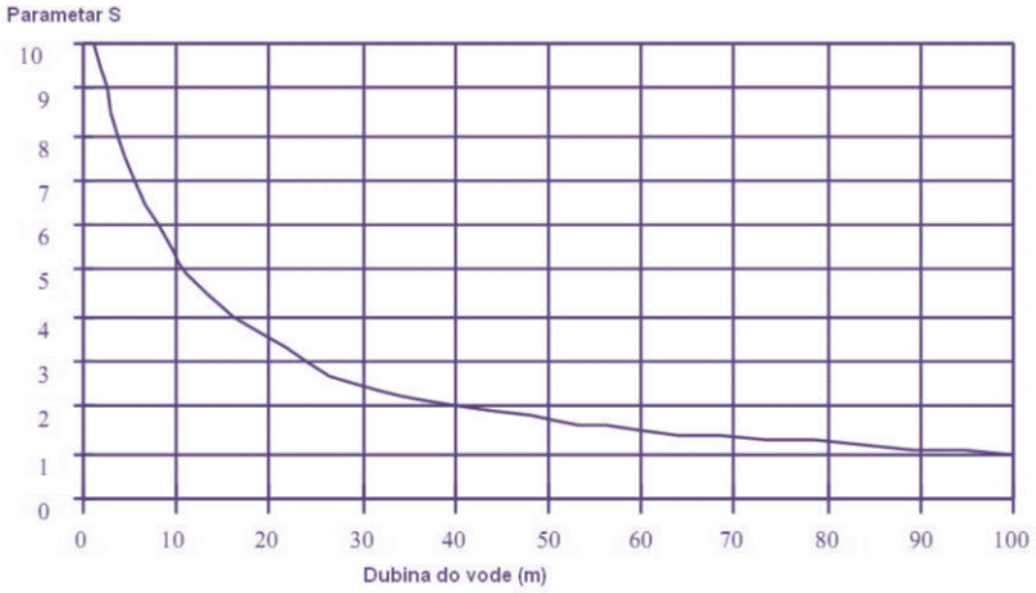
## 2.2. Opis parametara

### 2.2.1. Dubina do podzemne vode (parametar S)

Dubina do podzemne vode definirana je kao dubina piezometarske razine koja zajedno sa značajkama nezasićene zone, određuje vrijeme procjeđivanja onečišćenog fluida i trajanje procesa razrjeđenja uslijed različitih sorpcijskih procesa [6]. Procjeđivanje se može odvijati [8]:

- U nezasićenoj poroznoj sredini kao gravitacijsko cijeđenje vode preko vlažnih stjenki šupljina,
- U zasićenoj poroznoj sredini kao prokapljivanje kroz slojeve reducirane propusnosti pod utjecajem hidrauličnog gradijenta,
- Kao cijeđenje na mjestima gdje otvoreni vodonosnik izlazi na površinu terena iznad površinske vode ili gdje vodna ploha nailazi na granicu s bitno povećanom propusnošću

U skladu s modelom, vrijednost procjene koja se odnosi na dubinu do podzemne vode se s porastom dubine smanjuje (Slika 2.2.), što je i logično za zaključiti, jer je s većom dubinom potreban i dulji put prolaska onečišćenja sa površine do podzemne vode a samim time i veća mogućnost razrjeđenja.




Slika 2.2. Dijagram određivanja parametra S – dubina do podzemne vode [6]

### 2.2.2. Djelovanje efektivne infiltracije (parametar I)

Efektivna infiltracija (perkolacija) je značajna u ocijeni ranjivosti vodonosnika. Voda ispire onečišćenja sa površine terena te se procjeđuje kroz nezasićenu poroznu sredinu do podzemne vode u zasićenoj zoni, ali ovisno o vrsti tla ili stijene moguće je prilikom transporta određeno razrjeđenje. Ova voda zapravo predstavlja medij za prijenos onečišćenja. Efektivna infiltracija se izračunava na temelju fluktuacije razine vode ili metodom infiltracije oborinskih voda [5]. U ovom radu korištena je metoda infiltracije oborinskih voda. Vrijednosti parametra u ovom radu računata su na temelju oborina (P) koje su kombinirane s površinskim hidrogeološkim uvjetima što je sadržano u indeksu potencijalne infiltracije (X – heta) [6], evapotranspiraciju nije bilo potrebno uzimati u obzir jer je na istraživanom području debljina tla svugdje veća od 0,5 metara.

Indeks potencijalne infiltracije (X-heta) ovisi o:

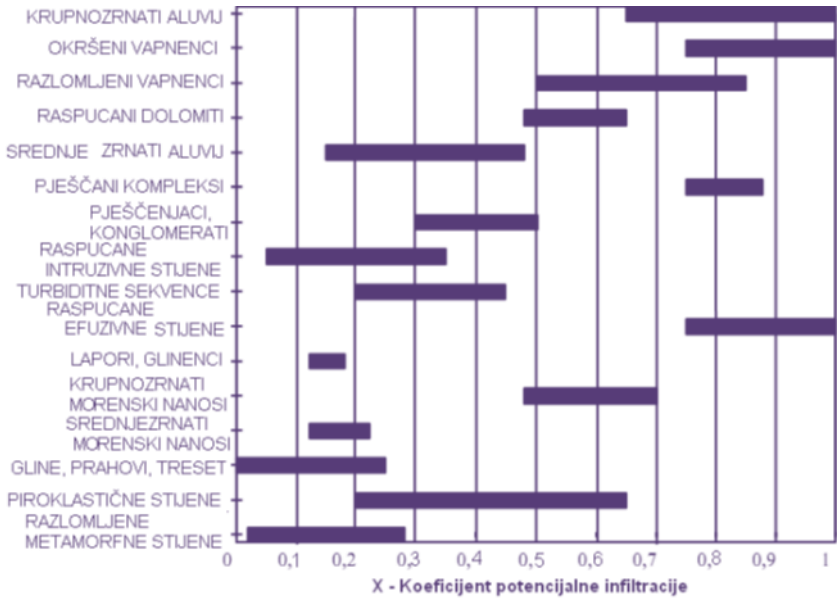
- Površinskoj litologiji vodonosnika ( u slučaju kada stijena vodonosnika izvija na površinu terena ili kada je vodonosnik pod oskudnim pokrovom tla) (Slika 2.3.)
- Hidrauličkim značajkama tla (ako mu je debljina veća od 0,5 metara) (Slika 2.4.)
- Nagibu površine terena
- Tipu relativne propusnosti medija izdanka stijene vodonosnika na površini

Ako ne postoje kontinuirane naslage tla količina infiltracije I se izračuna prema formuli (2.1.):

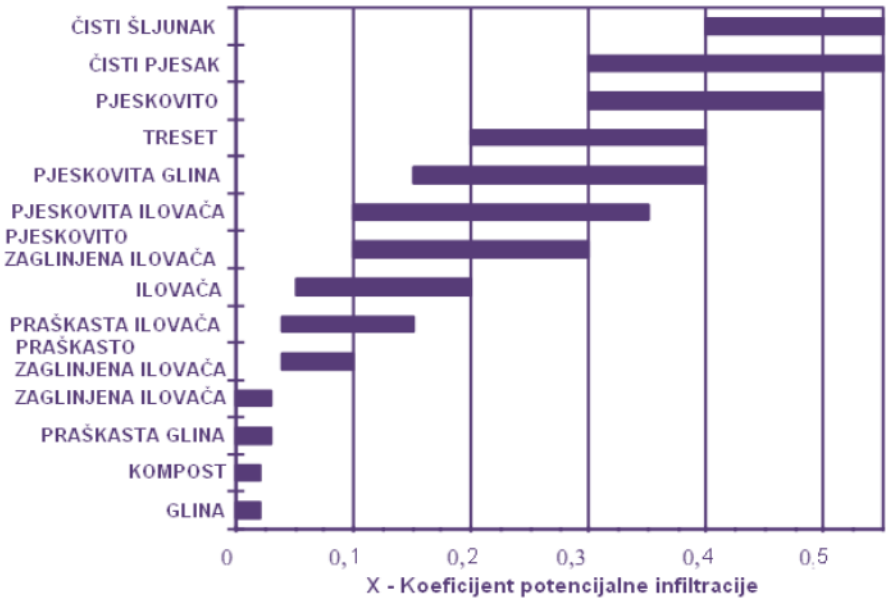
$$I = (P - E_t) \cdot X \quad (2.1.)$$

Ukoliko je debljina tla veća od 0,5 metara količina infiltracije I računa se prema formuli (2.2.):

$$I = P \cdot X \quad (2.2.)$$

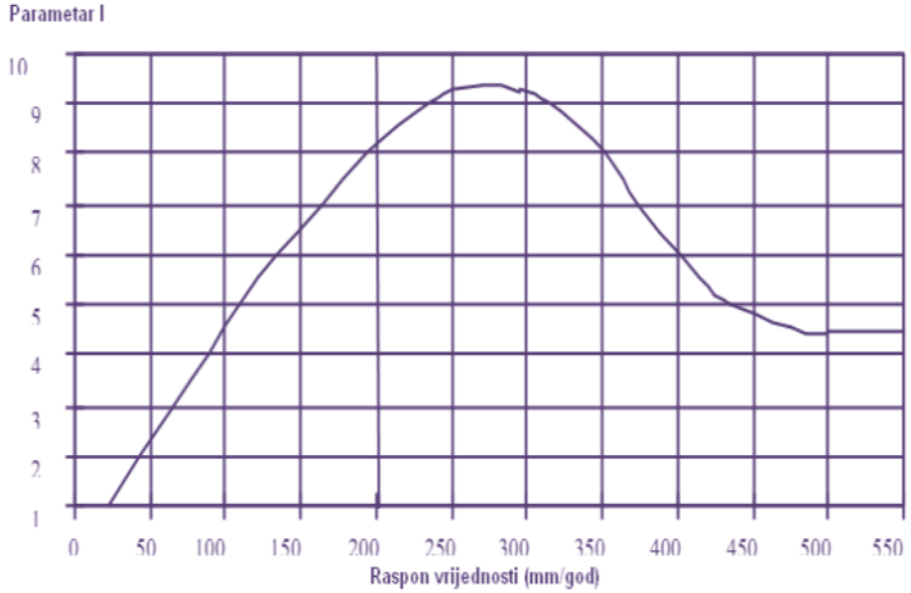



Slika 2.3. Dijagram određivanja koeficijenta X ovisno o vrsti stijene [6]




Slika 2.4. Dijagram određivanja koeficijenta X ovisno o teksturi tla [6]

Vrijednost infiltracije uvrštava se zatim u dijagram koji nam zatim daje iznos parametra I (Slika 2.5.).

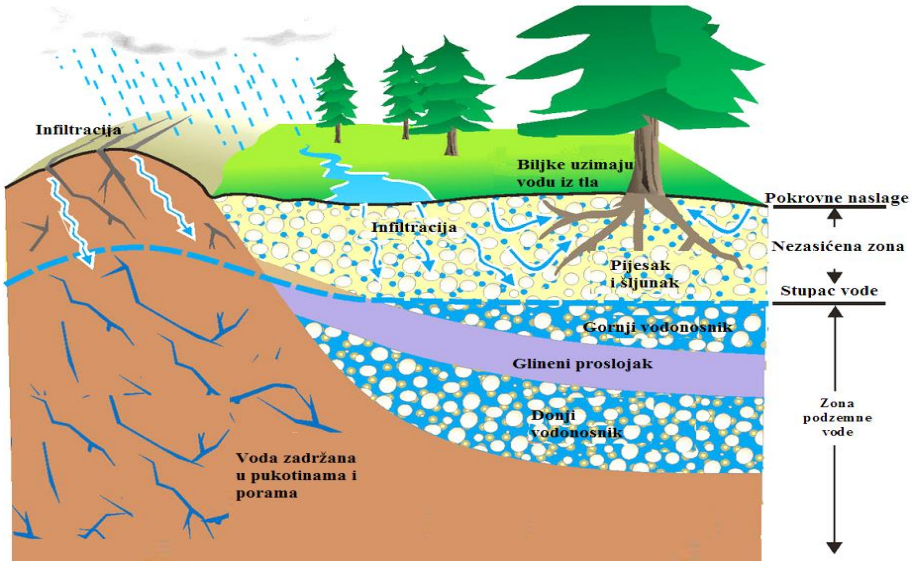



Slika 2.5. Dijagram određivanja parametra I [6]

Na dijagramu je vidljivo da do određene vrijednosti ranjivost raste, no nakon dodatnih infiltriranih količina krivulja pada i ranjivost se smanjuje. Taj učinak rezultat je razrjeđenja, odnosno smanjenja koncentracije onečišćenja do kojeg dolazi uslijed velikih količina oborina jer nakon nekog vremena velika količina vode se više ne može infiltrirati nego ona površinski otječe.

### 2.2.3. Kapacitet razrjeđenja u nezasićenoj zoni (parametar N)

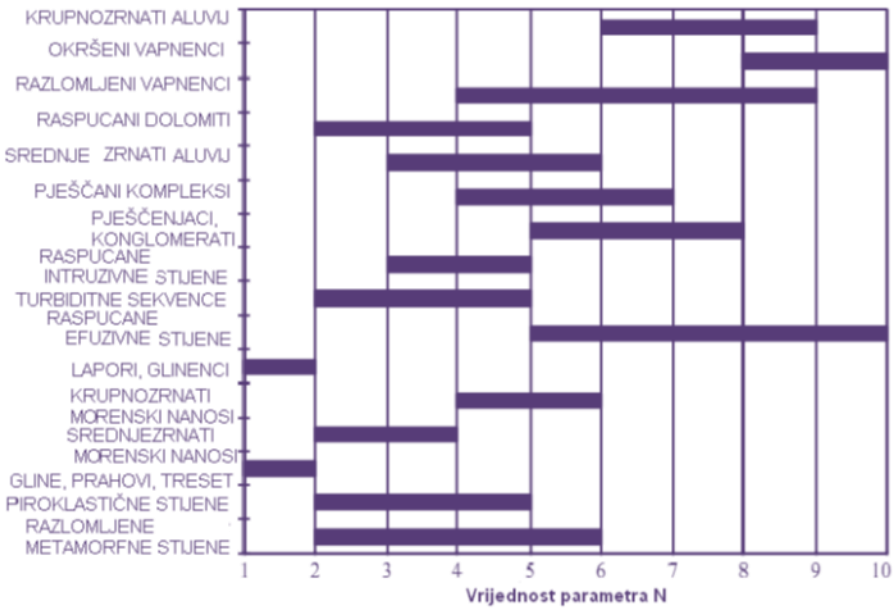
Nezasićena zona (Slika 2.6.) opisana je kao zona ispod sloja pokrovnih naslaga i iznad vodne plohe (stupac vode), koja je nezasićena ili diskontinuirano zasićena te predstavlja drugu liniju obrane vodonosnika od procjeđivanog onečišćenog fluida. Vodna ploha definirana je kao granica između gornjeg ozračenog područja i donjeg zasićenog, a zapravo je to zamišljena ploha na kojoj je tlak jednak atmosferskom, a ispod koje se voda giba pod utjecajem hidrauličkog gradijenta [8].




Slika 2.6. Slojevi vodonosnika (prema [9])

Parametar N opisuje kapacitet razrjeđivanja u nezasićenoj zoni [6]. Nezasićena zona bogata je organskom materijom i glinom koje zapravo pospješuju sorpciju, biološku

degradaciju i mijenjaju svojstva onečišćivača. U industrijskim i poljoprivrednim područjima, gdje je površina tla izložena opasnom otpadu, gnojivima i pesticidima, nezasićena zona može se smatrati zonom smanjenja utjecaja (eng. „*Buffer zone*“) u smislu filtra koji na neki način zadržava ili razrjeđuje onečišćenja s površine te time osigurava određeni stupanj zaštite vodonosnika. S hidrološkog gledišta nezasićena zona u velikoj mjeri kontrolira prihranjivanje podzemnih i površinskih voda kao i prijenos vode u atmosferu [10]. Kapacitet razrjeđivanja uključuje litološke i hidrogeološke značajke nezasićene zone (tekstura, mineralni sastav, granulometrijski sastav, razlomljenost, okršavanje itd.). Na slici 2.7. prikazana je vrijednost parametra N ovisno o hidrogeološkim značajkama. Imamo li izraženu slojevitost u nezasićenoj zoni gdje se slojevi po svojim litološkim i hidrogeološkim značajkama razlikuju, ukupnu vrijednost parametra N dobijemo sumiranjem umnoška debljine i težinske vrijednosti pojedinog sloja, a dobivenu vrijednost zatim podijelimo s ukupnom debljinom nezasićene zone. Ukoliko je vodonosnik prekriven s više nepropusnih slojeva ocjena koja se pripisuje nezasićenoj zoni je 1, zbog toga što je vodonosnik tada maksimalno zaštićen što je tiče slojeva iznad.



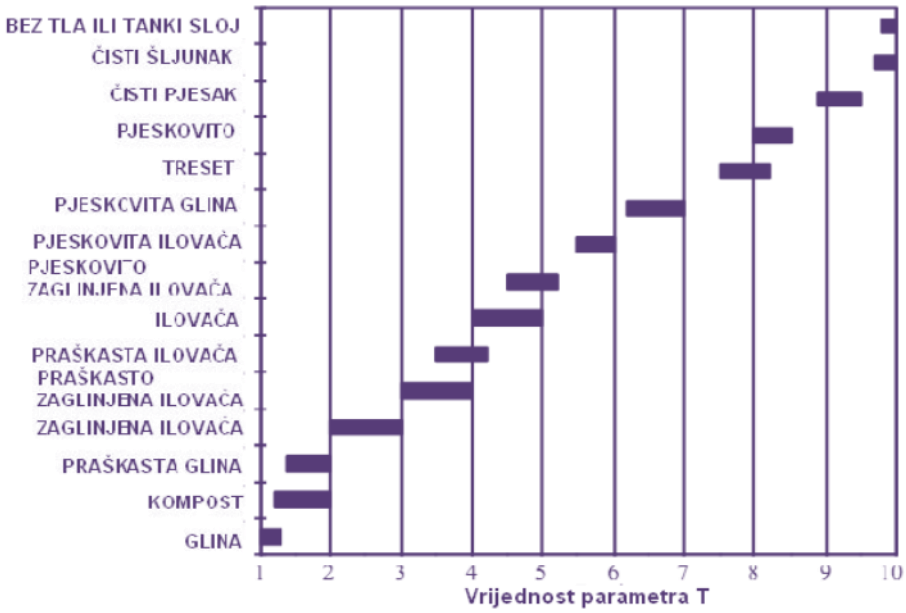

Slika 2.7. Dijagram određivanja parametra N [6]

### 2.2.4. Kapacitet razrjeđenja u tlu/pokrovnim naslagama (parametar T)

Tlo i pokrovne naslage vrlo su bitne kod ocjenjivanja ranjivosti podzemnih voda i zapravo su prva linija obrane od procjeđivanja onečišćenja s površine tla do podzemne vode jer imaju sposobnost usporavanja ili zadržavanja kretanja onečišćenja kroz hidrogeološki sustav. Tlo prilikom procjeđivanja onečišćujuće tvari ima sposobnost filtracije. Filtracijsko djelovanje tla ovisi o njegovoj sorptivnoj sposobnosti, odnosno mehanizmima sorpcije (upijanja). Najveći kapacitet adsorpcije ima humus u tlu, slijede minerali gline, među kojima najveći kapacitet ima montmorilonitna glina. Djelujući kao snažan pufer-sustav tlo inaktivira sve tvari koje naglo ulaze u njegovu masu ili se pak oslobađaju mineralizacijom organske tvari. Kisele sastavnice tlo puferira pomoću kationa i tako daje otpor naglim i većim promjenama reakcije tla [11]. Bitni procesi koji se događaju u tlu te utječu na ponašanje potencijalnih onečišćivača, a ovisno o svojstvima tla i pokrovnih naslaga mogu se podijeliti u dvije skupine parametara [12]:

I. **Fizikalna svojstva** (granulometrijski sastav, tekstura, dubina, gustoća, ukupni porozitet, hidraulička vodljivost tla i raspoloživa količina vode u tlu) te imaju izravan utjecaj na adsorpciju, filtraciju, drenažni kapacitet, sadržaj vode i brzinu procjeđivanja.
II. **Kemijska svojstva** (pH, kapacitet kationske izmjene (CEC), sadržaj organske materije i sadržaj glina) koja omogućuju sorpciju nekog kemijskog spoja ili elementa na čestice tla.

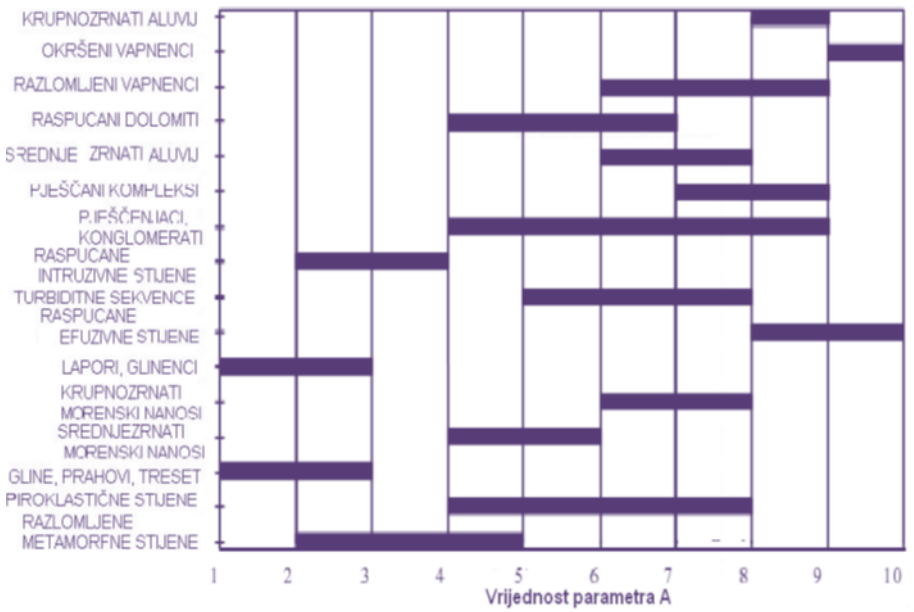
Podaci potrebni za procjenu parametra T često su nedostupni i ograničeni samo na podatke o granulometrijskom sastavu i teksturi, tzv. "rejting dijagrami" pozivaju se upravo na te značajke tla (Slika 2.8.).




Slika 2.8. Dijagram određivanja parametra T [6]

### 2.2.5. Hidrogeološka obilježja vodonosnika (parametar A)

Parametar A predstavlja hidrogeološke značajke vodonosnika koje nam opisuju procese koji se odvijaju u zasićenoj zoni prilikom miješanja onečišćenja i podzemne vode i to nakon što se koncentracija onečišćenja smanjila procjeđivanjem kroz pokrovne naslage i nesaturiranu zonu. Hidrogeološko istraživanje objedinjuje sve dostupne podatke o litologiji, strukturi, raspucalosti i okršenosti saturirane zone, a ti podaci mogu se prikupiti iz speleoloških objekata, geološkim istraživanjima, bušotinama i dr. Svi ti prikupljeni i dostupni podaci predstavljaju jednu bazu podataka koja je neophodna za procjenjivanje ranjivosti nekog vodonosnika. Na temelju dostupnih podataka pomoću ponuđenih raspona u "rejting dijagramima" (Slika 2.9.) može se odabrati vrijednost u svakom dijelu unutar vodonosnika [6].

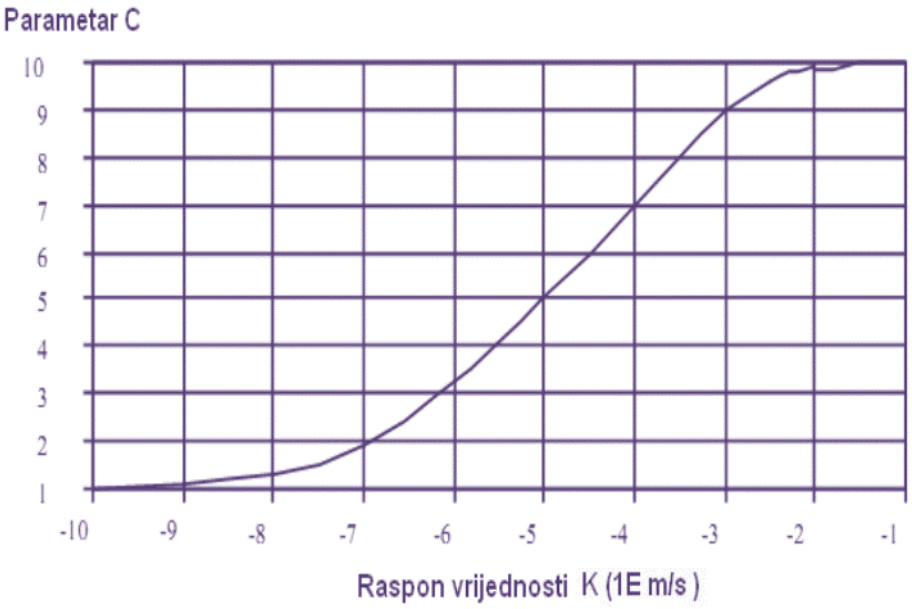



Slika 2.9. Dijagram određivanja parametra A [6]

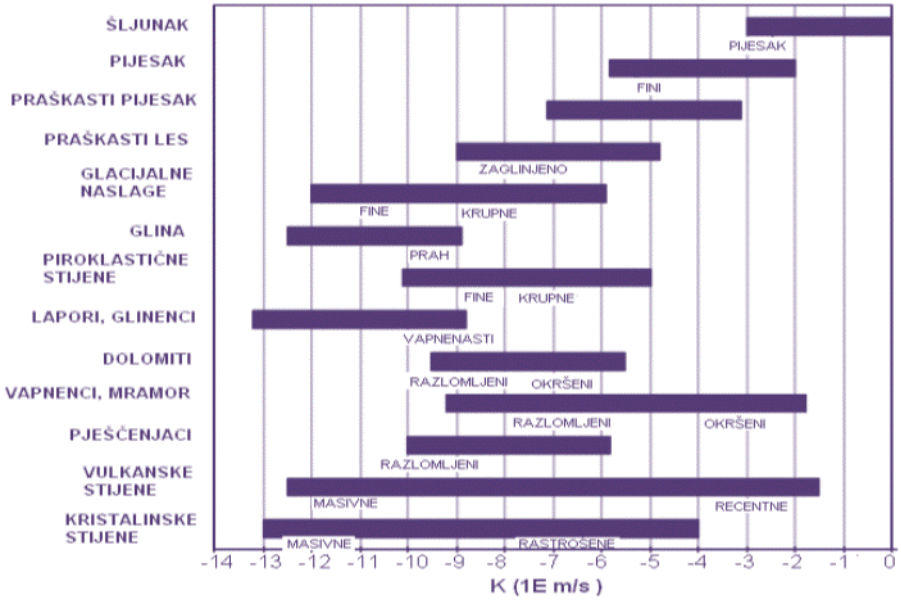
### 2.2.6. Raspon hidrauličke vodljivosti vodonosnika (parametar C).

Hidraulička vodljivost predstavlja brzinu procjeđivanja u poroznom mediju i ima dimenziju brzine, a samim time određuje i brzinu protoka onečišćenja unutar sustava podzemnih voda. Hidraulička vodljivost ovisi o vrsti materijala i o fizikalnoj karakteristici fluida koji prolazi kroz porozni materijal [13].

Visoka hidraulička vodljivost često je indikator prilikom procjene ranjivosti podzemnih voda na veliku ranjivost na onečišćenje [5]. Kako bi se dodijelila vrijednost parametru C koristi se dijagram ocjenjivanja prikazan na slici 2.10. Rasponi vrijednosti hidrauličke vodljivosti K za najčešće vrste vodonosnika prikazani su na slici 2.11.




Slika 2.10. Dijagram određivanja parametra C [6]

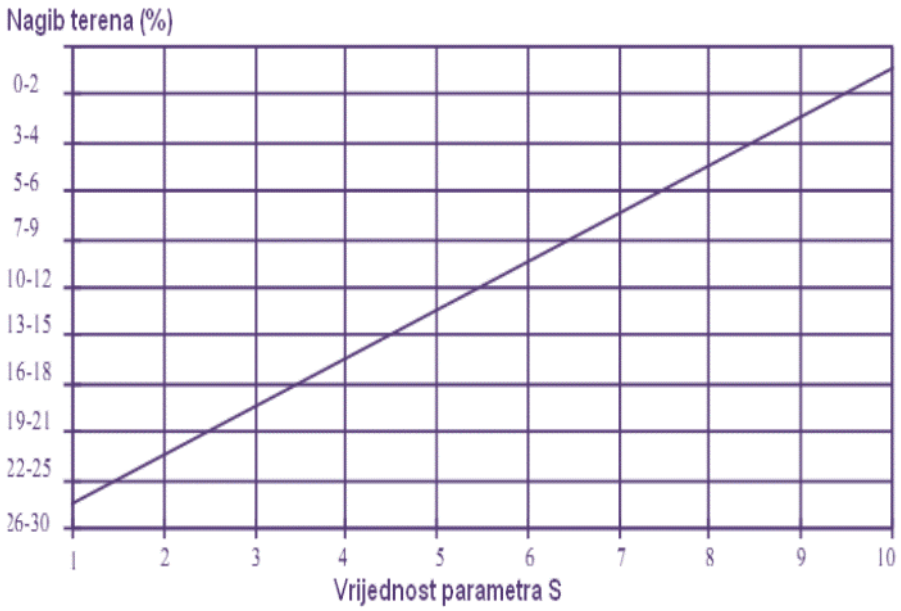



Slika 2.11. Raspon vrijednosti hidrauličke vodljivosti za najčešće vrste vodonosnika [6]

### 2.2.7. Hidrološka uloga nagiba terena (parametar S)

Parametar S prikazuje hidrogeološku ulogu nagiba terena. Nagib terena važan je faktor u procjeni ranjivosti jer uvjetuje zadržavanje otjecanja na površini, a samim time i

mogućnost procjeđivanja onečišćivača u zasićenu zonu vodonosnika. Na slici 2.12. prikazan je dijagram određivanja parametra S - utjecaj nagiba terena.




Slika 2.12. dijagram određivanja parametra S - utjecaj nagiba terena [6]

Iz dijagrama na slici 2.12. vidljivo je kako vrijednost parametra S raste sa smanjenjem nagiba terena. Dakle, kada je nagib terena manji (zaravnjen teren), manja je mogućnost rasprostiranja (raspršenja) onečišćenja uslijed procesa pod utjecajem gravitacije. Nagib terena nam također može biti pokazatelj tipa tla, stoga indirektno određuje kapacitet zadržavanja onečišćenja.

## 2.3. Težinski koeficijenti SINTACS metode

Nakon što se odrede vrijednosti svih sedam parametara, kako bi se moglo pristupiti procjeni konačnog stupnja ranjivosti potrebno je odrediti sustav težinskih koeficijenata. Težinski koeficijenti definiraju se za svaki pojedini parametar, kako bi se procijenjeni parametri što je moguće bolje prilagodili ukupnim hidrogeološkim značajkama vodonosnika i antropogenom opterećenju na površini promatranog područja. Težinski faktori prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Težinski koeficijenti SINTACS metode [6]

| Parametar | Normalni uvjeti | Veliko opterećenje | Procjeđivanje | Krš | Raspucale stijene |
|---|---|---|---|---|---|
| S | 5 | 5 | 4 | 2 | 3 |
| I | 4 | 5 | 4 | 5 | 3 |
| N | 5 | 4 | 4 | 1 | 3 |
| T | 4 | 5 | 2 | 3 | 4 |
| A | 3 | 3 | 5 | 5 | 4 |
| C | 3 | 2 | 5 | 5 | 5 |
| S | 2 | 2 | 2 | 5 | 4 |

Scenariji "normalni uvjeti" i "veliko opterećenje" odnose se na nizinska područja s debelim slojem tla i plitkim vodnim licem. U scenariju „normalni uvjeti“ radi se o relativno prirodnim uvjetima u područjima s malom gustoćom naseljenosti, gdje je prisutna ekstenzivna poljoprivreda u kojoj se ne upotrebljavaju agresivno poljoprivredna sredstva, dok se u drugom slučaju „veliko opterećenje“ radi o područjima gdje je intenzivna poljoprivreda u kojoj se koriste agrokemijska sredstva te se prakticira navodnjavanje, velikim naseljima i industrijskim kompleksima i sa stalnim opterećenjem otpadnih voda. Slučaj "procjeđivanje" odnosi se na područja gdje je dubina do podzemne vode zanemariva (močvare ili poplavljena područja). Slučaj „krš“ odnosi se na tip reljefa koji se razvija na tlu sastavljenom od topljivih stijena (najčešće kalcijevog karbonata ($CaCO_3$) ili magnezijevog karbonata ($MgCO_3$) dok se slučaj „raspucale stijene“ odnosi na područja čvrstih stijena čija je relativna propusnost povezana s indeksom loma i pretežno je ograničen samo na površinski dio krša [6].

SINTACS indeks ranjivosti SIVI (*eng. SINTACS Intrinsic Vulnerability Indeks*) izračuna se preko jednadžbe (2.3.):

$$I_{SINTACS} = \sum_{i=1}^{7} P_i \cdot W_i \tag{2.3.}$$

Gdje:

$P_i$ → predstavlja parametre SINTACS metode

$W_i$ → težinski koeficijenti

Raspon vrijednosti SINTACS indeksa ranjivosti je od 26 do 260. Ranjivost se prikazuje na karti različitim bojama u šest klasa prema tablici 1.2.

Tablica 1.2. Klase ranjivosti SINTACS metode [12]

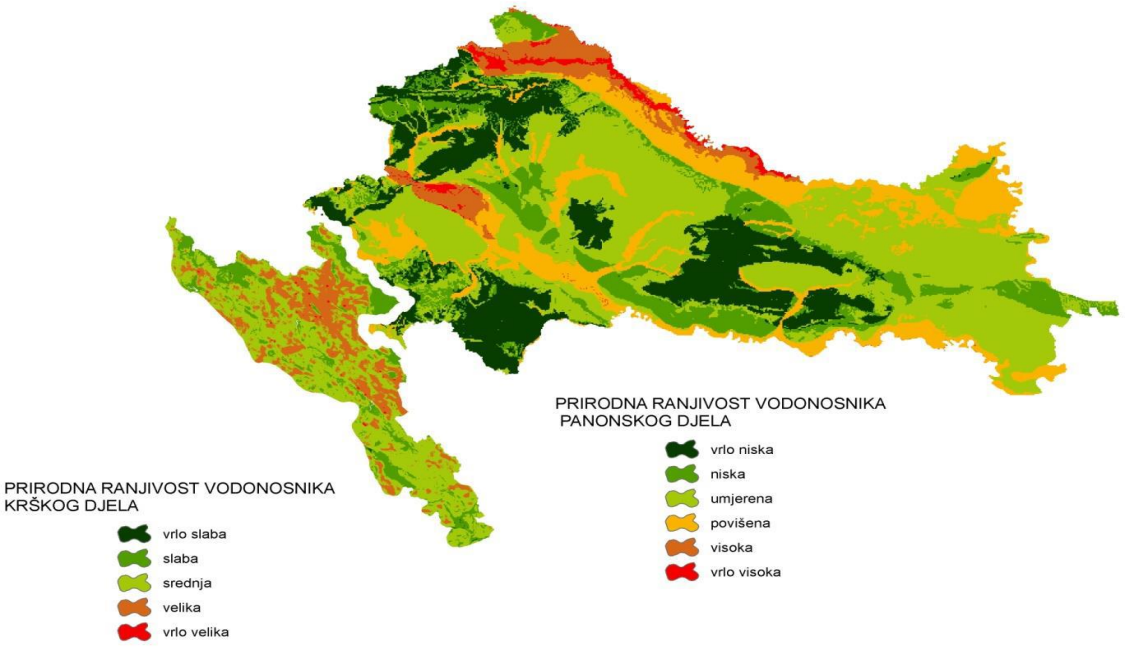
| $I_{SINTACS}$ | Klasa ranjivosti |
|---|---|
| 26 – 80 | Vrlo niska |
| > 80 – 105 | Niska |
| > 105 – 140 | Srednja |
| > 140 – 186 | Velika |
| > 186 – 210 | Vrlo velika |
| > 210 – 260 | Ekstremna |

# 3. Opis Varaždinskog vodonosnika

Varaždinski vodonosnik nalazi se na krajnjem zapadnom dijelu heterogenih kvartarnih naslaga dravske doline te predstavlja rubni dio vodonosnog sustava u kojem je prirodni režim podzemnih voda poremećen izgradnjom protočnih hidroenergetskih objekata kao i eksploatacijom podzemnih voda za vodoopskrbu [14]. Varaždinski vodonosnik nalazi se u nizinskom području koje je omeđeno sa sjevera brežuljcima gornjeg Međimurja, na zapadu Viničkim vinogorjem, a na jugu sjevernim obroncima Varaždinsko-topličkog gorja. Svako onečišćenje na ovom prostoru, bilo na tlu ili u vodotocima na kraju

završava u podzemnoj vodi. Brdski predjeli Ivančice i Ravne gore također su resursi podzemne pitke vode koja je sadržana u karbonatnim masivima. Ivanščica je izgrađena od kvartarnih stijena sekundarne pukotinske poroznosti s zahvaćenim izvorima većeg kapaciteta koji nikada ne presuše (Bistrica, Beli zdenci, Žgano vino i Šumi). Za vodoopskrbu Županije najviše se koriste podzemne vode dravske doline, a manjim dijelom izvorišta vodonosnika Ivančice i Ravne gore. Što se tiče količine, zalihe vode zadovoljavaju trenutne i buduće potrebe, no kakvoća vode se ne može svugdje smatrati zadovoljavajućom i jednakom [15]. Opće stanje kakvoće podzemne vode u dravskom vodonosniku uvjetovano je načinom sedimentacije naslaga, te debljinom slabo propusnih pokrovnih naslaga iznad vodonosnika. Na krajnjem zapadu (područje varaždinskog vodonosnika) vodonosnik je pokriven razmjerno tankim prašinasto-glinovitim naslagama u pravilu manje od 5 m (a često je to i samo humus), a što za posljedicu ima veliku prirodnu ranjivost vodonosnika. Zbog relativno tankog pokrovnog tla u prvome vodonosnom sloju, na pojedinim područjima, povećana je koncentracija nitrata, kao posljedica antropogenog utjecaja. Podzemna voda iz drugog vodonosnika relativno je dobre kakvoće [16].

U planu upravljanja vodnim područjima za razdoblje 2016. – 2021. varaždinsko područje okarakterizirano je kao područje koje se gotovo u cijelosti nalazi u kategorijama vrlo visoke i visoke ranjivosti čak 94 % (Slika 3.1.) [17].

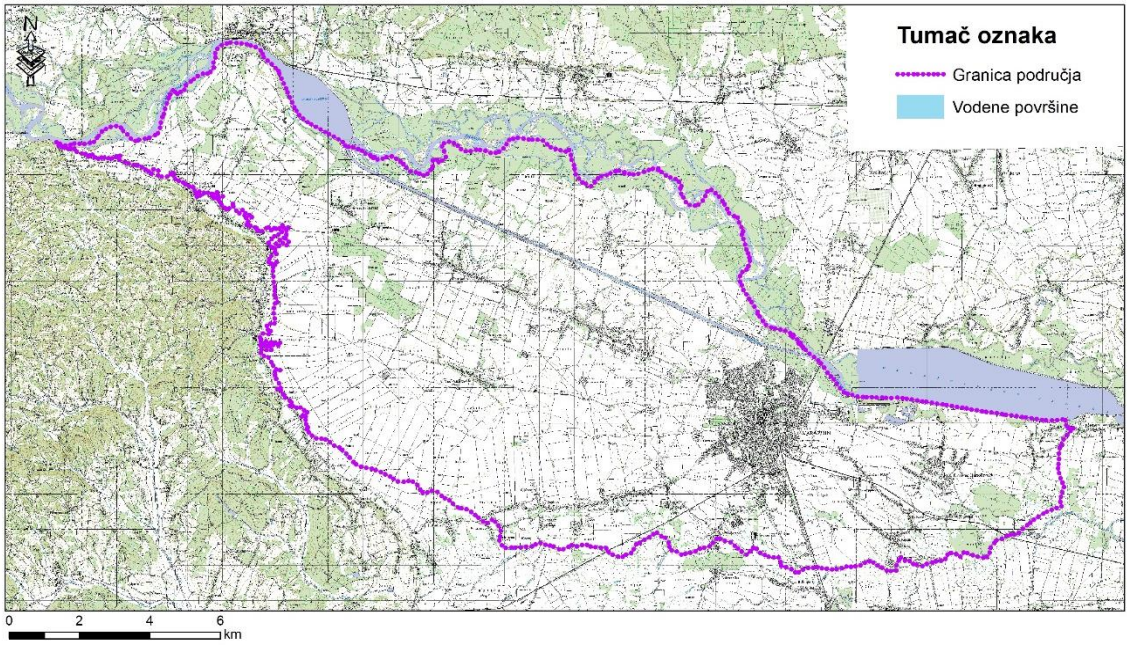


Slika 3.1. Karta prirodne ranjivosti vodonosnika vodnog područja rijeke Dunav [17]

## 3.1. Geografski smještaj

Varaždinski vodonosnik proteže se od Međimurskih Gorica na sjeveru do Ivanščice i Kalnika na jugu. Prema projektu „*Evidencija i gospodarenje podzemnim vodama Hrvatske*“ varaždinski vodonosnik administrativno se dijeli na sjeverni dio (Međimurje-ravničarski dio) i južni dio (Zapadna Podravina između Drave na sjeveru i obronaka Ivanščice i Kalnika na jugu). Zapadnu granicu Zapadne Podravine čini državna granica sa Slovenijom, a istočnu cesta Koprivnica-Legrad [7]. U radu je kao područje istraživanja uzeto područje III. zone sanitarne zaštite izvorišta Varaždin, Vinokovščak i Bartolovec (Slika 3.2.).

Podzemna voda varaždinskog vodonosnika crpi se za potrebe vodoopskrbe na pet crpilišta koji se nalaze na području Varaždinske i Međimurske županije. Na varaždinskom području to su crpilišta Varaždin, Bartolovec i Vinokovščak, a na području Međimurja crpilišta Nedelišće i Prelog [18].




Slika 3.2. Varaždinski vodonosnik i granica III. zone sanitarne zaštite izvorišta Varaždin

## 3.2. Geološke značajke

Varaždinski vodonosnik u geotektonskom smislu pripada Murskoj potolini, zapadnom rubnom dijelu Panonskog bazena. Granicu prema Dravskoj potolini čini Legradski prag kao nastavak Kalnika. Murska potolina sastoji se od dvije tektonske jedinice Međimurskih gorica (antiklinorij) i Varaždinske depresije [7]. Tektonska jedinica Međimurske gorice obuhvaća gotovo čitavo područje između rijeke Mure i Drave, i najveća je tektonska cjelina u Međimurskoj županiji [19]. Tektonska jedinica Varaždinska depresija ima alpski pravac pružanja istok-zapad. Istočnu granicu čini Kalnik-Legradski prag dok je zapadna granica antiklinala Ravne Gore i Ormoško-Selnička antiklinala. Na jugu se nalazi južni rubni rasjed Murske potoline, a na sjeveru Čakovečki rasjed [7].

Varaždinski vodonosnik izgrađen je od šljunka i pijeska kvartarne starosti. Najstarije naslage na površini nalaze se u južnom prigorju, oko Vinice i Voće. To su mezozojsko-trijaski pješčenjaci, šejlovi, lapori, vapnenci, dolomiti i dolomitne breče. Izravno na njima taložene su miocenske naslage od kojih pretežito konglomerati, pješčenjaci, vapnenci, lapori, laporoviti vapnenci, mjestimice tufovi i vulkanske breče. Konkordantno se talože naslage ponta, u dubljim intervalima lapori s proslojcima pješčenjaka i pijeska, a u plićim pijesci i pješčenjaci. Tijekom kvartara taloženje se odvija u močvarnoj sredini uz stalno donošenje fluvijalnog materijala [20].

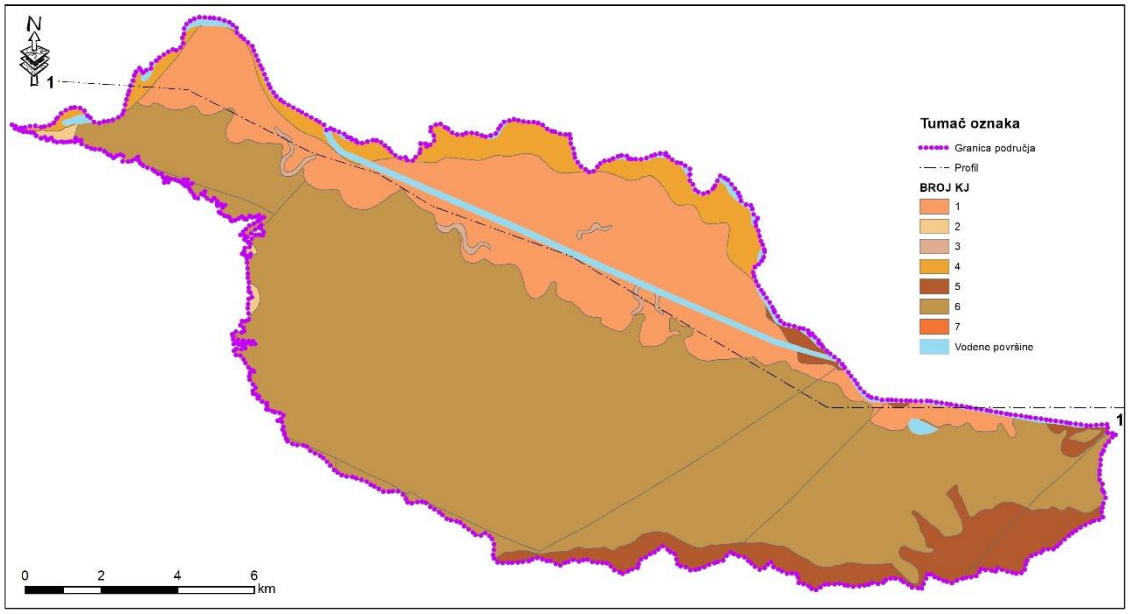
Varaždinski vodonosnik čine šljunci i pijesci srednje i gornjopleistocenske, te holocenske starosti. Njegova debljina je najmanja između Križovljana i Ormoža. Uz sjeverni rubni rasjed (kod Ormoškog mosta) debljina je 5 m, a prema jugu raste do preko 15 m uz južni rub. Prema istoku debljina se postupno povećava te se kod Svibovca (HE Varaždin) kreće oko 30 m, kod Nedelišća oko 40 m, sjeverozapadno od Varaždina iznosi oko 60 m, jugoistočno od HE Čakovec iznosi 112 m, a južno od Preloga 150 m. Zatim se debljina nizvodno od Svete Marije (HE Dubrava) smanjuje na 60 m, kod Legradskog praga iznosi 50 m, a uz sjeverni rub kod današnjeg korita Legrada iznosi 14 m dok je kod Đelekovca 12 m [7].

Što se tiče granulometrije vodonosnika, dominiraju valutice šljunka s primjesom pijeska. U profilu varaždinskog vodonosnika, na većem dijelu područja, pojavljuje se proslojak sitnijeg granulometrijskog sastava tj. praha, gline, prašinastog pijeska i

mjestimice treseta koji dijeli vodonosnik u dva sloja, gornji vodonosnik i donji vodonosnik. Kod crpilišta Varaždin taj je proslojak na dubini od oko 40 m, kod crpilišta Bartolovec na oko 52 m, a kod crpilišta Vinokovščak na oko 25 m dubine [7].

Završetak ciklusa sedimentacije obilježava taloženje praha, gline i prašinastog pijeska koji su zapravo krovina vodonosnika čija debljina varira i uglavnom je manja od 0,5 m. Na području crpilišta Bartolovec debljina pokrovnih naslaga kreće se od 0,3 do 2 m, na području crpilišta Varaždin od 0,0 do 1,6 m, a na području crpilišta Vinokovščak od 0,0 do 2,0 m. Čest je i slučaj izostanka krovine pa se tako u tankom humusnom sloju pojavljuju valutice šljunka. Veće debljine pokrovnih naslaga lokalnog su karaktera i ne prelaze 5 m iako se kao izuzetak navode jugoistočni rubni dijelovi gdje debljina pokrovnih naslaga prelazi i 10 m [7].

Na slici 3.3. prikazana je geološka karta područja Varaždinskog vodonosnika s označenom linijom litološkog profila prikazanog na slici 3.4., a u tablici 2. opisane su litostratigrafske jedinice geološke građe.



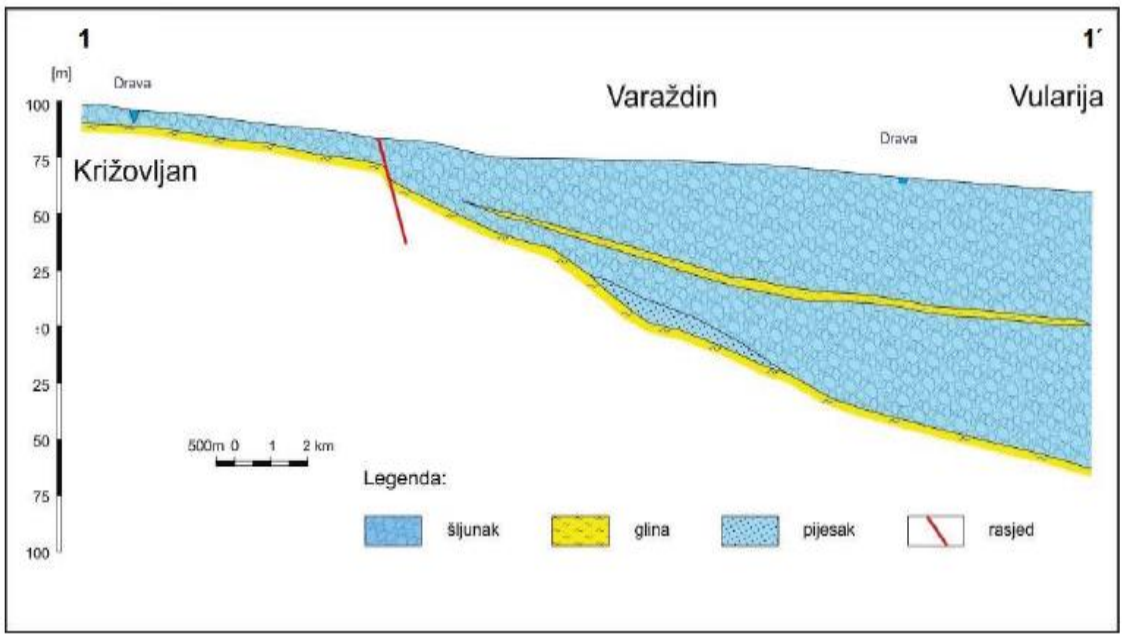

Slika 3.3. Geološka karta područja Varaždinskog vodonosnika izrađena u GIS-u

Tablica 2. Opis litostratigrafskih jedinica geološke građe [21, 22]

| BROJ KARTOGRAFSKE JEDINICE (u skladu sa slikom 3.2.) | OZNAKA | OPIS | STAROST | DEBLJINA | SASTAV | ZRNO |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | $a_1$ | Aluvij prve dravske terase: šljunci i pijesci | Kvartar | Visina terasnog odsjeka opada u smjeru toka vode kod Petrijanca 3-4m, a kod Zamlake svega 0,5 m visine | Prevladavaju valutice metamorfnih i eruptivnih stijena promjera 2-5 cm iako ima i do 15 cm, šljunkoviti pijesci sadrže 45% šljunka | Pijesci su srednjezrnati, dobro sortirani i homogenog sastava. Siltni pijesci sadrže 20% silta i srednje su sortiranosti |
| 2 | al | Aluvij (aluvijalni nanosi) | Kvartar | | Glinovito-siltni i pješčani materijali, pomiješani s valuticama šljunka | |
| 3 | am | Facijes mrtvaja: gline i organske gline | Kvartar | 1-2 m | Gline organskog podrijetla | |
| 4 | a,ap | Povodanjski facijes i facijes korita: šljunci i pijesci | Kvartar | | Sastav je sličan $a_1$ i $a_2$ | |
| 5 | a | Aluvij recentnih tokova | Kvartar | | Sastav i veličina valutica identična kao i za $a_1$ i $a_2$. Glavni sastojak je silt, a primjese pijeska iznose 14-42%, a gline 5-20% | |
| 6 | $a_2$ | Aluvij druge dravske terase: šljunci i pijesci | Kvartar | Isto kao kod $a_1$ | Isto kao kod $a_1$ | Isto kao kod $a_1$ |
| 7 | pr | Proluvij | Kvartar | Varira od 10-120 m | Najzastupljeniji je kvarc, muskovit i feldspati | |

## 3.3. Hidrogeološke značajke

Osnovna karakteristika Varaždinskog vodonosnika je visoka propusnost šljunaka te povećanje debljine naslaga od zapada prema istoku [20]. Kao što je ranije navedeno Varaždinski vodonosnik čine dva vodonosna sloja međusobno odijeljena slabopropusnim međuslojem (Slika 3.4.).




Slika 3.4. Shematski uzdužni litološki profil duž varaždinskog vodonosnika trasom Križovljan-Varaždin-Vularija [14]

### 3.3.1. Prvi vodonosni sloj

U prvom vodonosnom sloju dominiraju šljunkovito-pjeskovite naslage koje na području crpilišta Vinokovščak zaliježu do dubine od 27 m. Idući prema zapadu taj se sloj naslaga istanjuje te 2 km zapadno od crpilišta Vinokovščak zaliježe do dubine 20 m, a prema jugoistoku ide na preko 32 m dubine. Na području Varaždinskog crpilišta prvi vodonosni sloj zaliježe do dubine 42 m. Prema zapadu sloj istanjuje i na području Nove Vesi Petrijanečke zaliježe do dubine 18,3 m, a kod Šijanca do 19,7 m. Na području Bartolovca prvi vodonosni sloj zaliježe do 52 m dubine. Vrijednost hidrauličke vodljivosti prvog sloja na području Bartolovca iznosi 300 m/dan [7].

### 3.3.2. Slabopropusni međusloj

Slabopropusni međusloj sastavljen je od gline, praha i prašinastog pijeska, dubina zalijeganja ovog sloja kreće se oko 20 m kraj Svibovca dok prema istoku postupno tone pa je na području Varaždina na 42 do 55 m dubine. Debljina mu je oko 5 m, a na

području Petrijanca ovaj sloj uklinjuje. Radi se o značajnom diskontinuitetu uvjeta taloženja, polupropusnom međusloju, koji dijeli vodonosnik na prvi i drugi vodonosni sloj [14]. Hidraulička vodljivost određivana u edometru na uzorcima uzetim iz bušotina za potrebe HE Čakovec i HE Dubrava iznosi $10^{-4}$ do $10^{-6}$ m/dan [7].

### 3.3.3. Drugi vodonosni sloj

Drugi vodonosni sloj sastavljen je kao i prvi vodonosni sloj od šljunaka i pijesaka no ovdje prevladava više sitnozrnatijeg materijala u odnosu na prvi vodonosni sloj. Dubina zalijeganja sloja na području Bartolovca iznosi od 55 m do preko 100 m, dok je na području crpilišta Varaždin na dubini od 46 do 64 m, a zapadno od crpilišta isklinjava. 2 km zapadno od crpilišta Varaždin debljina drugog sloja je 1,5 m. Na području crpilišta Vinokovščak drugi vodonosni sloj se nalazi na dubini 22 do 28 m u sjeverozapadnom dijelu crpilišta dok se u jugoistočnom dijelu crpilišta nalazi na dubini 35 do 50 m. Prosječna vrijednost hidrauličke vodljivosti određena na temelju pokusnog crpljenja je na području Bartolovca 140 m/dan, transmisivnost 6200 $m^2$/dan, a koeficijent uskladištenja $2{,}2x10^{-4}$. Hidraulička vodljivost drugog sloja na području crpilišta Varaždin je 90 m/dan, transmisivnost 1440 $m^2$/dan, a uskladištenje $1{,}9x10^{-5}$. Na području crpilišta Vinokovščak sva tri zdenca zahvaćaju oba vodonosnika. Prosječna hidraulička vodljivost oba vodonosnika je 55 m/dan [7].

### 3.3.4. Krovina vodonosnog sustava

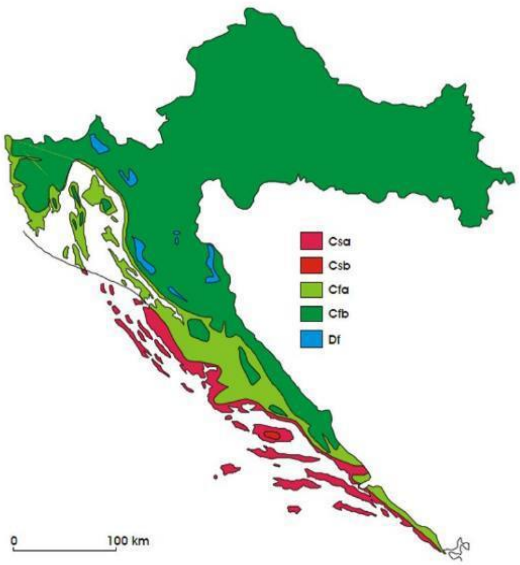
Krovinu čini humus sa prašinasto-glinovito-pjeskovitim naslagama čija debljina se na području crpilišta Bartolovec kreće od 0,3 do 2 m, na području crpilišta Varaždin od 0,0 do 1,6 m, a na području crpilišta Vinokovščak od 0,0 do 2,0 m [7].

### 3.3.5. Podina vodonosnog sustava

Podina vodonosnog sustava se sastoji od gline, praha i lapora. Hidraulička vodljivost na lokaciji HE Dubrava određivana na uzorcima u edometru iznosi $10^{-6}$ d0 $10^{-7}$ m/dan [7].

## 3.4. Klimatološke značajke

Klimu nekog područja uz prisutne atmosferske cirkulacije i geografski položaj definira i niz čimbenika koji su lokalnog karaktera kao npr. topografija, blizina voda, količina biljnog pokrova itd. Prema Köppenovoj klasifikaciji klime prostor varaždinskog vodonosnika pripada kontinentalnoj klimi s oznakom Cfb (Slika 3.5.) što znači da se srednja temperatura prosječno najhladnijeg mjeseca kreće između -3°C i 18°C dok srednja mjesečna temperatura najtoplijeg mjeseca ne prelazi 22°C (ako je barem 4 mjeseca temperatura viša od 10°C). Oborina takvog područja jednoliko je raspodijeljena kroz cijelu godinu [23].

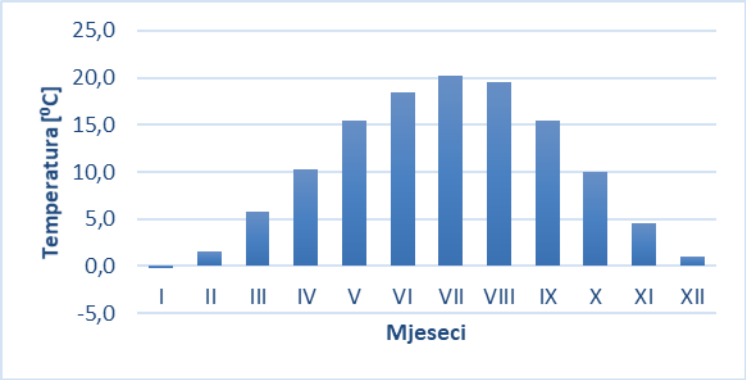



Slika 3.5. Geografska raspodjela klimatskih tipova po W. Köppenu u Hrvatskoj u standardnom razdoblju 1961.-1990. [23]

Cfa, umjereno topla vlažna klima s vrućim ljetom; Cfb, umjerena topla vlažna klima s toplim ljetom; Csa, sredozemna klima s vrućim ljetom; Csb, sredozemna klima s toplim ljetom; Df, vlažna borealna klima

### 3.4.1. Temperatura

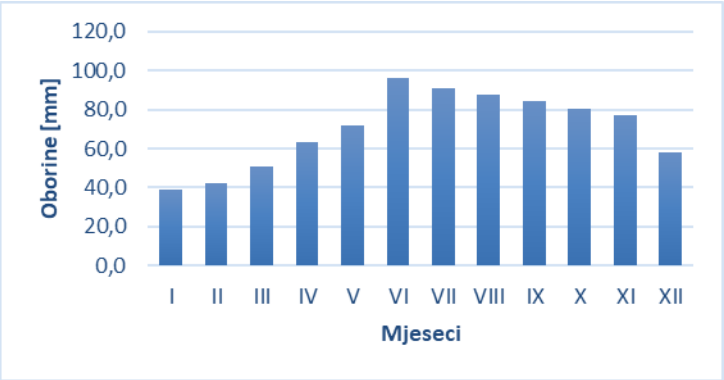
Prosječna višegodišnja temperatura zraka na klimatološkoj postaji Varaždin za razdoblje 1971.-2000. god. iznosila je 10,2 °C, prosječna maksimalna temperatura zraka za isto razdoblje iznosila je 37,9 °C dok je prosječna minimalna temperatura zraka iznosila -26,4 °C [24]. Na dijagramu 1. prikazan je godišnji hod temperature zraka u Varaždinu (razdoblje 1971-2000. god.).




Dijagram 1. Godišnji hod temperature zraka u Varaždinu (razdoblje 1971-2000. god.) [24]

### 3.4.2. Oborine

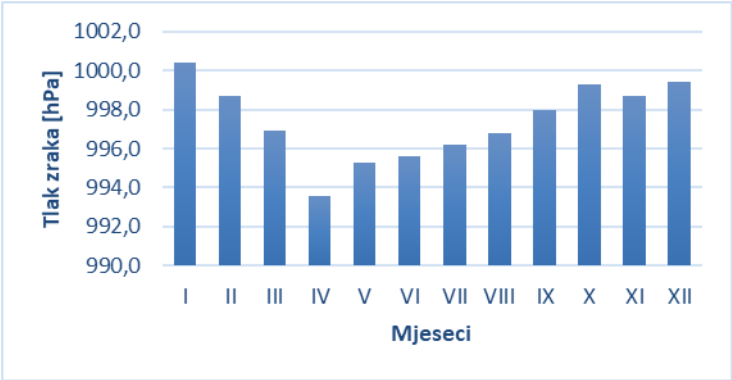
Prosjek visina godišnjih oborina u Varaždinu za razdoblje 1971-2000. iznosi 843,1 mm. Najkišniji mjeseci su lipanj i srpanj, a mjeseci s najmanje oborina su siječanj, veljača i ožujak [24]. Na dijagramu 2. prikazane su prosječne mjesečne sume oborina u Varaždinu (1971-2000. god.).




Dijagram 2. Prosječne mjesečne sume oborina u Varaždinu (1971-2000. god.) [24]

### 3.4.3. Tlak zraka

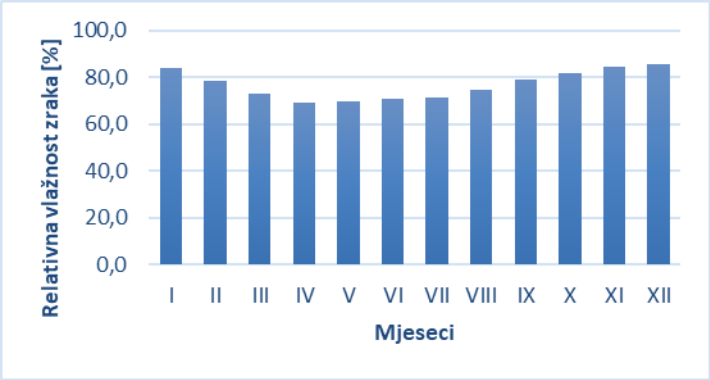
Prosječna višegodišnja vrijednost tlaka zraka na hidrometeorološkoj postaji Varaždin u razdoblju 1971-2000. god. iznosi 997,4 hPa [24]. Na dijagramu 3. prikazani su mjesečni prosjeci tlaka zraka u Varaždinu u razdoblju 1971-2000. god..




Dijagram 3. Mjesečni prosjeci tlaka zraka u Varaždinu u razdoblju 1971-2000. god. [24]

### 3.4.4. Relativna vlažnost zraka

Prosječne mjesečne relativne vlažnosti zraka u Varaždinu u razdoblju 1971-2000. god. navedene su u dijagramu 4. Prosječna višegodišnja relativna vlažnost zraka u navedenom razdoblju iznosi 76,9 % [24].




Dijagram 4. Prosječne mjesečne relativne vlažnosti zraka u Varaždinu u razdoblju 1971-2000. god. [24]

## 3.5. Kakvoća vode

Kvaliteta vode za piće svakog vodocrpilišta prati se prema Godišnjem planu monitoringa izvorišta vode za piće namijenjenih javnoj vodoopskrbi u Republici Hrvatskoj. Prema Elaboratu o zaštitnim zonama izvorišta Varaždin, Bartolovec i Vinokovščak [7] kakvoća podzemne vode ispitivana je prema Pravilniku o zdravstvenoj ispravnosti vode za piće (N.N. 47/08). Prema tom Pravilniku kakvoća se prati preko osnovnih („A“ analiza), proširenih („B“ analiza) i periodičkih opsežnih („C“ analiza) kemijskih analiza. Analize su rađene na uzorcima vode koji su uzimani iz zdenaca vodoopskrbnog sustava regionalnog vodovoda *Varaždin* te piezometara u priljevnim područjima crpilišta Varaždin, Bartolovec i Vinokovščak [7]. Iako je danas na snazi Pravilnik o parametrima sukladnosti i metodama analize vode za ljudsku potrošnju (NN 125/13) koji ne propisuje A, B i C analizu, tumačenje je napravljeno na postojećim podacima.

Na temelju rezultata tih analiza glavni problem u kakvoći vode Varaždinskog vodonosnika predstavljaju povišene koncentracije nitrata. Od sva tri spomenuta crpilišta najkritičnije je na crpilištu Varaždin gdje je koncentracija nitrata toliko povećana da je već nekoliko desetljeća prekoračena maksimalno dopuštena koncentracija (MDK), iako je u donjem vodonosnom sloju znatno niža, ali ipak daleko iznad prirodnih vrijednosti. Koncentracija nitrata gornjeg vodonosnog sloja na crpilištu Bartolovec iznosi 16 mg/L $NO_3^-$ dok u donjem sloju vrijednost koncentracije nitrata iznosi 10 mg/L $NO_3^-$. Na području crpilišta Vinokovščak glineni proslojak isklinjava pa nema podjele na gornji i donji vodonosni sloj. Rezultati praćenja koncentracija nitrata u razdoblju 2000.-2006. god. pokazuju da vrijednosti u zdencima nisu prelazile 35 mg/L $NO_3^-$, iako se primjećuje postupan rast kroz 2004. i 2005. god. vrijednosti do 40 mg/L $NO_3^-$ [27].

Iz svega navedenog zaključuje se da je gornji vodonosni sloj izloženiji onečišćenju s površine dok donji vodonosni sloj do neke mjere „štiti“ glineni proslojak. Dosadašnja istraživanja pokazala su da postoji problematika onečišćenja podzemnih voda ovoga područja te je važno tome posvetiti dodatnu pažnju. Procjene prirodne ranjivosti rade se upravo zato da bi se kao dodatnim alatom indirektno provjerilo gdje su slabe točke vodonosnog sustava kako bi se na njih usmjerila dodatna pažnja u smislu adekvatne zaštite i daljnjeg prostornog planiranja.

# 4. Izrada karte prirodne ranjivosti SINTACS metodom za područje varaždinskog vodonosnika

## 4.1. Priprema podataka

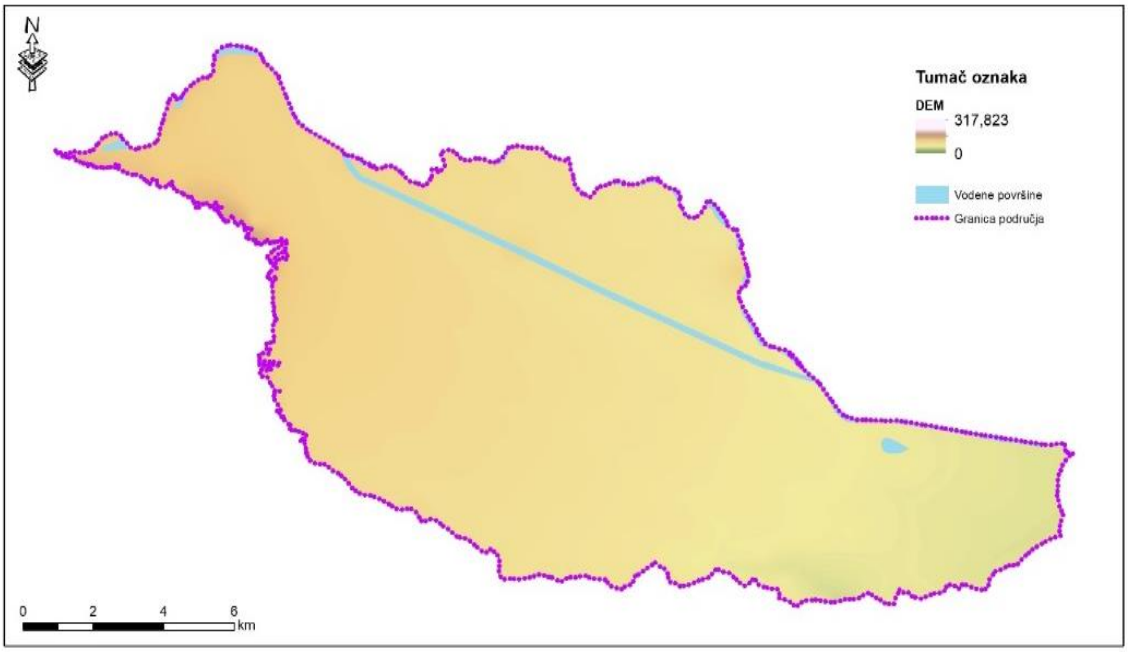
Da bi mogli procijeniti ranjivost nekog područja najprije moramo prikupiti adekvatne i pouzdane ulazne podatke koje kasnije modeliramo i bodujemo u skladu s metodom. U ovom radu za izradu karte ranjivosti varaždinskog vodonosnika korišten je ESRI ArcGIS softver te je stoga bilo potrebno sve ulazne podatke koji nisu bili u digitalnom obliku konvertirati u digitalni zapis na način da se skenirane karte, slike itd. postave u odgovarajući koordinatni sustav i projekciju (georeferenciranje) te se korištenjem alata za editiranje podataka digitaliziraju. Nakon što su svi ulazni podaci digitalizirani

korišteni su alati za geoprocesiranje (alati izdvajanja, preklapanja, alati konverzije iz jednog geometrijskog oblika u drugi, konverzije rasterskih u vektorske podatke i obrnuto te alati prostornih analiza).

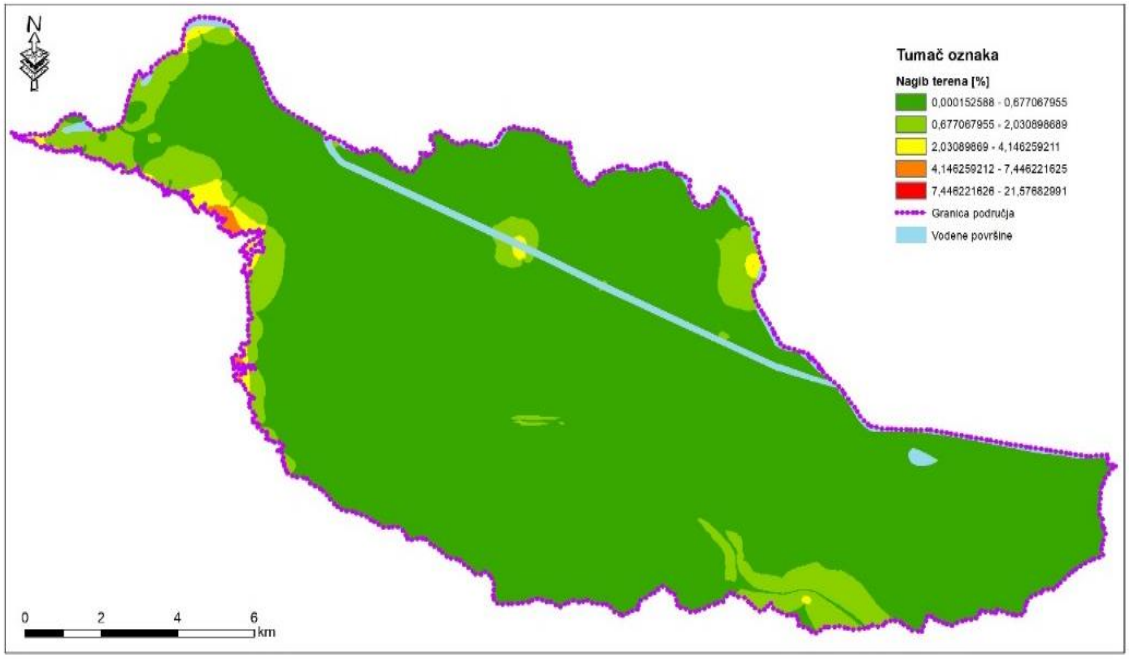
Podloge koje su korištene u ovom radu:

- Topografska podloga Republike Hrvatske M 1:25 000
- Osnovna geološka karta, listovi Varaždin [21] i Čakovec [22] M 1:100 000
- Hidropedološka karta Republike Hrvatske M 1:300 000 [25]
- Karta oborina Republike Hrvatske M 1:300 000 [24]

Topografska podloga korištena je za digitalizaciju kota iz čega je izrađen (naredba „*Topo to Raster"*) digitalni model reljefa (DMR) u „grid" formatu, raster veličine ćelija 25x25 metara (Slika 4.1.). Naredbom „*Slope"* je iz digitalnom modela terena izrađena karta nagiba terena (Slika 4.2.).



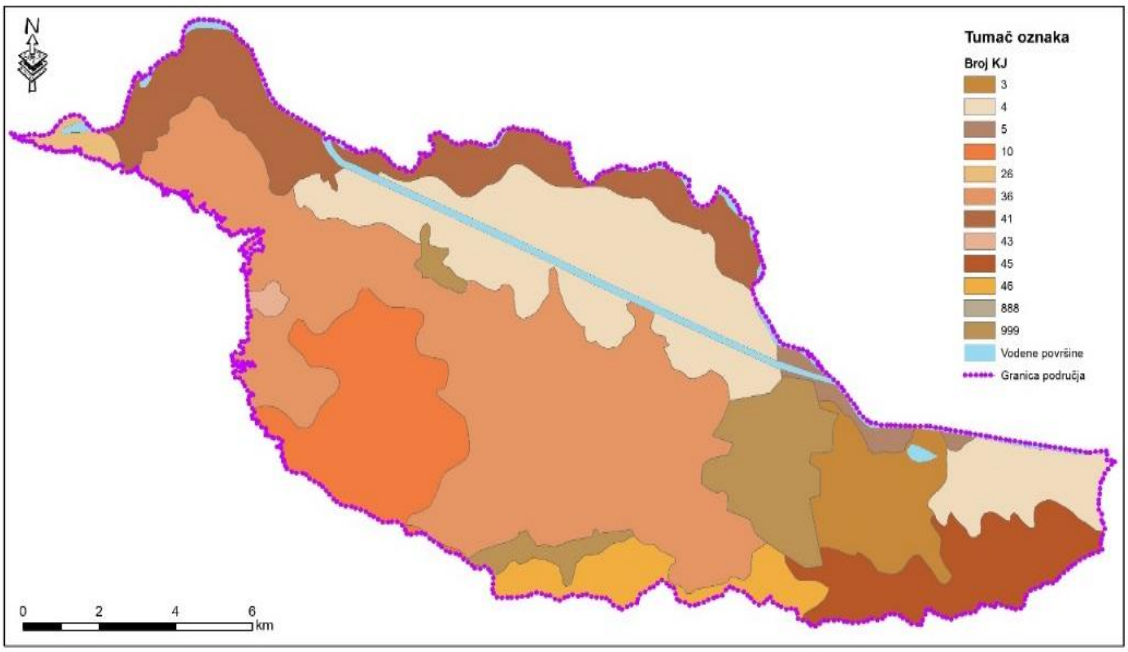

Slika 4.1. DMR raster




Slika 4.2. Karta nagiba terena

Osnovna geološka karta [21,22] digitalizirana je i korištena za izradu hidrogeološke karte. Podaci iz hidrogeološke karte o osnovnim hidrogeološkim jedinicama na području varaždinskog vodonosnika korišteni su kod parametara koji definiraju svojstva vodonosnika.

Hidropedološka karta Republike Hrvatske [25] korištena je za definiranje osnovnih svojstava tla (Tablica 3.) na istraživanom području potrebnih kod određivanja utjecaja tla na ranjivost vodonosnika čime je izrađena karta teksture tla (Slika 4.3.) koja je korištena zajedno za kartom oborina za određivanje parametra efektivne infiltracije.

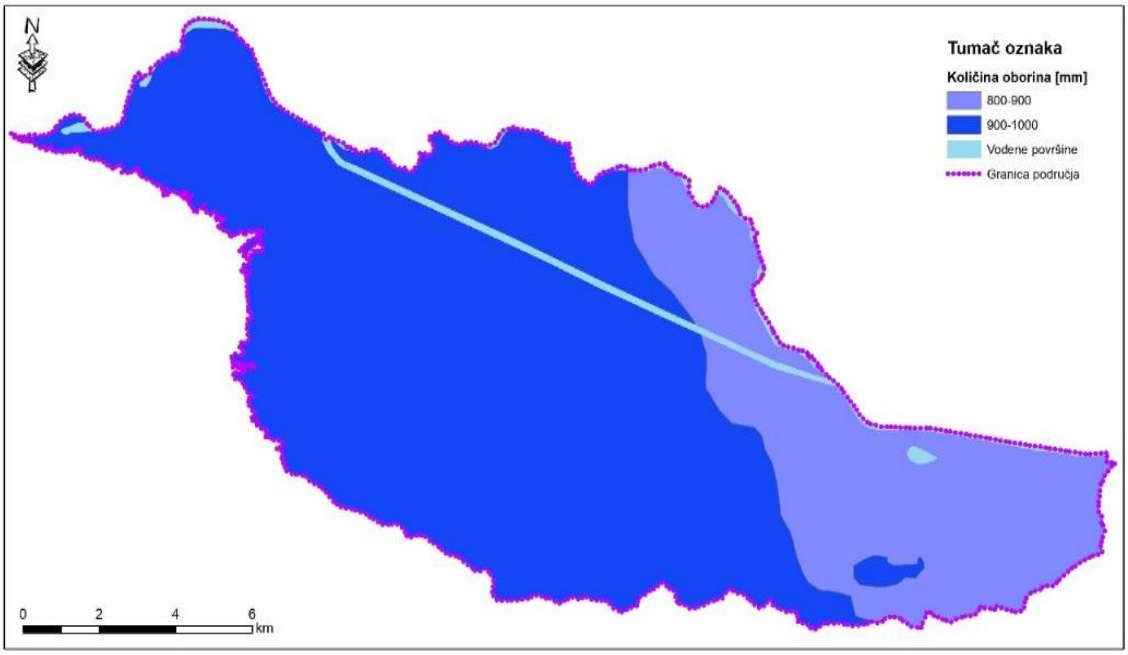



Slika 4.3. Karta teksture tla istraživanog područja

Tablica 3. Tekstura tla [25]

| BROJ KARTIRANE JEDINICE (U skladu sa slikom 4.2) | OPIS | DOMINANTNA DUBINA (cm) | KLASA DUBINE TLA |
|---|---|---|---|
| **3** | Ilovača | >200 | IV |
| **4** | Ilovača do dubine 50 cm, dalje pijesak | 80 | II |
| **5** | Ilovača do dubine 50 cm | 100 | II |
| **10** | Ilovača | >200 | IV |
| **26** | Ilovača | >200 | IV |
| **36** | Ilovača | 80 | II |
| **41** | Ilovača | >200 | IV |
| **43** | Ilovača | >200 | IV |
| **45** | Ilovača do dubine 100 cm, dalje pijesak | >200 | IV |
| **46** | Ilovača | >200 | IV |
| **888** | Vodotok | | |
| **999** | Urbano područje | | |

Karta srednjih godišnjih oborina na području varaždinskog vodonosnika (Slika 4.4.) dobivena je digitalizacijom postojeće karte oborina iz Klimatskog atlasa Republike Hrvatske [24].

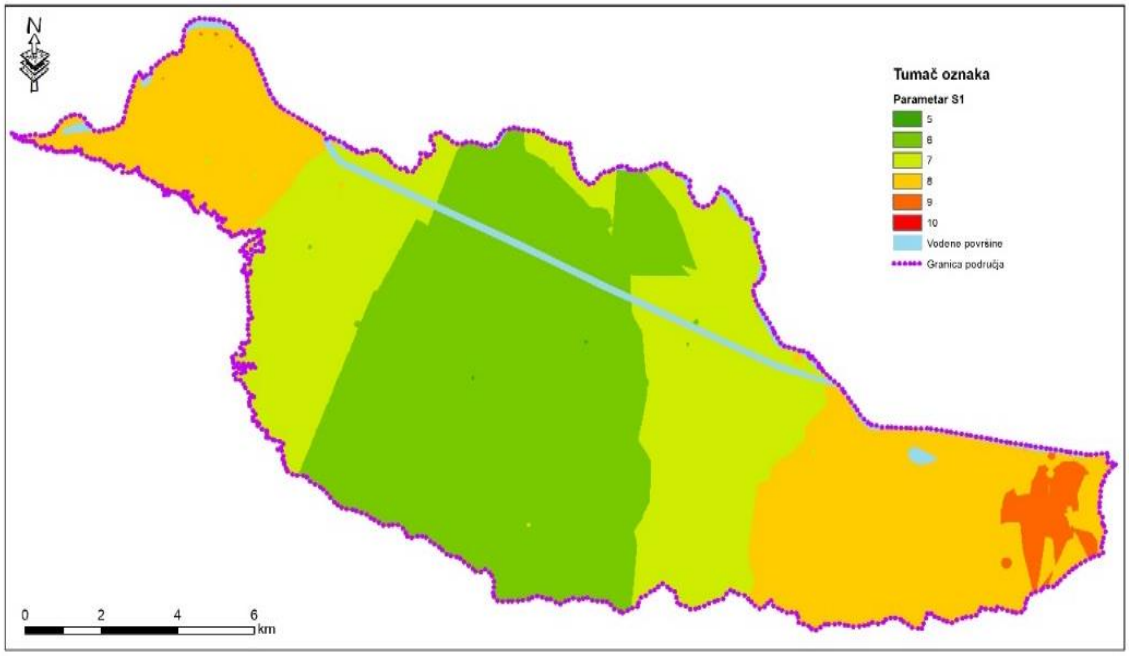



Slika 4.4. Karta srednjih godišnjih oborina

## 4.2. Ocjena prirodne ranjivosti vodonosnika SINTACS metodom

### 4.2.1. Parametar $S_1$

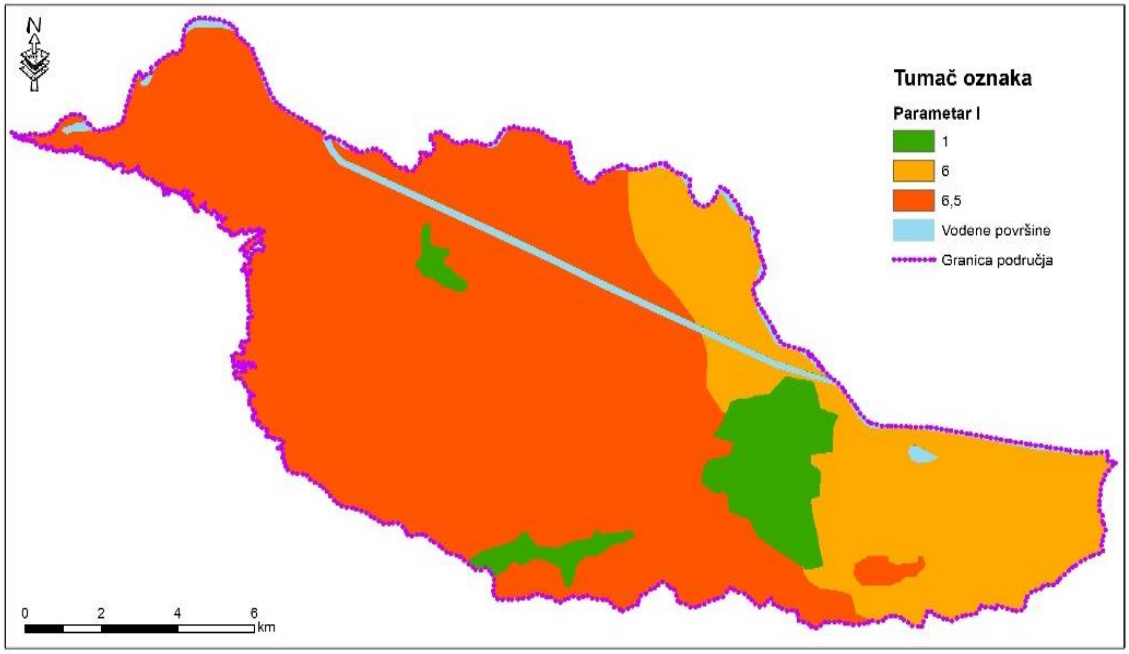
Iz postojećih podataka o apsolutnim kotama razina podzemne vode na području varaždinskog vodonosnika izmjerenih na piezometarskim bušotinama raspršenih po području, interpolacijom su dobivene vrijednosti razina podzemne vode za cijelo područje istraživanja. Raster dubina do podzemne vode dobiven je rasterskom analizom (Map algebra – alat „Raster Calculator“) na način da su od vrijednosti kota iz digitalnog modela reljefa oduzete kote razina podzemne vode. Dubine do podzemnih voda podijeljene su u 10 klasa prema zadanom dijagramu SINTACS metode (Slika 4.5.).




Slika 4.5. Prostorni raspored parametra $S_1$

### 4.2.2. Parametar I

Parametar I u SINTACS metodi kao što je ranije opisano označava utjecaj efektivne infiltracije na ranjivost samog vodonosnika. Kako bi se odredila i zadala vrijednost parametru I, korištene su prethodno pripremljena karta srednjih godišnjih oborina (Slika 4.4.) te karta teksture tla (Slika 4.3.) u čijoj je atributnoj tablici dodana vrijednost indeksa X (ksi). Indeks X određen je iz dijagrama metode (Slika 2.4.). Kao što je ranije opisano na području varaždinskog vodonosnika debljina tla svugdje je veća od 0,5 metara te evapotranspiraciju nije bilo potrebno uvrštavati i stoga je za izračun efektivne infiltracije korištena formula 2.2. Očitana vrijednost parametra X (slika 2.4.) za ilovaču iznosi 0,15, za urbana područja dodijeljena je vrijednost 0,01 jer se ona zbog gotovo potpuno asfaltiranih područja mogu smatrati uvjetno „nepropusna“ ali budući da ima i nešto travnatih površina dodijeljena je navedena vrijednost. Te vrijednosti zatim su pomnožene sa srednjom količinom godišnjih oborina područja varaždinskog vodonosnika i dobivenim vrijednostima, sukladno krivulji (Slika 2.5.), dodijeljene su vrijednosti parametra I (Slika 4.6.).




Slika 4.6. Prostorni raspored parametra I

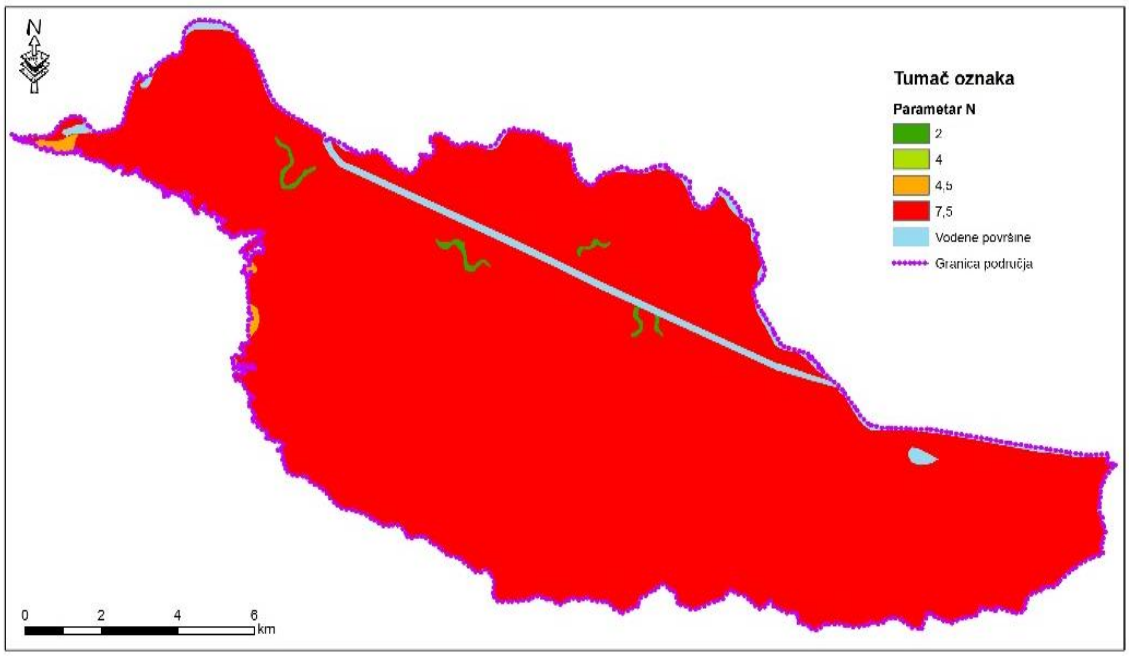
### 4.2.3. Parametar N

Parametar N u SINTACS metodi predstavlja kapacitet razrjeđivanja u nezasićenoj zoni vodonosnika. Debljina nezasićene zone dobivena je oduzimanjem rastera dubine do podzemne vode i dubine tla (površinskih naslaga). Na temelju litostratigrafskih jedinica geološke građe (Tablica 2.) odnosno stupanj njihove propusnosti te uz korištenje dijagrama ocjenjivanja („rejting dijagrama“) određen je parametar N (Tablica 4.). Na slici 4.7. prikazan je prostorni raspored parametra N.

Tablica 4. Vrijednost parametra N

| OZNAKA | OPIS | VRIJEDNOST<br>Prema dijagramu za parametar N |
|---|---|---|
| $a_1$ | Aluvij prve dravske terase: šljunci i pijesci | 7,5 |
| al | Aluvij<br>(aluvijalni nanosi) | 4,5 |
| am | Facijes mrtvaja: gline i organske gline | 2 |

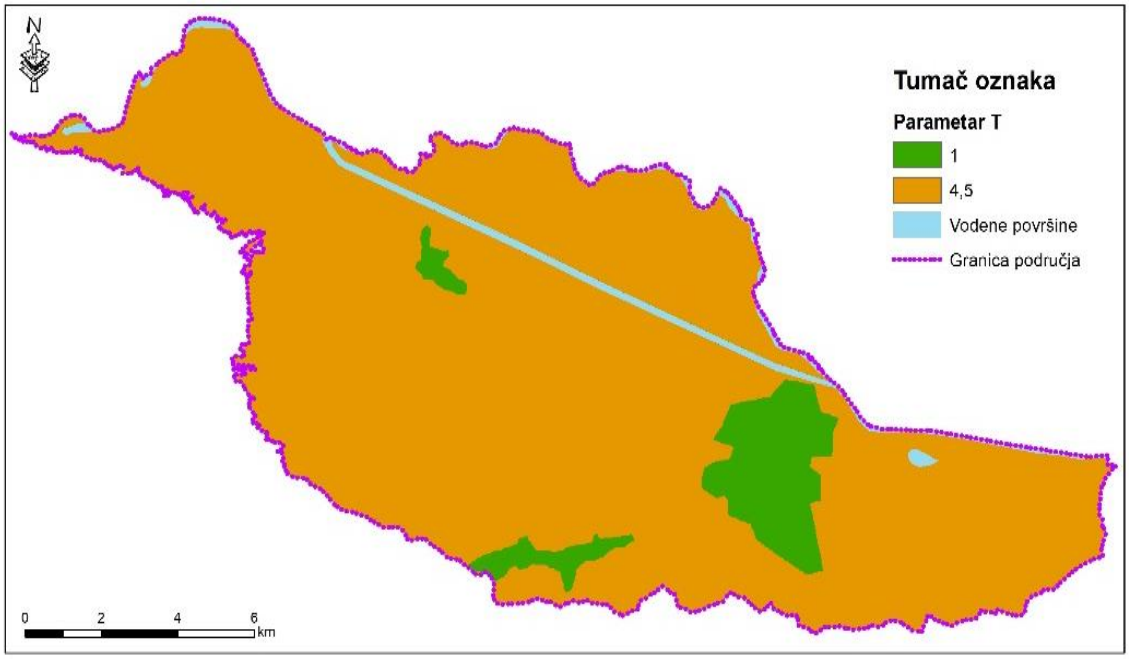
| | | |
|---|---|---|
| **a,ap** | Povodanjski facijes i facijes korita: šljunci i pijesci | 7,5 |
| **a** | Aluvij recentnih tokova | 7,5 |
| **$a_2$** | Aluvij druge dravske terase: šljunci i pijesci | 7,5 |
| **pr** | Proluvij | 4 |




Slika 4.7. Prostorni raspored parametra N

### 4.2.4. Parametar T

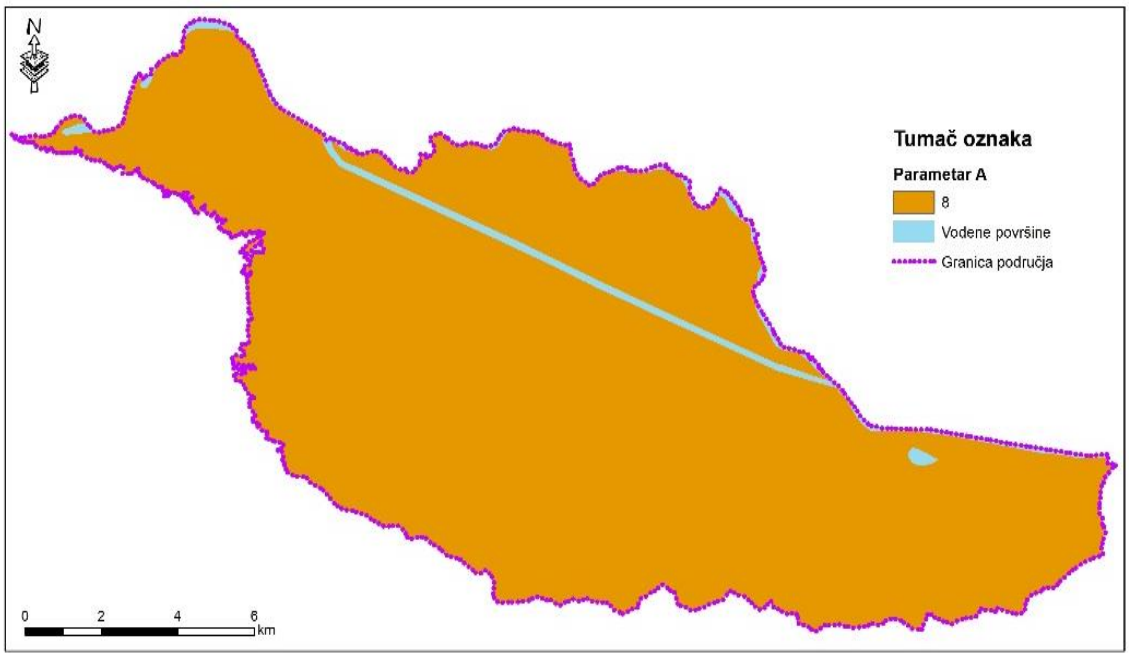
Parametar T u SINTACS metodi označava kapacitet tla i pokrovnih naslaga određenih na temelju hidropedološke karte [25]. Dijagram ocjenjivanja za određivanje parametra T (Slika 2.8.) vezan je isključivo za teksturu tla. Na hidropedološkoj karti izdvojene su jedinice dominantne debljine veće ili jednake 50 cm, jer se pokazalo da naslage manje debljine imaju gotovo zanemariv utjecaj na vodonosnik u obliku zadržavanja onečišćenja. Jedinicama ilovače dodijeljena je vrijednost 4,5, a urbanim područjima i vodotocima 1 jer se smatra da su urbana područja većinom asfaltirana, dok vodotoci nemaju pokrovnih naslaga. Na slici 4.8. prikazana je prostorna raspodjela parametra T.




Slika 4.8. Prostorni raspored parametra T

### 4.2.5. Parametar A

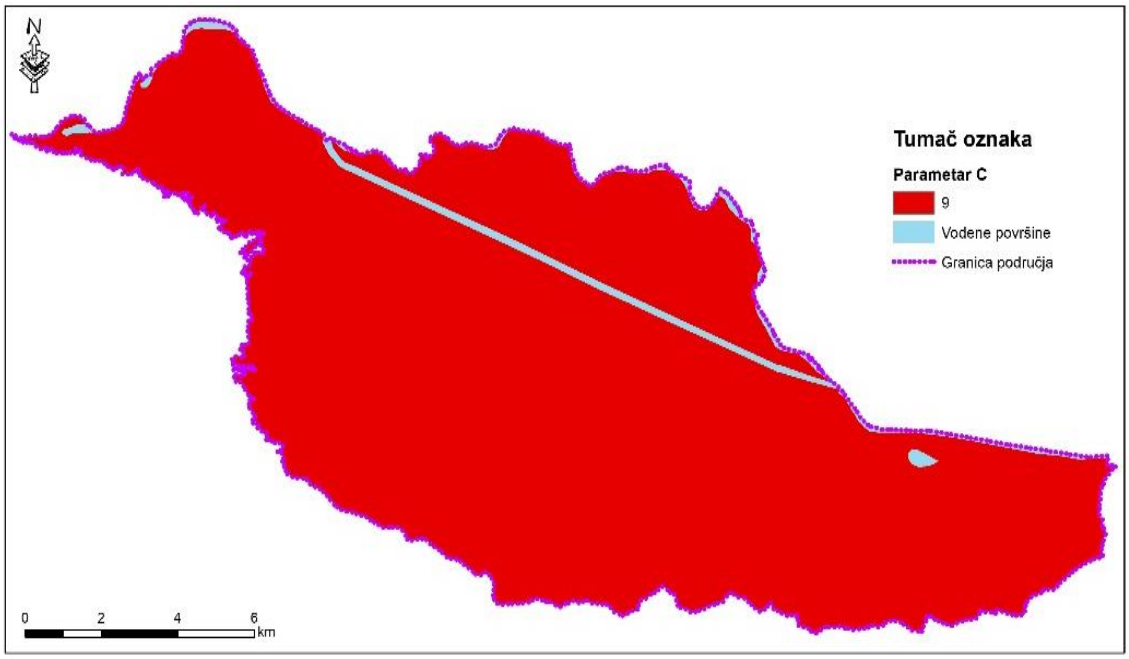
Parametar A u SINTACS metodi predstavlja hidrogeološka obilježja vodonosnika. Hidrogeološka obilježja saturiranog (zasićenog) dijela vodonosnika ovise o hidrogeološkim obilježjima stijena u kojima se isti nalazi. Varaždinski vodonosnik okarakteriziran je srednje do krupno zrnati aluvij te je na temelju dijagrama za određivanje vrijednosti parametra A (Slika 2.9.) stvoren konstantan raster vrijednosti 8 (Slika 4.9.).




Slika 4.9. Konstantna raspodjela parametra A vrijednosti 8

### 4.2.6. Parametar C

Parametar C u SINTACS metodi označava hidrauličku vodljivost vodonosnika. Kako podaci o prostornoj raspodijeli hidrauličke vodljivosti nisu dostupni. Prema podacima iz literature [8] zaključujemo da se hidraulička vodljivost varaždinskog vodonosnika kreće od $1{,}15 \cdot 10^{-3}$ do $3{,}47 \cdot 10^{-3}$ [m/s]. Prema krivulji za određivanje parametra C (Slika 2.10.) dodijeljena je konstantna vrijednost 9 za cijelo područje vodonosnika. Na slici 4.10. prikazan je konstantan raster vrijednosti 9.




Slika 4.10. Konstantna raspodjela parametra C vrijednosti 9

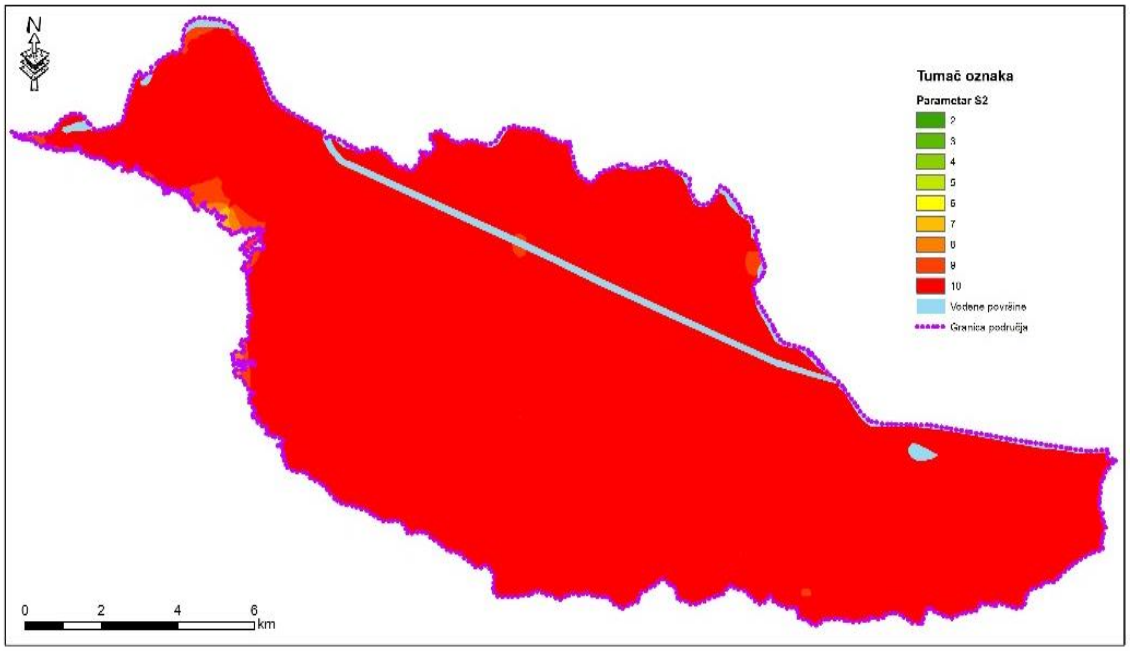
### 4.2.7. Parametar $S_2$

Parametar $S_2$ u SINTACS metodi označava nagib terena s vrijednostima ćelija prema postotku nagiba [%] te je izrađen iz DMR-a. Nagibi su reklasificirani u 10 klasa u rasponima prikazanim u tablici 5. te je svakoj klasi dodana vrijednost na temelju dijagrama metode za određivanje utjecaja nagiba terena (Slika 2.12.). Prostorni raspored parametra $S_2$ prikazan je na slici 4.11.

Tablica 5. Raspon klase nagiba i pripadne vrijednosti parametra $S_2$

| Raspon klase nagiba | Vrijednost parametra $S_2$ |
|---|---|
| 0-2 | 10 |
| 3-4 | 9 |
| 5-6 | 8 |
| 7-9 | 7 |
| 10-12 | 6 |
| 13-15 | 5 |
| 16-18 | 4 |
| 19-21 | 3 |

| | |
|---|---|
| **22-25** | 2 |
| **26-30** | 1 |




Slika 4.11. Prostorni raspored parametra $S_2$

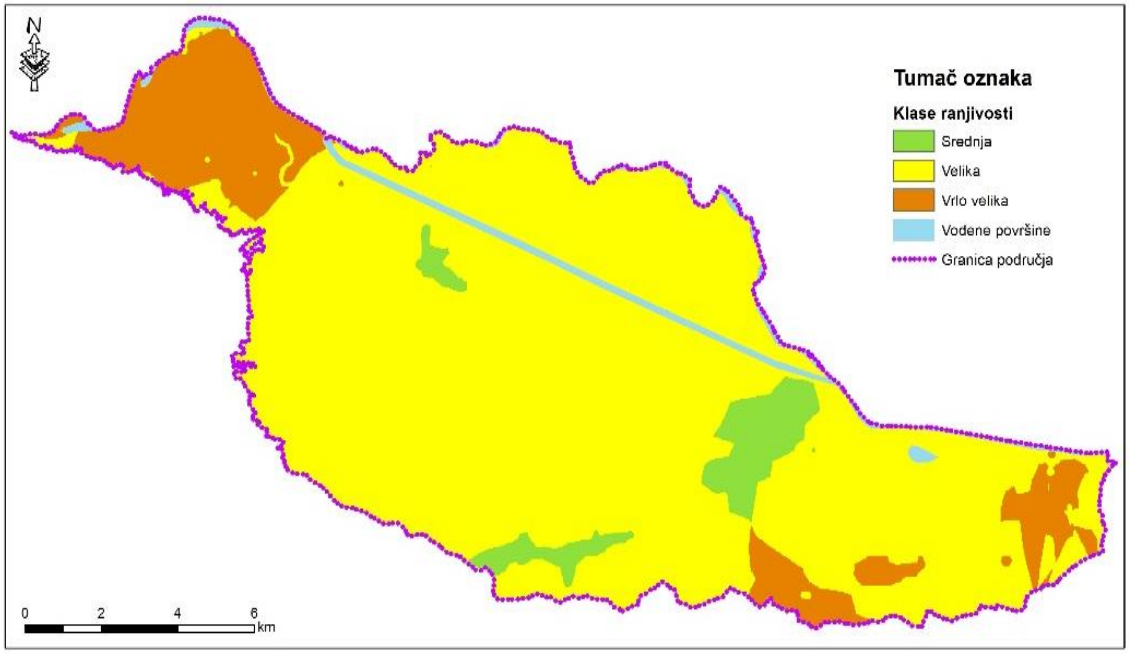
### 4.2.8. Analiza ranjivosti pomoću SINTACS metode

Nakon što su definirani svi parametri potrebno ih je pomnožiti s težinskim koeficijentima. Težinski koeficijenti definirani su za svaki pojedini parametar da se procijenjeni parametri što je moguće bolje prilagode ukupnim hidrogeološkim značajkama vodonosnika i antropogenom opterećenju na površini promatranog područja. Što se tiče antropogenog opterećenja područja varaždinskog vodonosnika, najznačajniji utjecaj imaju poljoprivreda, peradarske farme kao i urbanizacija. Zbog velikog broja peradarskih farmi, poljoprivrednih površina, upotrebe pesticida, prometnica itd. kao težinski koeficijenti odabrani su koeficijenti za scenarij „veliko opterećenje“ (Tablica 1.).

Stoga, konačna formula za izračun indeksa ranjivosti (Iv – vulnerability index) (prema formuli 2.3.) u raspisanom obliku glasi:

$$\mathbf{Iv(SINTACS) = (S_1 \bullet 5) + (I \bullet 5) + (N \bullet 4) + (T \bullet 5) + (A \bullet 3) + (C \bullet 2) + (S_2 \bullet 2)}$$

Množenjem rastera svakog pojedinog parametra SINTACS metode sa pripadajućim težinskim koeficijentom dobiven je raster prostorne raspodjele vrijednosti indeksa ranjivosti varaždinskog vodonosnika. Indeks ranjivosti klasificiran je zatim 3 klase prema klasama ranjivosti SINTACS metode navedenih u tablici 1.2. Različiti stupnjevi ranjivosti prostorno su prikazani na karti prirodne ranjivosti (Slika 4.12.).




Slika 4.12. Karta prirodne ranjivosti varaždinskog vodonosnika

### 4.2.9. Analiza rezultata procjene ranjivosti SINTACS metodom

Iz dobivene karte ranjivosti varaždinskog vodonosnika (Slika 4.12.) vidljivo je da glavninu promatranog područja karakterizira velika i vrlo velika ranjivost. Promatrano područje proteže se na 187 $km^2$ i od toga je kao srednje ranjivo okarakterizirano 11,2 $km^2$ što čini otprilike 6 % ukupne površine područja. Područje velike ranjivosti obuhvaća površinu od 152,8 $km^2$ što je 82 % ukupne površine područja, dok je površina od 23,3 $km^2$ u vrlo velikoj ranjivosti što čini 12 % od ukupne površine područja.

Dijelovi koji su okarakterizirani kao srednje ranjivi protežu se urbaniziranim područjima koja su prekrivena slojem asfalta koji se smatra nepropusnim. Isto tako područja koja su urbanizirana imaju uređeno prikupljanje i kontrolirano odvođenje oborinskih voda (slivnici, jarci, rigoli…) te se stoga može smatrati da nema direktne infiltracije u podzemlje osim na dijelovima parkova i zelenih površina što je praktički zanemarivo.

Područje velike ranjivosti proteže se pretežito središnjim dijelom te zauzima najveću površinu istraživanog područja. Dubine do podzemne vode na ovom dijelu veće su od četiri metra što pokazuje da nezasićena zona ipak daje određenu zaštitu vodonosniku.

Područja vrlo velike ranjivosti nalaze se na sjeverozapadnom dijelu te na području crpilišta Bartolovec. Na sjeverozapadnom dijelu područja dubina do podzemne vode je većinom manja od pola metra što se može pripisati utjecaju akumulacijskog jezera HE Varaždin te tamo nezasićena zona i pokrovne naslage ne pružaju gotovo nikakvu zaštitnu barijeru od onečišćenja. Na tim mjestima gotovo sve što se nalazi na površini isprano je i infiltrirano u podzemlje. Područje crpilišta Bartolovec također je okarakterizirano kao područje vrlo velike ranjivosti jer je kao i na sjeverozapadnom dijelu područja nezasićena zona plitka jer se u blizini nalazi akumulacijsko jezero HE Čakovec.

Dobiveni rezultati SINTACS metode poklapaju se sa ranijim istraživanjima ranjivosti gdje je u planu upravljanja vodnim područjima za razdoblje 2016. – 2021. varaždinsko područje okarakterizirano kao područje koje se gotovo u cijelosti nalazi u kategorijama vrlo visoke i visoke ranjivosti čak 94 % kao što je i dobiveno u ovom radu. Stoga se

SINTACS metoda pokazala vrlo pouzdanom u procjeni ranjivosti varaždinskog vodonosnika.

SINTACS metoda uključuje u svojoj procjeni sedam parametara koje je poprilično teško odrediti. Za procjenu parametara najprije treba imati kvalitetne ulazne podatke koje nije uvijek jednostavno prikupiti. Nakon što se ulazni podaci prikupe potrebno ih je dobro analizirati te provjeriti njihovu smislenost. Za dobru analizu i aproksimaciju važno je poznavati određene programske pakete koji će se koristiti.

U ovom radu korišten je ESRI ArcGIS programski paket te je stoga bilo važno poznavanje određenih alata koji su korišteni. Tako dobivene interpretacije zatim treba bodovati prema zadanim dijagramima metode za što je opet potrebno određeno iskustvo. U konačnici tu su težinski faktori koji poboljšavaju samu analizu te daju jednu stepenicu više u prilagodbi istraživanom području i pouzdanosti rezultata metode. SINTACS metoda, kao i sve parametarske metode procjene prirodne ranjivosti, izdvaja ona ranjivija područja gdje je manja prirodna zaštita na površini te u nezasićenoj zoni vodonosnika, ali kod ove metode je u obzir uzeta i situacija u zasićenoj zoni vodonosnika, što znači da je pogodna za procjenu ranjivosti određenog izvorišta tj. crpilišta podzemne vode ne samo vodonosnika u cjelini. Također kod SINTACS metode velika važnost dana je parametrima infiltraciji kao i dubinama do podzemne vode što vidimo u konačnici prilikom množenja parametara s težinskim faktorima u formuli 2.3.

# 5. Zaključak

U ovom radu ocijenjena je ranjivost podzemnih voda na području varaždinskog vodonosnika. Varaždinski vodonosnik aluvijalni je vodonosnik izgrađen od šljunka i pijesaka kvartarne starosti te se dijeli na gornji i donji vodonosni sloj. Za vodoopskrbu Županije najviše se koriste podzemne vode dravske doline, a manjim dijelom izvorišta vodonosnika Ivančice i Ravne gore. Podzemna voda varaždinskog vodonosnika crpi se za potrebe vodoopskrbe na pet crpilišta koji se nalaze na području Varaždinske i Međimurske županije. Što se tiče količine, zalihe vode zadovoljavaju trenutne i buduće potrebe, no kakvoća vode nije svugdje jednaka. Zbog relativno tankog pokrovnog tla u prvome, gornjem vodonosnom sloju, na pojedinim područjima, povećana je koncentracija nitrata, kao posljedica antropogenog utjecaja. Podzemna voda iz drugog vodonosnika relativno je dobre kakvoće. Zbog svega navedenog iznimno je važno štititi ove rezerve podzemne vode kako se trend povećanja koncentracije nitrata u prvom vodonosnom sloju ne bi povećavao.

SINTACS metoda je metoda procjene prirodne ranjivosti te uzima u obzir sedam parametara: dubina do podzemne vode (S), djelovanje efektivne infiltracije (I), kapacitet razrjeđenja u nezasićenoj zoni (N), kapacitet razrjeđenja u tlu/pokrovnim naslagama (T), hidrogeološka obilježja vodonosnika (A), hidraulička vodljivost vodonosnika (C), hidrološka uloga nagiba terena (S). Kako bi se svaki od tih parametara odredio i analizirao potrebno je prikupiti kvalitetne ulazne podatke te vješto manipulirati njima u željenom programskom paketu u ovom slučaju ESRI ArcGIS programskom paketu. Kako za istraživano područje nije bilo prostornih ulaznih podataka za neke parametre kao npr. hidrauličku vodljivost vodonosnika, potrebno je bilo interpolirati određene podatke ili uzimati konstantnu vrijednost pa se pouzdanost primjene SINTACS metode u nekim segmentima može smatrati „grubljom“. No u konačnici tu su težinski faktori koji poboljšavaju samu analizu te daju jednu stepenicu više u prilagodbi uvjetima koji vladaju na području istraživanja.

Iz dobivene karte ranjivosti varaždinskog vodonosnika vidljivo je da glavninu promatranog područja karakterizira velika i vrlo velika ranjivost, dok su pojedini dijelovi okarakterizirani kao srednje ranjivi, a to su urbanizirana područja prekrivena slojem asfalta koji se smatra uvjetno nepropusnim.

Dobiveni rezultati SINTACS metode u ovom radu poklapaju se sa ranijim istraživanjima ranjivosti gdje je u planu upravljanja vodnim područjima za razdoblje 2016. – 2021. varaždinsko područje okarakterizirano kao područje koje se gotovo u cijelosti nalazi u kategorijama vrlo visoke i visoke ranjivosti, stoga možemo smatrati da se metoda pokazala vrlo pouzdanom u procjeni ranjivosti varaždinskog vodonosnika, ali je ujedno dodatno potvrdila da se radi o vrlo osjetljivom području po pitanju onečišćenja podzemne vode. Budući da se ovdje radi o području sa značajnim zalihama podzemne vode, a i potrebe za potrošnju su velike, treba se usmjeriti velika pažnja odgovarajućem pristupu gospodarenja i zaštiti podzemnih voda ovoga kraja kako bi se mogućnost onečišćenja podzemnih voda na tako ranjivom području svela na najmanju moguću mjeru.

# 6. Literatura


1. Ministarstvo zaštite okoliša i energetike. Dostupno na: http://www.mzoip.hr/hr/vode.html. Datum pristupa: 14. ožujka 2018.
2. UN Water. Dostupno na: http://www.unwater.org/. (Datum pristupa: 14. ožujka 2018.)
3. Direktiva 2006/118/EZ Europskoga parlamenta i Vijeća od 12. prosinca 2006. o zaštiti podzemnih voda od onečišćenja i pogoršanja stanja (SL L 372, 27. 12. 2006.)
4. Nastavni zavod za javno zdravstvo dr. Andrija Štampar. Dostupno na: http://www.stampar.hr/hr/povodom-svjetskog-dana-voda-22-ozujka-2015-znacaj-vode-i-vodnih-resursa-za-opstanak-planete-zemlje. (Datum pristupa: 14. ožujka 2018.)
5. Civita M. & De Maio M. (2000): SINTACS R5, a new parametric system for the assessment and automating mapping of groundwater vulnerability to contamination – Pitagora Editor (Bologna)
6. Loborec J. Procjena rizika od onečišćenja podzemnih voda u kršu na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice. Doktorski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet. 2013.
7. Bačani A., Posavec K. Elaborat o zaštitnim zonama izvorišta Varaždin, Bartolovec i Vinokovščak : elaborat : (pročišćeni tekst). Zagreb : Rudarsko-geološko-naftni fakultet. 2013.
8. Urumović K. Fizikalne osnove dinamike podzemnih voda. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet. Zagreb. 2003.
9. Canadian Geoscience Education Network (CGEN), Water Stored Underground: Vital and Vulnerable. Dostupno na: https://www.cgenarchive.org/bowen-island-underground.html.(Datum pristupa: 14. ožujka 2018.)
10. V.G. Rumynin, Subsurface Solute Transport Models and Case Histories (2011.), Theory and Applications of Transport in Porous Media vol. 25, DOI: 10.1007/978-94-007-1306-2 2
11. Bašić F. Tlo kao sastavnica ekološkog trojstva. Dostupno na: http://www.geografija.hr/hrvatska/tlo-kao-sastavnica-ekoloskog-trojstva/. (Datum pristupa: 23. ožujka 2018.)

12. Kapelj S., Loborec J., Kapelj J.; Assessment of aquifer intrinsic vulnerability by the SINTACS method, 2013. Geologia Croatica, Vol. 10.4154/GC.2013.09 No. 66/2, 119-128
13. Gotovac H. Modeliranje toka i pronosa u podzemlju. Materijali iz kolegija Dinamika i modeliranje podzemnih voda. Split: Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije. 2014.
14. Hlevnjak B., Strelec S., Jug J.; Hidrogeološki uvjeti pojave glinenog proslojka unutar varaždinskog vodonosnika, 2015. Inženjerstvo okoliša ,Vol.2/No.2.
15. Izvješće o stanju okoliša Varaždinske županije za razdoblje od 2010. do 2013. Varaždin. 2014.
16. Strategija upravljanja vodama (NN BR. 91/2008)
17. Plan upravljanja vodnim područjima za razdoblje 2016. – 2021
18. Kovač I., Kovačev-Marinčić B., Mesec J., Vugrinec J. Komparativna analiza koncentracije nitrata u gornjem i donjem sloju varaždinskog vodonosnika, 2017. Radovi Zavoda za znanstveni rad Varaždin, No.28. DOI: https://doi.org/10.21857/9e31lh4zem
19. Hrvatski geološki institut, Zavod za hidrogeologiju i inženjersku geologiju, Resursna osnova za pitku i geotermalnu vodu u Međimurskoj županiji, Zagreb
20. Urumović K., Hlevnjak B., Prelogović E., Mayer D., (1990): Hidrogeološki uvjeti varaždinskog vodonosnika. Geol. Vjesnik, vol.43, 149-158, Zagreb
21. Šimunić, An., Pikija, M., Hećimović, I., et al. (1981): Tumač za list Varaždin (OGK 1:100 000). Savezni geološki zavod, Beograd
22. Mioč, P., Marković, S. (1998): Tumač za list Čakovec (OGK 1:100 000). Institut za geološka istraživanja Zagreb, Institut za geologijo, geotehniko in geofiziko Ljubljana, Zagreb-Ljubljana
23. Köppenova podjela klima i hrvatsko nazivlje, Šegota, T., Filipčić, A.,Geoadria Vol.8 No.1, lipanj 2003)
24. Zaninović, K., Gajić-Čapka, M., Perčec Tadić, M., Vučetić, M., Milković, J., Bajić, A., Cindrić, K., Cvitan, L., Katušin, Z., Kaučić, D., Likso, T., Lončar, E., Lončar, Ž., Mihajlović, D., Pandžić, K., Patarčić, M., Srnec, L., Vučetić, V. (2008): Klimatski atlas Hrvatske, 1961. - 1990. : 1971. - 2000. Monografija, Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb

25. Vidaček, Ž., Bogunović, M., Husnjak, S., Sraka, M., Bensa, A. & Petošić, D. (2004): Tumač hidropedološke karte Republike Hrvatske, M 1:300 000. Zavod za pedologiju, Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 33 str.
26. Zavod za javno zdravstvo Varaždinske županije. Dostupno na: http://www.zzjzzv.hr/?task=group&gid=10&aid=10. (Datum pristupa: 27. kolovoza 2018.)
27. Larva, O. (2008): „Ranjivost vodonosnika na priljevnom području varaždinskih crpilišta.“, Disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 194 str., Zagreb.

# 7. Popis slika

**Slika 2.1.** Parametri procjene ranjivosti prema SINTACS metodi

**Slika 2.2.** Dijagram određivanja parametra S – dubina do podzemne vode

**Slika 2.3.** Dijagram određivanja koeficijenta X ovisno o vrsti stijene

**Slika 2.4.** Dijagram određivanja koeficijenta X ovisno o teksturi tla

**Slika 2.5.** Dijagram određivanja parametra I

**Slika 2.6.** Slojevi vodonosnika

**Slika 2.7.** Dijagram određivanja parametra N

**Slika 2.8.** Dijagram određivanja parametra T

**Slika 2.9.** Dijagram određivanja parametra A

**Slika 2.10.** Dijagram određivanja parametra C

**Slika 2.11.** Raspon vrijednosti hidrauličke vodljivosti za najčešće vrste vodonosnika

**Slika 2.12.** dijagram određivanja parametra S - utjecaj nagiba terena

**Slika 3.1.** Karta prirodne ranjivosti vodonosnika vodnog područja rijeke Dunav

**Slika 3.2.** Varaždinski vodonosnik i granica III. zone sanitarne zaštite izvorišta Varaždin

**Slika 3.3.** Geološka karta područja Varaždinskog vodonosnika izrađena u GIS-u.

**Slika 3.4.** Shematski uzdužni litološki profil duž varaždinskog vodonosnika trasom Križovljan-Varaždin-Vularija

**Slika 3.5.** Geografska raspodjela klimatskih tipova po W. Köppenu u Hrvatskoj u standardnom razdoblju 1961.-1990.

**Slika 4.1.** DMR raster

**Slika 4.2.** Karta nagiba terena

**Slika 4.3.** Karta teksture tla istraživanog područja

**Slika 4.4.** Karta srednjih godišnjih oborina

**Slika 4.5.** Prostorni raspored parametra $S_1$

**Slika 4.6.** Prostorni raspored parametra I

**Slika 4.7.** Prostorni raspored parametra N

**Slika 4.8.** Prostorni raspored parametra T

**Slika 4.9.** Konstantna raspodjela parametra A vrijednosti 8

**Slika 4.10.** Konstantna raspodjela parametra C vrijednosti 9

**Slika 4.11.** Prostorni raspored parametra $S_2$

**Slika 4.12.** Karta prirodne ranjivosti varaždinskog vodonosnika

# 8. Popis tablica

**Tablica 1.** Težinski koeficijenti SINTACS metode

**Tablica 1.2.** Klase ranjivosti SINTACS metode

**Tablica 2.** Opis litostratigrafskih jedinica geološke građe

**Tablica 3.** Tekstura tla

**Tablica 4.** Vrijednost parametra N

**Tablica 5.** Raspon klase nagiba i pripadne vrijednosti parametra $S_2$