

UNIVERZITET U BEOGRADU
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET

Vladimir J. Živanović

**RAZVOJ METODOLOGIJE ZAŠTITE IZVORIŠTA
PODZEMNIH VODA PRIMENOM KARATA
RANJIVOSTI**

doktorska disertacija

Beograd, 2016

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Vladimir J. Živanović

**DEVELOPMENT OF METHODOLOGY FOR
GROUNDWATER SOURCE PROTECTION BASED
ON VULNERABILITY MAPPING**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2016

Mentor:

Dr Igor Jemcov, vanredni profesor,
uža naučna oblast: hidrogeologija
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Članovi komisije:

Dr Veselin Dragišić, redovni profesor,
uža naučna oblast: hidrogeologija
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Dr Dušan Polomčić, redovni profesor,
uža naučna oblast: hidrogeologija
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Dr Nataša Ravbar, viši naučni saradnik
uža naučna oblast: hidrogeologija karsta i ocena ranjivosti podzemnih voda
Institut za izučavanje karsta ZRC SAZU, Postojna, Slovenija
Pridruženi profesor Univerziteta u Novoj Gorici

Datum odbrane: _____

ZAHVALNICA

Ovom prilikom se zahvaljujem mentoru Prof. dr Igoru Jemcovu koji me je brojnim idejama usmeravao i savetovao počev od perioda izrade mog magistarskog rada i mog naučnog delovanja na polju zaštite podzemnih voda.

Želim da naglasim posebnu zahvalnost Prof. dr Veselinu Dragišiću na ogromnoj, nesebičnoj pomoći i brojnim savetima bez kojih ovaj rad ne bi bio potpun. Zahvalan sam mu na podršci, strpljenju i vremenu provedenom u brojnim diskusijama o temama analiziranim u ovom radu. Takođe sam mu zahvalan na ogromnom terenskom iskustvu koje mi je izuzetno pomoglo da sagledam sve aspekte zaštite podzemnih voda i da time značajno unapredim razvijenu metodologiju i dobijene rezultate.

Zahvaljujem se i Prof. dr Dušanu Polomčiću i dr Nataši Ravbar na stručnim savetima, brojnim sugestijama i podršci u radu.

Zahvaljujem se Nebojši Atanackoviću, Savi Magazinoviću, Sunčici Ninković, Jakovu Andrijaševiću, Branislavu Petroviću i ostalim kolegama sa Departmana za hidrogeologiju ne samo na stručnoj već i na prijateljskoj podršci.

Na kraju želim da izrazim neizmernu zahvalnost svojoj porodici na ogromnom strpljenju, podršci, ljubavi i razumevanju tokom svih ovih godina koje sam posvetio izradi ovog rada.

RAZVOJ METODOLOGIJE ZAŠTITE IZVORIŠTA PODZEMNIH VODA PRIMENOM KARATA RANJIVOSTI

Apstrakt

Zaštita podzemnih voda osnovni je preduslov za njihovo dugotrajno i održivo korišćenje, pri čemu je u dosadašnjoj praksi za ove potrebe implementacija zona sanitarne zaštite bila najčešći postupak. Uspostavljanje zona sanitarne zaštite posebno je značajno kod izvorišta u kojima su podzemne vode veoma ranjive, kao što je to slučaj kod aluvijalnih ili karstno-pukotinskih izdani.

Određivanje zona sanitarne zaštite izvorišta podzemnih voda predstavlja vrlo kompleksan zadatak koji zahteva analizu brojnih parametara od kojih zavisi veličina uspostavljenih zona. Metodologija za delineaciju zona treba da bude primenljiva u različitim hidrogeološkim uslovima, tako da se uspešno može primeniti u sredinama sa različitom strukturom poroznosti i različitim hidrodinamičkim karakteristikama podzemnih voda (sa slobodnim nivoom i pod pritiskom), kao i različitim uslovima prihranjivanja. Primenom različitih pristupa u delineaciji sanitarnih zona jednog te istog izvorišta, dobijaju se zone različite po obliku i veličini. Stoga, poboljšanje i usklađivanje metodologije za definisanje zona sanitarne zaštite i dalje predstavlja važan zadatak u hidrogeološkim istraživanjima.

Dosadašnja praksa određivanja zona sanitarne zaštite uglavnom je zasnovana na određivanju vremena horizontalnog kretanja podzemnih voda ka vodozahvatnom objektu. Vertikalno kretanje podzemnih voda sa površine terena do izdanske zone najčešće se ne uzima u obzir. U nekim slučajevima u rezultatu koncentrisane infiltracije (poniranja), dolazi do „zaobilaženja“ zaštitne funkcija sedimenata, odnosno stena u nadizdanskoj zoni, te je stoga veoma bitno poznavati i vreme kretanja površinskih voda ka ponorskim zonama.

U cilju unapređenja postojeće metodologije za određivanje zona sanitarne zaštite, u procesu izrade ove doktorske disertacije razvijena je TDM metoda za zaštitu izvorišta podzemnih voda. Metoda je bazirana na oceni ranjivosti izvorišta podzemnih voda, uzimajući u obzir neophodne parametre koji utiču na brzinu kretanja vode sa bilo koje tačke na površini terena u slivu izvorišta, do vodozahvatnog objekta. Zaštita podzemnih voda iskazana je preko ukupnog vremena kretanja vode ka vodozahvatnom objektu, uzimajući u obzir sve tri vremenske komponente kretanja površinskih i podzemnih voda.

Za potrebe testiranja i validacije dobijenih rezultata, predložena TDM metoda je primenjena za određivanje zona sanitarne zaštite tri reprezentativna izvorišta, koja su po svojim geološkim, hidrogeološkim i hidrodinamičkim karakteristikama veoma različita. Na izvorištu „Beli Timok“ bunarima se kaptira plitka aluvijalna izdan, na izvorištu „Vrelo Crnica“ klasičnom kaptažom zahvataju se karstno-pukotinske vode, dok je na izvorištu „Fišerov Salaš“ bunarima kaptirana duboka neogena izdan pod pritiskom.

Kao rezultat primene predložene metodologije određene su zone sanitarne zaštite koje su različite po veličini i obliku, u odnosu na zone okonturene primenom klasičnih metoda. Pri njihovom definisanju u obzir su uzeti svi faktori koji utiču na vreme putovanja vode do vodozahvatnog objekta, čime su dobijeni realističniji podaci. Na konkretnim primerima pokazano je da je TDM metoda primenljiva za zaštitu izvorišta u različitim hidrogeološkim i hidrodinamičkim uslovima.

Ključne reči: zaštita podzemnih voda, izvorište podzemnih voda, zaštita izvorišta podzemnih voda, zone sanitarne zaštite, TDM metoda, kretanje podzemnih voda, kretanje površinskih voda

Naučna oblast: Geološko inženjerstvo

Uža naučna oblast: Hidrogeologija

UDK broj: 556.36/.388(043.3)
628.112/.196(043.3)

DEVELOPMENT OF METHODOLOGY FOR GROUNDWATER SOURCE PROTECTION BASED ON VULNERABILITY MAPPING

Abstract

Groundwater protection is a basic precondition for their long-term and sustainable use. The most common method which has been used in practice so far is the implementation of sanitary protection zones. It is particularly important to establish sanitary protection zones for highly vulnerable groundwater sources, as is the case with alluvial or karst-fissured aquifers.

Determination of sanitary protection zones of groundwater sources is a very complex task that requires the analysis of a number of parameters which define the size of the established zones. The methodology for delineation of zones should be applicable in various hydrological conditions, so that it can be successfully applied in areas with different porosity types and different hydrodynamic characteristics of groundwater (confined and unconfined) as well as different recharge conditions. As a result of applying different approaches in delineation of sanitary zones of the same source, zones which are different in shape and size are obtained. Therefore, the improvement and harmonization of the methodology for defining the zones of sanitary protection remains an important task in hydrogeological studies.

Previous practice of determining sanitary protection zones was mainly based on defining time of horizontal groundwater flow toward the water intake facility. Vertical movement of groundwater from the surface to the saturated zone is usually not taken into account. In some cases the result of concentrated infiltration leads to "avoiding" the protective function of the sediments and rocks in unsaturated zone. Therefore it is very important to know the time of surface water flow to ponor zones.

In order to improve the existing methodology for delineation of sanitary protection zones, in the process of development of this PhD thesis the TDM method for protection

of groundwater sources has been developed. This method is based on vulnerability assessment of groundwater sources, taking into account the necessary parameters that affect the speed of water flow from any point on the surface in the source catchment, to the intake facility. Groundwater protection is expressed through total time of movement of water to the water intake facility, taking into account all three time components of the surface and groundwater flow.

For the purpose of testing and validation of the results obtained, the proposed TDM method has been applied to determine sanitary protection zones of three representative groundwater sources which are very different according to their geological, hydrogeological and hydrodynamic characteristics. At the groundwater source "Beli Timok", wells are used for tapping shallow alluvial aquifer, at the source "Crnica spring" a karst-fissured aquifer is tapped, while at the source "Fišerov Salaš" deep wells are tapping confined Neogene aquifer.

Sanitary protection zones which are obtained as a result of applying the proposed methodology are different in size and shape when compared to the zones contoured by using conventional methods. When defining these, all the factors affecting travel time to the water intake facility were taken into account, which enabled obtaining more realistic data. It has been shown on more concrete examples that the TDM method is applicable for source groundwater protection in different hydrogeological and hydrodynamic conditions.

Key words: groundwater protection, groundwater source, groundwater source protection, sanitary protection zones, TDM method, groundwater movement, surface water movement

Scientific discipline: Geological Engineering

Specific scientific field: Hydrogeology

UDC number: 556.36/.388(043.3)
628.112/.196(043.3)

**“A clever person solves a problem.
A wise person avoids it.”**

Albert Einstein

„Pametán čovek rešava problem.
Mudar čovek ga sprečava.“

Albert Ajnštajn

S A D R Ź A J

1. UVOD	1
2. KONCEPT UVOĐENJA ZONA SANITARNE ZAŠTITE.....	5
3. POSTOJEĆI PRISTUPI U ODREĐIVANJU ZONA SANITARNE ZAŠTITE.....	12
3.1. Određivanje zona sanitarne zaštite metodom fiksnog radijusa i vremena putovanja vode	14
3.2. Određivanje zona sanitarne zaštite koristeći metode za ocenu ranjivosti podzemnih voda.....	16
3.3. Određivanje zona sanitarne zaštite na bazi procene rizika od zagađivanja podzemnih voda.....	17
3.4. Određivanje zona sanitarne zaštite koristeći hidrodinamičke modele kretanja podzemnih voda	18
4. OSVRT NA POSTOJEĆU ZAKONSKU REGULATIVU I NAČIN ODREĐIVANJA ZONA SANITARNE ZAŠTITE U EVROPI I U SRBIJI	21
4.1. Zaštita podzemnih voda u Evropskoj uniji	21
4.2. Zaštita izvorišta podzemnih voda u nekim zemljama Evropske unije.....	22
4.3. Osvrt na zakonske regulative iz oblasti zaštite podzemnih voda u Srbiji.....	30
4.3.1. Istorijat zaštite podzemnih voda u Srbiji	30
4.3.2. Zaštita podzemnih voda kroz zakonsku regulativu u Srbiji	33
4.3.3. Zaštita podzemnih voda kroz aktuelnu zakonsku regulativu u Srbiji	37

5. PROBLEMATIKA ODREĐIVANJA ZONA SANITARNE ZAŠTITE U RAZLIČITIM HIDROGEOLOŠKIM SREDINAMA	40
5.1. Izdani u sredinama intergranularne poroznosti.....	41
5.1.1. <i>Opšte karakteristike izdani u sredinama intergranularne poroznosti</i>	<i>41</i>
5.1.2. <i>Postojeći trendovi u zaštiti podzemnih voda izdani u sredinama intergranularne poroznosti</i>	<i>44</i>
5.2. Izdani u sredinama pukotinske poroznosti.....	45
5.2.1. <i>Opšte karakteristike izdani u sredinama pukotinske poroznosti</i>	<i>45</i>
5.2.2. <i>Postojeći trendovi u zaštiti podzemnih voda izdani u sredinama pukotinske poroznosti</i>	<i>48</i>
5.3. Izdani u sredinama kavernozone poroznosti.....	50
5.3.1. <i>Opšte karakteristike izdani u sredinama kavernozone poroznosti</i>	<i>50</i>
5.3.2. <i>Postojeći trendovi u zaštiti podzemnih voda u sredinama kavernozone poroznosti</i>	<i>54</i>
6. GLAVNE KOMPONENTE KOJE UTIČU NA ODREĐIVANJE ZONA SANITARNE ZAŠTITE.....	57
6.1. Površinsko kretanje vode	57
6.2. Vertikalno kretanje vode u nadizdanskoj zoni.....	61
6.3. Horizontalno kretanje vode u izdanskoj zoni.....	64
6.4. Karakter kontaminanata	66
7. METODOLOŠKI PRISTUP U ODREĐIVANJU ZONA SANITARNE ZAŠTITE U RAZLIČITIM HIDROGEOLOŠKIM USLOVIMA – TDM METODA.....	68
7.1. Konceptualni model zaštite izvorišta	68
7.2. Proračun sanitarne zaštite primenom TDM metodologije.....	70
7.2.1. <i>Proračun vremena površinskog kretanja vode</i>	<i>70</i>

7.2.2.	<i>Proračun vremena vertikalnog kretanja vode u nadizdanskoj zoni</i>	75
7.2.3.	<i>Proračun vremena horizontalnog kretanja vode u izdanskoj zoni</i>	80
7.2.4.	<i>Proračun ukupnog vremena kretanja vode do vodozahvatnog objekta</i>	89
8.	IZBOR REPREZENTATIVNIH IZVORIŠTA ZA PRIMENU NOVOG MODELA ZA ODREĐIVANJE ZONA SANITARNE ZAŠTITE	91
9.	ZAŠTITA PODZEMNIH VODA IZVORIŠTA „BELI TIMOK“	93
9.1.	Geografski položaj izvorišta „Beli Timok“	93
9.2.	Klimatske karakteristike	93
9.3.	Hydrografske i hidrološke karakteristike.....	96
9.4.	Geomorfološke karakteristike.....	98
9.5.	Vegetacioni pokrivač	99
9.6.	Pedološke karakteristike tla	101
9.7.	Geološka građa terena.....	103
9.8.	Hydrogeološke karakteristike istražnog područja.....	104
9.9.	Izvorište podzemnih voda „Beli Timok“	107
9.10.	Primena TDM metode za ocenu ranjivosti podzemnih voda izvorišta „Beli Timok“	110
9.10.1.	<i>Određivanje vremena horizontalnog kretanja podzemnih voda</i>	111
9.10.2.	<i>Određivanje vremena vertikalnog kretanja podzemnih voda</i> ..	115
9.10.3.	<i>Određivanje vremena kretanja površinskih voda</i>	125
9.10.4.	<i>Izrada finalne karte ranjivosti izvorišta podzemnih voda</i>	130

10. ZAŠTITA PODZEMNIH VODA IZVORIŠTA „VRELO CRNICE“	134
10.1. Geografski položaj vrela Crnice	134
10.2. Klimatske karakteristike	135
10.3. Hidrografske i hidrološke karakteristike	137
10.4. Geomorfološke karakteristike	139
10.5. Vegetacioni pokrivač	141
10.6. Pedološke karakteristike tla	142
10.7. Geološka građa i tektonika terena	144
10.8. Hidrogeološke karakteristike istražnog područja	150
10.9. Karstno izvorište „Vrelo Crnice“	154
10.10. Primena TDM metode za ocenu ranjivosti podzemnih voda izvorišta „Vrelo Crnice“	156
10.10.1. <i>Određivanje vremena kretanja površinskih voda</i>	157
10.10.2. <i>Određivanje vremena vertikalnog kretanja podzemnih voda</i>	164
10.10.3. <i>Određivanje vremena horizontalnog kretanja podzemnih voda</i>	177
10.10.4. <i>Izrada finalne karte ranjivosti izvorišta podzemnih voda</i>	184
11. ZAŠTITA PODZEMNIH VODA IZVORIŠTA „FIŠEROV SALAŠ“	188
11.1. Geografski položaj izvorišta „Fišerov Salaš“	188
11.2. Klimatske karakteristike	189
11.3. Hidrografske i hidrološke karakteristike	192
11.4. Geomorfološke karakteristike	193
11.5. Vegetacioni pokrivač	195
11.6. Pedološke karakteristike tla	196
11.7. Geološka građa terena	198
11.8. Hidrogeološke karakteristike istražnog područja	201
11.9. Izvorište podzemnih voda „Fišerov Salaš“	207
11.10. Primena TDM metode za ocenu ranjivosti podzemnih voda izvorišta „Fišerov Salaš“	209

11.10.1. Određivanje vremena horizontalnog kretanja podzemnih voda.....	212
11.10.2. Određivanje vremena vertikalnog kretanja podzemnih voda.....	216
11.10.3. Izrada finalne karte ranjivosti izvorišta podzemnih voda.....	221
12. REZULTATI I DISKUSIJA.....	223
12.1. Predlog zona sanitarne zaštite primenom TDM metode.....	223
12.2. Potrebne podloge za primenu TDM metode.....	230
12.3. Prednosti i nedostaci TDM metode.....	232
13. ZAKLJUČAK.....	235
LITERATURA	238
Biografija autora	
Izjava o autorstvu	
Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada	
Izjava o korišćenju	

1. UVOD

Ubrzani naučni i tehnološki razvoj, pored niza prednosti koje pruža savremenom društvu, nosi sa sobom i određene negativne aspekte koji se u značajnoj meri odnose na kontinuirano ugrožavanje životne sredine. Ovim ni vodni resursi, kao važan element životne sredine nisu pošteđeni. Stoga je jedan od najbitnijih izazova koji stoji pred savremenim društvom, kako rešiti pitanje zaštite vodnih resursa, a prvenstveno podzemne vode, koje nesumnjivo predstavljaju važan izvor kvalitetnih pijaćih voda. Danas u svetu živi gotovo 7 milijardi ljudi od kojih preko 20% oskudeva vodama adekvatnog kvaliteta. Uzroci za to su mnogobrojni. Pored prirodnih, pre svega klimatskih uslova, ističu se i rast i razvoj velikih gradova i industrije, sve veća upotreba hemijskih i bioloških supstanci u poljoprivredi i sl. Procenjuje se da će 2050 godine na svetu živeti preko 9 milijardi ljudi, što će izazvati povećanje potreba za 75% u odnosu postojeću potrošnju. Stoga se u predstojećem periodu nameće pitanje kako adekvatno preventivnim merama zaštititi postojeće vodne resurse, pre svega resurse podzemnih voda.

Podzemne vode predstavljaju veoma značajan resurs koji se od postanka čovečanstva koristi za vodosnabdevanje. U mnogim regionima predstavljaju jedinu prihvatljivu opciju za vodosnabdevanje. Nacionalne statistike razvijenih zemalja pokazuju da korišćenje podzemnih voda u snabdevanju vodom dobija sve više na značaju, a procena je da trećina svetske populacije zavisi od podzemnih voda (Schmoll et al. 2006). U pojedinim zemljama gotovo kompletno vodosnabdevanje se odvija zahvatanjem podzemnih voda (Austrija, Danska i dr). U našoj zemlji se za organizovano vodosnabdevanja naselja podzemne vode koriste u oko 80 % slučajeva (Polomčić 2001), a na području Vojvodine podzemne vode predstavljaju isključivi vid vodosnabdevanja stanovništva.

Zaštita izvorišta podzemnih voda za vodosnabdevanje stanovništva i industrije jedan je od prioritarnih zadataka savremenog društva, a očuvanje kvaliteta podzemnih voda je

neophodan korak koji omogućava održivi razvoj urbanih sredina. Uspostavljanje preventivnih mera zaštite podzemnih voda predstavlja jedan od najbitnijih koraka u zaštiti istih (Filipović, Vujasinović, 1982).

Izvorišta podzemnih voda u našoj zemlji i u svetu štite se nizom zakonskih i podzakonskih akata. Neophodnost da se podzemne voda zaštite, u našoj zemlji uređena je Zakonom o vodama i Zakonom o zaštiti životne sredine. Pored toga, „Pravilnikom o načinu određivanja i održavanja zona sanitarne zaštite izvorišta vodosnabdevanja“ (Službeni glasnik RS, 92/08) definisan je način određivanja i održavanja zona sanitarne zaštite za sva izvorišta koja se mogu koristiti ili se koriste za javno snabdevanje vodom za piće.

Jedan od najvećih nedostataka u sadašnjem određivanju zona sanitarne zaštite predstavlja nedovoljno jasno utvrđena metodologija koja na sveobuhvatan način i prilagođena različitim hidrogeološkim sredinama tretira ovu problematiku. U dosadašnjoj praksi, osnovni kriterijum za definisanje zona sanitarne zaštite predstavlja vreme putovanja podzemne vode do mesta gde one ističu ili se zahvataju. Na ovaj način u potpunosti je zanemarena prirodna zaštita nadizdanske zone. Kao posledica ovoga, u praksi se često dešava da projektovane zone sanitarne zaštite budu nepravilno utvrđene. Sa jedne strane premale ili nedovoljne, što prouzrokuje neadekvatnu zaštitu i time potencijalnu mogućnost zagađivanja podzemnih voda, a sa druge strane da budu mnogo veće nego što je to potrebno. Predimenzioniranje zona ima višestruke posledice, jer se zauzimanjem velikih površina terena nepotrebno ograničavaju aktivnosti na područjima koja gotovo po pravilu imaju veliki ekonomski značaj.

U svetskoj praksi pri projektovanju i utvrđivanju zona sanitarne zaštite izvorišta sve veću primenu imaju karte ranjivosti podzemnih voda. One su po prvi put primenjene šezdesetih godina prošlog veka u Francuskoj (Margat 1968, prema Vrba and Zaporozec 1994). Ideja je bila da se prostorno opiše stepen ranjivosti podzemnih voda od zagađivanja u funkciji geoloških, hidroloških i hidrogeoloških uslova sredine. Uključivanjem brojnih autora u pomenutu problematiku kroz različit pristup i uvođenje različitih faktora prilikom izrade karata ranjivosti, dolazi do postepenog razvoja ove

metodologije. Tako su u nekoliko evropskih zemalja urađene kompilacione karte koje tretiraju postojeće stanje zagađivanja i zaštite podzemnih voda.

Primenom različitih metoda za ocenu ranjivosti podzemnih voda, izdvajaju se područja u kojima zagađujuće supstance veoma lako mogu dospeti do podzemnih voda (Živanović, 2011). Zato pomenute karte imaju nezaobilaznu ulogu u projektovanju i određivanju zona sanitarne zaštite izvorišta podzemnih voda. Jedna od prvih metoda za ocenu ranjivosti podzemnih voda koja je upravo kreirana da bi se što lakše definisale zone sanitarne zaštite jeste EPIK metoda (Döerfliger and Zwahlen 1997). Prvobitno kreirana na Univerzitetu Nojšatel u Švajcarskoj, kasnije prihvaćena i unapređena u saradnji Švajcarske agencije za životnu sredinu, šume i zemljišta i Švajcarske nacionalne hidrološke i geološke službe, ova metoda je postala osnovno sredstvo za utvrđivanje zona sanitarne zaštite u karstnim terenima. U istoj zemlji je nakon toga razvijena DISCO metoda, sa namenom utvrđivanja ranjivosti i određivanja zona sanitarne zaštite izvorišta podzemnih voda u stenama sa pukotinskom poroznošću (Pochon et al., 2008). Potvrda sve veće primene karata ranjivosti u zaštiti izvorišta podzemnih voda jeste pojava novih metoda za ocenu ranjivosti. Tako su kreirane COP+K metoda (Andreo et al., 2009, Marin et al., 2012), Slovenački pristup (Ravbar, 2007), PaPRIKa metoda (Kavouri et al. 2011) i druge.

Predmet doktorske disertacije jeste razvoj i unapređenje metodologije zaštite izvorišta podzemnih voda. Imajući u vidu da je ona najvećim delom zasnovana na uspostavljanju zona sanitarne zaštite, u disertaciji je posebna pažnja posvećena poboljšanju metodologije određivanja zona sanitarne zaštite primenom karata ranjivosti podzemnih voda.

Razvoj novog metodološkog postupka za određivanje zona sanitarne zaštite izvorišta podzemnih voda predstavlja osnovni cilj izrade ove disertacije. Ta nova metodologija treba da bude jednostavna za primenu, ali i primenljiva u različitim hidrogeološkim uslovima kao što su karstno-pukotinske izdani sa slobodnim nivoom u otvorenim hidrogeološkim strukturama, ili izdani formirane u dubljim vodonosnim strukturama (arteko-subarteske izdani). Razvijeni postupak baziran je na primeni metoda za ocenu

ranjivosti podzemnih voda pri čemu su izdvojene i korišćene metode primenljive u procesu delineacije sanitarnih zona. Izdvojene metode su dalje unapređivane i kao rezultat toga došlo se do metodologije za proračun zona sanitarne zaštite u različitim hidrogeološkim uslovima.

Doktorska disertacija sastoji se od 250 stranica teksta u okviru kojih postoji 165 slika i 25 tabela. Prikazana je kroz 13 poglavlja koja čine nekoliko logičkih celina. Prvih pet poglavlja obrađuje problematiku zona sanitarne zaštite izvorišta u svetu i kod nas. Prikazani su osnovni pristupi u određivanju zona, dat je istorijat zaštite podzemnih voda u našoj zemlji i izneta je problematika određivanja zona sanitarne zaštite u različitim hidrogeološkim sredinama. Druga celina obuhvata poglavlja koja opisuju metodologiju određivanja zona sanitarne zaštite. Prvo su prikazane glavne komponente koje utiču na veličinu zona, da bi zatim detaljno bila prikazana kompletna metodologija određivanja pomenutih zona. Treća celina obuhvata prikaz reprezentativnih izvorišta na kojima je primenjen novi metodološki postupak kao i prikaz kompletnog postupka ocene ranjivosti izvorišta podzemnih voda. U četvrtoj celini prikazani su dobijeni rezultati sa predlozima uspostavljanja zona sanitarne zaštite za sva analizirana izvorišta, sa ocenom primenljivosti prikazane metodologije.

2. KONCEPT UVOĐENJA ZONA SANITARNE ZAŠTITE

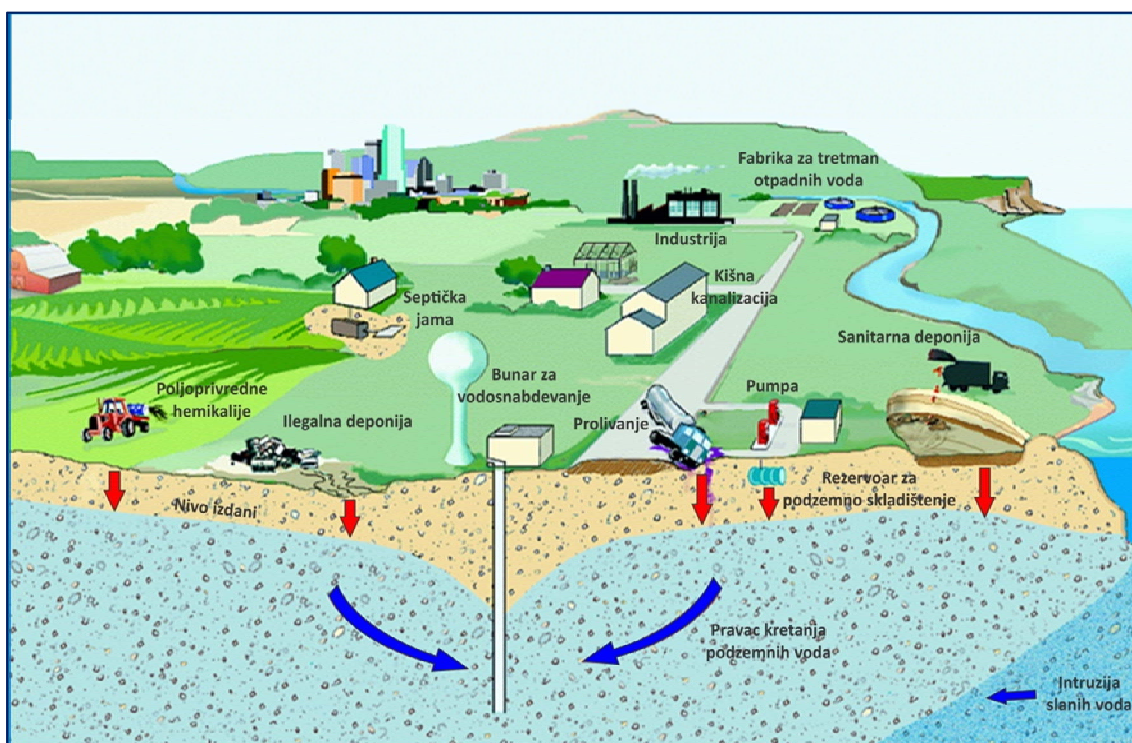
Podzemne vode predstavljaju važan resurs koji je sve više ugrožen raznovrsnim ljudskim aktivnostima (slika 2.1). Razlozi koji dovode do povećanje rizika od zagađivanja podzemnih voda su brojni. To su pre svega (GSI 1999):

- Ispuštanje komunalnih, industrijskih kao i otpadnih voda iz poljoprivredne proizvodnje u površinske tokove ili direktno u vodonosnu sredinu, što je i dalje značajno prisutno;
- Iako se količine otpada iz domaćinstva i industrijskog otpada sve više povećavaju, deponije i dalje predstavljaju osnovni vid njihovog odlaganja;
- Od sredine 20-og veka, nekontrolisano je rasla upotreba đubriva i pesticida u poljoprivrednoj proizvodnji;
- Iz godine u godinu sve je veći intenzitet kopnenog saobraćaja, a time su i proizvodnja, distribucija i korišćenje fosilnih goriva sve veći;
- Značajno su povećane proizvodnja i primena različitih hemijskih supstanci u različite svrhe. Mnoge hemijske supstance su veoma toksične, pa njihova pojava u podzemnim vodama predstavlja rizik, posebno kada je u pitanju vodosnabdevanje;
- Kretanje podzemnih voda, a samim tim i zagađujućih supstanci (kontaminata¹) kroz poroznu sredinu predstavlja relativno usporen proces koji još uvek nije u dovoljnoj meri istražen. Stoga ni svest o mogućim rizicima kontaminacije podzemnih voda nije dovoljno razvijena.

Pri ovako izraženim rizicima od kontaminacije, zaštita podzemnih voda predstavlja složen i multidisciplinarni zadatak koji obično zahteva implementaciju skupih, a često i teško primenljivih mera za zaštitu ili remedijaciju kontaminiranih podzemnih voda i geološke sredine uopšte. Problematika zaštite podzemnih voda posebno dobija na težini

¹ *Kontaminanti ili zagađujuće supstance podzemnih voda i hidrogeološke sredine uopšte, predstavljaju sve organske i neorganske supstance koje negativno utiču na kvalitet vode, najčešće antropogenog, ali i prirodnog porekla, koje se unose u nadzdansku i izdansknu zonu, direktno ili indirektno, kontinuirano ili povremeno, a čije poreklo se može razdvojiti od osnovnih sastojaka i osobina koje podzemne vode i hidrogeološka sredina već genetski poseduju.*

kada neka zagađujuća supstanca dopre do izdanske zone i kada je potrebno primeniti niz remedijacionih aktivnosti, često veoma skupih i koje mogu da traju godinama, a u nekim slučajevima i decenijama. Iz tih razloga, preventivnim merama zaštite podzemnih voda je neophodno pokloniti posebnu pažnju.

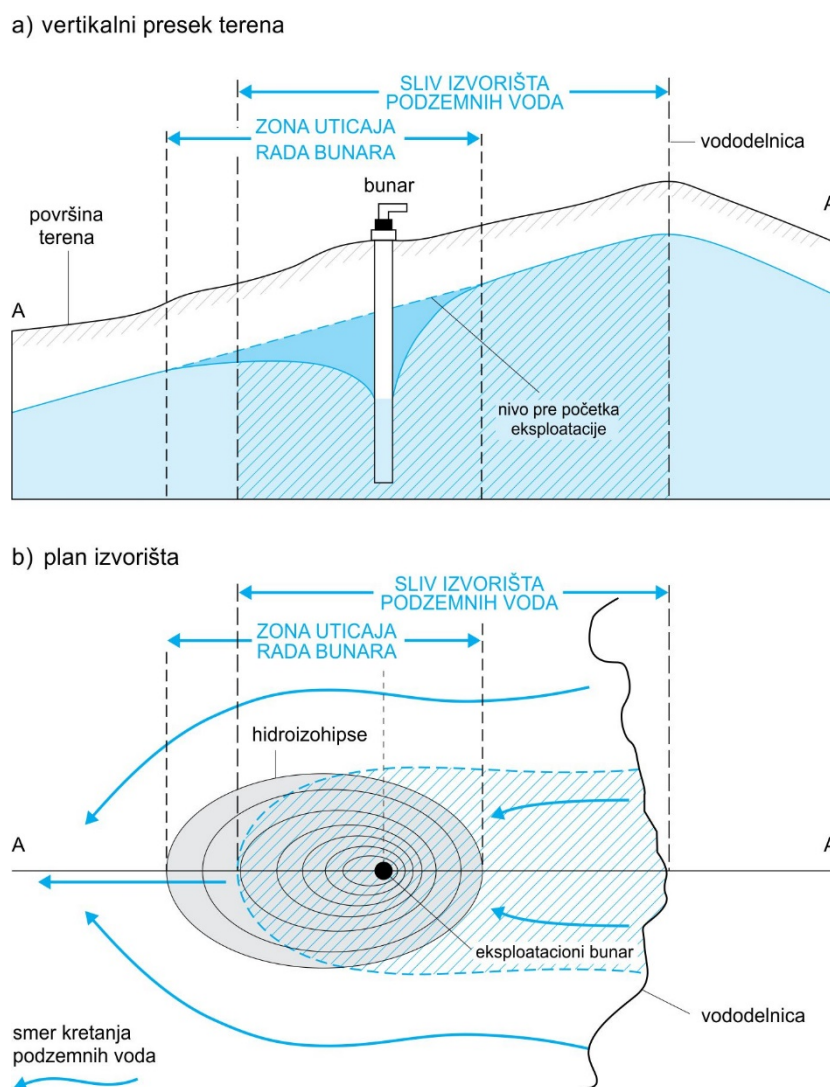


Slika 2.1 Glavni izvori zagađivanja podzemnih voda (Zaporozec 2002)

U slučaju kontaminacije podzemnih voda i geološke sredine, mere remedijacije se svode na lokalizacije i rekonstrukcije. Prve imaju za cilj da se spreči dalje širenje zagađenja, dok druge služe da se izvrši likvidacija kontaminanata iz izdanske kao i iz nadizdanske zone i da se uspostavi prirodni kvalitet podzemnih voda.

Kod izvorišta podzemnih voda koje se koriste za vodosnabdevanje, njihova zaštita se u najvećoj meri svodi na uspostavljanje različitih zona sanitarne zaštite u zoni cirkulacije podzemnih voda kao vodozahvatnim objektima (slika 2.2). U granicama pomenutih zona uvode se restriktivne mere koje ograničavaju ili potpuno zabranjuju različite aktivnosti koje mogu da ugroze kvalitet postojećih ili budućih izvorišta podzemnih voda. Preventivna zaštita podzemnih voda ima značajne ekonomske i socijalne posledice,

međutim, one su obično znatno manje od onih izazvanih kontaminacijom podzemnih voda.

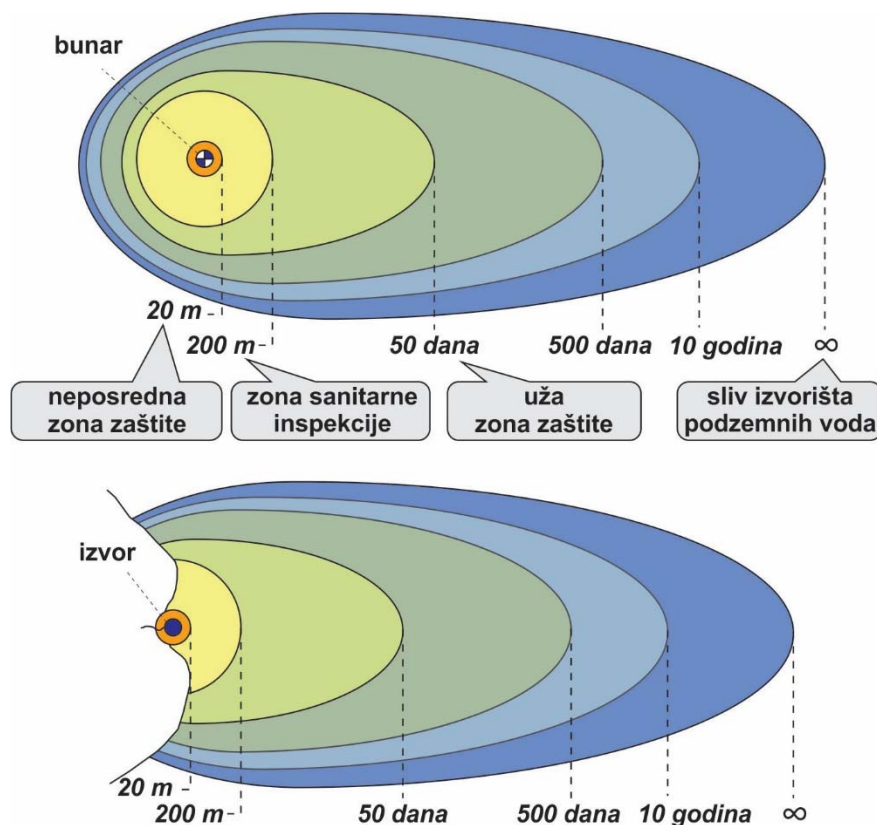


Slika 2.2. Razlika između rasprostranjenja sliva izvorišta podzemnih voda i zone uticaja rada bunara (US EPA, 1987, Foster, 2002, gore: vertikalni profil; dole: plan)

Zaštita izvorišta podzemnih voda se uglavnom bazira na implementaciji zona sanitarne zaštite koje se izdvajaju delineacijom na površini terena. Njihov broj zavisi od lokalne regulative, kao i od hidrogeoloških uslova (slika 2.3). U praksi se najčešće određuju sledeće zone zaštite (Filipović & Vujasinović, 1982; Krešić et al., 2006; Chave et al., 2006; Goldscheider, 2010):

- Neposredna zona zaštite;

- Uža zona zaštite;
- Šira zona zaštite;
- Još šira zona zaštite (sliv izvorišta podzemnih voda).



Slika 2.3. Idealna šema određivanja sliva izvorišta i vremena putovanja vode ka vodozahvatnom objektu (Foster et al., 2002, modifikovano)

a - za bunar u nezasićenoj izdani; b - za izvor koji drenira izdan sa slobodnim nivoom.

Neposredna zona zaštite obuhvata prostor neposredno oko pojave/objekta (izvora, galerije, bunara, grupe bunara ili drugih vodozahvatnih objekata). Uvodi se sa ciljem sprečavanje direktnog unošenja kontaminanata. Za delineaciju² ove zone obično se koristi metoda fiksnog radijusa, tj. izdvajanja koncentričnog prostora oko vodozahvata (slika 2.3) sa unapred definisanim radijusom. Obično se ograđuje žičanom ogradom (slike 2.4 i 2.5), a unutar nje je dopušten pristup samo ovlašćenim licima. Za ovu zonu se primenjuju najstrožije preventivne mere koje zabranjuju bilo kakvu aktivnost unutar ograđenog prostora.

² Određivanje granice rasprostranjenja pojedine zone sanitarne zaštite



Slika 2.4. Ograđivanje neposredne zone zaštite na primeru karstnog vrela Gaura Mare - Zlotska izvorišta u Istočnoj Srbiji

Slika 2.5. Ograđivanje neposredne zone zaštite na primeru bunara EBJ-2 za vodosnabdevanje Rume

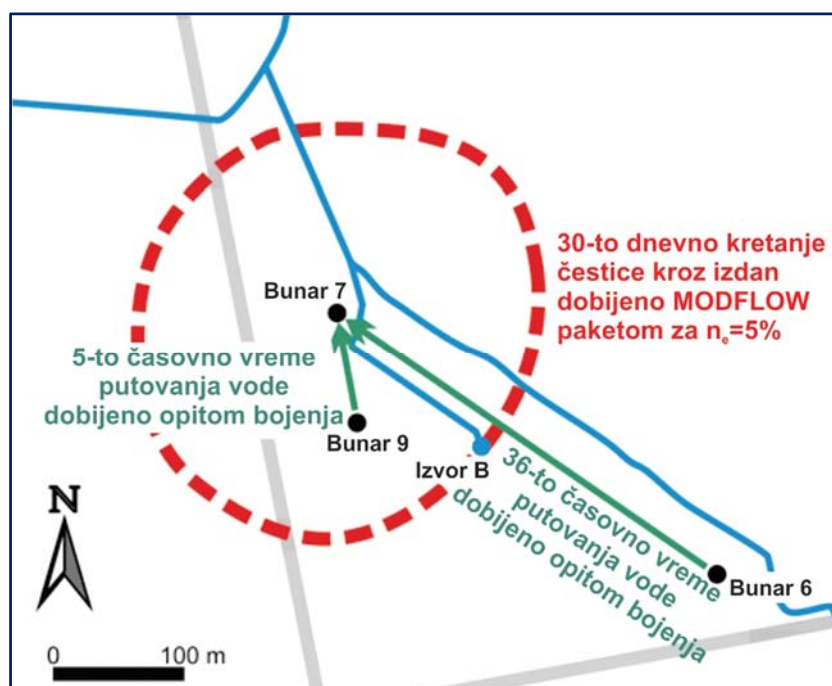
Najčešći kriterijum pri određivanju **uže zone zaštite** jeste vreme koje je potrebno da se broj patogenih bakterija na putu podzemne vode do vodozahvatnog objekta redukuje na prihvatljiv nivo. Obično je to vreme od 50 dana iako se u nekim zemljama (Danska, Mađarska, Slovačka, Slovenija, Irska, Švajcarska, Velika Britanija) pored vremenskog faktora uvodi i minimalni radijus oko vodozahvatnog objekta koji ova zona mora da obuhvati.

Šira zona zaštite se određuje prema očekivanom vremenu potrebnom za degradaciju ili značajnim smanjenjem prisustva kontaminanata u izdani. U nekim slučajevima ona se određuje preko vremena potrebnog za implementaciju remedijacionih mera za uklanjanje zagađujućih supstanci, čije se prisustvo ne smanjuje filtracijom kroz poroznu sredinu. Slično kao i kada je u pitanju II zona, ova zona zaštite najčešće se određuje preko vremena putovanja podzemne vode ka vodozahvatnom objektu (pr. 200 dana).

U mnogim zemljama (Hrvatska, Mađarska, Slovenija) uvodi se i **još šira zona zaštite** koja obuhvata celokupno slivno područje koje se drenira preko vodozahvatnog objekta. Primenom ove zone omogućava se dugotrajna održivost kvaliteta podzemnih voda.

Pri definisanju različitih zona sanitarne zaštite, u praksi se veoma malo vodi računa o različitosti hidrogeoloških uslova, koji karakterišu određena izvorišta podzemnih voda

koje se štite. Ovakav pristup je jednostavniji za primenu, posebno prilikom donošenja zakonskih regulativa vezanih za njihovu zaštitu, međutim u prošlosti, ovakva praksa je dovodila do brojnih zagađivanja, koja su nekada za posledicu imala i ljudske žrtve. Karakterističan primer predstavlja kontaminacija izvorišta za vodosnabdevanje grada Walkerton, Ontarijo, Kanada (Worthington, 2011; Goldscheider et al., 2007; Krešić, 2013). Grad se snabdevao podzemnim vodama sa tri bunara koja kaptiraju paleozojsku karstnu izdan debljine 70 m, sa debelim slojem glinovitim sedimenata (3-30 m) u povlati. Kontaminacija se dogodila u maju 2000 godine, nakon izlučivanja veoma obilnih padavina. Kasnija istraživanja su utvrdila da su uzrok kontaminacije patogene bakterije dospele iz stajskog đubriva. Posledica ovog događaja je sedam preminulih i 2300 obolelih osoba. Prikazani slučaj kontaminacije predstavlja karakterističan primer zanemarivanja specifičnosti hidrogeoloških uslova koji vladaju na predmetnom području. Prvobitno, postojeći hidrogeološki uslovi su analizirani primenom hidrodinamičkog modela, gde je razbijena karstna izdan šematizovana kao ekvivalentna zbijenoj poroznoj sredini sa efektivnom poroznošću od 5% (slika 2.6).



Slika 2.6. Predviđeni 150 metarski prečnik za 30 dnevno putovanje vode ka bunaru 7 u gradu Walkerton dobijeno hidrodinamičkim modelom pretpostavljajući efektivnu poroznost 0.05, kao i rezultati opita trasiranja od bunara 6 i 9 ka bunaru 7 (Worthington, 2011)

Modelovanjem 30-to dnevnog kretanja čestice kroz izdan dobijene su zone koje su obuhvatile prostor 150-290 m, oko eksploatacionih objekata odnosno bunara. Kasnije su primenjeni opiti trasiranja pokazali da su stvarne brzine kretanja podzemnih voda nekoliko stotina puta veće od prvobitno utvrđenih, što je ukazivalo na to da bi izvor zagađivanja mogao biti mnogo udaljeniji nego što su rezultati prvobitnih istraživanja ukazivali (Worthington, 2011).

Prikazani primer naglašava značaj i neophodnost izvođenja adekvatnih hidrogeoloških istraživanja u cilju zaštite izvorišta podzemnih voda. U procesu delinacija sanitarnih zona neophodno je analizirati uslove prihranjivanja, cirkulacije vode kroz nadizdansku zonu, kretanje vode kroz izdansku zonu, kao i ostale faktore koji mogu da utiču na sudbinu kontaminata na putu do vodozahvatnog objekta. Posebno treba voditi računa o specifičnostima kojima se karakterišu pojedini tipovi izdani, kao što je to slučaj kod aluvijalnih ili karstno-pukotinskih izdani.

3. POSTOJEĆI PRISTUPI U ODREĐIVANJU ZONA SANITARNE ZAŠTITE

Određivanje zona sanitarne zaštite predstavlja proces koji u sebi sadrži značajnu nesigurnost jer faktori koji utiču na veličinu zona zaštite obično nisu dovoljno poznati i značajno variraju u prostoru, a ponekada i u vremenu. Zbog toga izrada hidrogeološke studije zaštite pojedinih izvorišta podzemnih voda predstavlja kompleksan i multidisciplinarnan zadatak. I pored toga što najznačajniju ulogu u određivanju zona zaštite ima hidrogeolog, u rešavanje ovog zadatka treba da se uključe i inženjeri srodnih disciplina kao što su hemičari, mikrobiolozi, prostorni planeri, administratori i sl. (Waegeningh, 1985). Konačan rezultat sprovedenih istraživanja treba da rezultira uvođenjem zona zaštite, koje predstavljaju praktično i realistično rešenje. Zone sanitarne zaštite ne smeju da budu prevelike, jer njihovo uvođenje neće biti u skladu sa socijalnim i ekonomskim interesima. Sa druge strane, smanjenje zona zaštite zahteva detaljnije poznavanje uslova prihranjivanja, kretanja i isticanja podzemnih voda, što uzrokuje dodatne troškove.

Veličina i oblik zona zaštite zavise od više faktora, a pre svega od:

- Hidrogeoloških karakteristika izdani;
- Veličine izvorišta podzemnih voda (količine vode koje se eksploatišu);
- Tipa kontaminanata, kao i njihovog izvora;
- Ranjivosti izdani i
- Načina određivanja zona sanitarne zaštite (European Commission, 2007).

Metode za određivanje zona sanitarne zaštite se mogu podeliti u tri kategorije:

- Nehidrogeološke,
- Kvazihidrogeološke i
- Hidrogeološke (Krešić 2007, Krešić 2009, Krešić 2013).

Prvoj grupi pripada metodologija gde se zona zaštite određuje sa proizvoljnim radijusom oko izvorišta podzemnih voda pri čemu određivanje veličine radijusa nema naučnu osnovu.

U grupu kvazihidrogeoloških metoda svrstane su:

- Metoda proračunatog radijusa dejstva bunara,
- Metoda proračuna uticaja dejstva bunara u uniformnom strujnom polju i
- Metoda određivanja zona sanitarne zaštite primenom hidrogeološkog modeliranja koje nije bazirano na rezultatima realnog hidrogeološkog kartiranja.

Pored toga, u grupu kvazihidrogeoloških metoda svrstavaju se i metoda maksimalne depresije u bunaru tokom eksploatacije, zatim metoda procene veličina zona prema moćnosti sredine da u nadizdanskoj i izdanskoj zoni smanji ili kompletno anulira kontaminante (*assimilative capacity*) i metode graničnih uslova (*flow boundaries*) gde se granica zona određuju demarkacijom zona prihranjivanja i drugih hidroloških struktura koje kontrolišu tok podzemne vode (Chave et al., 2006). Iako se gore navedene metode najčešće koriste u određivanju zona sanitarne zaštite, često se dobijaju diskutabilni rezultati jer one ne uzimaju u obzir mnoge značajne parametre, kao što su prirodni tok kretanja podzemnih voda, heterogenost i anizotropija izdani, zaštitna uloga nadizdanske zone i sl.

Grupi hidrogeoloških metoda pripadaju hidrogeološki modeli, bazirani na rezultatima detaljnih hidrogeoloških istraživanja, gde su u značajnoj meri poznate hidrogeološke karakteristike stena kao i hidrodinamički uslovi kretanja podzemnih voda.

Od izbora metode u velikoj meri zavisiće pouzdanost dobijenih rezultata, detaljnost potrebnih podloga, kompleksnost pristupa, troškovi istraživanja i sl. (tabela 3.1). Primena jednostavnijih metoda zahteva malo ulaznih podataka, ali je zato pouzdanost dobijenih rezultata veoma mala. Sa druge strane, primenom metoda detaljnog hidrogeološkog kartiranja sa kompleksnim modeliranjem transporta kontaminanata mogu se dobiti veoma pouzdani podaci. Međutim, ovakav metodološki pristup zahteva veliki broj ulaznih podataka, a samim tim i značajna finansijska sredstva za njihovo dobijanje.

Tabela 3.1. Stepen nesigurnosti i kompleksnosti u primeni različitih metoda u određivanju zona sanitarne zaštite (Chave et al, 2006)

Metoda za određivanje zone sanitarne zaštite	Stepen nesigurnosti	Stepen kompleksnosti*
Metoda fiksnog radijusa (zona zaštite predstavlja krug sa fiksnim radijusom oko vodozahvatnog objekta)	Visok	Nizak
Metoda proračunatog radijusa (zona zaštite predstavlja krug sa definisanim vremenom kretanja vode ka vodozahvatnom objektu)	↑ ↓	↑ ↓
Analitičke metode (zone zaštite se određuju na bazi jednačina koje definišu kretanje podzemne vode i kontaminanata)		
Hidrogeološko kartiranje (metodologija koja zahteva detaljno geološko i hidrogeološko kartiranje kao i pojedine tehnike kao što su opiti trasiranja)	↓ ↑	↓ ↑
Numerički modeli strujanja podzemnih voda (zone zaštite se određuju na bazi simulacije kretanja podzemne vode i kontaminanata)		
	Nizak	Visok

* Stepem kompleksnosti direktno utiče i na cenu istraživanja za potrebe definisanja zona sanitarne zaštite

3.1. Određivanje zona sanitarne zaštite metodom fiksnog radijusa i vremena putovanja vode

Najčešći način određivanja zona sanitarne zaštite jeste kombinacija fiksnog radijusa i vremena putovanja kontaminanata ka vodozahvatnom objektu. Upotreba fiksnog radijusa je najjednostavniji metod delinacije, pri čemu se izdvajanje zona sanitarne zaštite ne bazira previše na lokalnim hidrogeološkim uslovima. Zone su obično predstavljene poligonima ili krugovima oko vodozahvatnog objekta sa unapred definisanim radijusom. Ovakav pristup u određivanju zona, sreće se u mnogim državama, pogotovo u određivanju **I zone**, tzv. neposredne zone zaštite (*wellhead/spring protection zone*). Ona obično obuhvata prostor od minimalno 10 m oko vodozahvatnog objekta bez obzira na hidrogeološke uslove. Samo je u pojedinim zemljama ona veća i to uglavnom za vodozahvatne objekte u karstu (30 m u Nemačkoj, 20 m u Sloveniji, 100 m u Turskoj).

II zona se najčešće naziva Uža zona zaštite (*Inner protection zone*) i vreme putovanja vode je najčešći parametar za njenu delineaciju. Pri određivanju veličine ove zone, u

praksi se koristi hidrodinamičko modeliranje kojim se definišu zone u skladu sa svim relevantnim hidrogeološkim parametrima. U nekim zemljama se kao dodatni kriterijum daje i minimalni radijus kojim se definiše minimalni prostor oko vodozahvatnog objekta koji ova zona mora da obuhvati. Kada su u pitanju karstne izdani, 50-to dnevno putovanje vode kroz izdan veoma često obuhvata kompletan sliv (Nemačka), pa se zato u mnogim zemljama II zona zaštite računa sa mnogo manjim vremenom putovanja (12 h u Sloveniji, 1 dan u Hrvatskoj i Srbiji, 10 dana u Švajcarskoj itd.). U nekim zemljama (Švajcarska) se u određivanju II i III zone primenjuje koncept ranjivosti podzemnih voda o čemu će biti više reči u daljem tekstu.

III zona zaštite tzv. šira zona sanitarne zaštite (*Outer Protection Zone*) može da obuhvati prostor u kojem podzemna voda doputuje do izvora ili bunara za period od 200 dana, godinu dana, 10 godina, ili čitav sliv u zavisnosti od zakonske regulative pojedinih država. Za izvorišta karstnih podzemnih voda, III zona obično obuhvata čitav sliv izvorišta. Ovakav način delinacije može da rezultira izuzetno velikom zonom zaštite, usled čega se u nekim zemljama ona ograničava ili deli na dve zone sa različitim restriktivnim merama (u Nemačkoj se treća zona zaštite deli na zonu 3a koja obuhvata prostor 2 km oko izvora ili bunara i zonu 3b koja obuhvata ostatak sliva).

Kao rezultat specifične problematike zaštite karstnih izvorišta, u nekim zemljama se uvodi više od 3 zone sanitarne zaštite, kako bi se različitim restriktivnim merama lakše izbalansirala upotreba i zaštite zemljišta u slivu izvorišta. Primer za to je Hrvatska, gde zona IIA obuhvata prostor sa kog podzemna voda dotekne za manje od 24h, zona III prostor gde podzemna voda dotekne za manje od 10 dana, zona IV zona sa vremenskim putovanjem podzemne vode ka vodozahvatu od 10 do 50 dana i zona V koja obuhvata čitav sliv (Biondic et al., 1998, Biondic, 2000). U Sloveniji se pored uže zone koja obuhvata prostor za koji voda do izvorišta dođe za manje od 12 h, i šire zone koja obuhvata čitav sliv, uvodi i srednja zona, za delove sliva sa direktnom hidrauličkom vezom sa vodozahvatnim objektom, ali sa vremenom putovanja većim od 12 h (Brenčić et al., 2009).

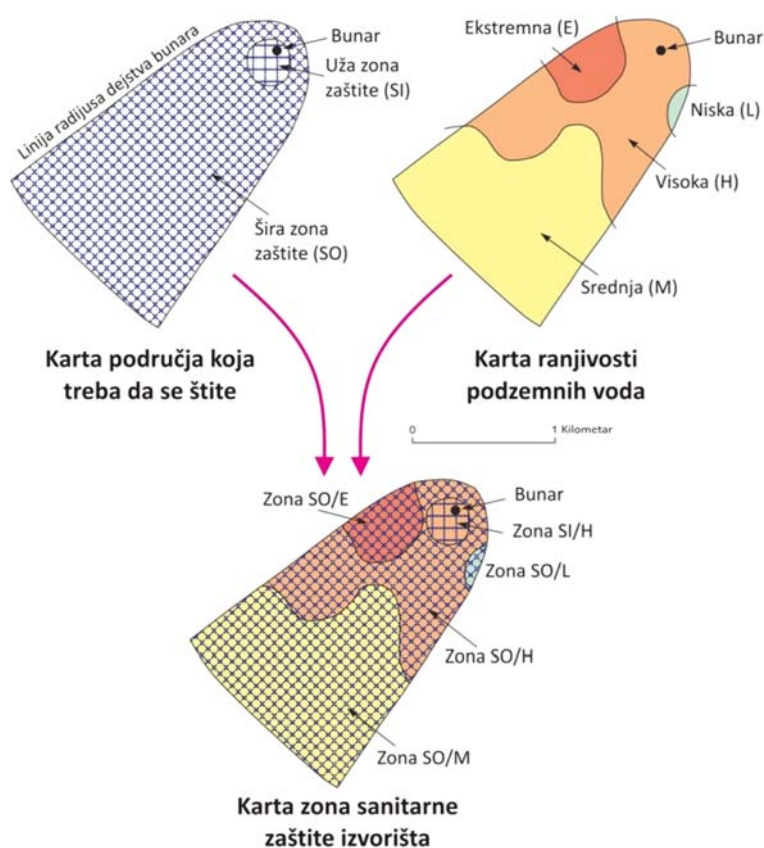
U mnogim zemljama se daje mogućnost smanjenja II i III zone u uslovima kada je izdan pokrivena vodonepropusnim slojem određene debljine koji sprečava infiltraciju voda, a

samim tim i kontaminanata sa površine terena. U pojedinim slučajevim za duboke izdani se kompletno izbacuju II ili III zona zaštite, što značajno može da smanji ekonomske posledice uvođenja zona.

3.2. Određivanje zona sanitarne zaštite koristeći metode za ocenu ranjivosti podzemnih voda

U nekim zemljama (Irska, Engleska, Švajcarska, Srbija), u metodološki postupak određivanja zona sanitarne zaštite uključene su i karte ranjivosti podzemnih voda. Primenom metoda za ocenu ranjivosti podzemnih voda obično se povećava preciznost i sigurnost u određivanju pomenutih zona. Ovim metodama vrši se procena zaštitne uloge nadzidske zone. Procenjeni stepen zaštite se dalje kombinuje sa zaštitnom ulogom izdanske zone čime se znatno unapređuje delineacija sanitarnih zona. Ovaj način određivanja zona sanitarne zaštite u poslednje vreme posebno dobija na značaju u karstnim terenima.

Primer upotrebe karte ranjivosti u određivanju zona sanitarne zaštite prikazan je u takozvanom „Irskom pristupu“ za ocenu ranjivosti podzemnih voda (GSI, 1999). Karta zona sanitarne zaštite se dobija preklapanjem karte koja pokazuje zone sa različitim vremenom kretanja vode ka vodozahvatnom objektu sa kartom ranjivosti podzemnih voda (slika 3.1). Kao rezultat moguće je izdvojiti 4 stepena zaštite u okviru uže zone zaštite (SI/E, SI/H, SI/M, SI/L gde su: SI uža zona zaštite, E – ekstremna, H – visoka, M – srednja i L – niska ranjivost podzemnih voda). Isti princip važi i za širu zonu sanitarne zaštite (SO/E, SO/H, SO/M i SO/L gde je SO oznaka sa širu zonu zaštite, dok su E, H, M i L stepeni ranjivosti podzemnih voda). Za svaku zonu je predviđen različit stepen restriktivnih mera.



Slika 3.1. Određivanje zona sanitarne zaštite objekata za vodosnabdevanje kombinacijom karata ranjivosti podzemnih voda i karte područja koja treba da se štite (GSI 1999)

Jedan od prvih primera primena metoda ranjivosti podzemnih voda u određivanju zona sanitarne zaštite izvorišta karstnih podzemnih voda jeste EPIK metoda (Doerfliger and Zwahlen 1997). Prema autorima ove metode, ranjivost karstne izdani je direktno u funkciji razvoja epikarsta, pedološkog sastava i debljine tla, uslova infiltracije i razvijenosti karstne mreže. Zone sanitarne zaštite su u direktnoj vezi za stepenom ranjivosti podzemnih voda.

3.3. Određivanje zona sanitarne zaštite na bazi procene rizika od zagađivanja podzemnih voda

U 2001. godini je u zakonsku regulativu Holandije inkorporiran novi metodološki pristup u određivanju ZSZ-a (Chave et al., 2006). Cilj ovog pristupa bio je da se dostigne zdravstveni cilj od 1 infekcije godišnje na 10 000 ljudi koja je posledica korišćenja vode

za piće. Dostizanje ovakvog cilja se vezuje za purifikaciona³ svojstva sredine koja treba da omoguće sadržaj potencijalnih kontaminanata ispod granice MDK. Kao primer se navodi maksimalna koncentracija virusa koja treba da bude $1,8 \cdot 10^{-7}$ po litru. Ako se uzme prosečan sadržaj virusa u površinskim vodama, onda dolazimo do toga da se on u površinskoj vodi koja hrani izdan na putu do vodozahvatnog objekta mora smanjiti 10^5 - 10^8 puta. Koliki je put neophodan vodi da bi se dostigao ovaj cilj zavisi od mnogih parametara sredine, kao što su filtracione karakteristike sredine, karakter nadizdanske zone, dubine do nivoa podzemnih voda i sl. Sve ove parametre treba uzeti u obzir pri definisanju zona sanitarne zaštite, što će omogućiti zaštitu od kontaminacije i održavanje kvaliteta podzemnih voda, koja odgovara riziku infekcije od 10^{-4} po osobi po godini. U praksi ovo znači da je u sredinama sa slabijim autopurifikacionim svojstvima potrebno da druga zona zaštite bude veća od puta koji voda pređe za 60 dana, pa je zato u Holandiji i promenjen kriterijum za određivanje druge zone sanitarne zaštite.

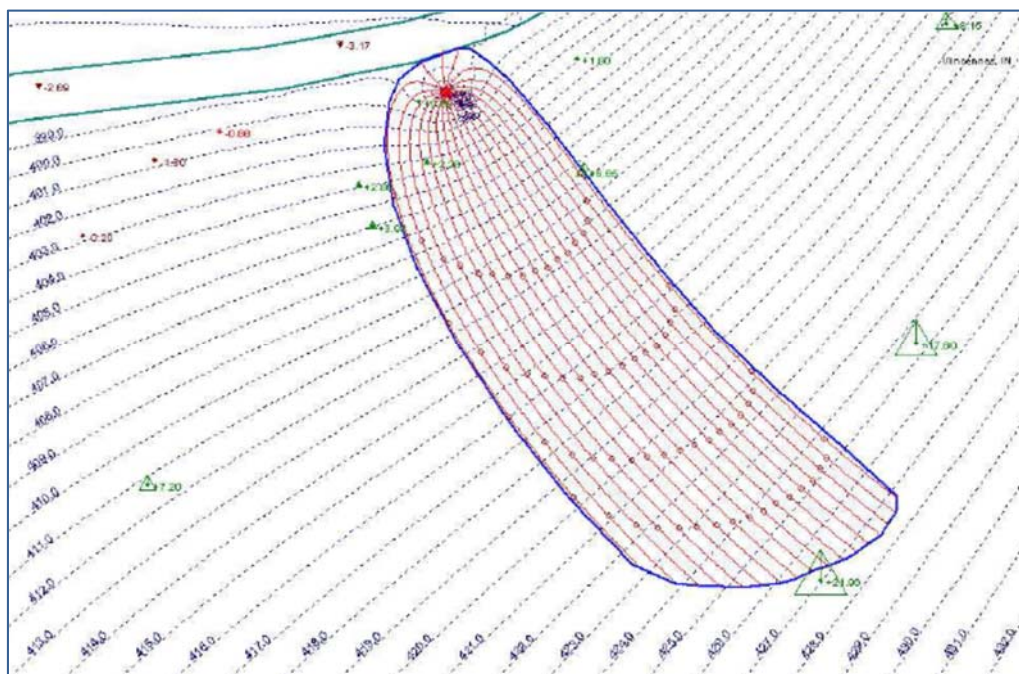
3.4. Određivanje zona sanitarne zaštite koristeći hidrodinamičke modele kretanja podzemnih voda

Hidrodinamički modeli kretanja podzemnih voda predstavljaju nezaobilazne alatke pri određivanju zona sanitarne zaštite velikih izvorišta formiranih u izdanima intergranularne poroznosti.

Prednosti hidrodinamičkih modela u hidrogeološkim istraživanjima su višestruke. Koriste se za identifikaciju parametara vodonosne sredine, za procenu upravljačkih odluka na već formirane sisteme kao i za prognozu razvoja različitih procesa kao što su promene režima izdani, transport kontaminanata kroz izdan, procese sleganja ili deformacije tla itd. (Polomčić, 2001). Kao rezultat primene hidrodinamičkog modeliranja dobijaju se karte sa iscrtanim strujnicama kretanja podzemne vode ka vodozahvatnom objektu. Prilikom izrade ovih karata moguće je zadati vremenski interval prema kojem se na karti iscrtavaju tačke između kojih podzemna voda pređe rastojanje za zadato vreme (slika 3.2). Sa

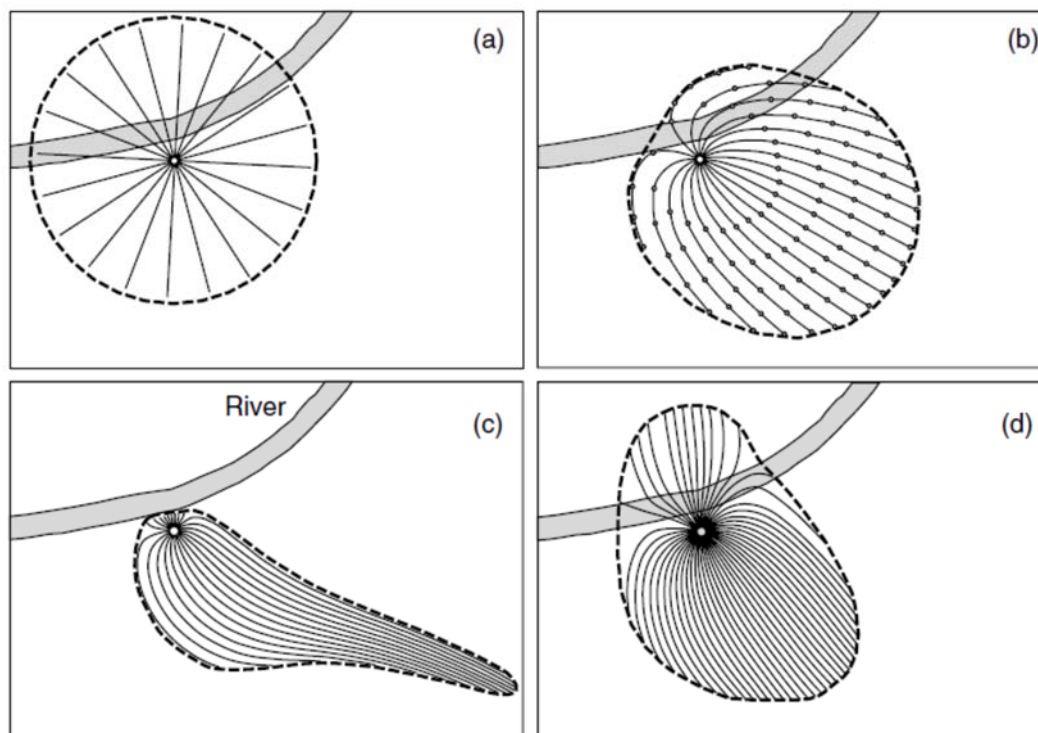
³ Skup prirodnih procesa koji dovode do eliminacije određenih nepoželjnih organskih, pa i neorganskih biološki razgradljivih, supstanci iz površinskih i podzemnih voda.

ovakvom podlogom veoma je lako izdvojiti zonu u kojoj podzemne vode doputuju do vodozahvatnog objekta za zadati vremenski interval. Samim tim i delineacija sanitarnih zona postaje znatno olakšana.



Slika 3.2. Strujnice koje pokazuju putanje kretanja podzemne vode ka bunaru dobijene primenom hidrodinamičkog modeliranja. Crveni kvadrati na strujnim linijama pokazuju rastojanje koje voda pređe za period od godinu dana (Kraemer et al., 2005.)

Za uspešnu primenu hidrodinamičkih modela neophodno je dobro poznavanje hidrogeoloških uslova na terenu. Što se više informacija inkorporira u model to će verodostojnija biti i dobijena strujna slika. Tako na primer, zona uticaja bunara i putanje strujnih linija biće veoma različiti ako se na jednom izvoristu uzmu u obzir prirodni gradijent podzemnog toka, prihranjivanje iz reke ili pak kolmatiranost rečnog korita (slika 3.3.).



Slika 3.3. Strujna slika koja pokazuje petogodišnje vreme putovanja čestica podzemne vode ka bunaru pored reke. Strujna slika dobijena: a) na bazi prostog proračuna radijusa uticaja bunara; b) koristeći podatke o prirodnom strujnom toku; c) uvođenjem granice konstantnog potencijala (reke) i d) uzimajući u obzir otpor koji se javlja prilikom filtracije kroz rečno korito (Krešić, 2009)

Hidrodinamički modeli se retko koriste za određivanje zona sanitarne zaštite izvorišta karstnih podzemnih voda, kao i za izvorišta podzemnih voda pukotinskih izdani. Razlog za to su visoki zahtevi za ulaznim podacima koji se pre svega odnose na dobro poznavanje heterogenosti izdanske i nadizdanske zone, koji su u većini slučajeva nedostupni. Primena modela može da rezultira velikim greškama što je prikazano na primeru grada Walkerton (Poglavlje 2). Značajan napredak u simuliranju funkcionisanja karstnih sistema jeste napravljen primenom MODFLOW CFP (Reimann, Hill, 2009) i MODFLOW-USG (Panday et al, 2013) paketa. Međutim, ovi paketi su još uvek u razvoju i pojedini moduli neophodni za određivanje zona sanitarne zaštite kao što transport kontaminanata (fate and contaminant transport) kao i praćenje putanja kretanja čestica podzemnih voda (*particle tracking*) još uvek nisu dostupni (Krešić, 2013).

4. OSVRT NA POSTOJEĆU ZAKONSKU REGULATIVU I NAČIN ODREĐIVANJA ZONA SANITARNE ZAŠTITE U EVROPI I U SRBIJI

4.1. Zaštita podzemnih voda u Evropskoj uniji

Menadžment podzemnim vodama u zemljama članicama Evropske unije je u velikoj meri pod okriljem Evropske direktive za vodu (*Directive 2000/60/EC: Establishing a Framework for Community Action in the Field of Water Policy - Water Framework Directive*) koja je doneta 23. oktobra 2000. godine. Cilj Direktive je da se uspostavi okvir za delovanje članica država na polju zakona iz domena voda. Njeno osnovno načelo je održivo korišćenje voda zasnovano na dugoročnoj zaštiti vodnih resursa. Direktiva teži ka tome, da se stvori dobar okvir za zaštitu površinskih i podzemnih voda, pri čemu se posebna pažnja poklanja:

- Sprečavanju daljeg narušavanja kao i poboljšanju statusa voda,
- Promociji održivog korišćenja vode i
- Stalnom smanjenju količine polutanata koji se unose u izdan.

U odeljku 4 Direktive, ciljevi zaštite životne sredine podeljeni su na: površinske i podzemne vode i zaštitna područja. U aneksu 4 Direktive, detaljnije se definiše termin „zaštićena područja“:

1. Zaštićena područja u kojima se eksploatišu podzemne vode namenjene za ljudsku upotrebu (Područja zaštite pijaćih voda⁴).
2. Zaštićena područja u kojima se štite ekonomski bitne biljke i životinje koje žive u vodi.
3. Zaštićena područja u kojima se nalaze vode namenjene za rekreaciju uključujući i vode za kupanje definisane direktivom 76/160/EEC.

⁴ DWPA - Drinking Water Protected Areas

4. Zaštićena područja u kojima se nalaze podzemne vode ranjive na zagađivanje sa površine (definisano Direktivama 91/676/EEC (*The Nitrates Directive – Direktiva o nitratima*) i 91/271/EEC (*The Urban Waste-water Treatment Directive – Direktiva o tretmanu urbanih otpadnih voda*)).
5. Zaštićena područja namenjena zaštiti staništa pojedinih vrsta gde je održavanje i poboljšanje kvaliteta vode značajan faktor za njihovu zaštitu (*Direktive* 92/43/EEC i 79/409/EEC).

U poglavlju 7 Direktive bliže se određuje zadatak članica Unije da identifikuju sva vodna tela⁵ namenjena za vodosnabdevanje, kapaciteta 10 m³/dan ili koja služe vodosnabdevanju više od 50 osoba. Obaveza članica je da se za ova vodna tela omogući neophodna zaštita kroz sprečavanje narušavanja njihovog kvaliteta i uvođenje odgovarajućih zona sanitarne zaštite. Sam način definisanja sanitarnih zona nije definisan ovom Direktivom. Prema uputstvu broj 16 (*Guidance on Groundwater in Drinking Water Protected Areas*) koje je deo strategije za implementaciju vodne Direktive (2000/60/EC), određivanje zona sanitarne zaštite, prepušteno je članicama Unije. Data je i preporuka da njihova veličina treba da zavisi od:

- Hidrogeoloških karakteristika izdani,
- Količine vode koja se eksploatiše,
- Vrste kontaminanta i njihovih izvora za koje su zaštitne mere neophodne,
- Od proračuna vremena putovanja ka vodozahvatnom objektu i
- Ranjivosti podzemnih voda.

4.2. Zaštita izvorišta podzemnih voda u nekim zemljama Evropske unije

Evropska direktiva za vode daje osnovne smernice za zaštitu podzemnih i površinskih voda. Međutim, određivanje zona zaštite za postojeća i buduća izvorišta podzemnih voda, kao i preventivnih mera koje se propisuju za svaku od njih, ostavljeno je članicama Unije. U najvećem broju zemalja, zaštita izvorišta podzemnih voda, bazirana je na uvođenju tri

⁵ Prema Evropskoj direktivi za vodu (*Directive 2000/60/EC*) telo površinske vode odnosi se na izdvojeni deo površinske vode kao što je jezero, potok, reka, ili deo potoka ili reke. Telo podzemne vode predstavlja akumulaciju vode ispod površine terena tj. deo izdani.

zone sanitarne zaštite (tabela 4.1). Dok se prva zona uglavnom određuje metodom fiksnog radijusa, kod uže i šire zone zaštite, u obzir se obično uzima vreme putovanja vode ka vodozahvatnom objektu.

Tabela 4.1. *Primer određivanja zona sanitarne zaštite u Evropi i u nekim zemljama sveta (COST Action 65, 1995; Margane, 2003; Chave et al., 2006; Carey et al., 2009, modifikovano).*

Zemlja	Zona neposredne zaštite (Zona I)	Uža zona zaštite (Zona II)	Šira zona zaštite (Zona III)	Komentar
Australija	50 m	10 godina	Ceo sliv	
Austrija	<10 m	60 dana	Ceo sliv (podeljen kod velikih slivova, na bazi radijusa od 2 km)	
Belgija (Walloon Region)	10 m	IIa: 24 h ili > 25 m, U karstu: uključuje sve zone koncentrisane infiltracije sa dokazanom vezom sa objektom koji se štiti, IIb: 50 dana kod izdani pod pritiskom, Za slobodne izdani: Peskovite.: IIa + 100 m Šljunkovite: IIa + 500 m Karst: IIa + 1000 m	Ceo sliv	
Hrvatska	IA: Neposredna zona izvora IB: Neposredna slivna zona	IIA: 24 h = "Zona strogog režima" III: 1-10 dana= "Zona limitacije i kontrole"	IV: 10-50 dana = "Zona ograničene zaštite"	"Specijalno zaštićene zone - Površni vodnih rezervi" obuhvata ceo sliv
Danska	10 m	60 dana ili 300 m	10-20 godina	
Francuska	<hektar	50 dana	Ceo sliv, nije obavezan	
Nemačka	10-30 m	50 dana Ceo sliv za otkrivene karstne akvifere gde je $t < 50$ dana	Ceo sliv (podeljen kod velikih slivova, na bazi radijusa od 2 km) Ceo sliv za otkrivene karstne akvifere	II i III zona mogu biti smanjene ako su prisutni vodonepropusni prekrivajući slojevi Zona II nije neophodna za duboke karstne akvifere
Holandija		60 dana (zamenjeno sa analizom rizika od zagađivanja)	100 godina	
Madarska	10-20 m	20 dana, min 100 m 75 dana (karstni akviferi)	6 meseci	5, 50 godina i cela zona prihranjivanja (hidrogeološke zaštitne zone A, B, C)

Irska	10 m	100 dana ili 300 m	Ceo sliv ili 1000 m	
Italija	>10 m	60 dana	180-365 dana u zavisnosti od ranjivosti pod. voda	
Portugal	20-60 m	50 dana ili 40-280 m u zavisnosti od tipa akvifera	3500 dana ili 350-2400 m u zavisnosti od tipa akvifera	
Slovačka	10-50 m	50 dana ili >50 m	Ceo sliv	
Slovenija	10 m 20 m za karstne akvifere	50 dana (min 50 m) <12 h za karstne akvifere	Ceo sliv	Srednja zona 400 dana (min 25% od slivne površine) >12 h za karstne akvifere
Španija	24 h	50 dana (porozne stene) 100 dana (karstni akviferi)	1 godina	
Švajcarska	10 m	10 dana (min 100 m od zone I) Na bazi ranjivosti podzemnih voda za karstne akvifere	Duplo veća od II zone Na bazi ranjivosti podzemnih voda za karstne akvifere	
Turska	50 m (porozne stene), 100 m (karst)	50-250 m (porozne stene), 100-500 m (karst)	Zona prihranjivanja	
Velika Britanija	Područje oko vodozahvata	50 dana (min 50 m)	400 dana (min 25% od slivne površine)	

U daljem tekstu biće prikazana metodologija određivanja zona sanitarne zaštite u nekim zemljama Evropske unije.

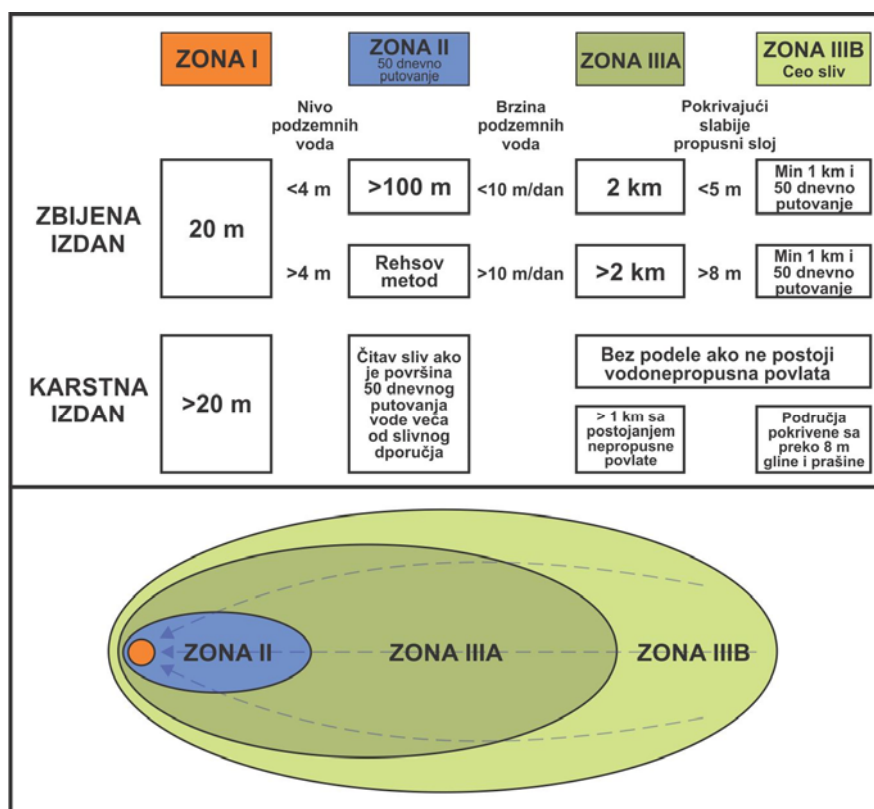
Nemačka

U Nemačkoj se zaštita podzemnih voda bazira na pravilniku postupanja u zaštićenim zonama podzemnih voda (DVGW, 1995). Prema ovoj regulativi, u cilju zaštite izvorišta podzemnih voda, uvode se tri zone (slika 4.1):

- I zona zaštite koja se uspostavlja neposredno oko vodozahvatnog objekta i koja treba da spreči zagađivanje izdani direktno kroz vodozahvat. Obuhvata prostor od najmanje 10 m oko vodozahvata, najmanje 20 m u pravcu toka ka izvoru i 30 m u pravcu toka za slučaj karstnih izvora.
- II zona zaštite treba da spreči mikrobiološko zagađivanje. Definiše se na osnovu puta koji čestica vode pređe za 50 dana do vodozahvatnog objekta, pri čemu taj prostor ne sme da bude manji od 100 m.

- III zona treba da omogući zaštitu podzemnih voda od svih kontaminanata uključujući i one slabo razgradive kao što je primer pojedinih hemijskih jedinjenja i radioaktivnih supstanci. Obično obuhvata čitav sliv, odnosno celu oblast iz koje podzemne vode teku ka vodozahvatnom objektu.

Za slučaj da je slivna površina veoma velika, pravilnikom je data mogućnost da se III zona zaštite podeli na dve zone IIIa i III b. U tom slučaju se IIIa zona uspostavlja na udaljenosti od 2 km od vodozahvatnog objekta, dok IIIb zona obuhvata ostatak sliva. Ovakva podela III zone nije moguća za pukotinske i karstne izdani koje nisu zaštićene površinskim slabije propusnim slojevima. U slučaju kada se podzemna voda kreće toliko brzo da za manje od 50 dana dospe iz svih delova slivnog područja, onda se uspostavlja samo II zona zaštite. Pomenuti pravilnik takođe daje mogućnost izostavljanja II zone sanitarne zaštite, za slučaj da bunari kaptiraju duboke vodonosne horizonte pokrivene vodonepropusnim slojevima.

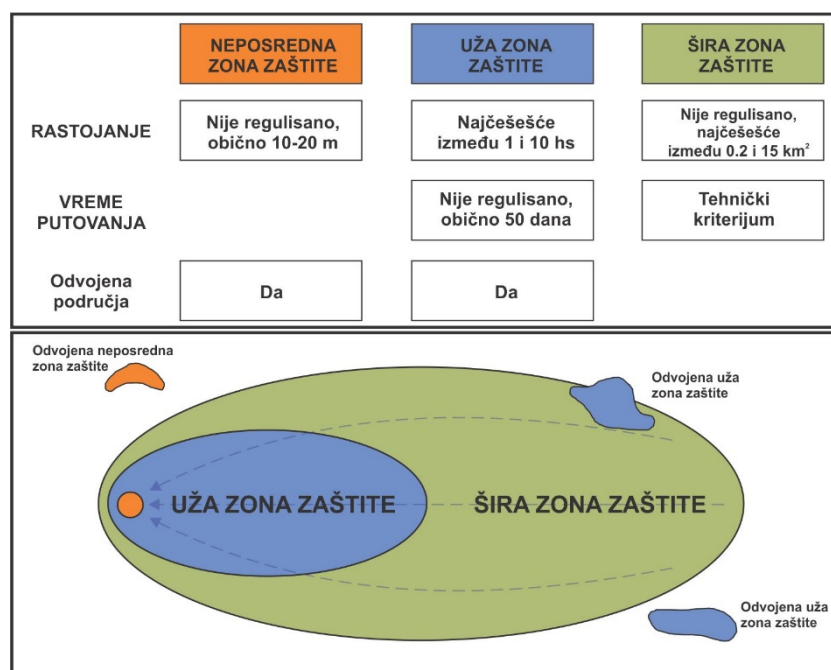


Slika 4.1. Određivanje zona sanitarne zaštite objekata za vodosnabdevanje u Nemačkoj (Garcia-Garcia & Martinez-Navarrete, 2005)

Francuska

Sistematska zaštita površinskih i podzemnih voda u Francuskoj započinje 1992. godine usvajanjem Zakona o vodama kojim je propisano uspostavljanje zona sanitarne zaštite za sva izvorišta podzemnih voda (slika 4.2). Ovim zakonom je predviđeno da se za svako izvorište uvede neposredna, bliža i udaljena zona zaštite.

Neposredna zona zaštite je obavezna i treba da obuhvati prostor od nekoliko stotina m² do par hektara (najčešće 30x30 m). Zemljište u ovom prostoru mora biti u vlasništvu države, a u slučaju da nije radi se eksproprijacija. Ova zona mora biti ograđena. Bliža zona zaštite je takođe zakonski obavezna. Određuje se na bazi brzine i pravca kretanja podzemnih voda ka vodozahvatnom objektu. Iako vreme putovanja ka vodozahvatu nije definisano zakonom, u praksi se najčešće koristi vremenski period od 50 dana. Udaljena zona zaštite nije obavezna, a određuje se u cilju zaštite kompletnog slivnog područja. Često može da obuhvati veliku površinu.



Slika 4.2. Određivanje zona sanitarne zaštite objekata za vodosnabdevanje u Francuskoj (Garcia-Garcia & Martinez-Navarrete, 2005)

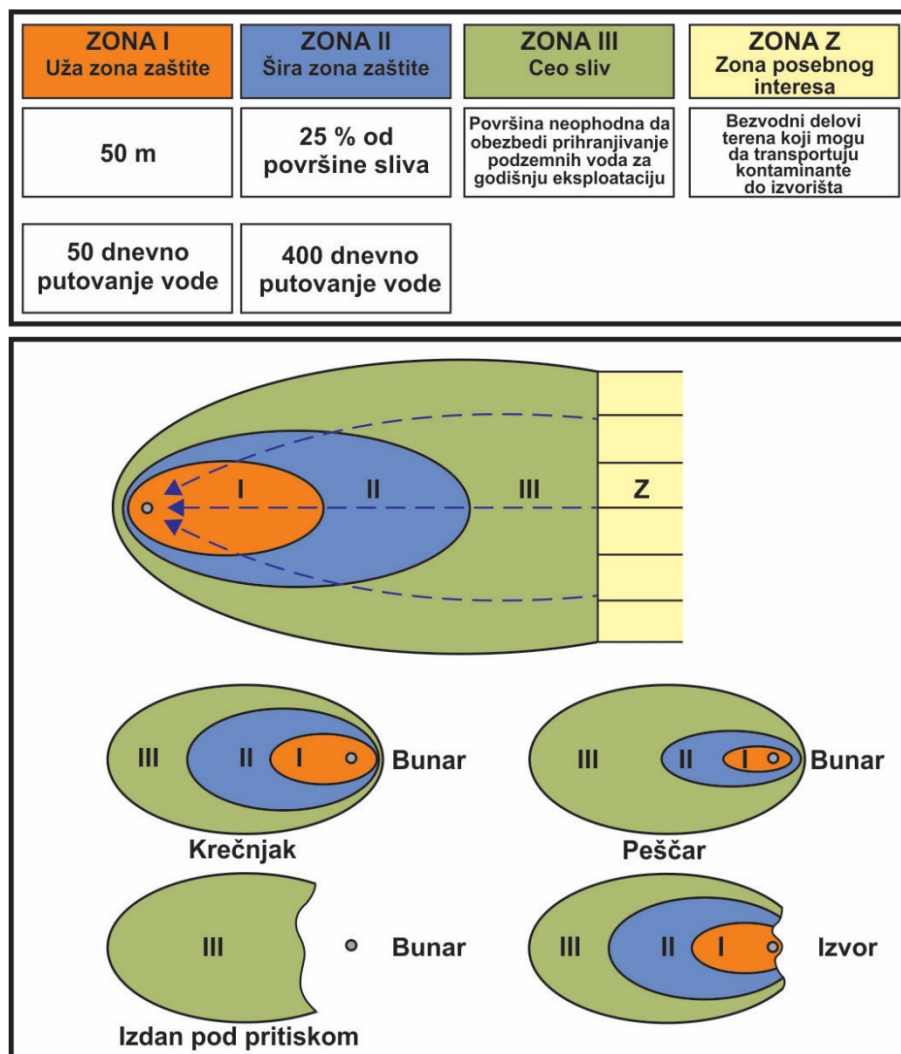
Ovako definisan sistem zaštite nije mnogo primenjivan u praksi. U periodu od 5 godina nakon donošenja zakona, uspešno je zaštićeno samo 32% izvorišta podzemnih voda. Razlog tome je jak otpor primeni ovog zakona od strane farmerskih asocijacija, usled čega je kvalitet podzemnih voda u Francuskoj i dalje u mnogim slučajevima nezadovoljavajući.

Velika Britanija

Velika Britanija ima dugu tradiciju u zaštiti podzemnih voda. Prema zakonu o vodnim resursima iz 1991. godine, za zaštitu površinskih i podzemnih voda, zadužena je Agencija za životnu sredinu. Kao rezultat rada agencije, do sada su za više od 2000 izvorišta uspostavljene zone sanitarne zaštite. Pravilnikom o zaštiti podzemnih voda iz 1998 godine, predviđene su tri zone sanitarne zaštite (slika 4.3):

- Zona I ili uža zona zaštite koja se definiše na bazi 50-dnevnog kretanja vode iz bilo koje tačke izdani do vodozahvatnog objekta. Ovo rastojanje ne sme da bude manje od 50 m.
- Zona II ili šira zona zaštite koja se definiše na bazi 400-dnevnog kretanja vode iz bilo koje tačke izdani do vodozahvatnog objekta ili na bazi 25% od slivne površine u zavisnosti od toga koja zona je veća. U poslednje vreme postoji težnja da se izbacila upotreba 25-procentne veličine sliva kao kriterijuma za određivanje II zone. Razlozi za to su višestruki, ali se kao najbitniji navodi česta pojava da je usvojena zona višestruko veća od modelski potvrđenog 400-dnevnog kretanja vode ka bunaru ili izvoru.
- III zona ili zona zaštite sliva izvorišta, obuhvata prostor oko vodozahvata zajedno sa zonom prihranjivanja izdani.

Pored ovih, za pojedina izvorišta se uvodi i IV zona zaštite, nazvana zona posebnog interesa. Ona obično obuhvata slivove reka koje poniru i na taj način hrane izdan. Prilikom određivanja zona sanitarne zaštite, početkom devedesetih su zone imale jednostavne oblike koji su se dobijali primenom hidrauličkih jednačina. Danas se rade konceptualni hidrogeološki modeli, a zatim i hidrodinamički modeli kojima se preciznije određuju pravci i vremena kretanja podzemnih voda.



Slika 4.3. Određivanje zona sanitarne zaštite objekata za vodosnabdevanje u Velikoj Britaniji (Garcia-Garcia & Martinez-Navarrete, 2005)

Švajcarska

Zaštita podzemnih voda u Švajcarskoj predviđena je Zakonom o zaštiti voda iz 1991. godine, kao i Uredbom o zaštiti voda iz 1998. godine. Određivanje ZSZ se definiše Pravilnikom o zaštiti podzemnih voda iz 2000 godine. Za izvorišta koja su u eksploataciji za javno vodosnabdevanje uvode se tri zone zaštite: S1, S2 i S3, koje se definišu na bazi rezultata hidrogeoloških istraživanja (slika 4.4).

Za sve tipove izdani, izuzev karstne, uvode se:

- S1 zona zaštite koja obuhvata min. 10 m oko bunara. Kod izvora se ograđuje prostor od 10 m oko zone isticanja podzemnih voda.
- S2 zona se definiše preko 10-dnevnog vremena putovanja podzemnih voda. Rastojanje od zone S1 do granice zone S2 mora da bude najmanje 100 m. Dozvoljeno je smanjenje zone S2 ukoliko se dokaže da je izdan zaštićena slabije propusnim pokrivačem debljine najmanje 2 m. Ne određuje se za duboke izdani, kod kojih je dokazano odsustvo hidrauličke veze sa plićim izdanima.
- S3 zona obuhvata prostor koji treba da bude takve veličine da rastojanje između zona S3 i S2 bude veće od rastojanja između zona S2 i S1.

Kada su u pitanju karstni tereni, u Švajcarskoj se ZSZ određuju na bazi karata ranjivosti dobijenih primenom EPIK metode. U zavisnosti od razvijenosti epikarsta, zaštitnog pokrivača, uslova infiltracije i razvijenosti mreže karstnih kanala, izdvajaju se zone sa različitim stepenom ranjivosti, koje se transformišu u zone sanitarne zaštite.



Slika 4.4. Određivanje zona sanitarne zaštite objekata za vodosnabdevanje u Švajcarskoj
(Garcia-Garcia & Martinez-Navarrete, 2005)

Mađarska

Prema Zakonu o vodama iz 1996. godine, vlasnici prava na eksploataciju podzemnih voda dobijaju zaduženje da ove resurse učine bezbednim. Prema Pravilniku iz 1997. godine, propisana je zaštita područja oko bunara koji služe za javno vodosnabdevanje, dok je za korisnike privatnih bunara sprovođenje zaštitnih mera ostavljeno kao opcija. Zaštita je sprovedena definisanjem 5 zona sanitarne zaštite:

- Uža zona zaštite koja odgovara 20-to dnevnom putovanju čestice vode do vodozahvata,
- Šira zona zaštite koja odgovara 6-to mesečnom putovanju čestice vode do vodozahvata,
- Hidrogeološka zaštitna zona A koja odgovara 5-to godišnjem putovanju čestice vode do vodozahvata,
- Hidrogeološka zaštitna zona B koja odgovara 50-to godišnjem putovanju čestice vode do vodozahvata i
- Hidrogeološka zaštitna zona C koja obuhvata celokupan prostor na kome se izdan prihranjuje.

Kao dodatan propis propisana je obaveza da se šira zona, kao i hidrogeološke A i B zone zaštite, određuju hidrodinamičkim modeliranjem.

4.3. Osvrt na zakonske regulative iz oblasti zaštite podzemnih voda u Srbiji

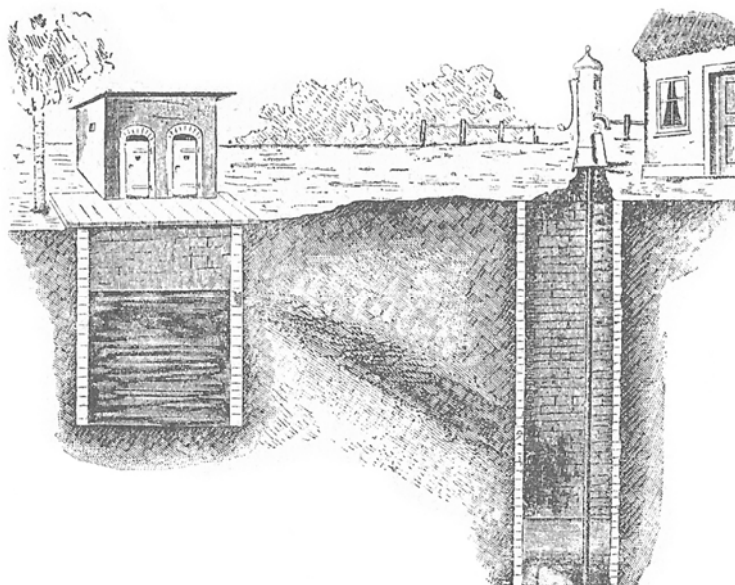
4.3.1. Istorijat zaštite podzemnih voda u Srbiji

Zaštita podzemnih voda se u našoj zemlji oduvek odvijala u skladu sa postojećom zakonskom regulativom. Prvi zakon u Srbiji koji je sadržao i članove vezane za zaštitu životne sredine i površinskih i podzemnih voda donet je 1850. godine u tadašnjoj Kneževini Srbiji. „Kazniteljnj zakonik za policijske prestupke“ je sadržao pet članova koji upućuju na rešavanje problematike iz oblasti hidrogeologije i ekologije (Vilimonović, 1997). Paragraf 64 ovog zakona propisuje kaznene zatvorske mere za

svakoga ko u bunar, kladenac ili potok, koji se koristi za vodosnabdevanje pijaćom vodom ljudi ili stoke, baci leš životinje, đubre ili bilo šta drugo što može „opoganiti“ vodu. Paragraf 65 propisuje istu kaznenu meru, ali za zagađivanje reka.

Po mnogim autorima, jedan od najznačajnijih srpskih naučnika koji se bavio izučavanjem postojanja, korišćenja, a samim tim i zaštitom podzemnih voda jeste Svetolik Radovanović (Filipović i Dimitrijević 1990; Dragišić 1997; Filipović 1997; Grubić 1997; Komatina 1992; Milivojević 1997; Stevanović 2012; Dragišić & Živanović, 2014). Zbog brojnih objavljenih radova na temu podzemnih voda, a posebno zbog svog dela „Podzemne vode – izdani, bunari, terme i mineralne vode“ (Radovanović, 1897), ovaj velikan srpske nauke se smatra osnivačem srpske hidrogeologije (Dragišić 1997).

U poglavlju 4 ovog dela, koje se bavi sastavom vode i njenih osobina, Radovanović opisuje efekat prečišćavanja vode prilikom filtracije kroz poroznu sredinu. Takođe daje primere narušavanja kvaliteta podzemne vode na prostorima gde se ljudi naseljavaju (slika 4.5). Kao izvori zagađivanja navode se „nužnici, đubrišta, pomijare i svakovrsna trulež...“. U istom poglavlju Radovanović ukratko navodi i smernice kako očuvati kvalitet podzemne vode. Kao prvi činilac se navodi sam teren i njegov geološki sastav koji treba da bude takav da je u potpunosti isključena mogućnost da se voda slučajno zagadi.



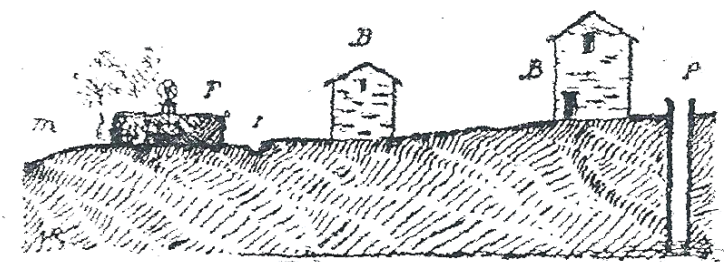
Slika 4.5. Zagađivanje bunarske vode od nužnika (Radovanović, 1897)

Pored poznavanja podzemnih voda, verovatno najznačajniji doprinos njihovoj zaštiti daje Jovan Žujović. U svojoj monografiji „Snabdevanje sela vodom – Izvori i bunari“ (Žujović, 1931) pored problema vodosnabdevanja, posebnu pažnju posvećuje zaštiti podzemnih voda (Filipović 1997; Stevanović 2012).

U posebnom poglavlju „*Obrana podzemne vode*“ Žujović govori o uspostavljanju zona sanitarne zaštite. Kako navodi na početku ovog poglavlja: „*Obrana podzemne vode sastoji se u tome da se pod takav nadzor stavi onaj prostor površine pod kojim se nalazi tok struje ka izvorima i bunarima, kako bi voda u ovima zadržala nepromenjenu svoju kakvoću i količinu*“. U daljem tekstu se navodi da je, i pored toga što je teško odrediti i odbraniti prostor zemljišta sa kojeg podzemna voda „*dobija svoju sadržinu*“, potrebno ustanoviti dva zaštitna pojasa: uži i širi. Uži pojas bi trebalo da obuhvati neposrednu okolinu izvora i bunara, dok bi širi pojas trebalo da obuhvati čitav sliv. U daljem tekstu Žujović navodi i aktivnosti koje ne bi smele da se obavljaju u blizini izvora i bunara, jer bi mogle da ugroze kvalitet podzemnih voda.

Na kraju ove knjige, u *Završnoj reči*, Žujović ponovo govori o tome kako treba koristiti i štiti podzemnu vodu. Autor navodi da bunare treba bušiti tako da budu što dalje od izvora zagađivanja (slika 4.6). Knjigu završava primerima zakona u stranim naprednijim državama gde se mnogo veća pažnja poklanjala zaštiti podzemnih voda. Kao primer navodi zakonske odredbe u tadašnjoj Nemačkoj, u kojoj su jasno bili propisani način korišćenja izvora, restriktivne i kaznene mere u slučaju narušavanja kvaliteta vode nečijim nemarom. Jedan interesantan segment zakona koji se odnosio na zaštitu podzemnih voda omogućavao je vlasnicima izvora i bunara da zahtevaju otkup zemljišta oko vodozahvatnih objekata u cilju odbrane podzemnih voda od zagađivanja.

Na osnovu svih ovih saznanja koje Žujović navodi u ovoj knjizi, kao i na osnovu svih preporuka za zaštitu podzemnih voda, možemo slobodno reći da je ovaj velikan srpske nauke utemeljivač savremene zaštite podzemnih voda.



Slika 4.6. Primer dobro iskopanog bunara u blizini kuća za stanovanje (Žujović, 1931)

Legenda: P – bunar; B – kuće za stanovanje; F – đubrište

U periodu nakon Žujovića mnogi naši hidrogeolozi bave se problematikom zaštite podzemnih voda u Srbiji. U brojnim radovima publikovanim u zbornicima sa naučnih skupova, kao i u domaćim stručnim časopisima, pre svega u časopisu „Voda i sanitarna tehnika“, opisivana je ova problematika. Međutim, prva knjiga na našim prostorima koja se isključivo bavi zaštitom podzemnih voda, jeste udžbenik „Zaštita podzemnih voda“ autora B. Filipovića i S. Vujasinovića, iz 1982. godine.

U udžbeniku su prikazani osnovni tipovi zagađivača, zatim osnovni fizičko-hemijski procesi uzajamnog dejstva kontaminanata, podzemnih voda i sredine, određivanje parametara uzajamnog dejstva, zakonitosti migracije kontaminanata u vodonosnoj sredini, prognoza rasprostranjenja zagađenja itd. U posebnom poglavlju prikazane su mere zaštite podzemnih voda pri čemu je detaljno prikazana metodologija određivanja zona sanitarne zaštite u skladu sa tadašnjom zakonskom regulativom.

4.3.2. Zaštita podzemnih voda kroz zakonsku regulativu u Srbiji

Zaštita površinskih i podzemnih voda u Srbiji, prvi put se zakonski jasno definiše kroz **Zakon o vodama iz 1965. godine** (Službeni list SFRJ 13/65). Iako se mere zaštite o zabrani unošenja opasnih i štetnih materija definisane ovim zakonom uglavnom odnose na površinske vode, ovim merama se indirektno štite i podzemne vode. Do donošenja ovog zakona, korišćenje i zaštita voda bili su definisani kroz pojedine članove u okviru drugih zakona i ukaza, koji se nisu direktno odnosili na površinske i podzemne vode

(Zakon o iskorišćavanju poljoprivrednog zemljišta (Službeni list FNRJ, 43/59 i 53/62) i Opšta uredba o vodnim zajednicama (Službeni list FNRJ, 6/52)).

U članu 40. **Zakona o vodama iz 1967. godine** (Službeni glasnik SRS 17/67) zabranjuje se preduzimanje radova i mera koji bi uticali na režim podzemnih voda u smislu ugrožavanja snabdevanja pijaćom vodom po količini i kvalitetu, kao i radova koji bi štetno uticali na izdašnost i kvalitet izvora za pijaće, mineralne, termalne i lekovite vode, kao i na stabilnost objekata. U istom zakonu, u članu 46 predviđa se uspostavljanje zaštitnih zona oko izvorišta podzemnih voda za vodosnabdevanje, kao i izvora mineralnih, termalnih i lekovitih voda. U skladu sa sanitarnim propisima, u ovim zonama se zabranjuje vršenje pojedinih radnji (prekopavanje, bušenje, đubrenje, izgradnja i sl.), koje bi mogle da ugroze režim podzemnih voda.

U **Zakonu o vodama iz 1975. godine** (Službeni glasnik SRS 33/75), još više se posvećuje pažnja korišćenju i zaštiti podzemnih voda. U članu 142. se prioritet u korišćenju kvalitetnih podzemnih voda daje snabdevanju stanovništva vodom, napajanju stoje, korišćenju vode u sanitarne i komunalne svrhe, snabdevanju industrije koja zahteva visokokvalitetnu vodu i sl. U članu 150. se definiše pojam izvorišta kao prostora na kojem se nalaze vode koje se po količini i kvalitetu mogu ili se već koriste za snabdevanje vodom za piće. U istom članu se predviđa da izvorišta moraju biti zaštićena od namernog ili slučajnog zagađivanja kao i od drugih uticaja koji mogu nepovoljno delovati na zdravstvenu ispravnost vode ili na izdašnost izvorišta.

U članu 151. predviđeno je uspostavljanje zona i pojaseva sanitarne zaštite izvorišta i glavnih vodova koji služe za snabdevanje vodom za piće. Značajno za problematiku zaštite podzemnih voda, kao i za hidrogeologiju kao naučnu disciplinu, jeste to što se u ovom istom članu broj zona zaštite i ograničenja u okviru njih, određuje na bazi hidrogeoloških karakteristika terena.

U poglavlju XI istog zakona nalaze se članovi koji se odnose na zaštitu površinskih i podzemnih voda. U članu 160. se definiše pojam zagađivanja voda koji podrazumeva svaku veštačku štetnu promenu u prirodnom sastavu, sadržaju i kvalitetu vode, korita

vodotoka i sliva. U članovima koji slede, najoštrije se zabranjuje direktno ili indirektno unošenje materija u vodu (opasne materije) koje zbog sastava, količine, stepena radioaktivnosti ili drugih osobina mogu dovesti u opasnost život i zdravlje ljudi, riba i životinja. Takođe se zabranjuje unošenje materija koje mogu promeniti vode u meri koja može ograničiti ili onemogućiti upotrebu voda u korisne svrhe (štetne materije). U cilju zaštite se u članu 167. zabranjuje unošenje svih materija koje u podzemnim vodama mogu izazvati zagađivanje ili zasljanjivanje. Takođe se zabranjuje korišćenje bunara kao septičkih jama, unošenje materija koje mogu izazvati zarazne i parazitske bolesti, ispuštanje radioaktivnih materija i sl. Zabranjuje se i ostavljanje opasnih i štetnih materija u blizini izvora i bunara koje mogu zagađiti vodu.

Na bazi člana 151. Zakona o vodama iz 1975. godine, par godina kasnije donet je **„Pravilnik o načinu određivanja i održavanja zona i pojaseva sanitarne zaštite objekata za snabdevanje vodom za piće“ (Službeni glasnik Republike Srbije, br. 33/78)**. Ovim pravilnikom bilo je predviđeno određivanje i održavanje zona sanitarne zaštite za sve objekte koji se koriste za snabdevanje vodom za piće, a na bazi njega, definisane su sanitarne zone za veliki broj izvorišta za javno vodosnabdevanje u Srbiji. Po ovom pravilniku usvajale su se sledeće zone sanitarne zaštite:

- 1) Zona neposredne zaštite (zona strogog nadzora),
- 2) Uža zona zaštite (zona ograničenja),
- 3) Šira zona zaštite (zona nadzora) i
- 4) Pojas zaštite.

Pored bunara, izvora, galerija i drugih vodozahvatnih objekata, zona neposredne zaštite je bila predviđena za sve objekte i postrojenja koja su u funkciji vodosnabdevanja (crpne stanice, instalacije za popravak kvaliteta voda, komore za prekid pritiska i sl.). Obuhvatala je prostor od najmanje 10 m od objekta koji se štiti.

Određivanje uže zone zaštite nije bilo jasno definisano u pomenutom pravilniku. U članu 6. stoji da *površina uže zone zaštite mora biti tolika da obezbedi zaštitu vode od mikrobiološkog, hemijskog, radiološkog i drugih vrsta zagađivanja.*

Interesantno je da je kod zahvatanja podzemnih voda iz izdani bez površinske zaštite, kod kojih se voda posebno nije prečišćavala na instalacijama, bilo predviđeno da se deo uže zone zaštite ograđuje zajedno sa zonom neposredne zaštite. Pri tom, površina dela zone koja se ograđuje zavisila je od veličine depresionog levka pri maksimalnom crpljenju vode.

Iako predviđeno Pravilnikom, definisanje šire zone sanitarne zaštite je uveliko zavisilo od projektanta jer metodologija određivanja ove zone nije bila propisana (*Šira zona zaštite određuje se oko izvorišta i obuhvata teritoriju ili deo teritorije slivnog područja izvorišta ili teritoriju koja služi za napajanje izvorišta*).

Četvrta zona zaštite, tj. pojas zaštite, odnosio se samo na glavne cevovode i obuhvatao je prostor sa svake strane cevovoda po najmanje 2,5 m.

Zakon o vodama iz 1989. godine (Službeni glasnik SRS 49/89) sadrži u najvećoj meri sve članove koje se odnose na iskorišćavanja i zaštitu podzemnih voda, koji su od ranije usvojeni u zakonu iz 1975. godine. Zaštita podzemnih voda se na sličan način definiše i **Zakonom o vodama iz 1991. godine** (Službeni glasnik RS 46/91), čiji su pojedini članovi (članovi 81. do 96.) još uvek važeći u našoj zemlji.

4.3.3. Zaštita podzemnih voda kroz aktuelnu zakonsku regulativu u Srbiji

U današnje vreme zaštita podzemnih voda u Srbiji je u skladu za **Zakonom o vodama iz 2010. godine** (Službeni glasnik RS 30/2010). Zaštita voda je najvećim delom bazirana na članovima koji su postojali i u nekoliko prethodnih Zakona o vodama (Službeni glasnik SRS 33/75, Službeni glasnik SRS 49/89, Službeni glasnik RS 45/91). Jedna od novina u ovom zakonu jeste identifikacija vodnih tela i njihova zaštita (Član 73.) koji su posledica implementacije Evropske direktive za vodu (Directive 2000/60/EC). Prema ovom članu, javna vodoprivredna preduzeća se obavezuju da izvrše identifikaciju vodnih tela podzemnih i površinskih voda, koja se koriste ili bi se mogla koristiti za vodosnabdevanje u budućnosti u prosečnoj količini većoj od 10 m³/dan ili za snabdevanje vodom za piće više od 50 stanovnika. U stavu 2 ovog člana predviđena je zaštita ovih tela od namernog ili slučajnog zagađivanja kao i od drugih uticaja koji mogu nepovoljno uticati na izdašnost izvorišta i na zdravstvenu ispravnost vode.

Članom 77 ovog zakona predviđa se uvođenje tri zone sanitarne zaštite (šira, uža i neposredna zona) za sva izvorišta koja se koriste za snabdevanje vodom za piće i za sanitarno-higijenske potrebe. U istom članu se navodi da određivanje zona sanitarne zaštite treba da bude u skladu sa hidrološkim, hidrogeološkim i drugim svojstvima zemljišta i podslivova, vrstom izvorišta i njegovog okruženja, kapacitetom izvorišta i drugim činiocima koji utiču na izdašnost izvorišta, a održavanje na način kojim se ne ugrožava zdravstvena ispravnost vode na izvorištu. Način određivanja, održavanja i korišćenja zona kroz posebne pravilnike treba da propišu ministri nadležni za poslove zdravlja i ministar nadležan za poslove zaštite životne sredine.

Iako je važećem Zakonu o vodama iz 2010. godine krajnji rok za donošenje podzakonskih akata (uključujući i novi Pravilnik o određivanju i održavanju zona sanitarne zaštite) bio dve godine po donošenju zakona, novi pravilnik nije donesen tako da je u Srbiji još uvek važeći Pravilnik iz 2008. godine (**Pravilnik o načinu određivanja i održavanja zona sanitarne zaštite izvorišta vodosnabdevanje, Službeni glasnik RS 92/2008**). Ovaj pravilnik je znatno detaljniji od prethodnog iz 1978. godine i po njemu se određivanje zona sanitarne zaštite izvorišta temelji znatno više na rezultatima detaljnih hidrogeoloških

istraživanja. Pravilnikom je predviđeno određivanje tri zone sanitarne zaštite: zona neposredne sanitarne zaštite (zona I); uža zona sanitarne zaštite (zona II) i šira zona sanitarne zaštite (zona III).

Zona neposredne zaštite (zona strogog nadzora) obuhvata najmanje 10 m oko vodozahvatnog objekta, kada zbog nadziranja i održavanja u ovoj zoni boravi stalno zaposlena osoba i ova zona sa svim postrojenjima i instalacijama mora se ograditi. Kada u prvoj zoni ne boravi stalno zaposlena osoba ova zona mora da obuhvati prostor najmanje 3 m oko vodozahvatnih objekata. U ovoj zoni biće dozvoljen pristup samo ovlašćenim licima koje će odrediti vlasnik preduzeća. Izuzetno, pristup se može dozvoliti licima koja se u okviru stručnog usavršavanja upoznaju sa radom sistema i o istom se mora voditi stroga evidencija.

Uža zonu zaštite (zona ograničenja) mora da bude dovoljna da obezbedi vodu od mikrobiološkog, hemijskog, radiološkog i drugih vidova zagađenja. U ovoj zoni dozvoljeno je korišćenje zemljišta u poljoprivredne svrhe, uz strogo kontrolisano korišćenje herbicida, pesticida i đubriva. Zona uže zaštite čini površinu zemljišta pod sanitarnim nadzorom na kojoj nije dozvoljena izgradnja objekata, postavljanje uređaja i vršenja radnji koje mogu na bilo koji način zagađivati vodu. Površina uže zone zaštite mora biti tolika da obezbedi zaštitu vode od mikrobiološkog, hemijskog, radiološkog i drugih vrsta zagađivanja.

Prema važećem pravilniku o načinu određivanja zona sanitarne zaštite, druga zona sanitarne zaštite u intergranularnoj sredini se određuje tako da obuhvati prostor sa kog voda dotiče do vodozahvatnog objekta za najmanje 50 dana. Kada je izdan pod pritiskom i kada je vodonosna sredina pokrivena povlatnim zaštitnim pokrivačem koji umanjuje uticaj zagađujućih materija sa površine, ova zona se može smanjiti, ali da ne bude kraća od 50 m od vodozahvatnog objekta.

U poroznoj sredini karstno-pukotinskog tipa, kada je podzemna voda sa slobodnim nivoom i kada je vodonosna sredina pokrivena povlatnim zaštitnim slojem koji umanjuje uticaj zagađivača sa površine terena, zona II obuhvata prostor sa kog voda dotiče do

vodozahvatnog objekta za najmanje jedan dan. Slično kao i kod intergranularne izdani, kada je podzemna voda pod pritiskom i kada je vodonosna sredina pokrivena povlatnim zaštitnim slojem koji umanjuje uticaj zagađivača sa površine terena, ova zona se može smanjiti, ali da ne bude kraća od 500 m od vodozahvatnog objekta.

U članu 14 ovog Pravilnika stoji da se, bez obzira na tip izdani, zona II može izjednačiti sa zonom I kada je vodonosna sredina pokrivena povlatnim zaštitnim slojem koji neutrališe uticaj zagađivača sa površine terena.

Šira zona zaštite (zona nadzora) obuhvata teritoriju ili deo teritorije slivnog područja oko izvorišta. Prostor sa kog voda dotiče do vodozahvatnog objekta za najmanje 200 dana. Kada je izdan pod pritiskom i kada je vodonosna sredina pokrivena povlatnim zaštitnim pokrivačem koji umanjuje uticaj zagađujućih materija sa površine, ova zona se može smanjiti, ali da ne bude kraća od 500 m od vodozahvatnog objekta.

U poroznoj sredini karstno-pukotinskog tipa zona III obuhvata celo slivno područje. Kada je vodonosna sredina pokrivena povlatnim zaštitnim slojem koji umanjuje uticaj zagađivača sa površine terena, prostiranje zone III ne može da bude kraće od 1000 m od vodozahvatnog objekta u pravcu toka vode.

Kod izdani u poroznoj sredini karstno-pukotinskog tipa ograđuje se i ponor, vrtača, rased i drugi karstni oblik u okviru zone III u koji voda neposredno ponire i na koji se primenjuju zaštitne mere kao za zonu I.

Prema članu 20 Pravilnika, šira zona zaštite se može izjednačiti sa užom zonom kada je vodonosna sredina pokrivena zaštitnim slojem koji neutrališe uticaj zagađivača sa površine terena.

Površina i prostorno pružanje zona sanitarne zaštite izvorišta prikazuju se u Elaboratu o zonama sanitarne zaštite izvorišta.

5. PROBLEMATIKA ODREĐIVANJA ZONA SANITARNE ZAŠTITE U RAZLIČITIM HIDROGEOLOŠKIM SREDINAMA

Kretanje i akumuliranje podzemnih voda, njihova kontaminacija kao i mogućnost geološke sredine da prečisti zagađenu vodu, zavisi od mnoštva faktora, od kojih je najbitniji struktura poroznosti pomenute sredine. Od struktura pora, njihove veličine, povezanosti, zapunjenosti i sl., zavisice i sudbina kontaminanata koji dopru do podzemnih voda.

Brzina kretanja podzemnih voda, a samim tim i kontaminanata znatno varira u zavisnosti od tipova poroznosti. Tako se kod sedimenata sa intergranularnom poroznošću kreće u intervalu od 0,001 m/dan za prašinate sedimente, pa do 10 m/dan za šljunkovite sedimente (tabela 5.1). Sa druge strane kod stena kavernozone poroznosti, brzina filtracije mnogo više varira i može da iznosi više kilometara po danu (Milanović, 2000). Od brzine filtracije zavisi i stepen interakcije podzemnih voda sa okolinom što se odražava na autopurifikaciona svojstva sredine. Imajući u vidu iznete činjenice u daljem tekstu prikazane su opšte karakteristike izdani u sredinama različite strukture poroznosti i njihov uticaj na zaštitu podzemnih voda.

Tabela 5.1 Veličina koeficijenta filtracije nekih sedimenata i stena u zavisnosti od veličine ukupne poroznosti (Dragišić & Živanović, 2014)

Sediment/Stena	Koeficijent filtracije (K_f , m/s)	Poroznost (n , %)
Nekonsolidovani sedimenti		
Šljunak	$10^{-2} - 10^2$	25–40
Pesak	$10^{-4} - 1$	25–50
Prašina	$10^{-7} - 10^{-3}$	35–50
Glina	$10^{-10} - 10^{-7}$	40–70
Les	$10^{-9} - 10^{-3}$	35–50
Stene		
Peščari	$10^{-8} - 10^{-3}$	5–35
Škriljci, neispucali	$10^{-11} - 10^{-7}$	0–10
Škriljci, ispucali	$10^{-7} - 10^{-3}$	5–50
Dolomiti	$10^{-7} - 10^{-3}$	35–45
Karstifikovani krečnjaci	$10^{-4} - 10^2$	5–50
Mermeri ispucali	$10^{-6} - 10^{-3}$	0,1–2
Vulkanski tufovi	$10^{-5} - 10^{-3}$	15–40
Magmatske i metamorfne stene, ispucale	$10^{-11} - 10^{-2}$	0–10
Magmatske i metamorfne stene, neispucale	$10^{-12} - 10^{-8}$	0–5

5.1. Izdani u sredinama intergranularne poroznosti

5.1.1. Opšte karakteristike izdani u sredinama intergranularne poroznosti

Međuzrnska ili intergranularna poroznost karakteristična je za rastresite i slabovezane sedimente (šljunak, pesak, drobina, glina i sl.), najčešće kvartarne i delom neogene starosti. Ime je dobila po porama koje zauzimaju prostor između zrna, odnosno granula konkretnog sedimenta. Osim kod pomenutih sedimenata, međuzrnska poroznost se javlja i u zoni raspadanja čvrstih magmatskih, metamorfnih i sedimentnih stena. Veličina poroznosti rastresitih (zrnastih) sedimenata zavisi pre svega od oblika i uzajamnog rasporeda zrna, specifične površine zrna, stepena cementacije i sortiranja itd. (Dragišić, Živanović, 2014).

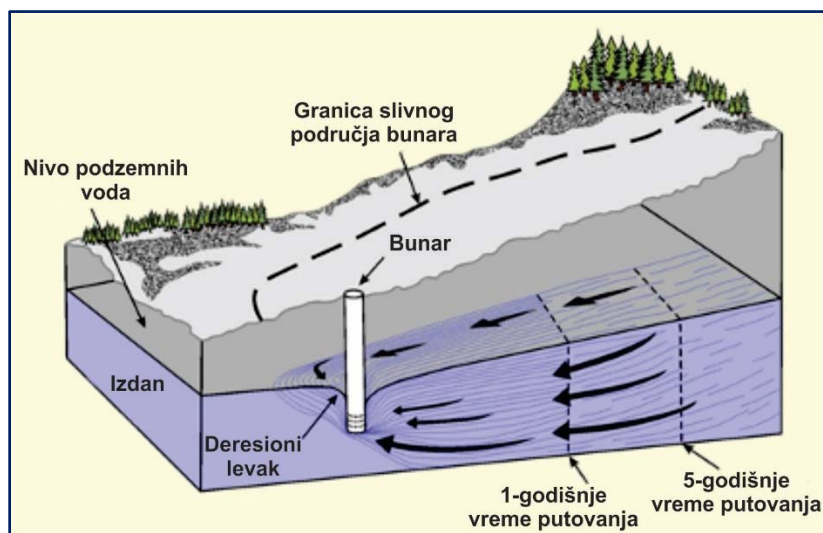
Izdani u sredinama intergranularne poroznosti karakteriše kontinualnost izdanske zone, odnosno kontinualnost nivoa izdani. Filtracija podzemnih voda kroz poroznu sredinu se obično odvija pri veoma malim brzinama koje se mere u mm/dan ili cm/dan. Pri ovako malim brzinama znatno je izraženiji kontakt podzemnih voda i površine zrna sedimenta, pa su samim tim izraženi i fizičko-hemijski procesi koji se dešavaju pri migraciji kontaminanata kroz poroznu vodonosnu sredinu. To su difuzija, mehanička i hidrodinamička disperzija, advekcija, sorpcija, biološka degradacija, jonska izmena, rastvaranje stena, hemijsko taloženje, izdvajanje gasova, hemijske reakcije (oksidacija, redukcija, hidroliza i dr.), radioaktivni raspad i dr. (Krešić et al. 2006; Delleur 2007).

Pri zaštiti izvorišta podzemnih voda u izdanima intergranularne poroznosti treba uzeti u obzir mnoge faktore od koji su najbitniji sledeći:

- hidrodinamički uslovi filtracije podzemnih voda;
- fizičko-hemijski interaktivni procesi kontaminanata, podzemnih voda i porozne sredine i
- zaštitna uloga nadizdanske zone.

Hidrodinamički uslovi filtracije podzemnih voda. Filtracija vode kroz poroznu intergranularnu sredinu se najčešće odvija pri veoma malim hidrauličkim gradijentima.

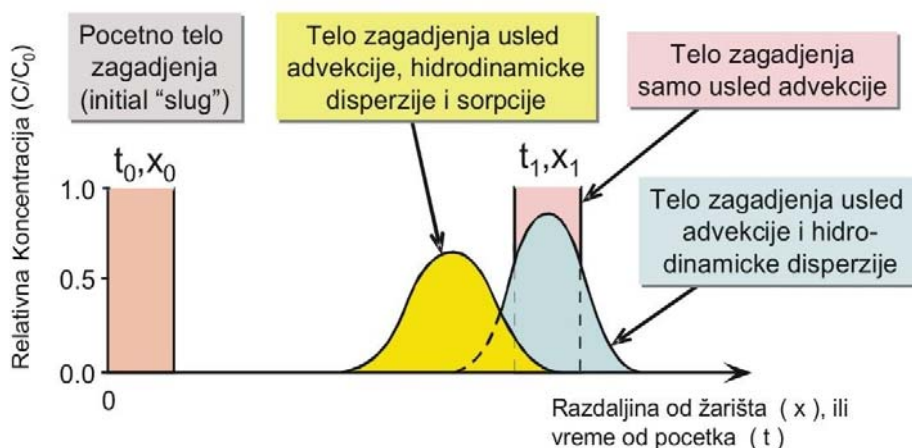
Radi utvrđivanja pravca, smera i brzine prirodnog podzemnog toka, neophodno je postojanje osmatračkih objekata, kao i praćenje promena nivoa površinskih voda, za slučaj hidrauličke veze sa podzemnim vodama. Kako se eksploatacija podzemnih voda iz izdani intergranularne poroznosti najčešće obavlja preko vertikalnih vodozahvatnih objekata (bunara), u obzir treba uzeti i promenu strujnog polja kao rezultat rada bunara (slika 5.1). Kada se bunarom crpi voda, dolazi do promene slobodnog, odnosno pijezometarskog nivoa podzemnih voda na lokaciji bunara u odnosu na ostatak izdani, što dovodi do povećanja brzine kretanja podzemne vode ka bunaru. Ovako izmenjena strujna slika će uticati i na transport kontaminanata u izdanskoj zoni.



Slika 5.1. Kretanje podzemnih voda ka vodozahvatnom objektu u uslovima postojanja prirodnog toka podzemnih voda (Ministry of Environment (British Columbia), 2004)

Fizičko-hemijski interaktivni procesi kontaminanata, podzemnih voda i stena. Zagađene podzemne vode menjaju svoj primarni sastav na putu od izvora kontaminacije do vodozahvatnog objekta. Proces interakcije između kontaminanata, podzemnih voda i porozne sredine, utiču na brzinu kretanja samih kontaminanata, njihovu koncentraciju, kao i na njihov hemijski sastav. Tako na primer, kao rezultat hidrodinamičke disperzije i difuzije, može se desiti da se kontaminant pojavi ranije na vodozahvatnom objektu u odnosu na česticu vode koja je iz iste tačke i u isto vreme krenula ka vodozahvatnom objektu (slika 5.2). Sa druge strane, kao rezultat procesa sorpcije, dolazi do kašnjenja kontaminanta, pri čemu se smanjuje i njegova koncentracija u podzemnoj vodi.

U zaštiti podzemnih voda kod izdani intergranularne poroznosti, od posebnog značaja može biti biološka degradacija. Različite oksido-redukujuće reakcije potpomognute aktivnošću aerobnih ili anaerobnih mikroorganizama, mogu dovesti do potpune degradacije kontaminanata.



Slika 5.2. Promena koncentracije kontaminanta sa vremenom i udaljenjem od trenutnog izvora kontaminacije sa ograničenim trajanjem: uticaj advekcije, hidrodinamičke disperzije i sorpcije (Krešić et al. 2006.)

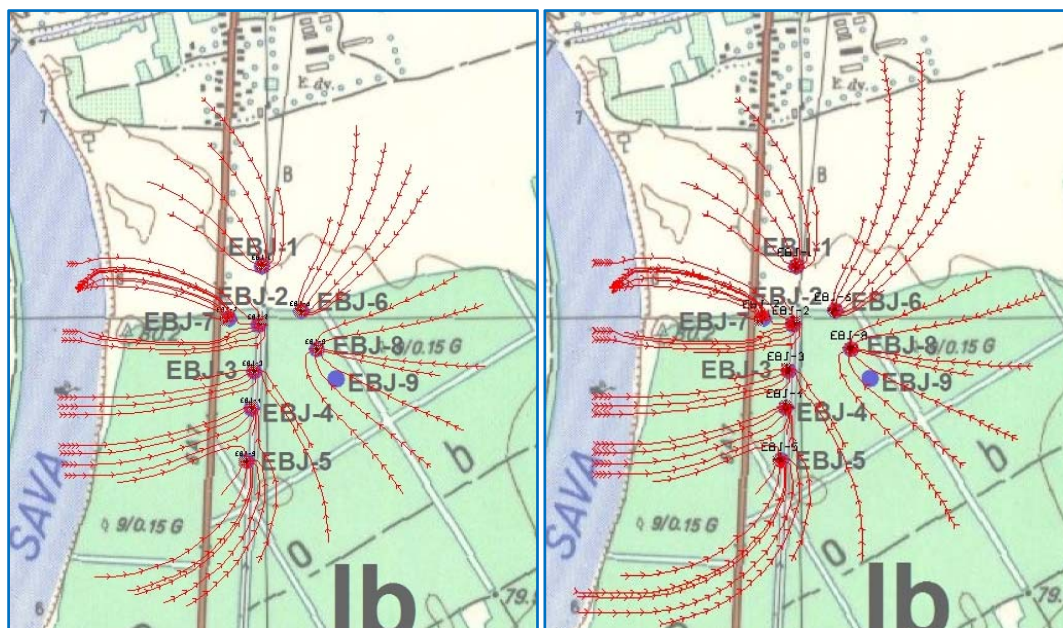
Zaštitna uloga nadizdanske zone. Izdani u neogenim sedimentima se obično karakterišu arteskim ili subarteskim nivoom. Pokrivene su povlatnim, slabije propusnim ili vodonepropusnim sredinama koje omogućavaju prirodnu zaštitu izdanske zone od zagađivanja sa površine. Arteski ili subarteski pritisak dodatno otežava infiltraciju kontaminanata, pa su zagađivanja ovih podzemnih voda po pravilu ređa. Sa druge strane, kvartarni sedimenti (pre svega aluvijalni i terasni sedimenti) imaju tanji zaštitni pokrivač koji često u potpunosti odsustvuje. Izdani u ovakvim sredinama iako bogate vodom veoma su ranjive na zagađivanje sa površine terena. Zbog ovoga se pri zaštiti izvorišta podzemnih voda u pomenutim sredinama posebna pažnja poklanja evaluaciji zaštitne uloge nadizdanske zone.

5.1.2. Postojeći trendovi u zaštiti podzemnih voda izdani u sredinama intergranularne poroznosti

Delineacija zona sanitarne zaštite kod izvorišta u sredinama međuzrnske poroznosti uglavnom se bazira na horizontalnom vremenu putovanja vode ka vodozahvatnom objektu. Glavni razlozi za ovakav pristup jesu male brzine kretanja podzemnih voda kao i značajna autopurifikaciona svojstva koje ove sredine imaju. Sporo kretanje vode kroz poroznu sredinu u većini slučajeva kontaminacije, omogućava primenu remedijacionih mera, a time i blagovremeno sprečavanje pojave kontaminanata na vodozahvatnom objektu.

Drugi razlog jeste moć samoprečišćavanja sredine, koja je posebno izražena kod međuzrnskih izdani. U mnogim slučajevima izdan može u potpunosti da degradira kontaminante pa se i zone sanitarne zaštite projektuju preko vremena koje je potrebno da se one pri filtraciji umanje ili potpuno unište. Primer za to su bakteriološka zagađivanja koja se mogu u potpunosti izgubiti u slučaju dovoljnog vremena zadržavanja vode u poroznoj sredini na putu do vodozahvata. U većini zemalja se u određivanju II zone sanitarne zaštite u izdanima intergranularne poroznosti koristi vreme putovanja od 50 dana. Ono predstavlja vreme potrebno da se broj patogenih bakterija na putu podzemnih voda do vodozahvatnog objekta redukuje na prihvatljiv nivo.

Pri definisanju zona sanitarne zaštite na bazi vremena putovanja podzemnih voda, u poslednjih 20 godina značajnu primenu ima hidrodinamičko modeliranje. Njegova primena posebno ima smisla u sredinama intergranularne poroznosti gde se dobijaju dosta realni rezultati pri određivanju zona sanitarne zaštite. Modeliranje posebno dobija na težini pri zaštiti izvorišta sačinjenih od više bunara, jer se simulira strujna mreža koja je rezultat rada više bunara (slika 5.3). Modeliranje takođe omogućava simulaciju transporta kontaminanata, pa čak i rezultata primene različitih mera remedijacije.



Slika 5.3. Raspored strujnica oko eksploatacionih bunara izvorišta "Sava I" koje pokazuju udaljenje potrebno da se do bunara filtrira voda za 50 dana (a) i 100 dana (b) - Krmpotić & Dragišić, 2006

Noviji moduli za simuliranje omogućavaju simulaciju ne samo prostog transporta kontaminanata kroz poroznu sredinu već i simulaciju fizičko-hemijskih interakcijskih procesa između kontaminanata, vode i porozne sredine što za rezultat ima definisanje zona sanitarne zaštite koje odgovaraju stvarnim uslovima filtracije kroz pomenutu sredinu.

5.2. Izdani u sredinama pukotinske poroznosti

5.2.1. Opšte karakteristike izdani u sredinama pukotinske poroznosti

Ispucalost je značajan faktor koji reguliše režim kretanja podzemnih voda u magmatskim, metamorfnim i čvrstim sedimentnim stenama. Step en ispucalosti, a samim tim i brzina kretanja podzemnih voda zavise od veličina pukotina kao i od frekvencije njihovog pojavljivanja. Od posebnog značaja je i prostorna distribucija pukotina. Tako na primer, u slučaju kada su pukotine subhorizontalne, onda i horizontalni hidraulički gradijent dominira u odnosu na vertikalni. U slučaju kada je

stenska masa izdijeljena na uniformne blokove, najveće vrednosti hidrauličke provodljivosti biće u pravcu spajanja pukotina.

Zaštita podzemnih voda u izdanima pukotinske poroznosti zavisi od poznavanja brojnih faktora od kojih se sledeći smatraju najvažnijim (Skinner, 1985):

- Brzina i pravac podzemnih voda,
- Stepenn reakcije između vode u pukotinama i stenske mase,
- Uticaj nadizdanske zone i
- Međusobna veza sa površinskim vodama.

Brzina i pravac podzemnih voda. Da bi se odredio prirodni tok podzemnih voda u pukotinskoj izdani, potrebno je poznavati mnoge parametre. Jedan od osnovnih je vodopropusnost stenske mase. Laboratorijska ispitivanja uzoraka stenske mase daju rezultate koji se ne mogu uvek prihvatiti za celu sredinu u kojoj je formirana izdan. Terenska ispitivanja obično daju mnogo bolje rezultate, ali i tu treba voditi računa jer kratkotrajni testovi daju vodopropusnost stenske mase samo u neposrednoj blizini bušotine/bunara. Takođe, za određivanje toka podzemnih voda potrebna su saznanja o anizotropiji izdani. Vodopropusnost stenske mase može biti potvrđena samo u slučaju postojanja dovoljnog broja osmatračkih bušotina raspoređenih u različitim pravcima u odnosu na objekat, na kojem se vrši crpenje.

Drugi parametar koji treba da bude poznat jeste prostorna distribucija pijezometarskih nivoa. Bez postojanja kvalitetne osmatračke mreže nemoguće je odrediti gradijente i pravce kretanja podzemnih voda. Situacija kod pukotinskih izdani je još komplikovanija jer zbog postojanja prostorne anizotropije strujna mreža postaje neortogonalna pa se samim tim i teže određuje. Ovo dovodi do zaključka da je u sredinama sa pukotinskom poroznošću bez adekvatne osmatračke mreže gotovo nemoguće odrediti fluks podzemnih voda. Karakteristične brzine kretanja podzemnih voda u ovim sredinama su u intervalu 1-10 m/d. U ekstremnim slučajevima zabeležene su i brzine od preko 1 km/d. Što je veća brzina, to zona prihranjivanja vodozahvatnog objekta ima više eliptičnu formu, što je od posebnog značaja za kasniju delineaciju zona zaštite.

Stepen reakcije između vode u pukotinama i stenske mase. Ispucale stene pored poroznosti koja je rezultat postojanja pukotina imaju i poroznost u samoj stenskoj masi usled čega se ukupna poroznost kod ovih stena naziva još i „dvojna poroznost“. Pri sporijem kretanju podzemnih voda filtracija se dobrim delom odvija i kroz samu stensku masu, što omogućava duži kontakt vode i stene i veću mogućnost da usled procesa difuzije dođe do smanjenja koncentracije kontaminanata. Pri kretanju kroz veće pukotine, brzina vode, a samim tim i kontaminanta će biti toliko velika da će njen gubitak kroz matriks biti minimalan. Ovo treba uzeti u obzir pri planiranju opita trasiranja kako bi podaci o vremenu transporta vode i kontaminanata bili što realniji.

Uloga nadizdanske zone. Zaštitna funkcija ove zone zavisi od više faktora. Kako će se voda kretati kroz ovu zonu će pre svega zavisiti od intenziteta kiše. Pri kišama manjeg intenziteta, dominiraće filtracija kroz matriks stene, a ne kroz postojeće pukotine, što će usloviti duže vreme putovanja infiltrirane vode i manju ranjivost podzemnih voda. Pri kišama jačeg intenziteta najveći deo vode će se infiltrirati kroz mrežu otvorenih pukotina što će omogućiti brže vertikalno kretanje vode, manju interakciju između vode u pukotinama i stene, a samim tim i veću ranjivosti podzemnih voda. Drugi, takođe bitan faktor jeste zapunjenost pukotina. U magmatskim stenama je veoma česta pojava da se i pored postojanja značajne ispucalosti, usled izraženog površinskog raspadanja pukotine zapunjavaju slabije propusnim materijalom, što znatno usporava infiltraciju i povećava zaštitnu funkciju cele nadizdanske zone.

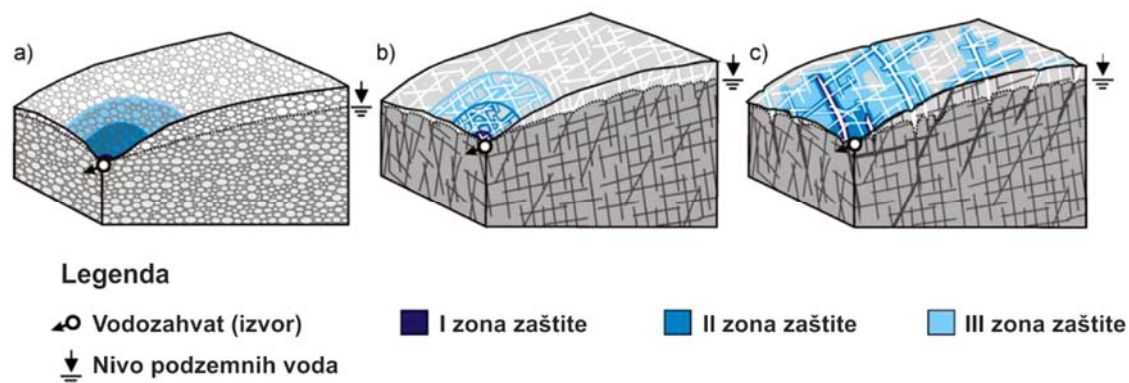
Međusobni odnos površinskih i podzemnih voda. Pored prihranjivanja pukotinske izdani na račun infiltracije atmosferskih padavina, čest je slučaj da se one prihranjuju površinskim vodama iz rečnih tokova. Kao i kod ostalih izdani, rečni tokovi mogu da omoguće zadovoljavajuću izdašnost izdani čak i u sušnim periodima. Sa aspekta zaštite podzemnih voda, neophodno je poznavati samoprečišćavajući potencijal rečnog nanosa, posebno u funkciji različitih vodostaja i količine vode koja se eksploatiše na izvorištu.

5.2.2. Postojeći trendovi u zaštiti podzemnih voda izdani u sredinama pukotinske poroznosti

Zaštita podzemnih voda u stenama pukotinske poroznosti treba da uzme u obzir činjenice da se u ovim stenama mogu javiti velike brzine kretanja, da se karakterišu velikom prostornom anizotropijom, da imaju ograničenu sposobnost purifikacije i da određivanje prethodnih karakteristika iziskuje izvođenje detaljnih hidrogeoloških istraživanja.

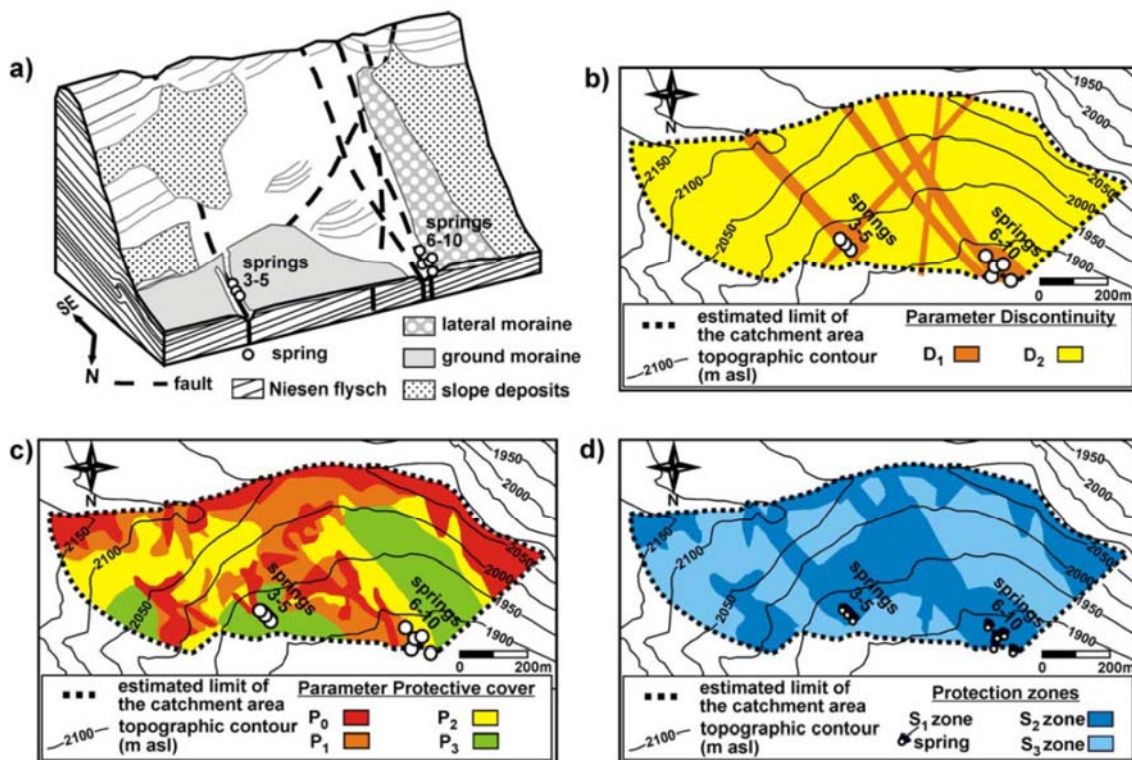
Iskustva u drugim zemljama pokazuju da se određivanje zona sanitarne zaštite za pukotinske izdani definiše najčešće preko vremena putovanja vode kroz poroznu sredinu. Za neposrednu zonu zaštite obično se uzima prostor 10-50 m oko vodozahvatnog objekta, a za užu i širu zonu zaštite prostor sa kojeg voda za 50 ili 200 dana podzemno putuje do vodozahvata. Ovo u praksi često rezultuje velikim površinama koje II i III zona obuhvataju što može da izazove socijalne i ekonomske probleme. Zato se u nekim zemljama ove zone ograničavaju određenim radijusom. Primer za to je Nemačka gde se II i III zona ograničavaju na maksimalno 2 km od vodozahvatnog objekta.

U novije vreme, karte ranjivosti se sve više koriste i u zaštiti izvorišta u pukotinskim sredinama. Veći deo metoda prilikom određivanja ranjivosti podzemnih voda analizira i parametre kojima se opisuje stepen konsolidovanosti stena, kao i stepen i karakter njihove ispucalosti. Samim tim, određuje se zaštitna uloga nadizdanske zone, što značajno može da pomogne u definisanju mera koje treba uvesti kako bi se izdan preventivno zaštitila. Postoje i metode koje su specijalno kreirane u cilju zaštite podzemnih voda pukotinskih izdani. Primer za to je DISCO metoda (Pochon et al. 2008), dizajnirana sa ciljem što lakšeg određivanja zona sanitarne zaštite za izvorišta pukotinske izdani. Ova metoda se preporučuje kod izuzetno anizotropnih sredina gde je u pojedinim zonama usled velike ispucalosti, veoma malo vreme zadržavanja podzemnih voda na putu ka vodozahvatnom objektu (slika 5.4).



Slika 5.4. Konceptualni model izdvajanja zona sanitarne zaštite u izdanima različite poroznosti (Pochon et al. 2008) a) homogena zbijena izdan; b) pukotinska izdan, slabije anizotropna; c) pukotinska izdan, veoma anizotropna

DISCO metodom vrši se ocena ranjivosti podzemnih voda preko analize sledeća dva parametra: D faktor (*Discontinuities*) koji definiše karakter ispucalosti i P faktor (*Protective cover*) kojim se definiše debljina i propusnost površinskog zaštitnog pokrivača. D faktor se određuje na bazi rezultata strukturnog kartiranja, geofizičkih ispitivanja i opita trasiranja. Vrednosti za ovaj faktor (0-3) upućuju na vreme zadržavanja vode i na stepen purifikacije. P faktor uzima u obzir tok vode kroz tlo i geološke sedimente koji naležu preko ispucalih stena. U zavisnosti od uslova na terenu, za ovaj parametar se dodeljuju vrednosti od 0-4 pri čemu više vrednosti ukazuju na veću zaštitnu funkciju nadizdanske zone. Spajanjem ova dva faktora dobija se karta zaštitnog faktora (F_{int}) na bazi koje se različite klase ovog faktora transformišu u različite zone sanitarne zaštite (slika 5.5).




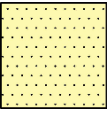
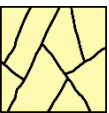
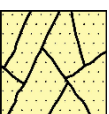


Slika 5.5. Određivanje zona sanitarne zaštite grupe izvora u oblasti Wysseberg u Švajcarskim Alpima primenom DISCO metode (Pochon et al, 2008)

5.3. Izdani u sredinama kavernozone poroznosti

5.3.1. Opšte karakteristike izdani u sredinama kavernozone poroznosti

Kavernozone poroznost se javlja u stenama rastvorljivim u vodi. Njoj prethodi pukotinska poroznost. Nastaje u procesu karstifikacije pri čemu se pukotine i prsline proširuju procesima fizičko-hemijskog dejstva vode. Kao rezultat ovog procesa javljaju se šupljine, kanali i kaverne različitih dimenzija kroz koje se podzemna voda kreće i akumulira. Vodopropusnost jedne ovakve stene zavisi od mnogih faktora koji u prostoru često veoma variraju. Stepenn ispucalosti stene će direktno uticati i na stepenn karstifikovanosti stene. Takođe, od sadržaja karbonatne komponente će zavisiti i brzina procesa njenog rastvaranja. Za transport podzemne vode je bitno i koliko su pukotine, kanali i kaverne povezane između sebe, kao i koliko su ove pore zapunjene glinovitim materijalom.

Na bazi pomenutih faktora, stene sa kavernošnom poroznošću (pre svega karbonatne stene) mogu se podeliti u više klasa koje se karakterišu različitim hidrodinamičkim karakteristikama, a samim tim i različitim stepenom ranjivosti podzemnih voda (slika 5.6). Izdvajanje klasa na terenu je često veoma teško usled velike heterogenosti analiziranih parametara, zbog čega u karstnim sredinama posebnu pažnju treba posvetiti prostornoj analizi svih faktora koji utiču na ranjivost karstnih izdanskih voda.

		Specifična izdašnost (μ)		Koefficient filtracije (K)		Ranjivost i rizik od kontaminacije podzemnih voda
		Min	Max	Min	Max	
Homogena poroznost	 m	$< 10^{-6}$		$< 10^{-7}$ cm/s		Sredina bez izdani. Niska ranjivost podzemnih voda.
	f c	0 0		0 0		
Homogena poroznost	 m	10^{-3} do 10^{-1}		10^{-6} do 10^{-4} cm/s		Generalni rizik od kontaminacije zbog zadržavanja dispergovanih delova kontaminanta. Niska verovatnoća kontaminacije sliva vodozahvatnog objekta
	f c	0 0		0 0		
Pukotinska	 m	0		0		Lokalni rizik od kontaminacije sa smanjenom retencijom kontaminanta u nadizdanskoj zoni. Srednji rizik od kontaminacije sliva vodozahvatnog objekta
	f c	10^{-4} do 10^{-2} 0		10^{-4} do 10^{-1} cm/s 0		
Heterogena poroznost	 m	10^{-3} do 10^{-1}		10^{-6} do 10^{-4} cm/s		Generalni rizik od kontaminacije sa efektima retencije kontaminanta. Moguća kontaminacija sliva sa dugotrajnom i promenljivom koncentracijom kontaminanta.
	f c	10^{-4} do 10^{-2} 0		10^{-4} do 10^{-1} cm/s 0		
Kartstno-pukotinska	 m	0		0		Lokalni rizik od kontaminacije, obično punktualan u karstnim vrtačama, sa veoma brzom propagacijom i niskom retencijom kontaminanta. Značajan rizik od zagađivanja čak iz udaljenih delova sliva, sa visokim pikom koncentracije, ali i kraćim zadržavanjem kontaminanta u vodonosnoj sredini.
	f c	10^{-4} do 10^{-2} 10^{-5} do 10^{-3}		10^{-4} do 10^{-1} cm/s 10^{-1} do 50 cm/s		
Kartstno-pukotinska	 m	10^{-3} do 10^{-1}		10^{-6} do 10^{-4} cm/s		Generalni rizik od kontaminacije posebno u karstnim vrtačama sa veoma brzom propagacijom i sa mogućom retencijom kontaminanta. Značajan rizik od zagađivanja čak iz udaljenih delova sliva, sa visokim pikom koncentracije, ali i mogućim dužim zadržavanjem kontaminanta u vodonosnoj sredini.
	f c	10^{-4} do 10^{-2} 10^{-5} do 10^{-3}		10^{-4} do 10^{-1} cm/s 10^{-1} do 50 cm/s		

m - matriksna poroznost
f - pukotine i ravni diskontinuiteta
c - karstne pećine i kanali

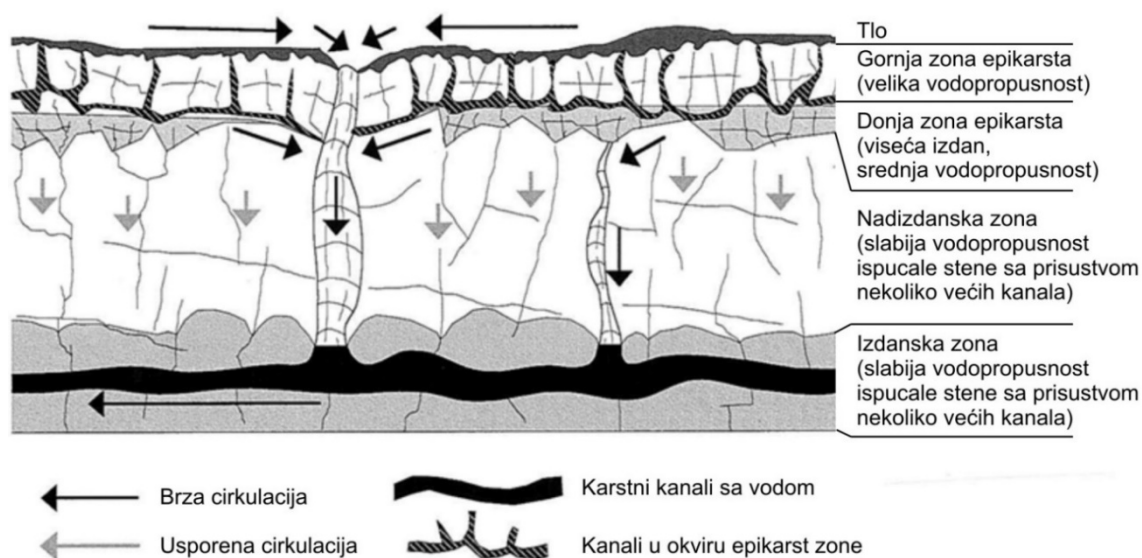
Slika 5.6. Stepem ranjivosti karstnih podzemnih voda u funkciji hidrauličkih parametara krečnjaka (Paloc, 1985)

Pri analizi zaštite podzemnih voda karstne izdani u obzir posebno treba uzeti sledeće karakteristike karstnih sistema (Goldscheider, 2002, Milanović, 2000, Živanović, 2011, modifikovano):

- Prihranjivanje karstne izdani vrši se difuzno i koncentrisano. Ranjivost podzemnih voda se drastično povećava kod koncentrisane infiltracije usled mogućnosti da se kontaminanti veoma brzo transportuju do nivoa podzemnih voda.
- Gornji delovi nadizdanske zone često se sastoje od nekarbonatnih formacija (tlo, kvartarni sedimenti, čvrste nekarstifikovane stene) koje pružaju određeni stepen zaštite podzemnih voda. Međutim, ove tvorevine u slivu ponora i ponirućih tokova povećavaju ranjivost podzemnih voda jer favorizuju formiranje površinskih tokova koji brzo transportuju kontaminante ka ponorskoj zoni.
- U mnogim slučajevim treba očekivati prisustvo epikarstne zone. Visok stepen ispucalosti ove zone obično omogućava mnogo lakši priliv (infiltraciju) površinskih voda u ovu zonu u odnosu na njeno pražnjenje (slika 5.7). Voda iz ove zone se najvećim delom transportuje ka izdanskoj zoni kroz visoko propusne oblike (krupne pukotine, kanali, jame), koji predstavljaju glavnu vezu izdanske i nadizdanske zone karstne izdani. Iako je epikarstna zona veoma porozna i vodopropustljiva, sama činjenica da se podzemne vode u njoj akumuliraju i delimično zadržavaju doprinosi određenom stepenu zaštite izdanskih voda. U delovima gde se voda iz ove zone vertikalno transportuje do izdanske zone podzemne vode su najranjivije.
- Brzina toka podzemnih voda u karstnim terenima je velika, uglavnom preko 2 cm/s, a u pojedinim slučajevima iznosi i 20-50 cm/s. Međutim, karstni sistemi se odlikuju dvojnomo poroznošću koja se javlja kao rezultat postojanja pukotina i prslina. Često je prisutna i intergranularna poroznost. U zavisnosti od toga koja poroznost preovlađuje, u karstnom sistemu se pored „brzih“ javljaju i „spori“ tokovi. Krajnji rezultat ovoga je činjenica da se kontaminant može transportovati veoma brzo, ili pak ostati u sredini veoma dugo. U prvom slučaju, kontaminanti putuju veoma brzo do vodozahvatnog objekta pri čemu je autopurifikaciona sposobnost sredine veoma ograničena. Ranjivost vodozahvatnih objekata je znatno manja u slučaju usporenog kretanja podzemnih voda pri čemu je

autopurifikacija sredine znatno izraženija što je veoma bitno u prognozi transporta pojedinih tipova kontaminanata.

- Kako je jedan od koraka u zaštiti vodozahvatnih objekata definisanje veličine njegovog sliva, u karstu je zaštita podzemnih voda posebno problematična, jer slivna područja često obuhvataju velike površine. Njihovu vododelnicu je teško odrediti ne samo zato što se često ne poklapa sa topografskom vododelnicom, već i zato što je vremenski promenljiva i zavisna od hidroloških uslova.
- Hidrogeološka anizotropija karsta je izuzetno naglašena pa je zato svaka interpolacija i ekstrapolacija podataka u karstnim terenima veoma diskutabilna.



*Slika 5.7. Šematski prikaz kretanja vode u epikarst zoni
(Smart & Friedrich 1986, preuzeto od Doerfliger 1999)*

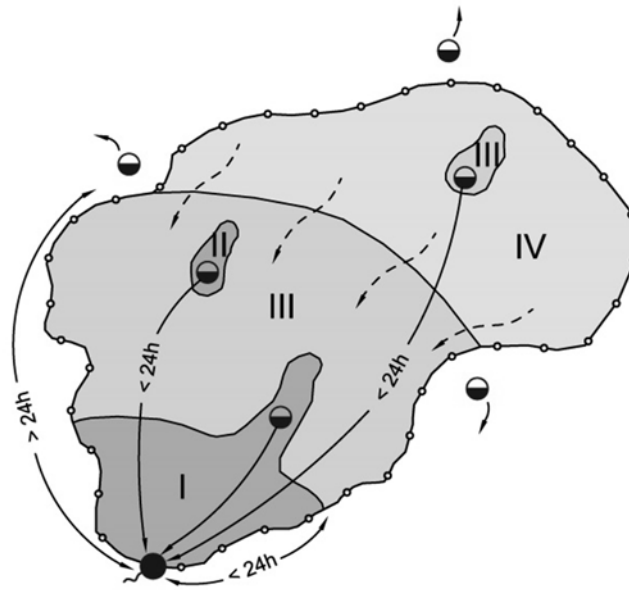
Određivanje zona sanitarne zaštite u karstu zbog svega gore navedenog zahteva realizaciju mnogo detaljnijih istraživanja i mnogo preciznije poznavanje celokupnog sistema. U hidrogeološkoj praksi se karstni sistemi veoma često posmatraju kao ekvivalenti poroznih medijuma, što prilikom modeliranja može da rezultira pogrešnim određivanjem zona zaštite, kao što je to ranije naveden primer pojave zagađivanja u gradu Walkerton (slika 2.6).

5.3.2. Postojeći trendovi u zaštiti podzemnih voda u sredinama kavernozne poroznosti

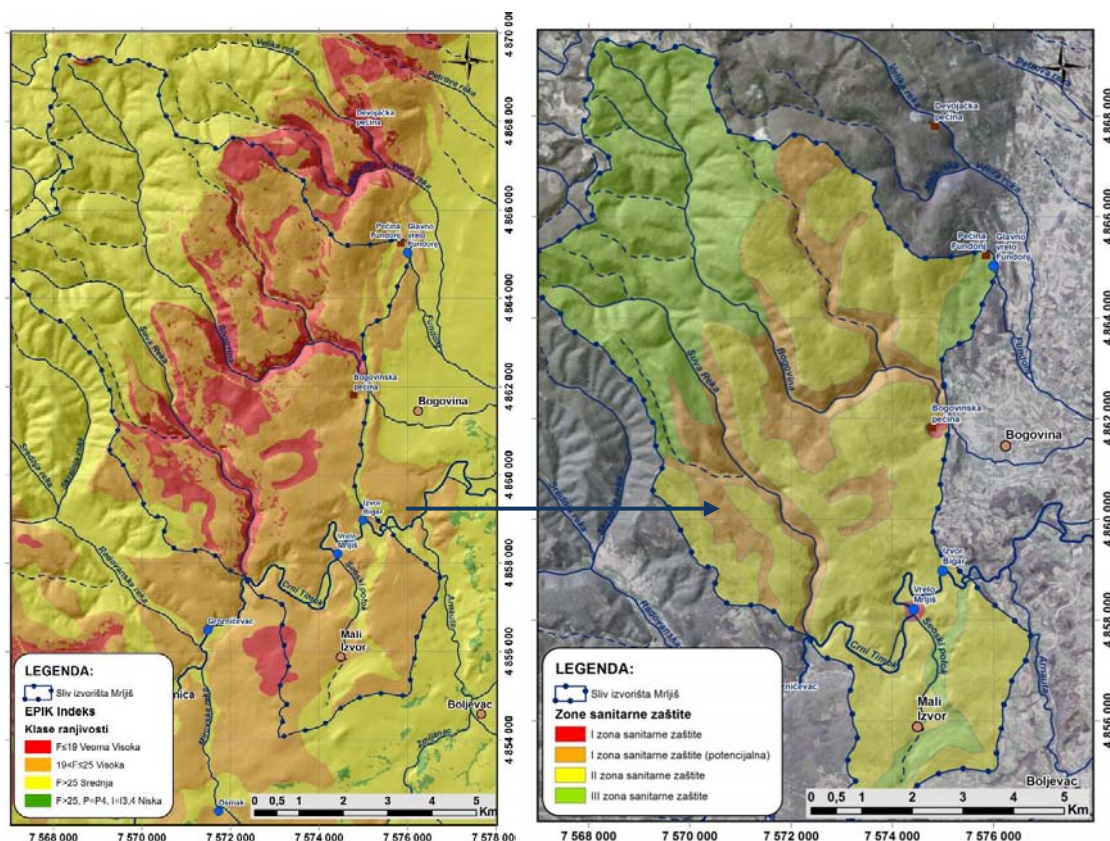
I pored toga što postoje značajne varijacije u broju i načinu određivanja, vreme putovanja kontaminanata je najčešća osnova za određivanje zona sanitarne zaštite u karstnim terenima. U određivanju sanitarnih zona karstnih izvorišta svakako treba uzeti u obzir specifičnosti karsta, pa tako Milanović (2000) predlaže da se pored vremena kretanja podzemne vode, u obzir uzmu i brzina kretanja, postojanje zona koncentrične infiltracije i sl. Na bazi ovih kriterijuma isti autor predlaže izdvajanje četiri zone zaštite (slika 5.8):

- Zona 1 (Neposredna zona zaštite izvora ili vodozahvatnog objekta). Ova zona uključuje prostor 50 m od vodozahvatnog objekta u pravcu dotoka podzemnih voda.
- Zona 2 (Uža zona zaštite koja zahteva veoma ozbiljne restriktivne mere zaštite). Ova zona treba da obuhvati deo sliva u kojem podzemne vode dospevaju za manje od 24 h do vodozahvatnog objekta. Ona treba da obuhvati i ponore u trećoj zoni od kojih voda do vodozahvatnog objekta putuje za manje od 24 h (ili više).
- Zona 3 (Šira zona zaštite). Ova zona treba da obuhvati deo sliva u kojem podzemne vode doputuju za manje od 10 dana do vodozahvatnog objekta. Takođe, treba da obuhvati i sve stalno aktivne ili povremene ponore iz IV zone koji imaju direktnu vezu za izvorom ili bunarom koji se štiti.
- Zona 4 (Spoljašnja zona zaštite) koja obuhvata ostatak sliva.

Sasvim drugačiji pristup pri određivanju zona sanitarne zaštite karstnih izvorišta predstavlja primena metoda za ocenu ranjivosti podzemnih voda. Prva primenjena metoda u tu svrhu jeste EPIK metoda (Doerfliger and Zwahlen 1997). Kod ove metode u zavisnosti od stepena ranjivosti podzemnih voda se određuje i stepen zaštite podzemnih voda. Vreme putovanja podzemne vode ka vodozahvatnom objektu ne ulazi u proračun veličina zona sanitarne zaštite. Jedan primer ovakvog određivanja zona sanitarne zaštite dat je kroz zaštitu podzemnih voda izvorišta Mrljiš u istočnoj Srbiji (Slika 5.9).

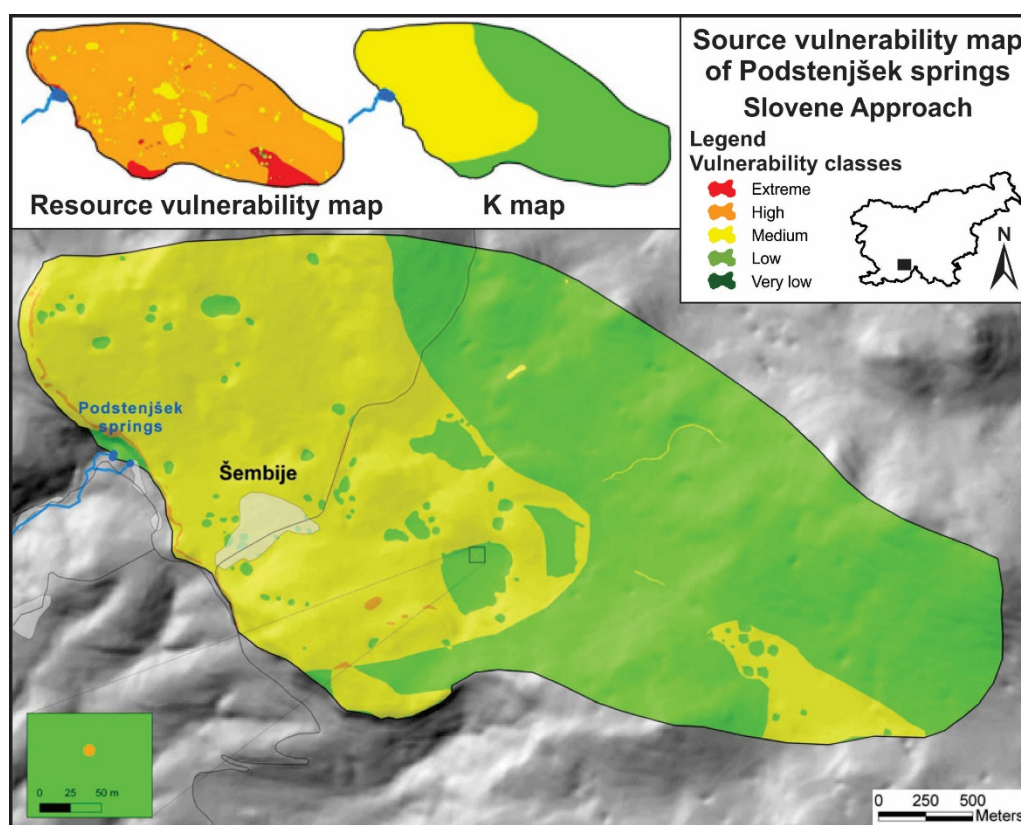


Slika 5.8. Šema određivanja zona sanitarne zaštite podzemnih voda u karstu (Milanovic, 2000, modifikovano).



Slika 5.9. Karta predloženih zona sanitarne zaštite izvorišta Mrljiš dobijena primenom EPIK metode za ocenu ranjivosti podzemnih voda (Živanović, 2011)

U novije doba se u određivanju zona sanitarne zaštite izvorišta karstnih podzemnih voda sve više primenjuju karte ranjivosti podzemnih voda u kombinaciji sa kartama koje definišu njihovo kretanje. Jedna od prvih aplikacija ovog pristupa jeste primena Slovenačke metode za ocenu ranjivosti podzemnih voda (Ravbar, 2007). Kao što je i predloženo „Evropskim pristupom“ za ocenu ranjivosti karstnih podzemnih voda (Zwahlen, 2004), za određivanje ranjivosti vodozahvatnih objekata, pored izrade karata ranjivosti podzemnih voda neophodno je uraditi i kartu faktora K. Ovaj faktor treba da definiše uslove kretanja karstnih podzemnih voda ka vodozahvatnom objektu. Kombinacijom ovog faktora sa kartom ranjivosti podzemnih voda dobija se karta ranjivosti vodozahvatnog objekta koja se može lako pretvoriti u kartu zona sanitarne zaštite prostom transformacijom različitih klasa ranjivosti u različite zone zaštite. Jedan primer primene ovakve metodologije jeste zaštita Podstenjšek izvora (slika 5.10) u jugozapadnoj Sloveniji (Ravbar & Goldscheider, 2007).



Slika 5.10. Karta ranjivosti Podstenjšek izvora dobijena primenom Slovenačke metode (Ravbar, 2007)

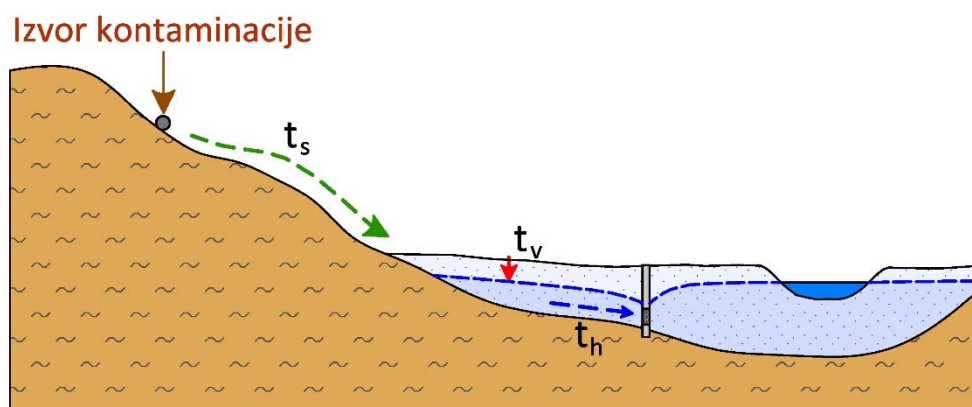
6. GLAVNE KOMPONENTE KOJE UTIČU NA ODREĐIVANJE ZONA SANITARNE ZAŠTITE

Dosadašnja metodologija određivanja zona sanitarne zaštite je uglavnom bazirana na proračunu horizontalnog kretanja podzemne vode ka vodozahvatnom objektu. Pri tom u obzir nisu uzimani površinsko kretanje vode, kao ni vertikalno kretanje vode kroz nadizdansku zonu. Kako bi bio prikazan njihov značaj sa aspekta zaštite vodozahvatnih objekata kao i čitave izdani, u daljem tekstu će se ove komponente analizirati.

6.1. Površinsko kretanje vode

Opšti nedostatak svih postojećih metoda određivanja zona sanitarne zaštite ogleda se u tome što one ne uzimaju u obzir kretanje površinskih voda preko slabije propusnih stena i sedimentata ka zonama sa povećanom ili intenzivnom infiltracijom. U ovim zonama površinska voda, a samim tim i kontaminanti, mogu se veoma brzo infiltrirati do izdanske zone. To ne mora biti slučaj samo sa karstnim, već i sa drugim vodonosnim sredinama.

Značaj doticaja površinskih voda sa vodonepropusne podloge na vodonosnu sredinu sa aspekta zaštite izvorišta podzemnih voda, može se objasniti na primeru izdani u aluvijalnim sedimentima (slika 6.1). Kod aluvijalnih izdani rasprostranjenje zona sanitarne zaštite se u praksi uglavnom vezuje za prostor na kojem su rasprostranjeni vodonosni aluvijalni sedimenti na određenoj daljini od vodozahvatnog objekata. Pri tom se ne uzima u obzir da pored prihranjivanja izdani na račun infiltracije površinskih voda konkretnog vodotoka, postoji i infiltracija površinskih voda koje dotiču sa padina (slika 6.2). Na taj način uvek postoji mogućnost da se ispušteni kontaminanti preko površinskih voda dosta brzo transportuju do vodonosne sredine.

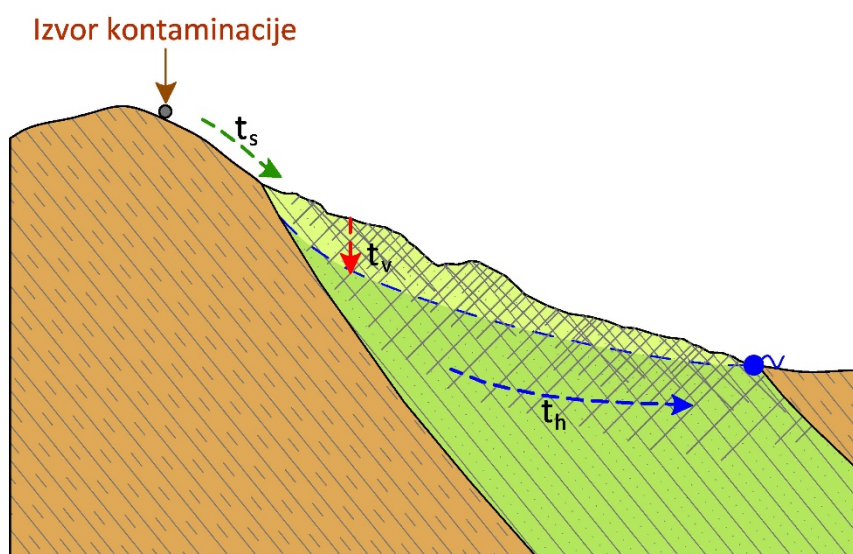


Slika 6.1. Primer transporta kontaminanata površinskim oticajem ka aluvijalnoj izdani



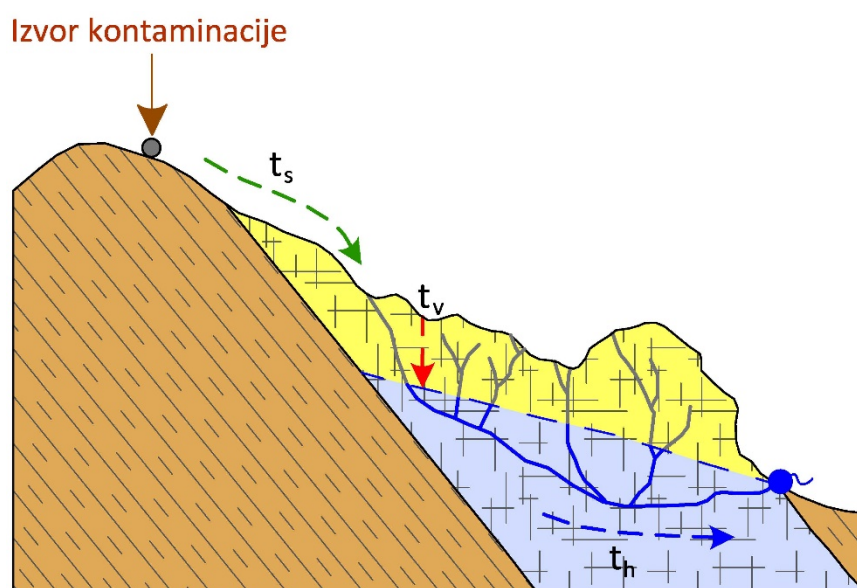
Foto 6.2. Bunar u aluvijonu Peka za vodosnabdevanja Kučeva sa miocenskim slabije propusnim sedimentima u zaleđu izvorišta

Ovakvo prihranjivanje izdani se nalazi i kod pukotinskih sredina, gde inače površinski oticaj dominira u odnosu na infiltraciju u ispucalu sredinu. Vode nastale izlučivanjem kišnih padavina formiraju površinske tokove koji sa sobom mogu transportovati i kontaminante. Prelaskom na deo sliva gde dominira vodonosna sredina sa pukotinskom poroznošću, stvaraju se uslovi za infiltraciju ovih voda zajedno sa kontaminantima (slika 6.3).



Slika 6.3. Primer transporta kontaminanata površinskim oticajem ka vodonosnoj sredini sa pukotinskom poroznošću

Posebno je karakterističan transport površinskih voda sa nekarbonatnih terena i njihova intenzivna infiltracija kroz koncentrične ponore ili ponorske zone, a javlja se kod karbonatnih terena. Veoma je čest slučaj da se u delovima sliva izgrađenim od nekarbonatnih stena, hipsometrijski višim u odnosu na karst, formiraju površinski tokovi. Pri prelazu na karstne terene tokovi poniru ili postepeno gube deo vode (slika 6.4).



Slika 6.4. Primer transporta kontaminanata površinskim oticajem ka vodonosnoj sredini u karstifikovanim stenama

Na taj način omogućen je veoma brz transport kontaminanata do izdanske zone, a samim tim i do vodozahvatnog objekta. U ovakvim slučajevima vreme potrebno da se kontaminant transportuje do izvora ili bunara često se meri danima, ponekada i satima.

Klasičan primer prihranjivanja karstne izdani preko izraženih koncentričnih ponora jesu Zlotska izvorišta u istočnoj Srbiji (Slika 6.5). Ona se sastoje od više vrela i bunara u dolini Beljevsinske (izvori Gaura Mare, Gaura Mika, Rnić i Mejlanović i bunari B-2 i B-4) i Zlotske reke (Zlotsko vrelo i bunari B-7 i B-8).



Slika 6.5. Hidrogeološka karta dela sliva Zlotskih vrela sa položajem ponora i vrela (gore), fotografija ponora Vojal (dole levo) i fotografija vrela Gaura Miku (dole desno)

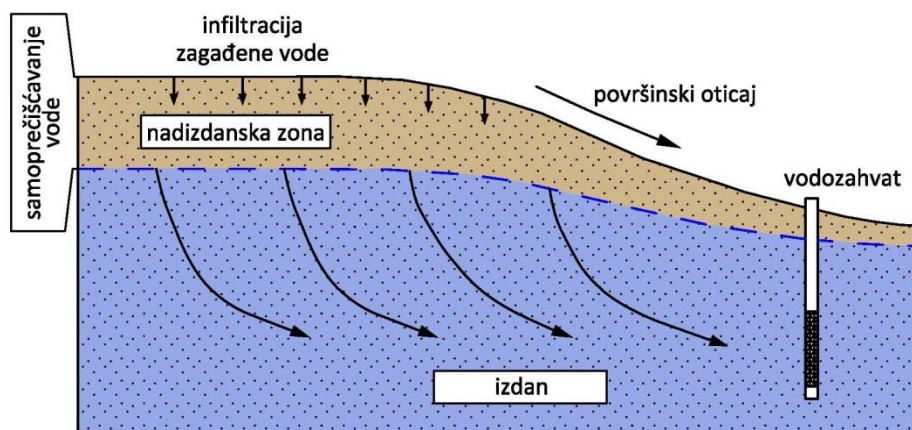
Na njima se drenira karstna izdan dela Kučajskog masiva, ukupne površine od oko 150 km² od čega karstni tereni zahvataju oko 43% (Radosavljević et al., 2015). U severozapadnom delu sliva nalazi se više povremenih površinskih tokova koji se formiraju na vodonepropusnoj podlozi, koji pri stupanju na karbonatnu podlogu koncentrisano poniru. Sedamdesetih godina vršeni su opiti trasiranja kojima je utvrđena direktna hidraulička veza između ponora i kaptiranih vrela (Jemcov & Živanović, 2014). Tako na primer, pri bojenju ponora Vojal obeleživač se pojavio na vrelima Gaura Mare i Gaura Mika pri čemu je proračunata fiktivna brzina filtracije od oko 0,1 m/s (slika 6.5). Ovako dobijena brzina ukazuje da podzemna voda za jedan dan pređe rastojanje od oko 8 km. Ovakvi prirodni uslovi su sa aspekta zaštite izdanskih voda izuzetno problematični, obzirom da kontaminanti ispušteni u slivu ponirućih tokova, predstavljaju veliki rizik za zagađivanje karstnih izdanskih voda, posebno za vreme izlučivanja kiša jakog intenziteta.

6.2. Vertikalno kretanje vode u nadizdanskoj zoni

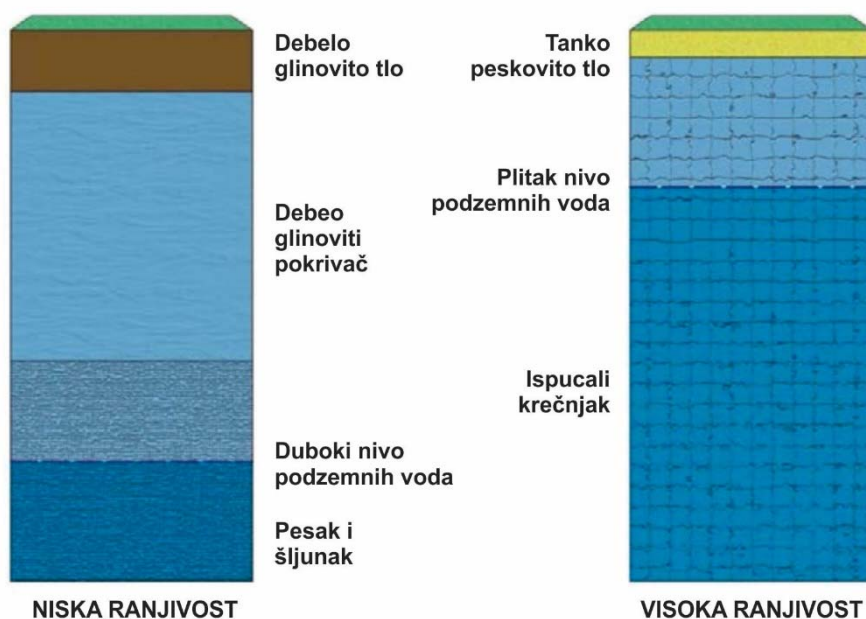
Zaštita podzemnih voda u velikoj meri zavisi od karaktera nadizdanske zone tj. od zaštitne funkcije koju ona ima (slika 6.6). U pojedinim slučajevima izdanska zona je zaštićena vodonepropusnom sredinom koja je prekriva i u potpunosti štiti od uticaja sa površine terena (slika 6.7, levo). U drugima slučajevima (primer aluvijalnih sedimenata ili pojave otkrivenog karsta) zaštitna uloga nadizdanske zone je veoma mala, usled čega su podzemne vode u ovim izdanima veoma podložne procesima zagađivanja (slika 6.7, desno). Koliko će nadizdanska zona imati samoprečišćavajuću moć, zavisi od više faktora od koji su najbitniji sastav rudinskog pokrivača, sedimenata i stena u nadizdanskoj zoni, njihova vodopropusnost, dubina do nivoa izdani, intenzitet padavina, količine vode koja se infiltrira, vidovi infiltracije i sl.

U dosadašnjoj hidrogeološkoj praksi, zaštitna uloga nadizdanske zone je samo delimično analizirana u procesu delineacije zona sanitarne zaštite. Kako je akcenat uglavnom stavljan na horizontalno kretanje podzemnih voda ka objektu koji se štiti, karakter nadizdanske zone je analiziran samo u pojedinim slučajevima. U mnogim zemljama, uključujući i našu, zaštita koju pružaju slojevi u zoni aeracije se analizira samo za

mogućnost smanjenja rasprostranjenja pojedinih zona. Pri tom, u proračunu veličine zona u obzir se uzima postojanje slabije propusnog ili vodonepropusnog sloja određene debljine bez detaljne analize uslova filtracije ka zoni zasićenja.



*Slika 6.6. Prirodno samoprečišćavanje zagađene vode
(Vrba & Zaporozec 1994, adaptirano)*



Slika 6.7. Primeri različite zaštitne funkcije nadizdanske zone

Kvantifikacija toka vode kroz nezasićenu zonu predstavlja veoma složen zadatak. Deo vode se može relativno brzo infiltrirati krećući se u zoni aeracije kroz porozne oblike ka nivou podzemnih voda. Samim tim i kretanje kontaminanata kroz krupnije porozne oblike

može biti značajno ubrzano, posebno za vreme kiša jakog intenziteta i odsustva deficita vlažnosti zemljišta. Na taj način vreme transporta kontaminanata koje se najčešće meri nedeljama ili godinama može biti svega nekoliko dana.

U zoni aeracije, podzemne vode na svom putu ka generalnom nivou izdani često nailaze na vodonepropusne barijere (sočiva gline, izolovane pore i sl.). One uz procese difuzije doprinose smanjenju brzine kretanja, kao i smanjenju koncentracije kontaminanata. Time se povećava ukupno vreme zadržavanja kontaminanata u zoni aeracije. Na njihov transport utiču i procesi disperzije. Disperzija je posebno izražena kod heterogenih zemljišta i sedimenata sa visokim parametrom disperzije, što je najčešće slučaj sa zonom aeracije. Disperzija se odražava ne samo na distribuciju vremena putovanja, već i na maksimalnu koncentraciju kontaminanata u vodi koja je obično manja od njihove inicijalne koncentracije.

Pored fizičko-hemijskih interaktivnih faktora kontaminant-voda-geološka sredina, na transport kontaminanata u nadizdanskoj zoni, značajan uticaj imaju ulazni i granični uslovi. Veličina i karakter padavina, isparavanje, sadržaj vlage u zemljištu, dubina do nivoa podzemne vode su parametri koji su veoma promenljivi u vremenu i u prostoru i dodatno usložnjavaju evaluaciju transporta kontaminanata. Svi navedeni faktori mogu značajno uticati na sudbinu kontaminanta na putu od površine terena do izdanske zone. Oni utiču na zaštitnu funkciju nadizdanske zone koja posebno treba biti analizirana pri definisanju zona sanitarne zaštite svakog izvorišta podzemnih voda. Analiza nadizdanske zone se obično sprovodi primenom metoda za ocenu ranjivosti podzemnih voda⁶.

Primenom pomenutih metoda dobijaju se karte ranjivosti koje nam prostorno pokazuju sposobnost prirodne sredine da zaštiti podzemne vode. Na taj način je moguće izdvojiti delove sliva izvorišta gde su podzemne vode prirodno zaštićene i gde se mogu smanjiti restriktivne mere zaštite koje se uspostavljaju u zavisnosti od propisane zone zaštite. Ovakav pristup u definisanju zona sanitarne zaštite prve su uvele Irska (GSI, 1999) i Švajcarska (SAEFL 1998). U Švajcarskoj je široko primenjivana EPIK metoda za ocenu

⁶ Ranjivost podzemnih voda se definiše kao skup osobina prirodne sredine koje određuju osetljivost izdani na zagađivanje sa površine terena (Živanović, 2011)

ranjivosti karstnih podzemnih voda pri čemu su zone sanitarne zaštite definisane na bazi izdvojenih klasa ranjivosti podzemnih voda (tabela 6.1).

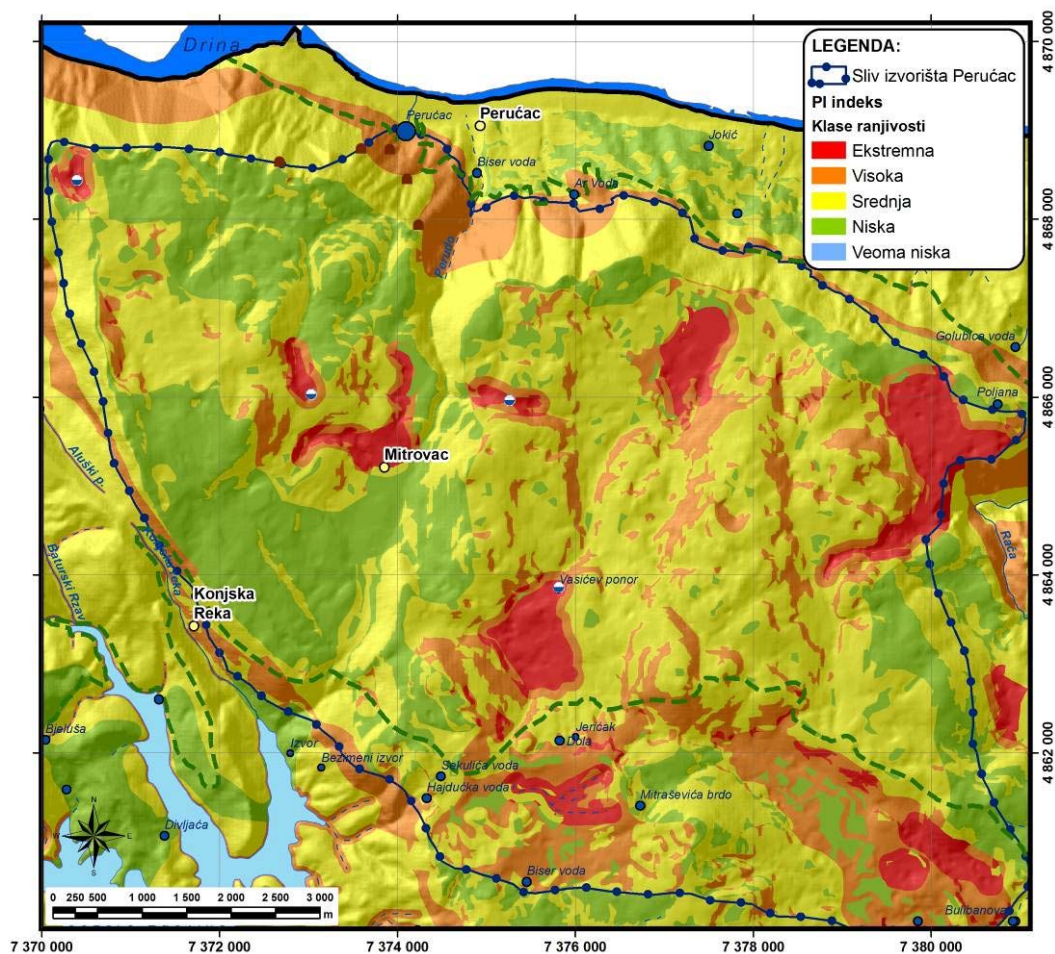
Tabela 6.1. Zavisnost između klase ranjivosti, indeksa zaštite F i zone sanitarne zaštite (SAEFL 1998)

Površine ranjivosti	Indeks zaštite F	Zona zaštite
Veoma visoka	$F \leq 19$	S1 (Neposredna zona zaštite)
Visoka	$19 < F \leq 25$	S2 (Uža zona zaštite)
Srednja	$F > 25$	S3 (Šira zona zaštite)
Niska	$F > 25, P = P4, I=I3,4$	Ostatak sliva

Metode za ocenu ranjivosti podzemnih voda posebno su primenljive u terenima izgrađenim od stena sa pukotinskom ili kavernožnom poroznošću. U pojedinim delovima ovih terena moguća je koncentrisana infiltracija, što omogućava brz transport kontaminanata do izdanske zone. Primenom metoda za ocenu ranjivosti ove zone se izdvajaju kao zone sa visokom i ekstremnom ranjivošću, pa se prilikom određivanja zona sanitarne zaštite njima dodeljuje viši stepen preventivnim mera. Primer za to je karta ranjivosti u slivu izvorišta Perućac dobijena primenom PI metode (Živanović, 2011). Na ovoj karti zone ponora i njihovih slivova izdvojene su kao područja gde su podzemne vode najranjivije, pa se samim tim kod njih mora uvesti najviši stepen zaštite (slika 6.8).

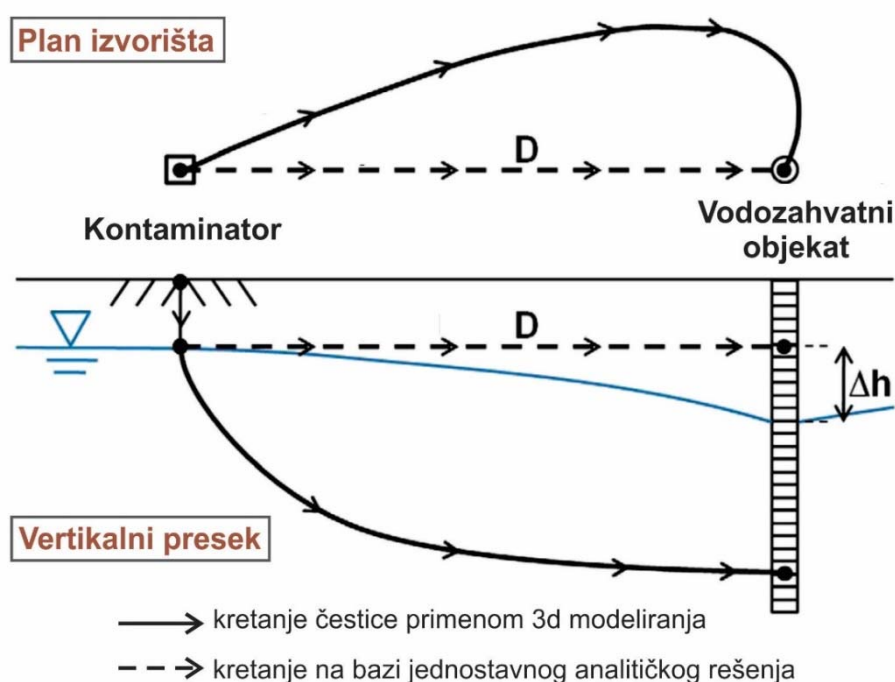
6.3. Horizontalno kretanje vode u izdanskoj zoni

Jedan od najvažnijih faktora koji određuje uslove horizontalnog kretanja podzemnih voda kroz stensku masu jeste poroznost, i to aktivna poroznost, određena površinom poprečnog preseka pora kroz koje može da se kreće slobodna (gravitaciona) voda. Voda se u poroznoj sredini kreće kroz sisteme otkrivenih i međusobno spojenih pora, pukotina i kaverni, različitih razmera, oblika i položaja. Pri kretanju podzemnih voda kroz zasićenu zonu razlikujemo dva režima tečenja: laminarni i turbulentni. Prvi režim je najčešći režim kretanja podzemnih voda. Javlja se pri malim brzinama tečenja, pri čemu se kretanje toka odlikuje paralelnim strujnicama bez presecanja toka. Kod turbulentnog kretanja dolazi do unutrašnje pulsacije koja uslovljava aktivno presecanje strujnica, što za posledicu ima pojavu vrtloženja.



Slika 6.8. Karta ranjivosti podzemnih voda u slivu izvorišta Perućac dobijena PI metodom (Živanović, 2011)

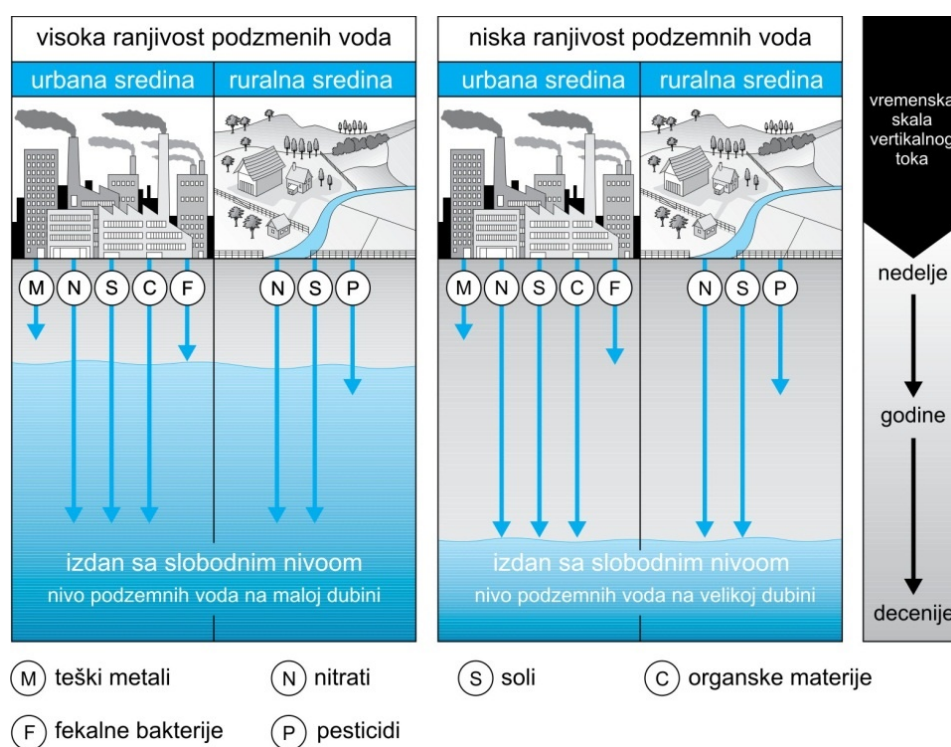
Brzina filtracije podzemnih voda zavisi pre svega od karaktera porozne sredine i hidrauličkog gradijenta. U uslovima kada dominira laminarno kretanje podzemnih voda, generalno se primenjuju dve tehnike u evaluaciji vremena kretanja podzemne vode: 1) proračun baziran na kretanju čestice (*particle tracking*) dobijene primenom 3D hidrodinamičkog modeliranja i 2) proračun na bazi primene jednostavnih analitičkih rešenja zasnovanih na Darsijevom zakonu kretanja podzemnih voda (slika 6.9). Primenom različitih tehnika mogu se dobiti rezultati koji često mogu da se veoma značajno razlikuju. Jedan primer moguće razlike u primeni ovih tehnika daje Sousa (2012).



Slika 6.9. Šematska komparacija kretanja podzemne vode primenom numeričkog modeliranja i jednostavne pravolinijske aproksimacije vremena kretanja podzemne vode u zasićenju zoni (Sousa et al., 2012)

6.4. Karakter kontaminanata

Pri određivanju zona sanitarne zaštite, kako kod nas tako i u većini evropskih zemalja, u dosadašnjoj praksi, karakteristike kontaminanata nisu razmatrane kao faktor koji utiče na njihovu veličinu (slika 6.10). Bez obzira na tip i poreklo zagađujućih čestica (nitrati, teški metali i dr.), predložene zone moraju da zaštite izvorište od svih njih. Jedino je određivanje druge zone zaštite delimično bazirano na karakteru kontaminanta, jer je zasnovano na vremenu potrebnom da se broj patogenih bakterija na putu podzemne vode do vodozahvatnog objekta redukuje na prihvatljiv nivo.



Slika 6.10. Brzine transporta različitih kontaminanata pri istim uslovima infiltracije (Foster et al. 2002)

U nekim zemljama kao što je Holandija, karakter potencijalnih kontaminanata je od posebne važnosti pošto je određivanje zona sanitarne zaštite bazirano na proceni rizika od zagađivanja (poglavlje 3.3). Veličina zone se određuje tako da se rizik smanji na minimum, a za to je neophodno poznavanje potencijalnih kontaminanata i njihovih karakteristika, pre svega njihove migrativnosti. Primena ovakve metodologije može imati značajnu socio-ekonomsku korist jer se sanitarne zone mogu smanjiti tako što se na bazi poznavanja potencijalnih kontaminanata procenjuje kolika je verovatnoća da isti dopru do vodozahvatnog objekta. Sa druge strane, ovakva metodologija obično zahteva veoma detaljna i skupa hidrogeološka istraživanja kako bi se sa sigurnošću dokazalo da određeni potencijalni izvor kontaminacije neće sigurno da ugrozi izvorište.

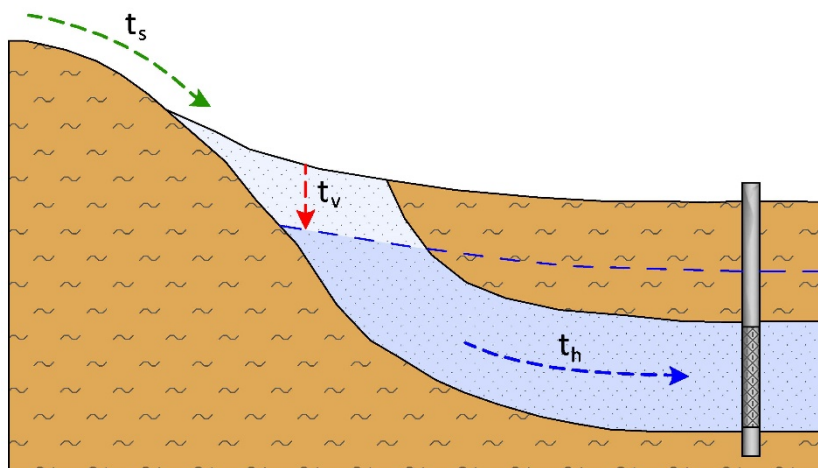
7. METODOLOŠKI PRISTUP U ODREĐIVANJU ZONA SANITARNE ZAŠTITE U RAZLIČITIM HIDROGEOLOŠKIM USLOVIMA – TDM METODA

7.1. Konceptualni model zaštite izvorišta

Analizirajući faktore koje utiču na sudbinu kontaminanata jasno je da konceptualni model određivanja zona sanitarne zaštite treba da obuhvati **površinsku, vertikalnu i horizontalnu komponentu kretanja vode**. Imajući u vidu da se zone sanitarne zaštite ne uvode kako bi se izvorište zaštitilo samo od pojedinih kontaminanata već od svih mogućih, konceptualni model ne razmatra četvrtu komponentu tj. karakter potencijalnih kontaminanata. Ova komponenta se analizira pri proceni uticaja potencijalnih izvora zagađivanja na izvorište, gde je poznat tip kontaminanta i gde je potrebno proceniti rizik da on dospe do vodozahvatnog objekta.

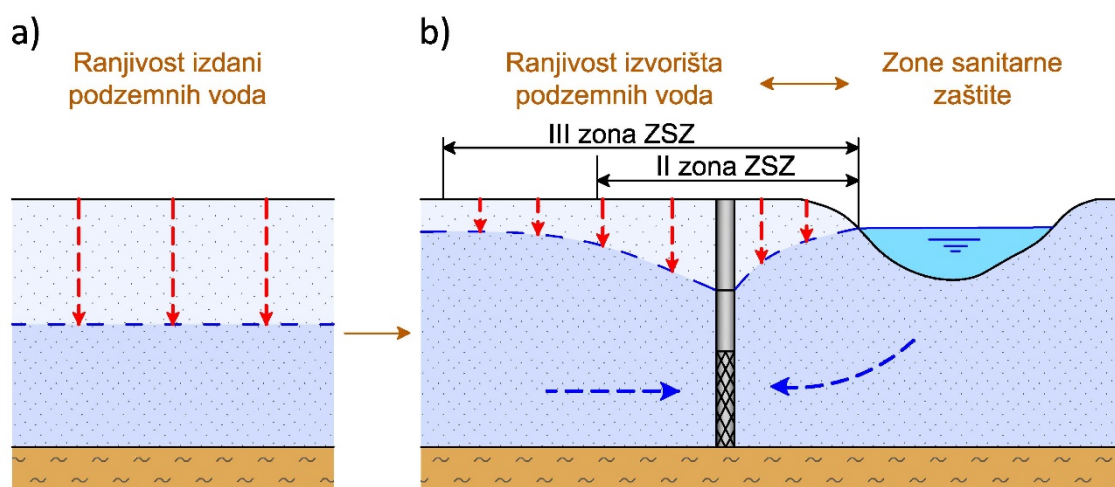
Konceptualni model određivanja zona sanitarne zaštite baziran na vremenu kretanja površinske i podzemne vode ka vodozahvatnom objektu, prikazan je na slici 7.1. Uzimajući u obzir da je čitav koncept određivanja sanitarnih zona baziran na vremenu putovanja vode, u daljem tekstu je za prikazanu metodologiju usvojen termin TDM metoda (*eng. Time Dependant Method*).

Da li je u procesu delineacije zona sanitarne zaštite potrebno analizirati sve tri komponente zavisi od tipa izvorišta podzemnih voda i same vodonosne sredine. Jasno je da će u slučajevima kada postoji koncentrisana infiltracija biti neophodno uključiti i komponentu površinskog kretanja vode. U situacijama kada je zona prihranjivanja izdani daleko od lokacije izvorišta, pri čemu je horizontalno vreme putovanja značajno veće od vremena koja se koriste u određivanju zona (pr. 50 i 200 dana), proračun zona sanitarne zaštite treba da obuhvati samo vertikalnu i horizontalnu komponentu kretanja (primer izvorišta koja kaptiraju duboku neogenu izdan).



Slika 7.1. Konceptualni model određivanja zona sanitarne zaštite (t_s – vreme površinskog kretanja vode ka zoni koncentrisane infiltracije; t_v – vreme kretanja vode kroz nadizdanku zonu; t_h – vreme kretanja vode kroz izdanku zonu ka vodozahvatnom objektu)

Određivanje zona sanitarne zaštite izvorišta podzemnih voda analizom različitih komponenti kretanja površinskih i podzemnih voda, u velikoj je meri zasnovano na metodologiji ocene ranjivosti podzemnih voda (slika 7.2). Pri tom treba voditi računa da li se radi o oceni ranjivosti izdani tj. celog sistema (*resource vulnerability*), ili o oceni ranjivosti izvorišta podzemnih voda (*source vulnerability*). Kod ocene ranjivosti izvorišta u obzir se uzima i horizontalna komponenta kretanja podzemnih voda ka vodozahvatnom objektu. Time se analiziraju sve komponente koje su bitne za zaštitu izvorišta podzemnih voda, a samim tim i za određivanje zona sanitarne zaštite.



Slika 7.2. Veza između ranjivosti izdani, ranjivosti izvorišta i zona sanitarne zaštite izvorišta podzemnih voda a) ranjivost izdani podzemnih voda b) ranjivost izvorišta podzemnih voda

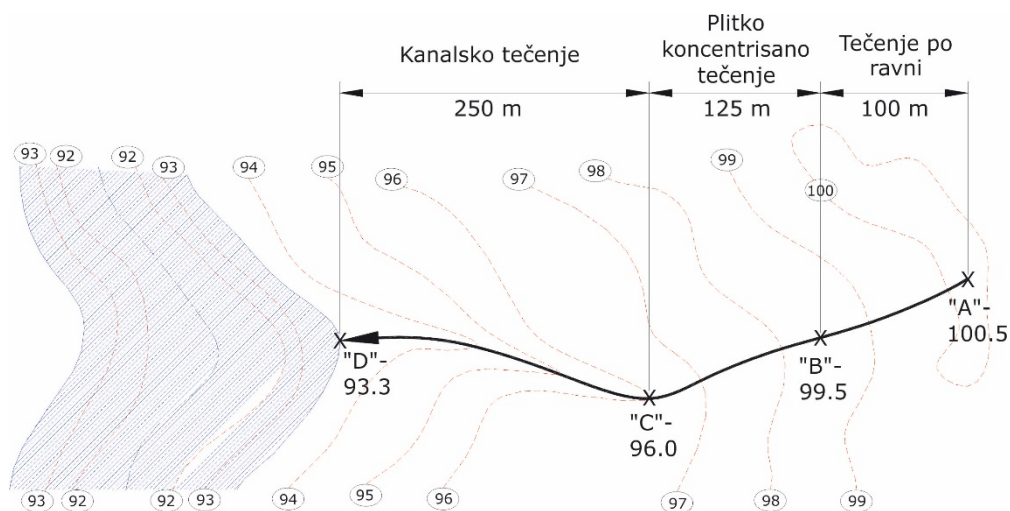
Predložena TDM metoda u suštini predstavlja metod za ocenu ranjivosti izvorišta podzemnih voda. Kako je finalna karta ranjivosti izražena preko vremena putovanja vode sa površine terena ka vodozahvatnom objektu, ona se lako može transformisati u kartu zona sanitarne zaštite. Time se predmetna metoda može klasifikovati i kao metoda za određivanje zona sanitarne zaštite.

7.2. Proračun zona sanitarne zaštite primenom TDM metodologije

Na osnovu detaljno prikazane zakonske regulative i zahteva koje je neophodno ispuniti u većini evropskih zemalja u pogledu određivanja zona sanitarne zaštite izvorišta za snabdevanje vodom (poglavlje 4.2.), može se zaključiti da je vreme putovanja vode ka vodozahvatnom objektu najčešći parametar koji se koristi u određivanju veličine za svaku od sanitarnih zona koje se uspostavljaju. U prethodnom poglavlju je prikazano da postoje 3 komponente od kojih zavisi ukupno vreme kretanja vode sa površine terena do vodozahvatnog objekta: kretanje površinske vode do zona koncentrisane infiltracije, kretanje vode kroz nadizdansku zonu i kretanje vode kroz izdansku zonu.

7.2.1. Proračun vremena površinskog kretanja vode

Vreme putovanja površinske vode (t_s) predstavlja vreme za koje čestica površinskog oticaja stigne od jedne tačke u slivu toka koji se gubi kroz zone koncentrisane infiltracije do zone gde se površinska voda infiltrira koncentrisano. Faktori koji utiču na površinsko vreme putovanja su dužina toka, nagib terena, hrapavost terena kao i intenzitet padavina (Conservation Engineering Division, 1986). Ono se obično računa kao suma vremena više segmenata površinskog toka pri čemu se u najvišim delovima sliva obično javlja spiranje tj. tečenje po ravni (*sheet flow*). Ovakvo tečenje se javlja na malim distancama, obično do 100 m, nakon čega tečenje prelazi u plitki koncentrisan tok. Kada površinska voda dođe do kanala povremenih ili stalnih površinskih tokova, onda plitki koncentrisan tok prelazi u kanalni tok (slika 7.3). Svaka od ovih komponenti može se izračunati na bazi Maningove jednačine za tečenje po ravni ili za kanalno tečenje.



Slika 7.3. Različite faze površinskog tečenja vode

Za tečenje po ravni, vreme putovanja se može izračunati sledećom jednačinom (Conservation Engineering Division, 2010):

$$t_{sh} = \frac{0.091(nL)^{0.8}}{P_2^{0.5} S^{0.4}}$$

gde su:

- t_{sh} - vreme putovanja površinske vode (h);
- n - Manningov koeficijent hrapavosti (tabela 7.1, slika 7.4);
- L - dužina puta (tečenja) (m);
- S - nagib terena (m/m);
- P_2 - 24 časovna kiša za period od 2 godine (mm);

Tabela 7.1. Vrednosti Manningovog koeficijenta hrapavosti (Engman, 1986)

Opis površine	n
Glatke površine (beton, asfalt, tucanik ili ogoljeno zemljište)	0,011
Neobrađeno zemljište	0,05
Kultivisana tla	
sa ostatkom vegetacije < 20%	0,06
sa ostatkom vegetacije > 20%	0,17
Travnate površi	
sa kratkom travom	0,15
sa gustom travom	0,24
sa gustom i visokom travom	0,41
Šume	
sa slabo razvijenim žbunjem	0,4
sa gusto razvijenim žbunjem	0,8



Kultivisana tla sa ostatkom vegetacije < 20%, $n = 0,06$



Kultivisana tla sa ostatkom vegetacije > 20%, $n = 0,17$



Glatke površine $n=0,011$



Šumoviti predeli $n=0,40$

Slika 7.4. Prikaz predela sa različitim vrednostima Maningovog koeficijenta n

Za proračun brzine (V_{sc}) plitkog koncentrisanog toka koji nastaje nakon tečenja po ravni, koriste se dve jednačine u zavisnosti od podloge po kojoj se vrši tečenje (ConnDot, 2001):

$$V_{sc} = 4.9178 \cdot S^{0.5} \text{ za hrapave površine}$$

$$V_{sc} = 6.1961 \cdot S^{0.5} \text{ za glatke površine}$$

Obe jednačine koriste Maningovu jednačinu sa različitim pretpostavkama za veličinu n (Maningov koeficijent hrapavosti) i veličinu r (hidraulički radijus). Za hrapave površi, n je 0,05, a r je 0,12 m, za glatke površi, n je 0,025 i r je 0,06. Vreme plitkog koncentrisanog toka se može izračunati jednačinom $t_{sc} = L / (V_{sc} * 3600)$ (h).

Brzina kretanja vode kroz kanale povremenih i stalnih tokova se može proračunati takođe uz pomoć Maningove formule za tečenje u otvorenom kanalu (ConnDot, 2001):

$$V_c = (r^{2/3} S^{1/2})/n$$

gde su:

- V_c - srednja brzina (m/s);
- r - hidraulički radijus (m) ($r=a/pw$, gde je a = poprečni presek vodenog toka (m^2), pw = okvašeni obim (m));
- s - nagib kanala (m/m);
- n - Maningov koeficijent hrapavosti za tečenje kroz kanale
($n=(n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m_5$, tabela 7.2).

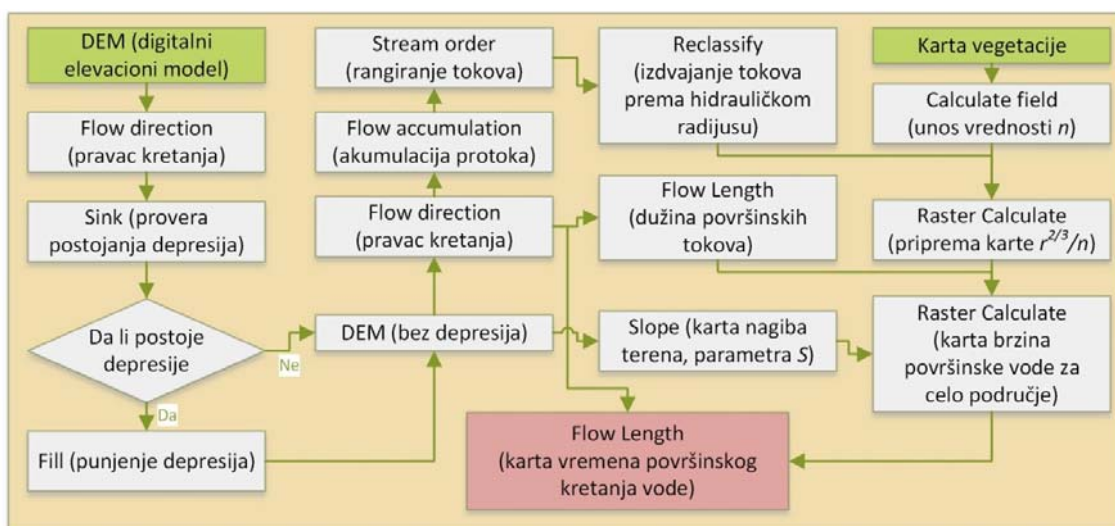
Tabela 7.2. Određivanje koeficijenta hrapavosti za tečenje kroz kanale po Cowan-ovoj metodologiji (1956)

Karakteristike kanala		Vrednost parametra	
Materijal korita	Zemljano korito	n_0	0,02
	Odlomci stena		0,025
	Sitnozrni šljunak		0,024
	Krupnozrni šljunak		0,028
Stepen nepravilnosti	Glatko korito	n_1	0
	Minimalna promenljivost		0,005
	Srednja promenljivost		0,01
	Velika promenljivost		0,02
Promenljivost vertikalnog profila kanala	Postepena	n_2	0
	Povremena promenljivost		0,005
	Česta promenljivost		0,010-0,015
Uticaj prepreka u strujanju voda	Beznačajan	n_3	0
	Minimalan		0,010-0,015
	Srednji		0,020-0,030
	Značajan		0,040-0,060
Vegetacija	Niska	n_4	0,005-0,010
	Srednja		0,010-0,025
	Visoka		0,025-0,050
	Veoma visoka		0,050-0,100
Stepen meandriranja	Beznačajan	m_5	1
	Primetan		1,15
	Značajan		1,30

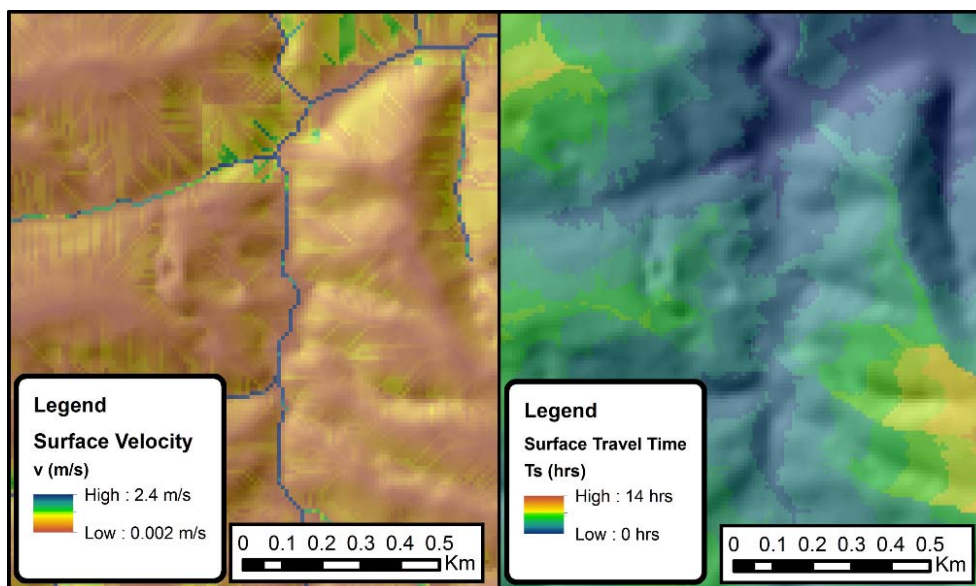
Slično kao i kod pojave plitkog koncentrisanog toka, vreme tečenja kroz otvorene kanale se može izračunati na bazi poznate brzine površinske vode, primenom jednačine:

$$t_c = L / (V_c * 3600) \text{ (h)}$$

Za primenu jednačina za proračun brzine kretanja i vremena putovanja površinske vode u slivu ponora ili ponirućeg vodotoka neophodna je primena GIS okruženja. Šematski prikaz izrade karte koja pokazuje vremena putovanja površinske vode prikazana je na slici 7.5, a primer izrade karata brzina površinskih tokova i vremena koje je potrebno površinskoj vodi da dotekne iz bilo koje tačke u slivu prikazan je na slici 7.6.



Slika 7.5. Šema izrade karte vremena putovanja površinske vode primenom ArcGIS okruženja



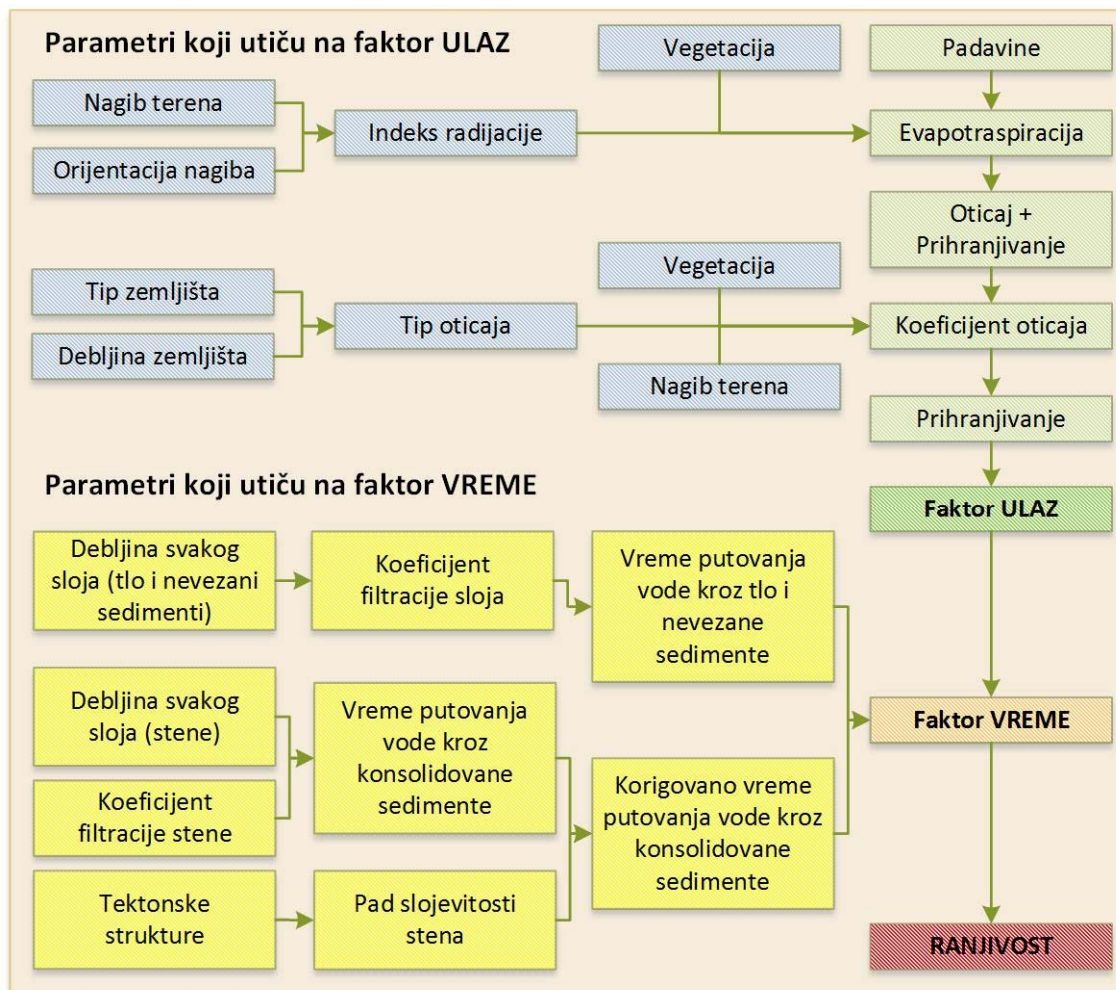
Slika 7.6. Primer karata brzina površinskog kretanja vode (levo) i vremena putovanja površinske vode (Živanović, 2015)

7.2.2. Proračun vremena vertikalnog kretanja vode u nadizdanskoj zoni

Nadizdanska zona ima značajnu ulogu u određivanju ranjivosti izvorišta podzemnih voda. Izvori zagađivanja se najčešće nalaze na površini terena pa će samim tim i vreme potrebno da kontaminant doputuje do izdanske zone pre svega zavisi od debljine i karaktera nadizdanske zone, kao i drugih faktora (morfologije terena, padavina, vegetacije i sl.). Korišćenje numeričkog modeliranja je gotovo nezaobilazno u analizi kretanja podzemne vode, pre svega u uslovima kada je izdan zasićena. Međutim, modeliranje kretanja vode u nadizdanskoj zoni može biti veoma kompleksno zbog složenih nelinearnih jednačina kretanja vode, te je stoga računarski mnogo zahtevnije od modeliranja kretanja vode u zasićenoj zoni (Sousa, 2013). Ova kompleksnost posebno dolazi do izražaja prilikom izrade hidrodinamičkih modela terena većih slivova u kojima je izražena prostorna promenljivost parametara sredine.

U analizi vremena vertikalnog kretanja vode u nadizdanskoj zoni od značajne pomoći nam mogu biti karte ranjivosti podzemnih voda. Prilikom izrade ovih karata veoma često se analiziraju brojni parametri koji definišu zaštitnu ulogu nadizdanske zone. Ti isti parametri utiču i na vreme putovanja vode ka izdanskoj zoni. Samim tim, karte ranjivosti nam mogu poslužiti i za ocenu vremena kretanja vode kroz nadizdansku zonu u slivu konkretnog izvorišta. Ovakav pristup su primenili Kralik i Keimel (2003) kod TIME-INPUT metode za ocenu ranjivosti karstnih podzemnih voda. Iako je metoda specifično razvijena za karstne terene, može se veoma lako primeniti i na ostale tipove izdani.

Prema autorima TIME-INPUT metode (Kralik & Keimel, 2003), za proračun vremena kretanja vode kroz nadizdansku zonu potrebno je odrediti dva osnovna parametra: parametar VREME (*Time*), koji se definiše preko debljine i koeficijenta filtracije tla i stena u zoni aeracije, i parametra ULAZ (*Input*) koji predstavlja korekcionni faktor vremena koji zavisi od veličine prihranjivanja (slika 7.7).



Slika 7.7. Dijagram TIME-INPUT metode koji pokazuje postupak određivanja faktora VREME i ULAZ (Kralik & Keimel, 2003, modifikovano)

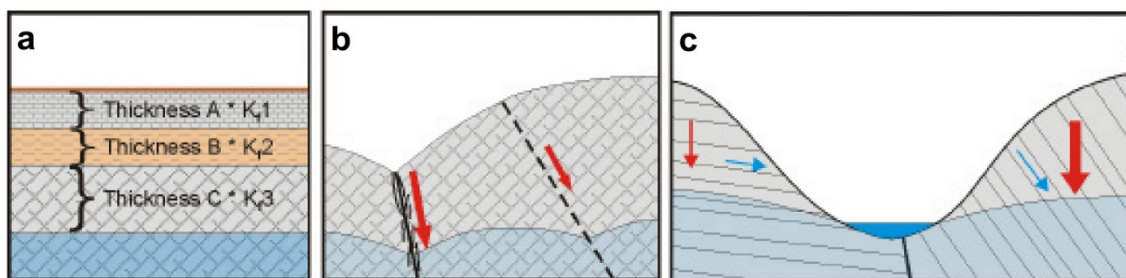
Pri proračunu faktora VREME, analiziraju se vrednosti debljine i koeficijenta filtracije svih slojeva u nadizdanskoj zoni u svakoj tački područja istraživanja (slika 7.7). Debljina zone i vrednosti koeficijenta filtracije mogu se dobiti istražnim bušenjem, izvođenjem odgovarajućih ispitivanja u bušotinama. Ovi podaci se posredno mogu dobiti analizom pedoloških, geoloških i satelitskih karata. Pri analizi vertikalnog putovanja kroz stensku masu uveden je dodatni korekcionni faktor koji se odnosi na prisustvo raseda, pa se tako u zoni ovih struktura koeficijent filtracije uvećava množenjem korektivnim faktorom, što za rezultat ima brže putovanje vode (tabela 7.3.). Dodatni korekcionni faktor postoji i za nagib (pad) slojevitosti stena u nadizdanskoj zoni, jer se povećanjem pada povećava i brzina kretanja vode (tabela 7.4., slika 7.8. - desno).

Tabela 7.3. Faktor korekcije koji opisuje postojanje rasednih struktura
(Kralik & Keimel, 2003)

Klase	Strukture	Faktor korekcije
1	Glavne rasedne zone	20
2	Manje rasedne zone	10
3	Bez raseda	1

Tabela 7.4. Faktor korekcije koji opisuje pad slojevitosti u odnosu na smer kretanja
podzemnih voda (Kralik & Keimel, 2003)

Klase	Pad slojevitosti	Faktor korekcije
1	0-5°	1
2	5-45° suprotno od smeru kretanja podzemnih voda	0,5
3	5-45° ka smeru kretanja podzemnih voda	3
4	46-90°	4



Slika 7.8. Parametri koji utiču na vreme kretanja vode kroz nadizdansku zonu: a – debljina i koeficijent filtracije nadizdanske zone; b – prisustvo struktura (sredina); c – pad slojevitosti
(Kralik, 2001)

Sabiranjem vremena koja su potrebna da voda prođe kroz svaki pojedinačni sloj tla i stenske mase na putu do nivoa podzemnih voda dobija se parametar VREME. Međutim, na vreme putovanja vode kroz nadizdansku zonu nema uticaj samo karakter slojeva u nadizdanskoj zoni, već i količina vode koja se infiltrira sa površine. Pri malom prihranjivanju kretanje vode se usporava i suprotno, pri infiltraciji većih količina površinskih voda smanjuje se i vreme potrebno da ova voda dođe do izdanske zone. U zavisnosti od veličine prihranjivanja, određuje se faktor INPUT koje je sličan faktoru W u nemačkoj GLA metodi za ocenu ranjivosti podzemnih voda. Njegovo određivanje je bazirano na jednačini vodnog bilansa:

$$\text{Prihranjivanje (mm)} = \text{Padavine (mm)} - \text{Evapotranspiracija (mm)} - \text{Oticaj (mm)}$$

Proračun evapotranspiracije baziran je na nagibu i orijentaciji (inklinaciji) terena, kao i na tipu vegetacije. Prostornom analizom elevacionog modela terena izrađuje se oleata nagiba terena kao i oleata inklinacije. Spajanjem ove dve oleate računa se indeks radijacije α (tabela 7.5., slika 7.9. - levo) koji pokazuje uticaj reljefa terena na realnu evapotranspiraciju.

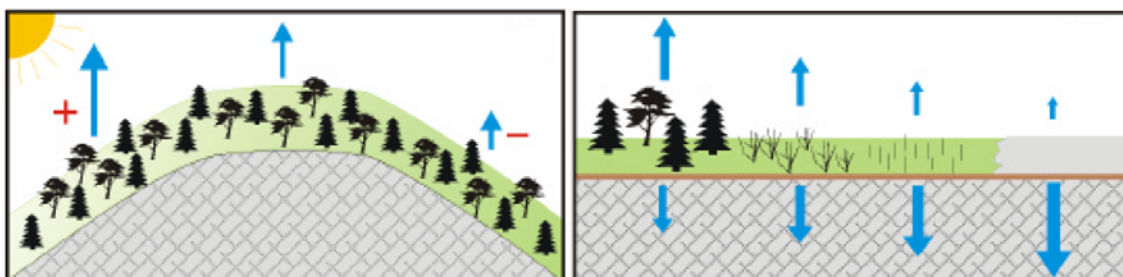
Tabela 7.5. Proračun indeksa radijacije α (Kralik & Keimel, 2003)

Nagib terena (°)	Orijentacija nagiba				
	N	NE & NW	E & W	SE & SW	S
0-5	0,97	0,98	1,00	1,01	1,02
6-10	0,92	0,94	1,01	1,04	1,08
11-20	0,85	0,89	1,03	1,12	1,19
21-30	0,77	0,83	1,08	1,25	1,35
31-45	0,70	0,80	1,17	1,43	1,58
>45	0,65	0,78	1,25	1,55	1,75

Drugi korak u određivanju evapotranspiracije je izrada karte vegetacije. Ona se može uraditi na osnovu analize satelitskih ili aero snimaka ili karte primene zemljišta (Corine Landcover, EEA 2007). U zavisnosti od postojanja i tipa vegetacije, vrši se procena udela evapotranspiracije u odnosu na ukupne padavine (tabela 7.6., slika 7.9. - desno). Nakon ovog proračuna vrši se korekcija dobijenih vrednosti sa indeksom radijacije α , pri čemu se dobija korigovana evapotranspiracija.

Tabela 7.6. Proračun indeksa evapotranspiracije ET (%) (Kralik & Keimel, 2003)

Broj	Tip vegetacije	ET (%)
1	Šumovite površine	35
2	Travnate površine i površine sa niskom vegetacijom	23
3	Ogoljene stene	7



Slika 7.9. Značaj nagiba i orijentacije nagiba terena (levo) i tipa vegetacije (desno) na veličinu evapotranspiracije (Kralik, 2001)

Nakon proračuna korigovane evapotranspiracije sledeći korak je određivanje faktora oticaja. Autori TIME-INPUT metode su za ovaj proračun primenili metodologiju koja je implementirana u PI metodi za ocenu ranjivosti karstnih podzemnih voda (Goldscheider, 2002). Suština metodologije ogleda se u tome da se prvo odredi karakter površinskog i pripovršinskog toka vode koji se formira nakon padavina. Za određivanje dominantnog toka kretanja vode analizira se karakter tla (dubina do slabopropusnog sloja u tlu ili ispod tla i koeficijent filtracije gornjeg dela tla⁷). U zavisnost od ovih parametara vrši se procena da li će na određenom području posle kiše dominirati površinski tokovi, ili će se najveći deo te vode infiltrirati (tabela 7.7).

Slika 7.7. Određivanje dominantnog toka kretanja vode kao funkcije koeficijenta filtracije tla i dubine do slabije vodopropusnog sloja (Goldscheider 2002)

		Dubina do slabopropusnog sloja u tlu ili ispod tla		
		<30 cm	30-100 cm	>100 cm
Koeficijent filtracije gornjeg dela tla (m/s)	>10 ⁻⁴	Tip D (zasićen površinski tok)	Tip C (veoma brz pripovršinski tok)	Tip A (infiltracija i kasnije proceđivanje)
	10 ⁻⁴ – 10 ⁻⁵		Tip B (brz pripovršinski tok)	
	10 ⁻⁵ – 10 ⁻⁶	Tip E (brz površinski Hortonov tok koji se dešava retko, samo za vreme olujnih padavina)		
	<10 ⁻⁶	Tip F (brz površinski Hortonov tok koji se dešava često, i pri padavinama manjeg intenziteta)		

Drugi korak u proceni koeficijenta oticaja jeste uključivanje reljefa i vegetacije u celokupan proračun. Kombinacijom tipa dominantnog toka kretanja voda, veličine nagiba terena i postojanja šuma, vrši se proračun faktora oticaja (tabela 7.8).

Slika 7.8. Određivanje faktora oticaja (Goldscheider 2002)

Dominantni tok	Nagib terena <5°		Nagib terena 5-30°		Nagib terena >30°	
	Šuma	Ostala vegetacija	Šuma	Ostala vegetacija	Šuma	Ostala vegetacija
Tip A	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8
Tip B	1,0	1,0	0,8	0,6	0,6	0,4
Tip C	1,0	1,0	0,6	0,4	0,4	0,2
Tip D	0,8	0,6	0,6	0,4	0,4	0,2
Tip E	1,0	0,8	0,6	0,4	0,4	0,2
Tip F	0,8	0,6	0,4	0,2	0,2	0

⁷ topsoil – najviši deo tla debljine 5 – 20 cm koji odgovara horizontu A

Veličina prihranjivanja podzemnih voda dobija se tako što se u svakoj tački analiziranog područja od količine padavina oduzme količina vode koja ispari i nakon toga se dobijena vrednost pomnoži sa faktorom oticaja (tabela 7.8.). U zavisnosti od dobijene vrednosti za prihranjivanje određuje se vrednost faktora VREME (tabela 7.9.).

Slika 7.9. Određivanje faktora VREME na bazi veličine proračunate infiltracije

Prihranjivanje kao rezultat infiltracije padavina	Faktor VREME
0 – 200 mm	1,5
200 – 400 mm	1,25
400 – 600 mm	1,0
600 – 800 mm	0,75
800 – 1000 mm	0,25
>1000 mm	0,25

Množenjem vrednosti parametara VREME i parametara ULAZ dobija se ranjivost podzemnih voda izražena kao funkcija vremena kretanja podzemne vode sa površine terena do izdanske zone:

$$RANJIVOST(s) = Faktor\ VREME(s) * Faktor\ ULAZ$$

Iako prvenstveno namenjena za karstni tip izdani, ovako prikazana metodologija može se relativno lako primeniti za proračun vremena vertikalnog kretanja vode u nadizdanskoj zoni za sve tipove izdani. Kompleksnost proračuna zavisiće od karaktera nadizdanske zone, pre sve od tipa tla, kao i broja slojeva nekonsolidovanih i konsolidovanih stena koji grade zonu aeracije.

7.2.3. Proračun vremena horizontalnog kretanja vode u izdanskoj zoni

Vreme horizontalnog kretanja podzemne vode kroz izdansku zonu zavisi od više faktora od kojih su najbitniji struktura i veličina poroznosti, koeficijent filtracije i hidraulički gradijent. Kod izvorišta u intergranularnim sredinama dominira laminarno kretanje podzemne vode. Za geološke sredine u kojima su formirane pukotinske i karstne izdani najčešće se javlja dvojna poroznost. Kroz pore u matriksu, kao i kroz mrežu prslina i

pukotina male poroznosti dolazi do spore laminarne cirkulacije, dok kroz krupne karstne kanale i pukotine dolazi do brze cirkulacije sa turbulentnim režimom tečenja podzemne vode (Jemcov, 2008).

U zavisnosti od pomenutih parametara, zavisice i metodologija proračuna vremena horizontalnog kretanja vode.

Laminarno kretanje odvija se po linearnom zakonu Darsija⁸:

$$Q = K_f \frac{h}{L} F$$

gde je:

Q – filtracioni proticaj (m³/s),

K_f – koeficijent proporcionalnosti koji zavisi od fizičkih svojstava stene i filtrirajuće tečnosti, a koji se naziva koeficijent filtracije (m/dan, m/s, cm/s),

F – površina poprečnog preseka toka upravnog na smer kretanja podzemnih voda (m²) i

$\frac{h}{L} = I$ – razlika nivoa podzemnih voda na putu filtracije koji se naziva hidraulički gradijent (bezdimezionalna veličina).

Transformacijom prethodne jednačine dobija se njen sledeći oblik:

$$\frac{Q}{F} = K_f I$$

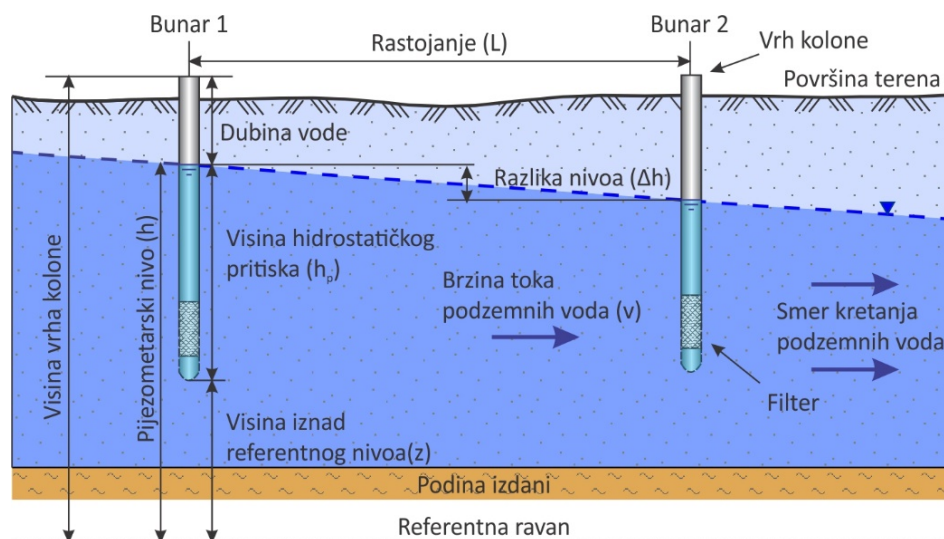
odnosno:

$$v = K_f I$$

Sa poznatim vrednostima koeficijenta filtracije i hidrauličkog gradijenta u svakoj tački sliva izvorišta, moguće je izračunati brzinu kretanja podzemne vode (slika 7.10). Samim

⁸ Darsijev zakon filtracije ili linearni zakon filtracije, poznat u stručnoj literaturi i kao Darsijeva jednačina, predstavlja empirijski zakon po kome je prosečan zapreminski proticaj kroz neku poroznu sredinu direktno proporcionalan hidrauličkom gradijentu, pod pretpostavkom da je tok podzemnih voda laminaran, i da se inercija može zanemariti (Dragišić, Živanović, 2015)

tim možemo izračunati i vreme koje je potrebno da čestica podzemne vode doputuje iz bilo kod dela zbijene izdani do vodozahvatnog objekta.



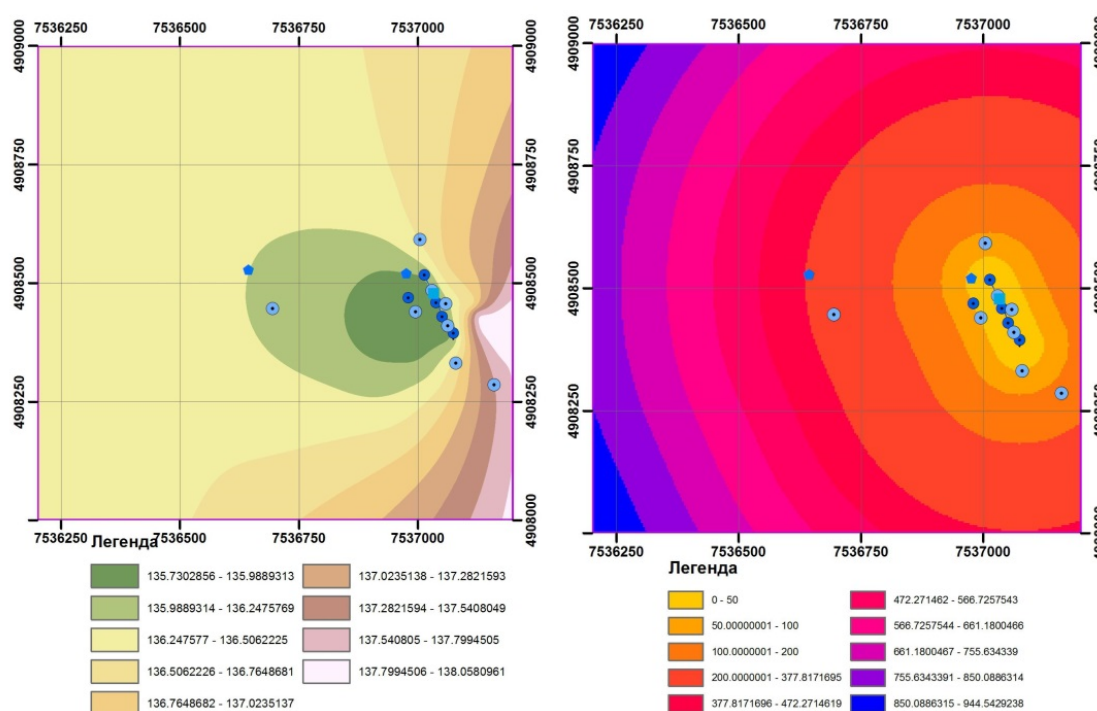
Slika 7.10. Šematski prikaz ključnih elemenata za određivanje pijezometriarskog nivoa i hidrauličkog gradijenta u izdani sa slobodnim nivoom (Krešić 2007)

Iako se za simulaciju strujanja podzemne vode kroz zonu zasićenja najviše primenjuju programi za hidrodinamičko modeliranje (Visual Modflow, Feflow, GMS i dr), kod jednostavnijih hidrogeoloških sistema moguće je uraditi proračun kretanja podzemne vode primenom ArcGis okruženja (Esri, 2014).

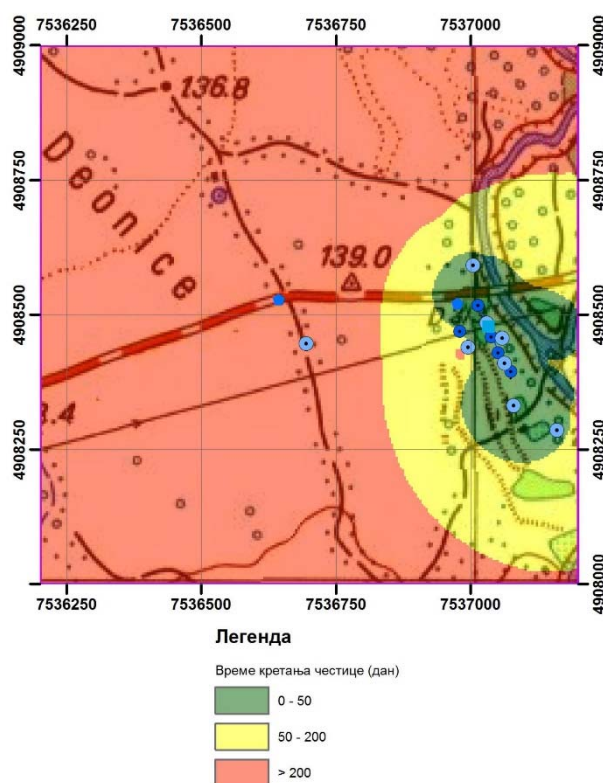
Koristeći dodatak za prostornu analizu podataka (*Spatial Analyst Tool*) i primenom alatki *Darcy Flow*, *Darcy Velocity* i *Particle Tracking*, moguće je odrediti brzine i pravce kretanja podzemnih voda kroz vodonosnu sredinu. Za proračun je potrebno definisati ulazne parametre: nivo podzemnih voda, efektivnu poroznost, debljinu zasićene zone i vrednost transmisivnosti T .

Jedan primer upotrebe ArcGis-a u određivanju horizontalne komponente vremena kretanja podzemne vode ka vodozahvatnim objektima jeste određivanja zona sanitarne zaštite izvorišta „Malo Laole“ za vodosnabdevanje Petrovca na Mlavi (Dragišić, Atanacković, 2015).

Za proračun brzine i pravca horizontalnog kretanja podzemne vode prvo je urađena oleata prostornog rasporeda nivoa podzemnih voda na bazi merenja u istražnim bušotinama i strukturno-pijezometarskim bušotinama, kao i merenja nivoa reke Mlave (slika 7.11). Nakon toga su urađene oleata efektivne poroznosti (na bazi rezultata granulometrijskih analiza uzoraka iz istražnih bušotina), oleata debljine izdanske zone i oleata transmisivnosti (na bazi rezultata probnog crpenja). Primenom *Darcy Flow* alatke prvo su dobijene oleate pravca i brzine kretanja podzemne vode kroz zonu zasićenja. Nakon definisanja brzine kretanja podzemnih voda, sračunato je vreme kretanja čestice u svakoj tački u odnosu na zadatu referentnu vrednost, koja je u ovom slučaju horizontalni dren. Deljenjem oleate rastojanja od vodozahvatnog objekta sa oleatom brzine kretanja dobijeno je vreme kretanja čestice ka vodozahvatnom objektu (slika 7.12).



Slika 7.11. Oleata nivoa podzemnih voda (a); Pravolinijsko rastojanje tačke na analiziranom području do drena (b)



Slika 7.12. Vreme kretanja čestice ka horizontalnoj galeriji (u danima)

U proračunu horizontalnog vremena kretanja podzemne vode ka pojedinačnom bunaru i određivanju zona sanitarne zaštite na bazi unapred definisanog vremena u praksi veliku primenu imaju analitičke metode. Tako se na primer, u Americi (USEPA, 1987) određivanje zona sanitarne zaštite vrši u skladu sa Programom za zaštitu prostora oko bunara (Wellhead Protection Areas – WHPA). Proračun veličine zone se vrši primenom Vislingovog analitičkog rešenja.

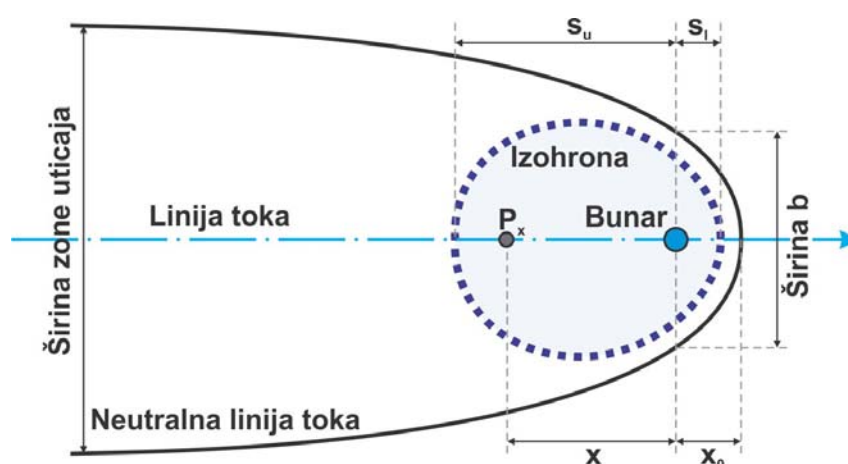
Vislingova metoda (Strobl & Robillard, 2005, Expósito et al., 2010) se koristi za direktan proračun vremena putovanja podzemne vode (vreme filtracije) od zadate tačke na osi tečenja do bunara na kojem se vrši crpenje. Pri primeni ove metode polazi se od pretpostavke da je izdan homogena i da je količina vode koja se crpi iz nje mala u odnosu na prirodni tok vode. Prilikom proračuna uzima se u obzir samo centralna osa toka.

Za proračun rastojanja s_u i s_l (rastojanja od vodozahvata do granice zone zaštite uzvodno i nizvodno podzemnom toku) i rastojanja b (širina zone u kojoj podzemne vode gravitiraju ka vodozahvatu za vreme putovanja T) potrebno je izračunati sledeće parametre podzemnog toka (slika 7.13):

$$B = \frac{Q}{hK_f i} = 2b \quad x_o = \frac{B}{2\pi} = \frac{Q}{2\pi h K_f i} \quad v_o = \frac{K_f i \cdot 86400}{n_o}$$

gde su:

- Q - izdašnost vodozahvata (m^3/s)
- h - debljina vodonosnog sloja (m)
- K_f - koeficijent filtracije vodonosnog sloja (m/s)
- n_o - poroznost vodonosnog sloja
- i - gradijent pada prirodnog podzemnog toka (za $Q = 0$)
- B - širina uzvodne zone koja gravitira ka bunaru pri određenom kapacitetu (m)
- x_o - nizvodno rastojanje od bunara do linije neutralnog toka koja ograničava oblast hranjenja vodozahvata (m)
- v_o - prividna brzina filtracije (m/s)



Slika 7.13. Grafički prikaz toka podzemne vode ka vodozahvatnom objektu (Wyssling, 1979 prema Strobl & Robillard, 2005)

Za proračun veličine II i III zone sanitarne zaštite potrebno je proračunati parametre s_u i s_l primenom sledećih jednačina (Expósito et al., 2010):

$$s_u = \frac{+d + \sqrt{d(d+8x_o)}}{2} \quad s_l = \frac{-d + \sqrt{d(d+8x_o)}}{2}$$

gde se parametar d računa preko prividne brzine filtracije i vremena koje je zahtevano ($d = v_o \cdot T$).

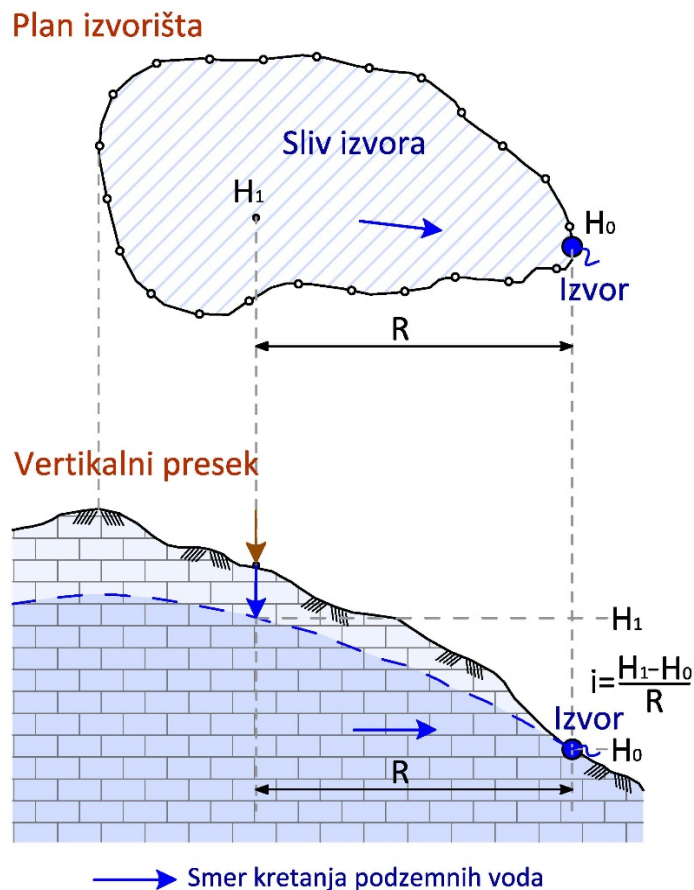
Kretanje podzemnih voda ka izvorima obično je dosta kompleksnije od bunara jer se izvori uglavnom javljaju u brdskim i planinskim terenima koji se karakterišu čestim promenama koeficijenta filtracije izdanske zone i nagiba slobodne vodene površine. Zato se u proračunu vremena horizontalnog kretanja podzemnih voda često koriste posredne metode. Manji izvori uglavnom dreniraju izdani u kojima preovladava laminarno kretanje podzemnih voda. U takvim slučajevima je moguć proračun primenom Darsijevog zakona filtracije (slika 7.14). I pored toga što je najčešća situacija da u zaleđu izvora ne postoji monitoring mreža na osnovu koje mogu da se izračunaju hidraulički gradijenti, nivo podzemnih voda u slivu izvora veoma česti prati nagib površine terena. Samim tim, hidraulički gradijent može da se proceni prostornom analizom digitalnog elevacionog modela terena.

Brzina kretanja podzemne vode ka izvoru može se izračunati primenom Darsijeve jednačine (Todd, 1980):

$$v = K_f I = K_f \frac{\Delta H}{R} = K_f \frac{H_1 - H_0}{R}$$

Uzimajući u obzir da brzina u ovom slučaju predstavlja vreme za koje podzemna voda doputuje iz bilo koje tačke sliva do izvora ($v = \frac{R}{t}$), u tom slučaju vreme putovanja podzemne vode može se izračunati (Todd, 1980):

$$t = \frac{R}{v} = \frac{R^2}{K_f(H_1 - H_0)}$$



Slika 7.14. Šematski prikaz određivanja brzine kretanja podzemne vode kroz izdansku zonu do izvora

Kod većih izvora kao što su to snažna karstna vrela, kretanje podzemne vode kroz izdansku zonu je često brzo i turbulentno, pa je Darsijev zakon u takvim slučajevima neprimenljiv. U takvim slučajevima, vreme horizontalnog kretanja podzemne vode kroz izdansku zonu može se proceniti direktnim i indirektnim metodama. Prirodni i veštački traseri imaju veliku primenu u određivanju veličine sliva izvora kao i u proceni vremena kretanja podzemne vode (Pronk et al., 2009, Worthington, 2007). U grupu prirodnih faktora spadaju temperatura vode, hemijski sastav vode, izotopski sastav i sl. (Goldscheider, 2010). Analiza ovih parametra, kao i njihova promena u toku vremena, može da nam ukažu na dubinu cirkulacije podzemne vode, karakter sredine kroz koju voda prolaziti, vreme zadržavanja vode u izdanskoj zoni i sl.

Veštački traseri imaju mnogo veću primenu u određivanju vremena putovanja podzemne vode kroz izdan. U nekim terenima kao što su karstni tereni, opiti trasiranja

predstavljaju nezaobilaznu komponentu u određivanja zona sanitarne zaštite. Trasiranjem natrijum fluoresceinom i drugim sličnim traserima može se odrediti brzina kretanja vode kroz karstne kanale, što znatno olakšava proces definisanja uslova zaštite izvora.

Posredno, brzina kretanja ka vodozahvatnom objektu, a samim tim i vreme koje voda provede na tom putu, može da se proceni na bazi analize hidrograma vrele. Na bazi analize isticanja više od 200 izvora u Italiji, Civita (2008) daje primer procene brzine kretanja podzemne vode kroz karstni akvifer na osnovu MDHT (*annual maximum discharge half-time*) veličine koja predstavlja vreme potrebno da se maksimalno zabeležena izdašnost izvora Q_{max} na početku perioda recesije smanji na $Q_{max}/2$.

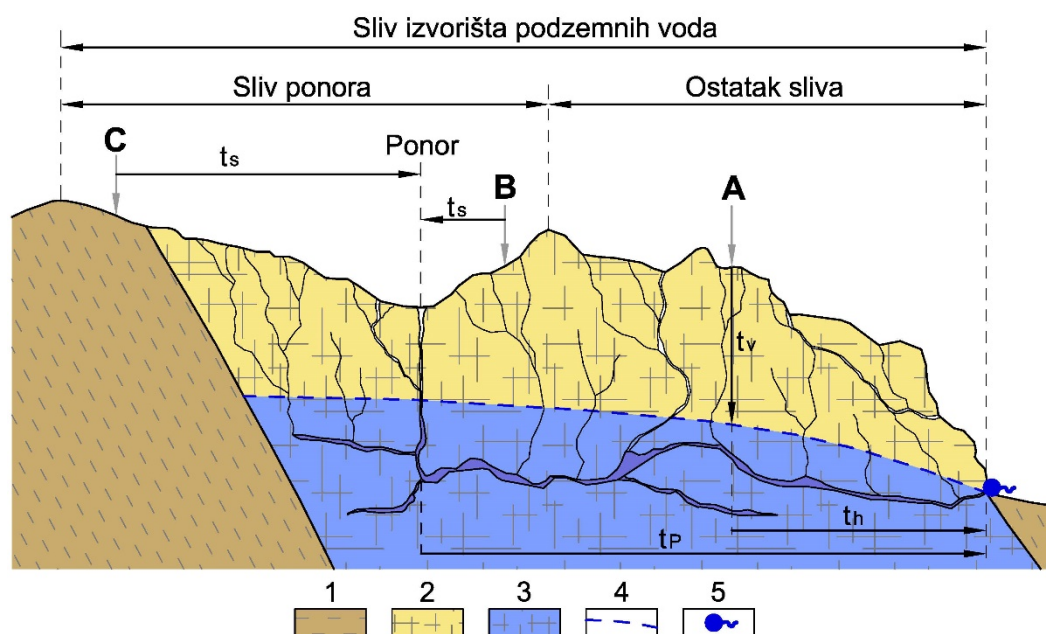
Tabela 7.10. Procena brzine kretanja podzemne vode u cilju delinacije zona sanitarne zaštite izvora na bazi analize hidrograma oticaja (Civita, 1995)

Scenario	MDHT (dan)	Brzina podzemnog toka	
		(m/s)	(m/dan)
A	MDHT < 5	$>10^{-2}$	>1000
B	$5 \leq \text{MDHT} \leq 50$	$10^{-2} - 10^{-3}$	≈ 100
C	$20 \leq \text{MDHT} \leq 50$	$10^{-3} - 10^{-4}$	≈ 10
D	MDHT > 50	$10^{-4} - 10^{-5}$	≈ 1

Primena ovakve metodologije za procenu brzine i vremena kretanja podzemnih voda kroz izdansku zonu nosi u sebi veliku nepreciznost i zbog toga se ova metoda može koristiti za dobijanje orijentacionih vrednosti za brzinu kretanja podzemne vode. Treba naglasiti da se podaci za brzine iz tabele 7.10. odnose na kretanje vode kroz glavne kanale, stoga za kretanje kroz kanale nižeg reda i kroz samu stenu treba uzeti redukovane vrednosti brzine.

7.2.4. Proračun ukupnog vremena kretanja vode do vodozahvatnog objekta

U prethodnim poglavljima prikazane su različite metodologije za procenu vremena kretanja vode po površini, kroz nadizdansku zonu i kroz izdansku zonu. Za svaku od pomenutih komponenti vremena kretanja površinske ili podzemne vode neophodno je pripremiti prostorne karte, tj. oleate u kojima će za svaku tačku biti izvršen proračun ovih vrednosti. Poslednji korak u određivanju ukupnog vremena kretanja vode ka vodozahvatnom objektu jeste preklapanje ovih oleata i sumiranje ovih vremena prema jednačinama koje su u funkciji položaja tačke u području istraživanja (slika 7.15).



Slika 7.15. Konceptualni model određivanja vremena putovanja kontaminanta sa površine terena do vodozahvatnog objekta, kao baza za delineaciju zona sanitarne zaštite (Živanović, 2015)

1. slabije vodopropusne stene; 2. karstifikovani krečnjak u nadizdanskoj zoni; 3. karstifikovani krečnjak u izdanskoj zoni; 4. nivo podzemnih voda; 5. izvor; t_s – vreme putovanja vode po površini terena do ponora; t_p – vreme putovanja vode od ponora do vodozahvatnog objekta; t_v i t_h – vertikalno i horizontalno vreme putovanja vode od tačke C do vodozahvatnog objekta

Ukupno vreme putovanja vode (t_{tot}), a samim tim i kontaminanta sa površine terena do vodozahvatnog objekta se može izračunati:

$$t_{tot}=t_v + t_h$$

(za delove terena van sliva zona sa koncentrisanom infiltracijom, primer tačka A)

$$t_{tot}=t_s + t_P$$

(za delove terena u slivu zona sa koncentrisanom infiltracijom, primer tačke B i C)

gde su:

- t_{tot} – ukupno vreme putovanja vode
- t_v – vertikalno vreme putovanja vode od površine terena do nivoa podzemne vode
- t_h – horizontalno vreme putovanja podzemne vode ka vodozahvatnom objektu
- t_s – vreme putovanja površinske vode u slivu zone sa koncentrisanom infiltracijom
- t_P – vreme putovanja vode od zone sa koncentrisanom infiltracijom do vodozahvatnog objekta

Sumiranjem vremena putovanja iz svake tačke u slivu izvorišta podzemnih voda do vodozahvatnog objekta dobija se karta ranjivosti izvorišta podzemnih voda. S obzirom na to da je ranjivost izražena kroz vreme, zone sanitarne zaštite se mogu lako odrediti u zavisnosti od lokalne zakonske regulative.

8. IZBOR REPREZENTATIVNIH IZVORIŠTA ZA PRIMENU NOVOG MODELA ZA ODREĐIVANJE ZONA SANITARNE ZAŠTITE

Određivanje zona sanitarne zaštite izvorišta podzemnih voda predstavlja kompleksan zadatak koji zahteva analizu brojnih parametara od kojih zavisi veličina uspostavljenih zona. Metodologija za delineaciju zona zaštite treba da bude takva da se može primeniti u različitim hidrogeološkim uslovima.

Na primeru tri različita tipa izvorišta podzemnih voda u eksploataciji prikazana je primena razvijene metodologije za određivanje zona sanitarne zaštite. Njihov izbor izvršen je na osnovu sledećih kriterijuma:

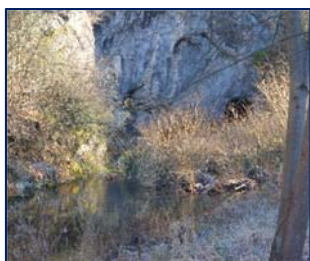
- struktura poroznosti vodonosne sredine (tipovi izdani),
- hidrodinamičke karakteristike nivoa izdani,
- uslovi hranjenja i dreniranja podzemnih voda,
- uslovi zaštite izvorišta,
- raspoloživi fond podataka rezultata istraživanja u području izvorišta i dr.

Predloženi koncept određivanja zona sanitarne zaštite baziran na vremenu kretanja površinske i podzemne vode primenjen je na tri lokacije tj. izvorišta podzemnih voda: izvorište „Beli Timok“ koje kaptira plitku aluvijalnu, vrelo Crnice karstno-pukotinsku i „Fišerov Salaš“ neogenu izdan pod pritiskom u peskovitim sedimentima.



Izvorište „Beli Timok“ nalazi se kod Zaječara gde kaptira aluvijalne sedimente na levoj obali Belog Timoka. Kaptirana aluvijalna izdan je sa slobodnim nivoom i u direktnoj hidrauličkoj vezi sa rekom, tako da se prihranjivanje najvećim delom odvija na račun infiltracije rečnih voda. Pored toga, izvorište se manjim delom prihranjuje na račun infiltracije padavina, kao i na račun slivanja voda sa okolnih padina. Izvorište je sa prosečnim kapacitetom od 30 l/s uključeno u sistem vodosnabdevanja Zaječara. Razlog zašto

je ovo izvorište izabrano za primenu novog modela za određivanje zona sanitarne zaštite, jesu složeni uslovi prihranjivanja, relativno veliki fond podataka ranijih istraživanja, intenzivna urbanizacija u neposrednoj blizini izvorišta itd.



Izvorište „Vrelo Crnice“ kaptira karstifikovane jurske i kredne krečnjake na zapadnim padinama Kučaja. Izvorište se sastoji od nekoliko izvora ukupne izdašnosti 280-1300 l/s. Deo izvorišta je kaptiran za vodosnabdevanje Sisevca, Ravne reke, Senjskog rudnika i Resavice. Izvorište kaptira karstno-pukotinsku izdan sa složenim uslovima prihranjivanja. Deo izdani se prihranjuje difuzno infiltracijom padavina, a deo koncentrisano poniranjem površinskih voda u ponor Nekudovske reke.



Izvorište „Fišerov Salaš“ formirano je za potrebe vodosnabdevanja Rume. Kaptira duboke neogene vodonosne horizonte pod pritiskom. Kaptirani slojevi peska su na dubini od 110-150 m, što povoljno utiče na stepen zaštite ove izdani. Usled dugotrajne eksploatacije došlo je do opadanja pijezometarskog nivoa za gotovo 30 m, čime su delimično izmenjeni hidrodinamički uslovi. O rezultatima hidrogeoloških i hidrodinamičkih istraživanja izvorišta tokom nekoliko decenija postoji značajan fond podataka.

9. ZAŠTITA PODZEMNIH VODA IZVORIŠTA „BELI TIMOK“

9.1. Geografski položaj izvorišta „Beli Timok“

Izvorište „Beli Timok“ nalazi se u istočnoj Srbiji u aluvijalnoj ravni na levoj obali Belog Timoka, oko 3 km jugoistočno od centra Zaječara (slika 9.1). To je jedno od dva izvorišta podzemnih voda iz kojih se grad Zaječar snabdeva pijaćom vodom⁹.

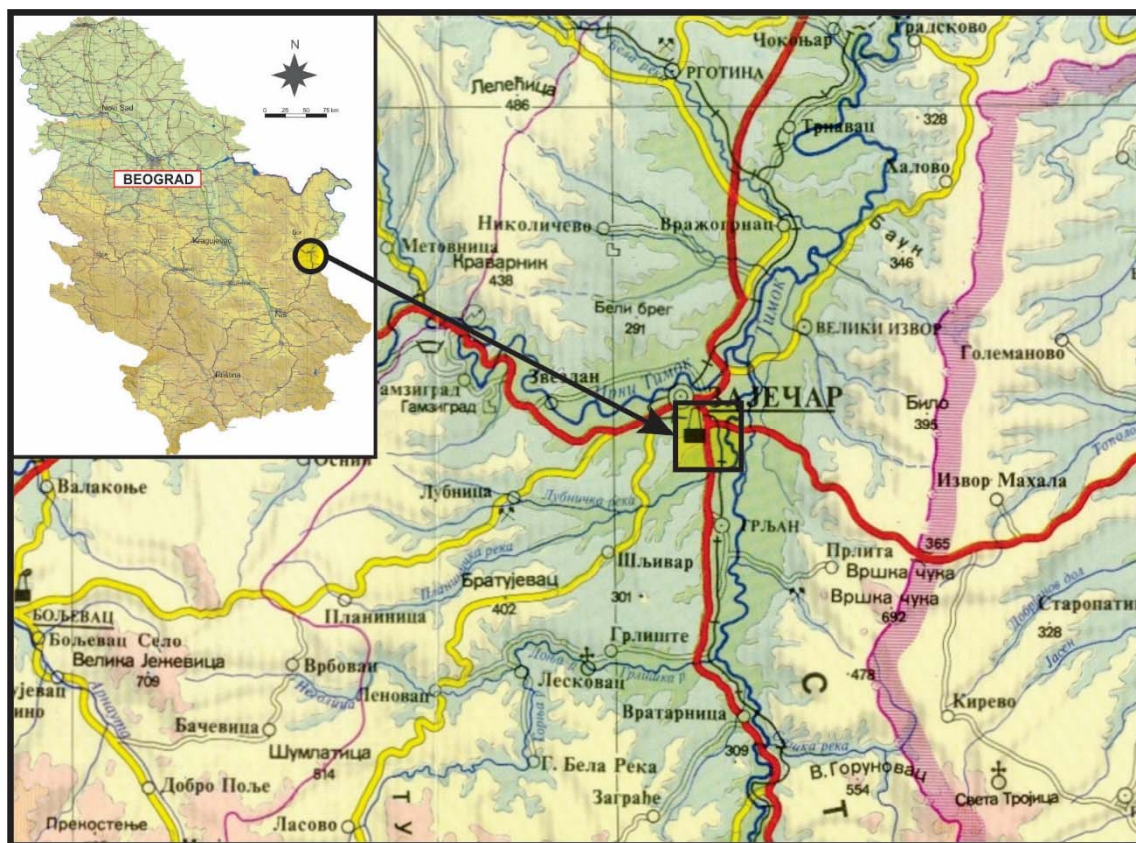
Najveće naseljeno mesto u blizini izvorišta je grad Zaječar koji predstavlja regionalni centar zaječarskog okruga. Oko 2 km severoistočno od centra Zaječara, Beli Timok se spaja sa Crnim, formirajući Veliki Timok.

Magistralnim asfaltnim saobraćajnicama Zaječar je povezan sa ostalim većim naseljenim mestima u Timočkoj krajini i istočnoj Srbiji, ali i sa susednim državama (Bugarska i Rumunija). Kroz Zaječar prolazi i železnička pruga Prahovo (Negotin)-Niš.

9.2. Klimatske karakteristike

Na širem području izvorišta „Beli Timok“ zastupljena je kontinentalna klima sa specifičnim karakteristikama uzrokovanim postojanjem planinskih masiva Karpata na severu i Homoljskih planina na zapadu. Na klimu područja utiče i njegova otvorenost prema Vlaškoj niziji, preko koje se u hladnoj polovini godine vrše prodori hladnih i suvih kontinentalnih vazdušnih masa iz jugoistočne Evrope. Njene glavne odlike su topla leta i hladne zime sa jasno izraženim prelaznim godišnjim dobima.

⁹ Drugo izvorište podzemnih voda je Tupižničko vrelo koje drenira karstnu izdan Tupižnice

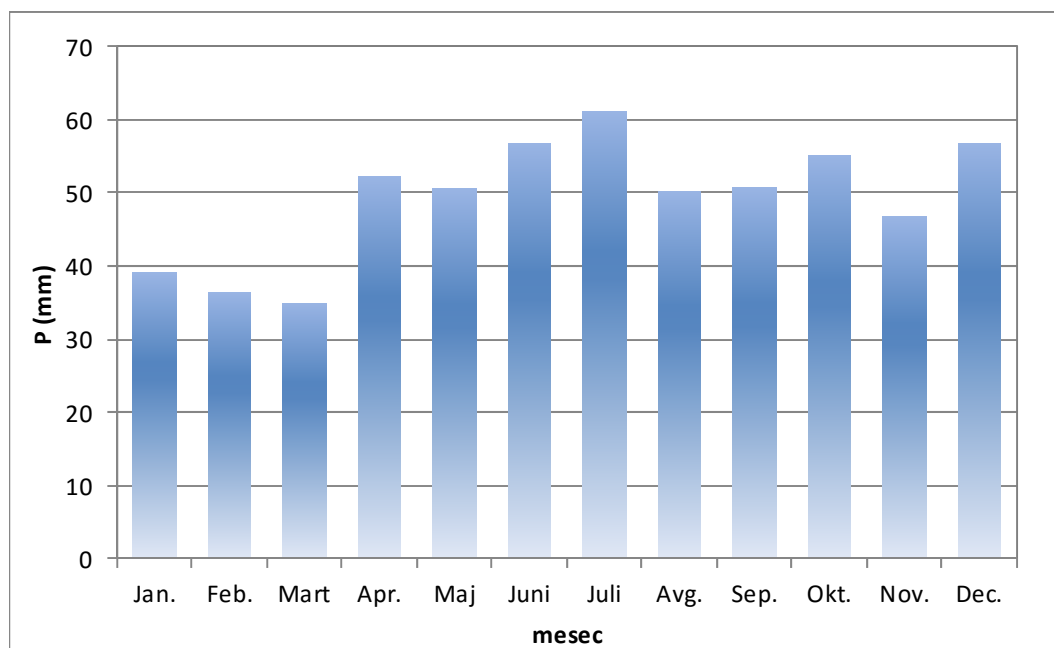


Slika 9.1. Geografski položaj izvorišta „Beli Timok“

Padavine. Pri analizi pluviometrijskog režima i njegovog uticaja na režim podzemnih i površinskih voda u području izvorišta korišćeni su podaci Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije za period od 1991–2010. za meteorološku stanicu Zaječar. Na osnovu podataka o srednje mesečnim i godišnjim količinama padavina, može se konstatovati da raspodela preko godine pokazuje modifikovani kontinentalni režim kod koga su maksimalne srednje mesečne količine padavina u junu i novembru, a najsušniji meseci su januar i avgust (slika 9.2).

Tabela 9.1. Prosečne mesečne sume padavina u mm za meteorološku stanicu Zaječar u periodu 1991-2010. godina (RHMZ Srbije)

GOD.	Jan.	Feb.	Mart	Apr.	Maj	Jun	Juli	Avg.	Sep.	Okt.	Nov.	Dec.	SUM.
P_{sr}	39.1	36.3	35.0	52.1	50.4	56.8	61.3	50.2	50.8	55.0	46.8	56.7	590.5
P_{min}	7.5	1.9	7.5	15.4	17.6	13.0	9.7	1.3	2.3	6.8	9.4	11.9	302.9
P_{max}	90.6	108.0	64.3	92.7	94.5	97.2	117.3	169.3	107.1	149.0	106.3	123.1	806.4



Slika 9.2. Histogram srednjih mesečnih suma padavina za m.s. "Zaječar" za period 1991-2010. (po podacima RHMZ-a)

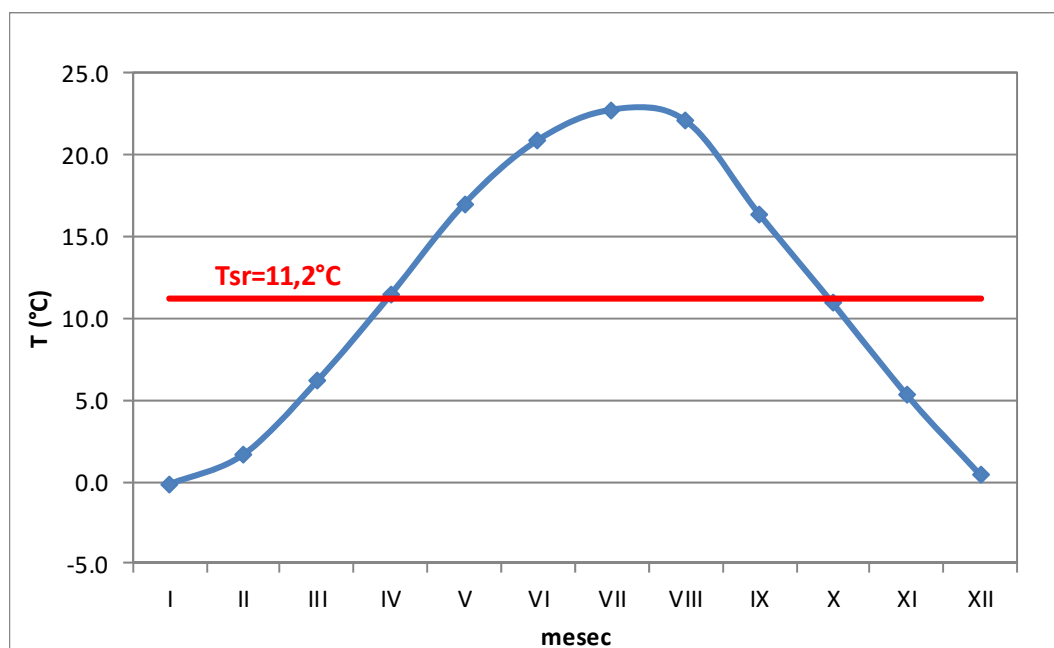
Maksimalna mesečna količina padavina u analiziranom periodu iznosila je 169,3 mm (maj 1980.), dok su minimalne mesečne padavine zabeležene u avgustu 2003. (1,3 mm). Srednja godišnja vrednost padavina za stanicu Zaječar iznosi 590,5 mm, pri čemu godišnje sume padavina variraju od 303 mm do 806,4 mm (tabela 9.1)

Temperatura vazduha. Za definisanje temperaturnog režima u istražnom području korišćeni su podaci merenja temperature vazduha na klimatološkoj stanici Zaječar (365 mm) za period od 1991-2010. godine (tabela 9.2).

Srednja godišnja temperatura vazduha za osmatrani period iznosi 11,2 °C (slika 9.3), a kreće se u granicama 10,0 °C (1991.) do 12,3 °C (2000.). Najniža srednja mesečna temperatura vazduha je zabeležena u januaru 2006. godine i ona iznosi -2,9 °C, a najviša u avgustu 1992. godine sa 24,8 °C.

Tabela 9.2. Prosečne mesečne temperature vazduha (°C) za meteorološku stanicu Zaječar u periodu 1991-2010. (RHMZ Srbije)

GOD.	Jan.	Feb.	Mart	Apr.	Maj	Juni	Juli	Avg.	Sep.	Okt.	Nov.	Dec.	SUM.
Tsr	-0.2	1.7	6.1	11.4	17.0	20.9	22.7	22.1	16.3	10.9	5.3	0.4	11.2
Tmin	-2.9	-3.3	0.5	7.4	13.8	18.7	21.5	19.6	13.8	8.2	-0.5	-3.5	10.0
Tmax	6.0	6.2	9.4	14.8	18.9	22.6	24.7	24.8	20.7	12.7	9.7	3.0	12.3



Slika 9.3. Dijagram srednjemesečnih temperatura vazduha (°C) za meteorološku stanicu "Zaječar" za period 1991-2010.

9.3. Hidrografske i hidrološke karakteristike

U širem smislu, istražno područje u hidrografskom pogledu generalno pripada slivu Dunava, odnosno crnomorskom slivu. U užem smislu, ovo područje pripada slivu Belog Timoka.

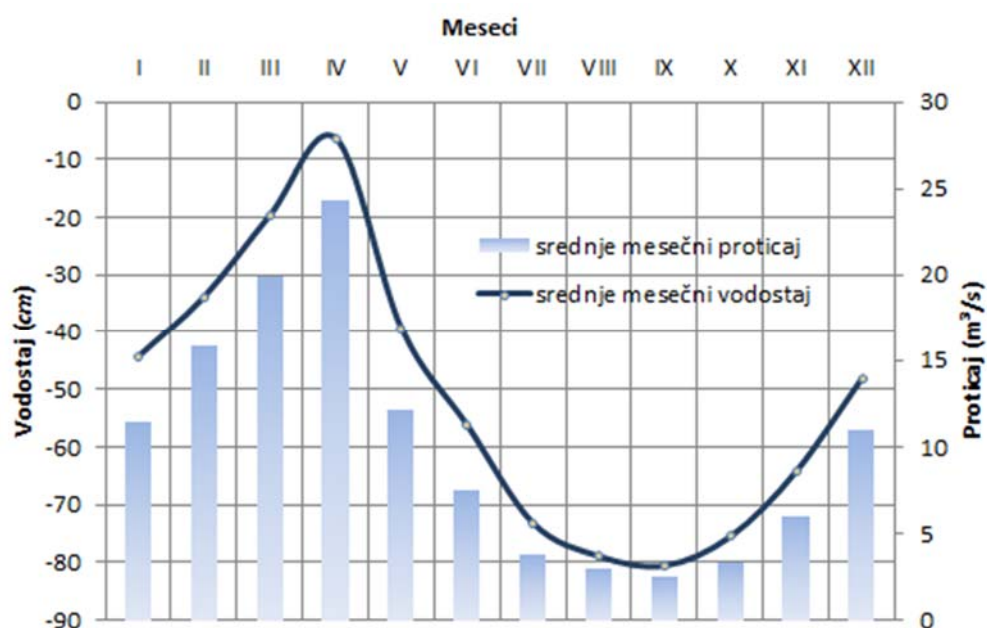
Beli Timok je najveći rečni tok na ovom području. Njegov sliv leži između Tresibabe na jugu, Stare Planine na istoku, Zaječarskog basena na severu i Tupižnice na zapadu. Protiče kroz zaječarsko-knjaževačku kotlinu a njegove dve najveće pritoke su Trgoviški i Svrliški Timok. Sliv Belog Timoka zauzima površinu od oko 2200 km², dok je njegova dužina oko 92 km. Šire područje istraživanja se karakteriše dendritičnim tipom rečne mreže (Dukić, 1973).

Prema podacima merenja na vodomernoj stanici u Zaječaru (kota „0“ 124,41 m) za period od 1991. do 2010. godine, prema podacima RHMZ-a, srednji mesečni proticaji Belog Timoka kretali su se u granicama od 0,86 m³/s do 72,6 m³/s, dok su se vodostaji kretali u intervalu -97 do 84 cm (tabela 9.3 i slika 9.4).

Tabela 9.3. Srednjemesečni vodostaji Belog Timoka (u cm) za period 1991 – 2010. godine na vodomernoj stanici Zaječar (po podacima RHMZ-a)

GOD.	Jan.	Feb.	Mart	Apr.	Maj	Jun	Jul	Avg.	Sep.	Okt.	Nov.	Dec.	Hsr
Hmin	-82	-82	-69	-68	-65	-75	-96	-97	-93	-91	-87	-84	-76
Hmax	20	74	83	84	17	-25	-37	-53	-62	-58	-21	2	-6
Hsr	-44	-34	-20	-6	-39	-56	-73	-79	-81	-76	-64	-48	-52

Minimalne vrednosti srednjegodišnjih proticaja i vodostaja zabeležene su 1993. godine, dok su maksimalne vrednosti za razmatrani period izmerene 2010. godine.

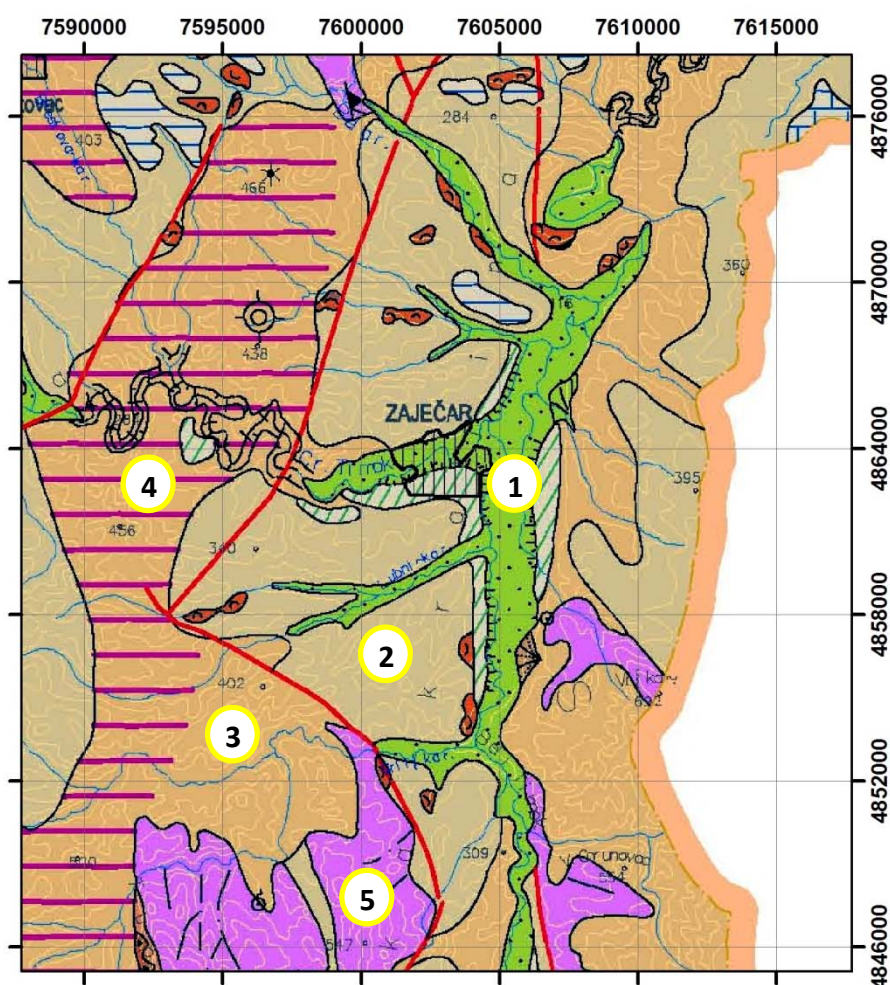


Slika 9.4. Dijagram srednjemesečnih vrednosti proticaja Belog Timoka za period 1991 – 2010. godine, na vodomernoj stanici Zaječar

9.4. Geomorfološke karakteristike

Šire područje izvorišta „Beli Timok“ u morfološkom pogledu čini tzv. Zaječarska kotlina koja je blago nagnuta prema severoistoku. Nadmorske visine terena kreću se od 234 m u južnom, do 466 m u krajnjem severoistočnom delu istražnog područja.

Neposredno u području izvorišta „Beli Timok“ kote terena kreću se oko 130 m. Zapadno i istočno od aluvijalne ravni, teren se blago uzdiže do visine od oko 230 m.



Slika 9.5. Geomorfološka karta šire okoline Zaječara (prema Geomorfološkoj karti Srbije 1:500 000) 1 – aluvijum i rečne terase; 2 – područje umerenog spiranja i jaružanja; 3 – područje intenzivnog spiranja i jaružanja; 4 – reljef tercijarnog vulkanizma; 5 – područje razvijenog kraškog procesa

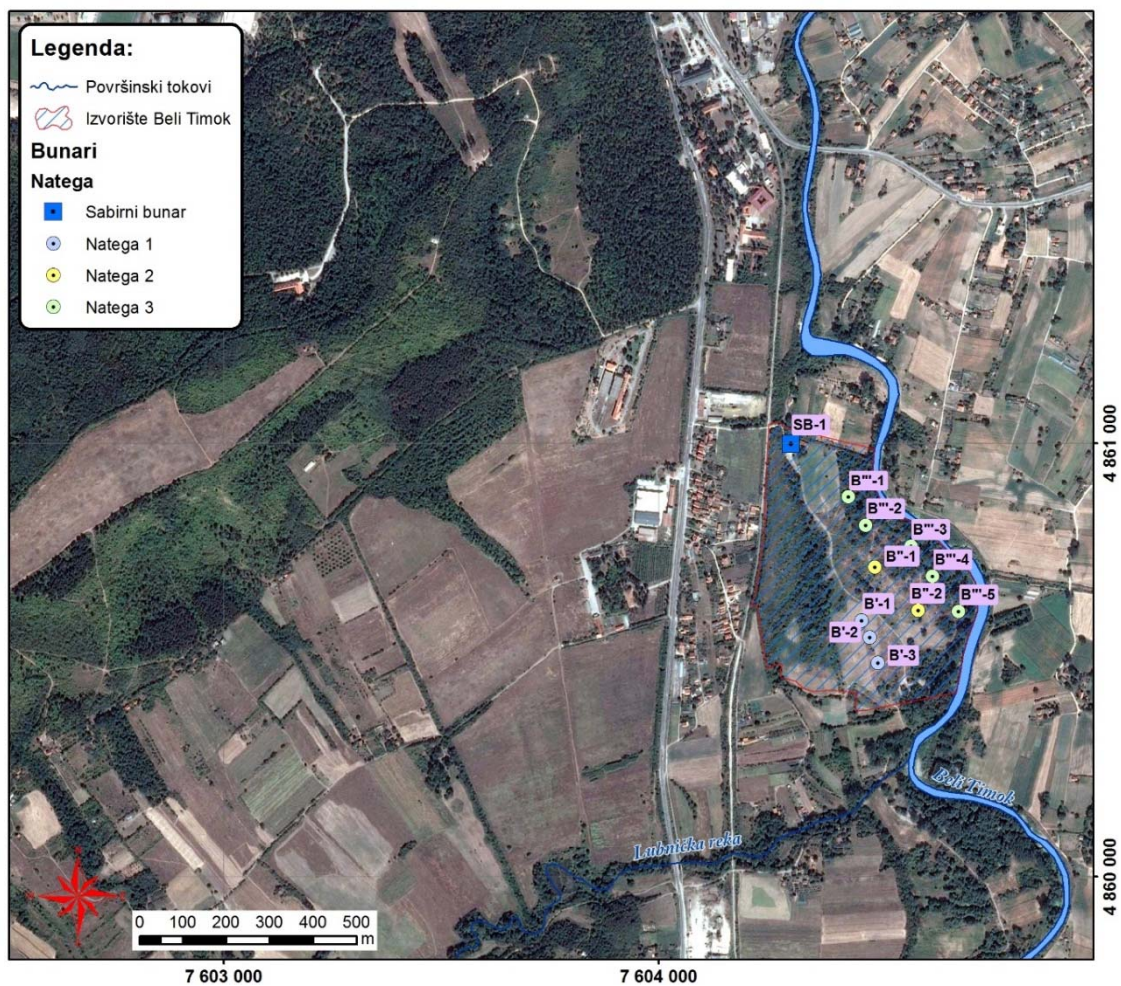
U geomorfološkom pogledu, u širem području izvorišta mogu se izdvojiti tri geomorfološke celine: miocenske tvorevine, rečne terase i aluvijalne ravni Lubničke reke i Belog Timoka. Prema morfogenezi, u neposrednom području izvorišta preovlađuju egzogeni oblici reljefa, pre svega predstavljeni produktima fluvijalnog procesa u vidu aluvijalnih ravni i rečnih terasa (slika 9.5).

Na području rasprostranjenja neogenih naslaga, najizraženiji su deluvijalno-proluvijalni procesi sa intenzivnim spiranjem i jaružanjem (slika 9.5). Zapadno od grada Zaječara zastupljeni su oblici reljefa na podlozi od vulkanogenih stena.

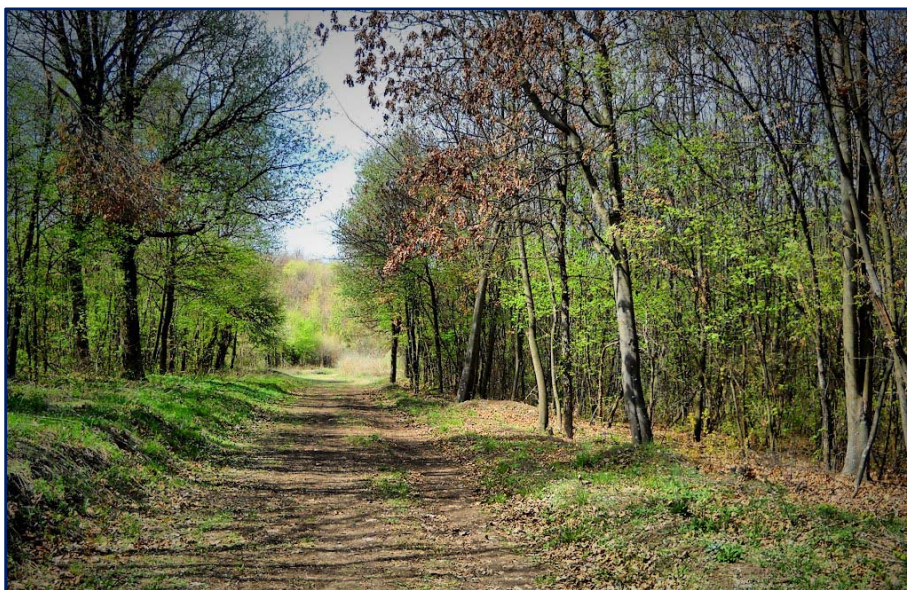
9.5. Vegetacioni pokrivač

Najveći deo istražnog područja karakteriše se poljoprivrednim zemljištem (slika 9.6), pa je samim tim i vegetacija uslovljena godišnjim dobima kao i kulturama koje se uzgajaju. U neposrednom području izvorišta nema poljoprivredne proizvodnje, a zemljište je pokriveno niskom vegetacijom, dok je u neposrednom pojasu pored Belog Timoka zastupljena višegodišnja vegetacija najčešće predstavljena vrbom i topolom.

Jedino se severozapadni deo istražnog područja (park šuma „Kraljevica“) karakteriše prisustvom guste šume koja se sastoji od velikog broja raznovrsnog, pretežno četinarskog drveća (slika 9.7).



Slika 9.6. Satelitski snimak šireg područja izvorišta „Beli Timok“ (Google Maps, 2015)



Slika 9.7. Park šuma „Kraljevica“

9.6. Pedološke karakteristike tla

Pri analizi pedološkog sastava šireg područja istraživanja korišćeni su podaci sa Osnovne pedološke karte u razmeri 1:50000 (list Zaječar 2). Za sve izdvojene tipove zemljišta prikazane su osnovne karakteristike na bazi rezultata istraživanja koje daju Antić i dr. (1987).

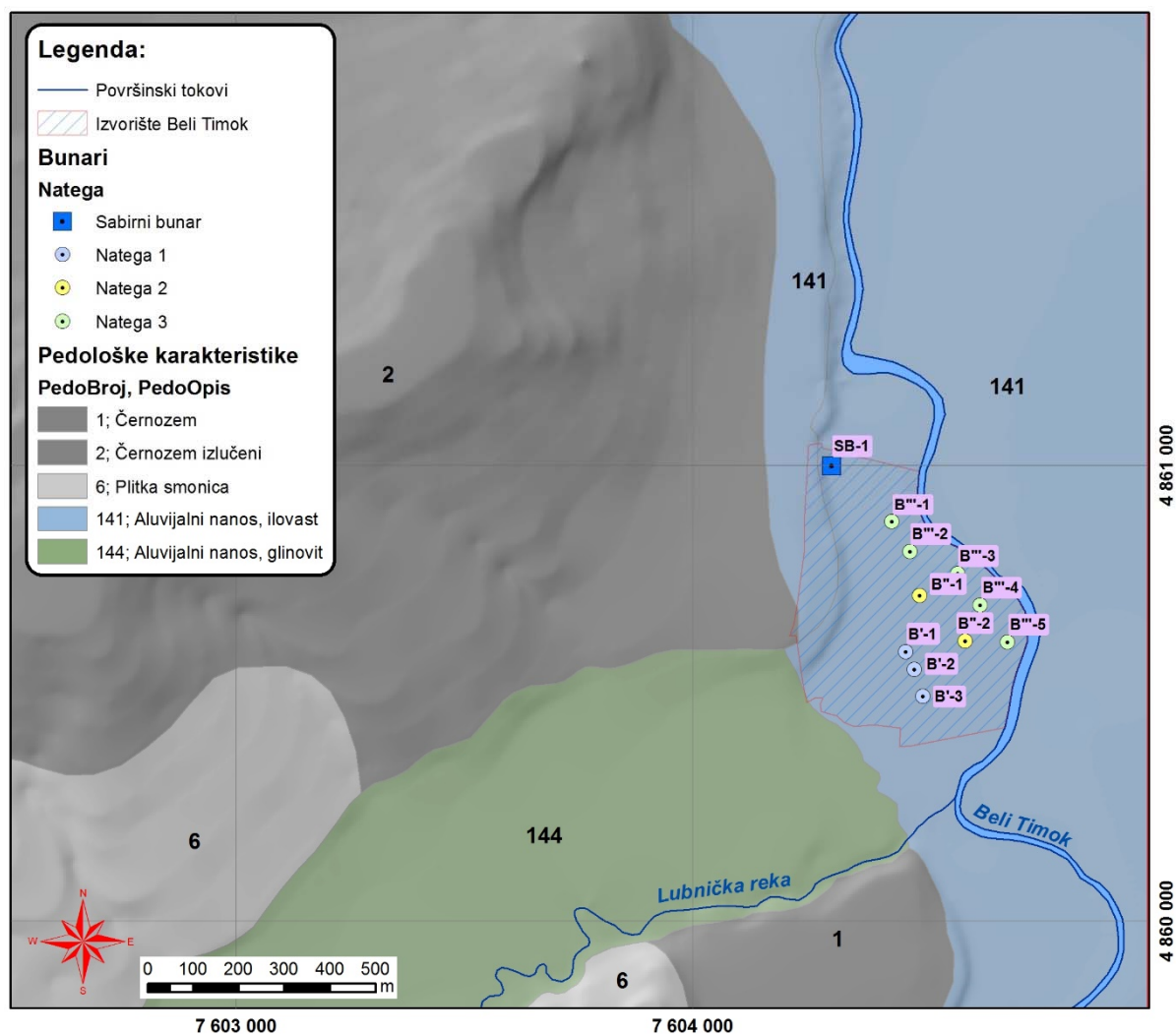
Promene u pedološkom sastavu rezultat su promene u geološkim karakteristikama podloge tj. matične stene pa su samim tim izdvojeni sledeći tipovi zemljišta (slika 9.8):

- černoziem;
- černoziem izlučeni;
- plitka smonica;
- aluvijalni nanos ilovast;
- aluvijalni nanos glinovit.

Generalno, sva zastupljena zemljišta na istražnom području moguće je svrstati u tri grupe.

Prvu grupu zemljišta čine aluvijalni nanosi reka. Imaju rasprostranjenje duž tokova Belog Timoka i Lubničke reke. Pod stalnim su uticajem površinskih poplavnih voda koje sa sobom nose materijal koji se permanentno istaložava. Debljina aluvijalnog zemljišta je oko 1 m. Karakteristično je prisustvo više horizonata pri čemu je najviši, pretežno peskoviti A horizont, debljine 10-20 cm ispod kojeg se nalazi C horizont sa povećanim sadržajem glinovite komponente.

Drugu grupu čine černoziem koji predstavljaju produkte raspadanja stepske vegetacije. Njihova debljina varira u širokim granicama, ali najčešće između 50 i 80 cm. Sve horizonte karakteriše visoki sadržaj peskovite komponente (oko 50 %) i mali sadržaj glinovite komponente (do 20%), usled čega imaju povoljna filtraciona svojstva. Varijetet černoziema je izlučeni (degradirani) černoziem koji se karakteriše povećanim sadržajem gline+praha koji dostiže i do 60 % (Antić i dr., 1987).



*Slika 9.8. Pedološka karta šireg područja izvorišta „Beli Timok“
(po autorima osnovne pedološke karte 1:50 000, list Zaječar 2)*

Trećoj grupi zemljišta pripadaju smonice koje pripadaju grupi crnica (vertisoli). Karakteriše ih moćan humusno-akumulativni sloj (60-120 cm) crne boje. Pripadaju zemljištima najtežeg mehaničkog sastava. Sadržaj glinovite+prašinate frakcije se kreće između 70 i 80 %, usled čega se karakterišu veoma malom filtracionom sposobnošću.

9.7. Geološka građa terena

Najstarije otkrivene stene u širem istražnom području su neogene, a najmlađe tvorevine kvartarne starosti (slika 9.9).

Neogen (Ng)

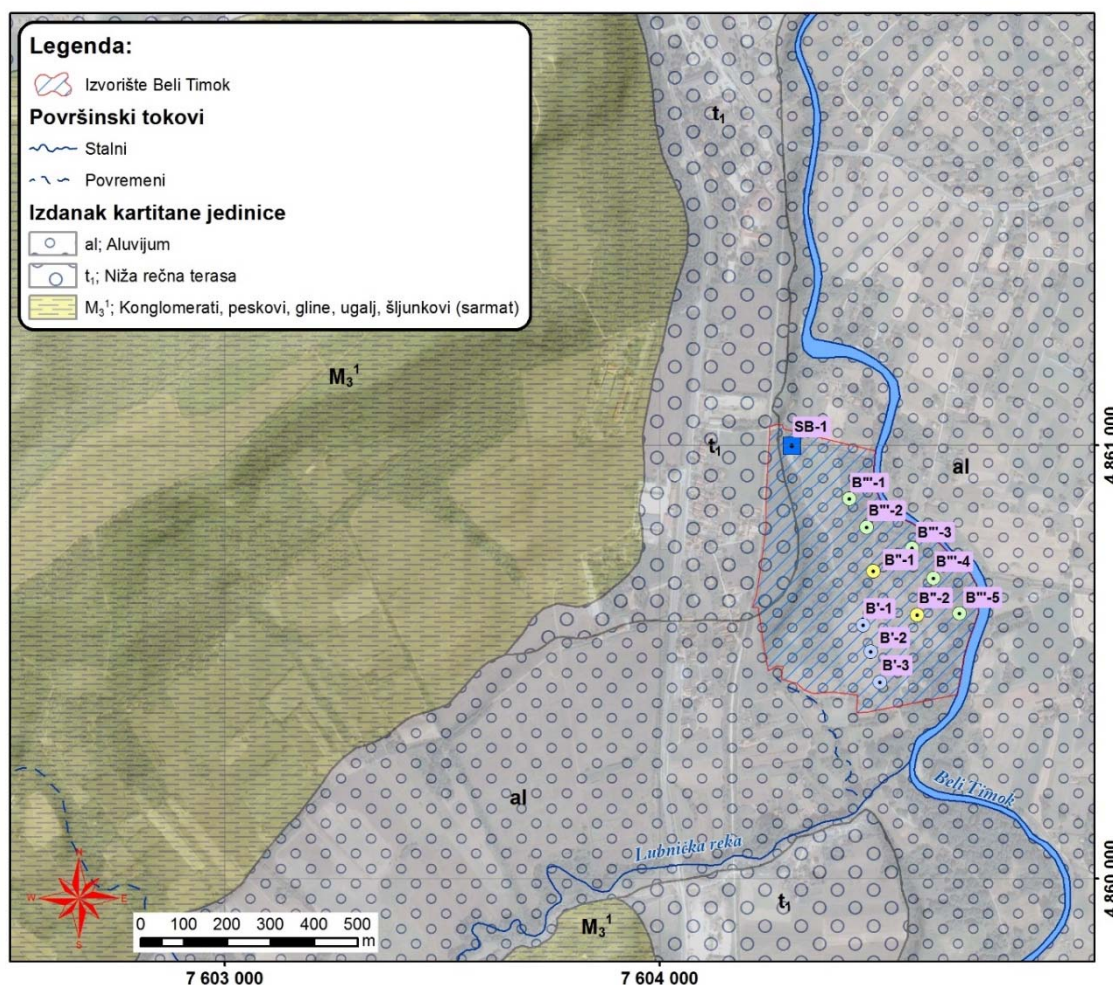
Neogeni sedimenti imaju značajno rasprostranjenje na istražnom području. Po starosti pripadaju sarmatu.

Sarmat (M_3^1) leži transgresivno preko sedimentnih i vulkanogenih tvorevina gornje krede zapadno od Belog Timoka, dok je istočna granica prekrivena aluvijalnim naslagama Timoka. Sedimenti sarmata predstavljeni su slabo vezanim peščarima i peskovitim glinama (Veselinović, 1967b). U obodnim delovima basena javljaju se i konglomerati koji transgresivno leže preko gornje krede.

Kvartar (Q)

Terasni sedimenti (t_1) imaju značajno rasprostranjenje u dolini Belog Timoka. Nalaze se na visini od oko 5 m iznad korita reka i izgrađeni su od peskova, supeskova, glina i šljunkova. Leže direktno preko sarmatskih sedimenata.

Aluvijum (al) ima veliko rasprostranjenje u području izvorišta „Beli Timok“, gde njegova širina prelazi 2 km, a debljina nanosa prosečno iznosi 6 m. Sastav aluvijalnih nanosa je dosta heterogen. Preovlađuju šljunkovi, peskovi i sugline.



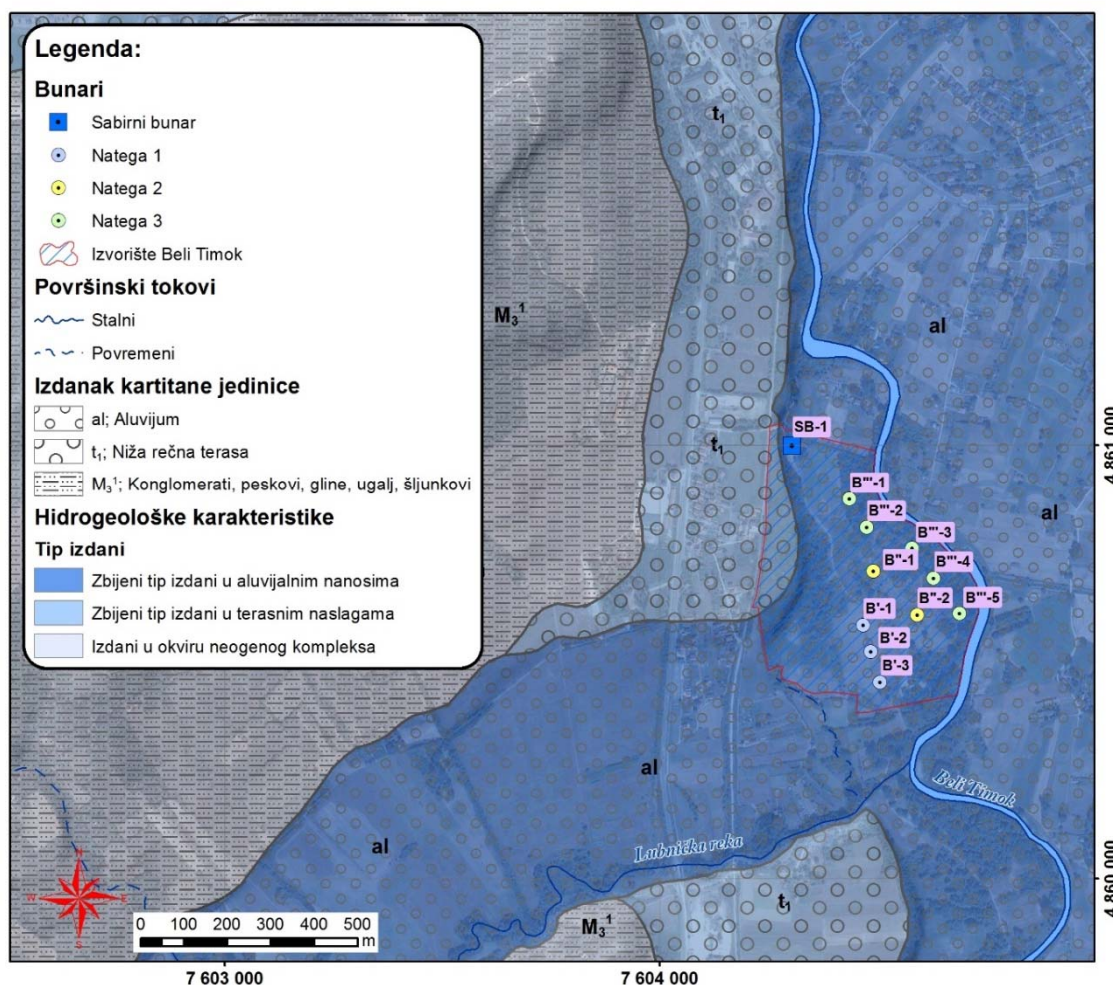
Slika 9.9. Geološka karta područja izvorišta „Beli Timok“

(po podacima Veselinović et al. 1967a)

9.8. Hidrogeološke karakteristike istražnog područja

Polazeći od rezultata istražnog bušenja, kao i opštih hidrogeoloških uslova na području Zaječara, mogu se izdvojiti sledeći tipovi izdani (slika 9.10):

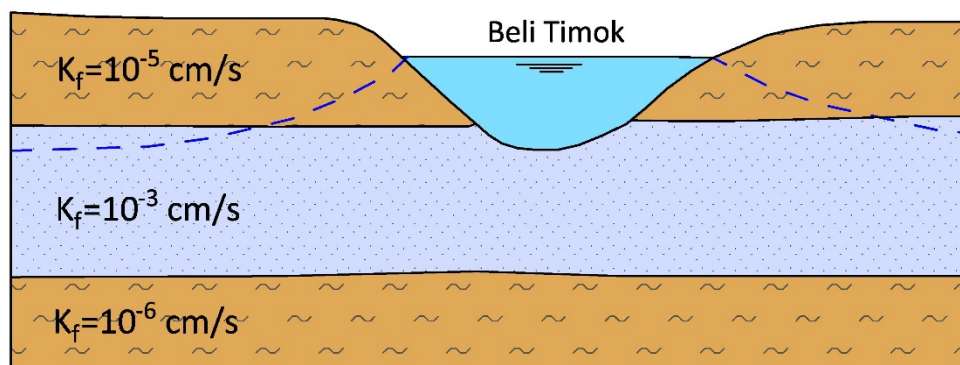
- Zbijeni tip izdani sa slobodnim nivoom u aluvijalnim nanosima
- Zbijeni tip izdani u terasnim naslagama i
- Izdani u okviru neogenog kompleksa.



*Slika 9.10. Hidrogeološka karta područja izvorišta „Beli Timok“
(geološka podloga prema podacima Veselinović et al. 1967a)*

Zbijeni tip izdani sa slobodnim nivoom u aluvijalnim nanosima

Zbijeni tip izdani u istražnom području ima značajno rasprostranjenje u aluvijalnim naslagama Belog Timoka i njegove leve pritoke Lubničke reke. Počev od Knjaževca pa do Zaječara, Beli Timok gradi prostranu aluvijalnu ravan mestimično širine do 2 km, prosečne debljine 6 m (Igrutinović i Nikolić, 1977, Filipović et al. 1977). Građa aluvijona, koja je prikazana na slici 9.11, je dvoslojevita i sastoji se od donjeg dobro vodopropusnog i gornjeg slabo vodopropusnog sloja (Milojević et al., 1976).



Slika 9.11. Šematski profil kroz aluvijalne sedimente izvorišta „Beli Timok“

Donji horizont izgrađuju peskovi i šljunkovi dobrih filtracionih karakteristika ($K_f = 5 \cdot 10^{-3}$ cm/s), debljine prosečno oko 3 m. Pomenute vodonosne naslage leže preko slabije vodopropusnih neogenih zaglinjenih sedimenata. Preko šljunkovito-peskovitog sloja leže slabije vodopropusne gline ($K_f = 10^{-5}$ cm/s), zaglinjeni i prašinski peskovi, koji umanjuju infiltraciju voda sa površine.

Izdan formirana u peskovito-šljunkovitim naslagama je sa slobodnim nivoom. Prihranjivanje izdani je dvojako. Najintenzivnije prihranjivanje je na račun infiltracije površinskih voda sa kojima postoji prisna hidraulička veza. Pored toga, prihranjivanje izdani vrši se i na račun infiltracije voda nastalih od atmosferskih padavina po površini rasprostranjenja aluvijalnih nanosa, a posebno na onim mestima gde je skinut zaglinjeni horizont. Manjim delom prihranjivanje izdani vrši se i na račun infiltracije površinskih voda koje sa padina dotiču do aluvijalne ravni Belog Timoka. Dreniranje izdani u prirodnim uslovima vrši se na račun isticanja u rečni tok za vreme sušnih perioda.

Zbijeni tip izdani u terasnim nanosima

Izdan sa slobodnim nivoom je formirana u okviru peskova i šljunkova niže rečne terase Belog Timoka. Rasprostranjena je severozapadno od izvorišta Beli Timok. Debljina peskova i šljunkova je svega par metara, a preko ovih sedimenata su nataložene sitnije frakcije, pretežno peskovite gline debljine 2 m. Izdan se prihranjuje pretežno infiltracijom padavina i površinskih voda koje se slivaju niz brdo Kraljevica. Zbog malog

rasprostranjenja i debljine vodonosnih slojeva, izdan u terasnim nanosima ima mali značaj za vodosnabdevanje stanovništva.

Izdani u okviru neogenog kompleksa

Neogeni sedimenti koji pripadaju zaječarskom neogenom basenu, u širem području izvorišta „Beli Timok“ imaju veliko rasprostranjenje u planu i profilu. Počev od površine terena pa do preko 500 m, smenjuju se različite vrste sedimenata: gline, peskovi, šljunkovi i slabo vezani peščari i konglomerati. U vertikalnom profilu preovlađuju slabo do potpuno vodonepropusni glinoviti sedimenti.

U peskovitim, šljunkovitim i slabo vezanim peščarsko-konglomeratičnim sredinama formirane su izdani najčešće sa nivoom pod pritiskom. Na osnovu velikog broja izvedenih arteskkih bunara u području grada Zaječara do dubine od 324 m izdvojena su četiri vodonosna horizonta (Petković & Milojević, 1955; Milojević, 1976):

- | | | |
|-----|--------------------|------------------|
| I | vodonosni horizont | od 98 do 118 m; |
| II | vodonosni horizont | od 160 do 190 m; |
| III | vodonosni horizont | od 248 do 257 m; |
| IV | vodonosni horizont | od 300 do 324 m; |

Novijim hidrogeološkim istraživanjima utvrđeno je prisustvo vodonosnih horizonata na dubinama preko 324 m (Dokmanović, 1999).

9.9. Izvorište podzemnih voda „Beli Timok“

Vodosnabdevanje stanovništva i dela industrije grada Zaječara vrši se sa tri izvorišta, od kojih se na dva („Beli Timok“ i „Tupižnica“) eksploatiše podzemna voda, dok se na trećem voda zahvata iz akumulacionog jezera „Grlište“.

Izvorište „Beli Timok“ nalazi se na levoj obali Belog Timoka uz samu reku, neposredno ispod ušća Lubničke reke (slika 9.12). Zahvatanje podzemnih voda iz aluvijalnih naslaga

Belog Timoka na izvoru „Beli Timok“ započeto je 1957. godine i predstavlja početak organizovanog snabdevanja vodom u Zaječaru.



*Slika 9.12. Jedan od bunara na izvoru „Beli Timok“ nedaleko od ušća
Lubničke reke i Belog Timoka*

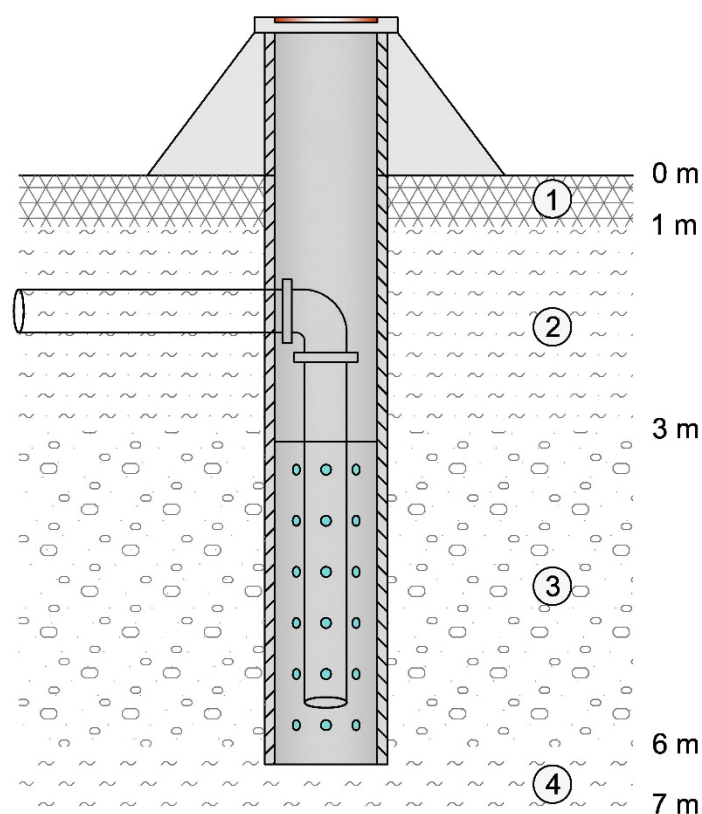
Debljina aluvijalnih nanosa u području iznosi 5-7 m. Sama debljina vodonosnog peskovito-šljunkovitog dela aluvijona iznosi oko 3 m. Usled čestih meandriranja Belog Timoka i debljina aluvijalnih nanosa varira. Preko aluvijalnih šljunkova i peskova leži slabije vodopropusni sloj koji čine glinoviti sedimenti, koji delimično štite podzemnu vodu od zagađivanja.

Podzemne vode su u direktnoj hidrauličkoj vezi sa površinskim vodama. Na nivo podzemnih voda u zoni izvorišta direktno utiče položaj nivoa vode u Belom Timoku, kao i režim eksploatacije. Nivo podzemnih voda u prirodnim uslovima nalazi se na dubini 2,5-3,5 m, dok se u periodu eksploatacije tokom letnjih meseci spušta do dubine od 4,8 m ispod površine terena (Živanović & Atanacković, 2013).

U uslovima kada izvorište nije u eksploataciji, nivo podzemnih voda je pod uticajem površinskih voda Belog Timoka. Generalni pravac kretanja podzemnih voda je u pravcu JJI-SSZ i poklapa se sa rečnim tokom. Prirodni hidraulički gradijent u okviru aluvijalnih naslaga u zoni izvorišta je blag (0,005-0,05). U režimu eksploatacije, strujna slika se menja i uslovljena je položajem vodozahvatnih objekata. Nivo izdani se usmerava ka

drenažnim objektima i eksploatacionim bunarima. U tom periodu, pri niskom stanju nivoa izdani i minimalnom vodostaju Belog Timoka, hranjenje izdani se mestimično prekida jer je korito reke udubljeno u vodonepropusnoj podlozi. Za vreme visokih vodostaja, hranjenje podzemnih voda u aluvijalnim nanosima je intenzivnije.

Sadašnje izvorište se sastoji od 10 plitkih kopanih bunara (Živanović & Atanacković, 2013). Bunari su povezani sistemom natege i to na sledeći način: prva natega sa 3 bunara, druga natega sa 2 i treća natega sa 5 bunara. Prosečna dubina bunara iznosi oko 6 m (slika 9.13). Svi su urađeni do vodonepropusne podloge. Pet bunara je urađeno pre 1980. godine, a kasnije je urađeno još 5. Podzemne vode se iz bunara ulivaju u jedan zajednički vodozahvat-bunar, (slika 9.14, levo) odakle se usmeravaju u Crpnu stanicu, gde se preko vodomera vrši merenje ukupno eksploatisane vode.



Slika 8.13. Litološki profil i tipska konstrukcija bunara izvorišta „Beli Timok“

1 – aluvijalno zemljište; 2 – peskovita glina; 3 – šljunak i pesak; 4 - glina

Pored kopanih bunara, na području izvorišta izrađeno je nekoliko infiltracionih bazena za potrebe povećanja količine vode tokom perioda niskih vodostaja. Ovaj sistem veštačke

regulacije izdani duži niz godina nije u funkciji, pa su infiltracioni bazeni napušteni i obrasli vegetacijom (slika 9.14, desno).



Slika 9.14. Sabirni bunar (levo) i napušteni infiltracioni bazen (desno)

U periodu 2012-2013. godine za potrebe overe rezervi praćen je režim eksploatacije na izvorištu „Beli Timok“. U ovom periodu prosečna mesečna eksploatacija se kretala u intervalu 24,4 – 34,6 l/s. Srednji kapacitet eksploatacije za čitav period osmatranja je iznosio 30 l/s.

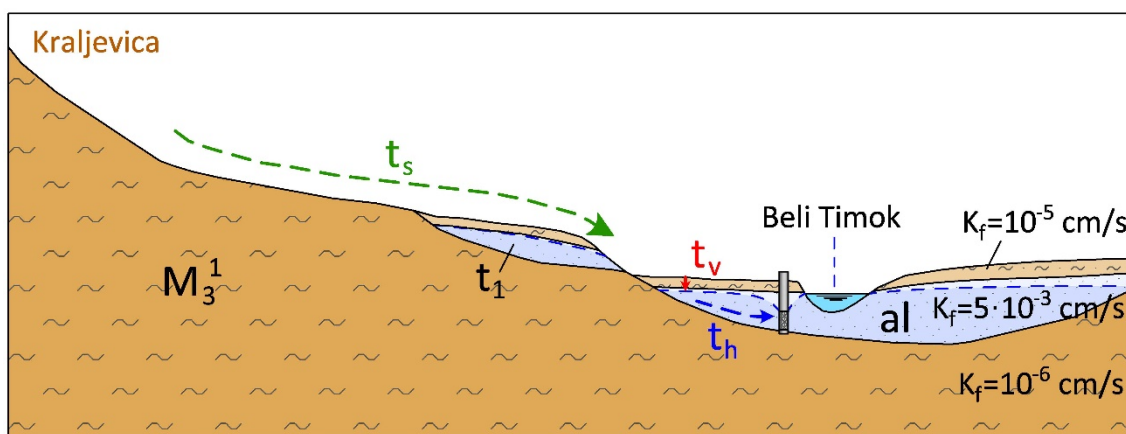
Kvalitet podzemnih voda izvorišta „Beli Timok“ je generalno dobar. Podzemne vode su male mineralizacije, hidrokarbonatne klase, kalcijumske grupe.

9.10. Primena TDM metode za ocenu ranjivosti podzemnih voda izvorišta „Beli Timok“

U toku 2012. i 2013. godine, na području izvorišta „Beli Timok“ izvedena su detaljna hidrogeološka istraživanja sa ciljem definisanja rezervi podzemnih voda ovog izvorišta (Živanović & Atanacković, 2013). Istraživanja su obuhvatila praćenja promena kvantitativnih parametara izvorišta (eksploatacione količine, nivoi podzemnih voda u bunarima, promene nivoa Belog Timoka, režim padavina i sl.) i kvalitativnih karakteristika podzemnih voda. Izvedena istraživanja su potvrdila da postoji dobra hidraulička veza izdani sa rekam i da se prihranjivanje najvećim delom odvija na račun

infiltracije rečne vode. Prihranjivanje se takođe vrši i na račun infiltracije padavina, kao i na račun infiltracije površinskih voda koje niz padinu dotiču do aluvijalne ravni.

Sintezom rezultata ranijih istraživanja napravljen je konceptualni model zaštite izvorišta „Beli Timok“ (slika 9.15). U model su uključene sve komponente koje utiču na sudbinu kontaminanata sa površine terena. I pored toga što podzemne vode najvećim delom dolaze iz pravca istoka (sa strane Belog Timoka), potencijalna opasnost od zagađivanja podzemnih voda postoji i sa zapadne strane. Zato je model uključio i mogućnost spiranja kontaminanata sa brda Kraljevica i njihov transport i infiltraciju kroz nadizdanku zonu u delu rasprostranjenja aluvijona reke.

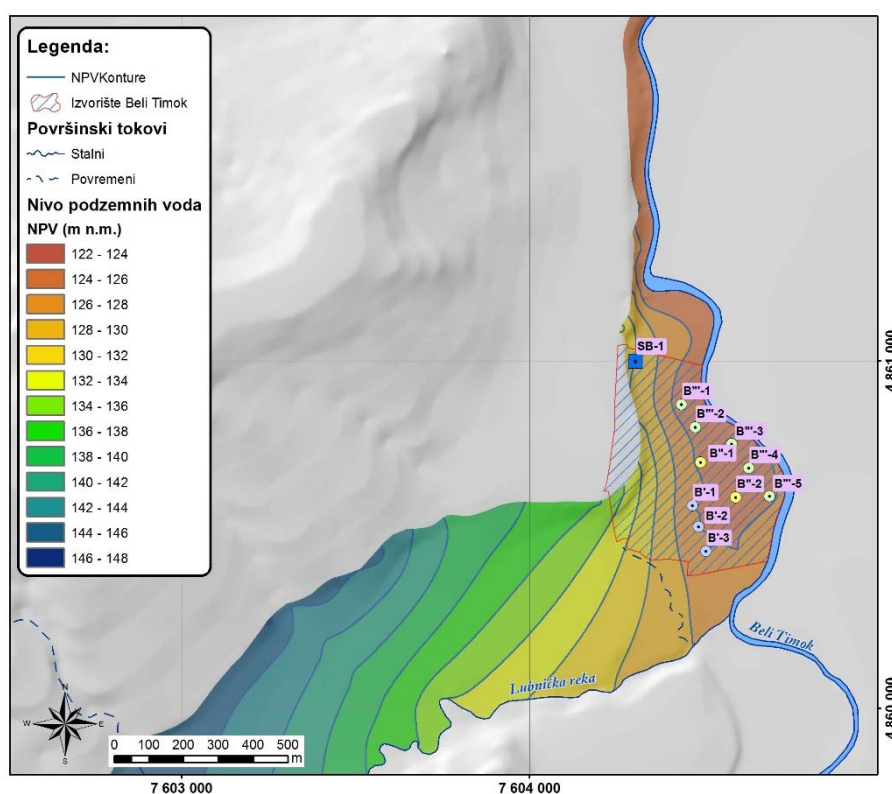


Slika 9.15. Konceptualni model zaštite izvorišta „Beli Timok“

9.10.1. Određivanje vremena horizontalnog kretanja podzemnih voda

Za proračun horizontalnog kretanja podzemne vode ka vodozahvatnim objektima prvo su pripremljene neophodne podloge za primenu alatke *Darcy Flow* u programskom paketu ArcGIS. Za uspešnu primenu ove alatke potrebne su sledeće oleate: oleata debljine izdanske zone (za proračun je uzeta prosečna debljina izdanske zone od 3 m), oleata koeficijenta transmisibilnosti (korišćena je prosečna vrednost $T=1,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) i oleata efektivne poroznosti (korišćena je srednja vrednost $n_{ef}=0,28$ za srednjezrne šljunkove po Shaap et al., 1999).

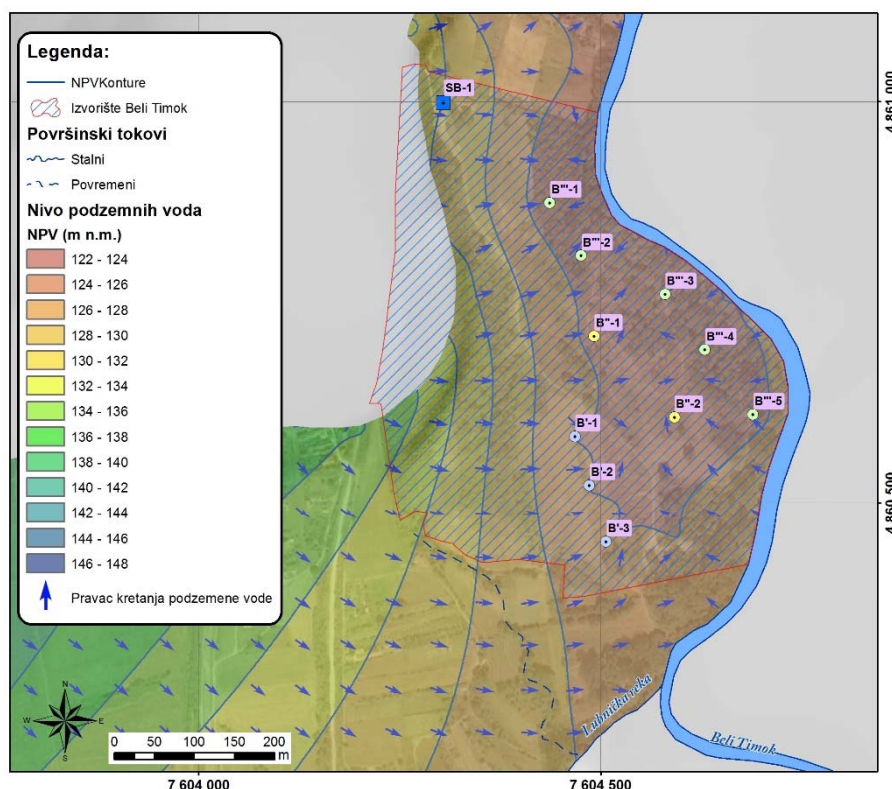
Najbitniji segment u proračunu kretanja podzemne vode ka vodozahvatnim objektima jeste karta dinamičkih nivoa podzemnih voda. Na bazi ove karte program računa pravce kretanja podzemne vode i hidrauličke gradijente u svakoj tački analiziranog područja. Karta nivoa podzemnih voda je dobijena prostornom interpolacijom dinamičkih nivoa podzemnih voda u bunarima. Na kontaktu sa površinskim tokovima (Beli Timok i Lubnička reka) zadate su vrednosti nivoa podzemnih voda od 0 m, a na kontaktu aluvijalnih sedimenata i rečne terase je zadata vrednost od 3 m ispod površine terena. Dobijena karta (slika 9.16.) je pokazala da se nivoi podzemnih voda smanjuju u pravcu površinskih tokova. Najniži nivoi su u zoni izvorišta „Beli Timok“, što je posledica funkcionisanja rada bunara.



Slika 9.16. Karta nivoa podzemnih voda (m n.m.) za područje rasprostranjenja aluvijalne izdani na levoj obali Lubničke reke i Belog Timoka

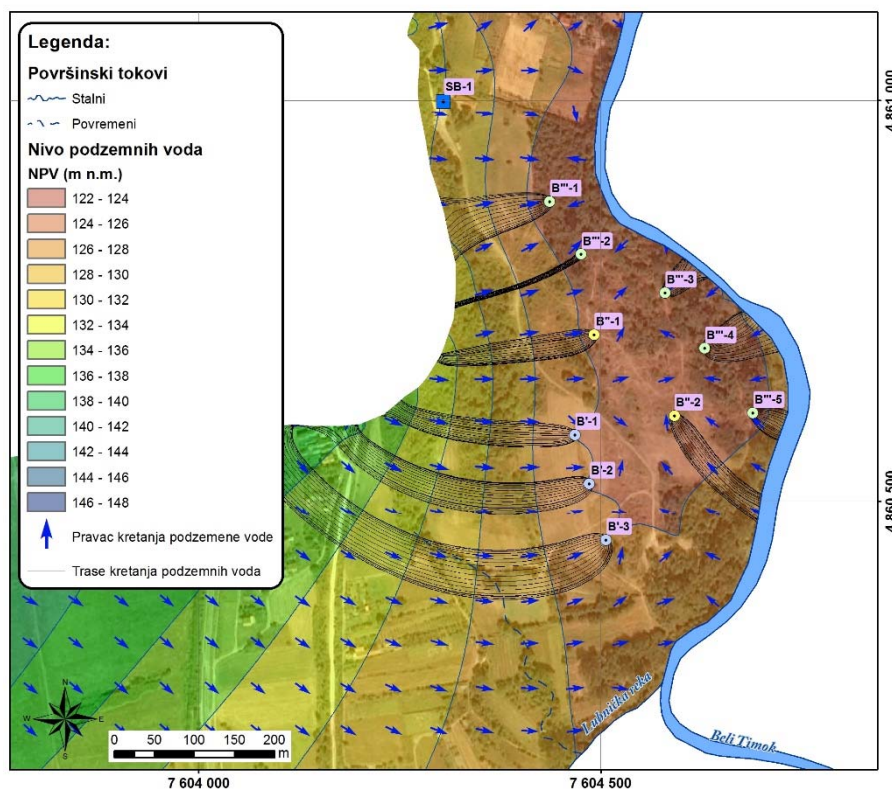
Primenom alatke *Darcy Flow* (Esri, 2014) dobijene su dve karte: karta pravca kretanja podzemnih voda (*Flow Direction*) i karta intenziteta kretanja podzemnih voda (*Flow*

Magnitude). Prva karta pokazuje smer kretanja podzemnih voda iz svake tačke područja rasprostranjenja aluvijalne izdani (slika 9.17), dok druga karta u toj istoj tački pokazuje brzinu kretanja podzemnih voda u m/s.



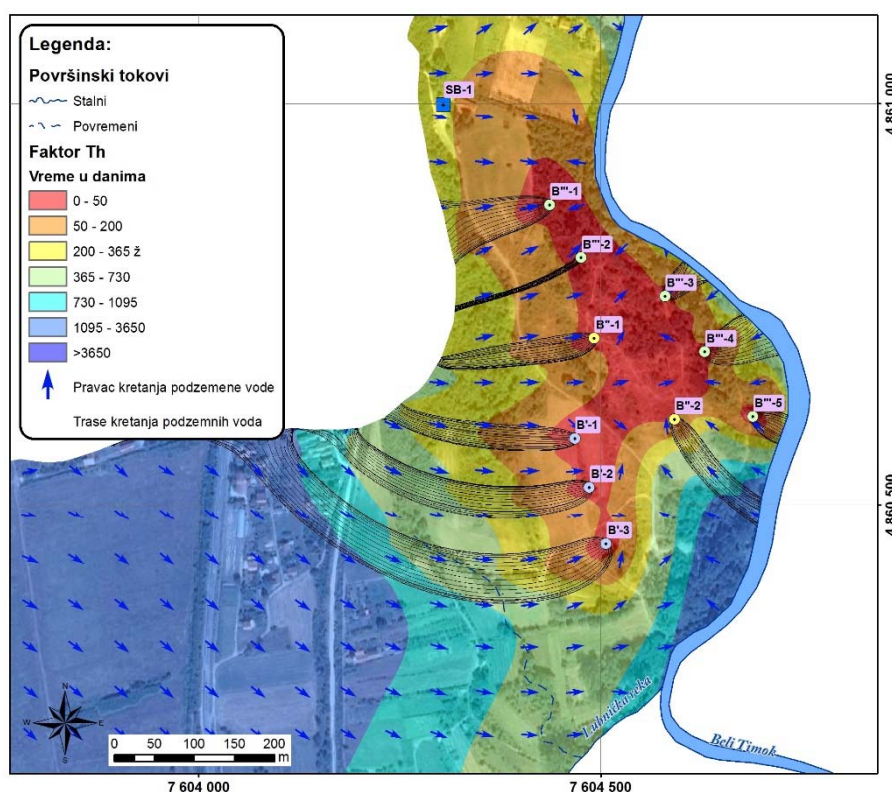
Slika 9.17. Karta pravca kretanja podzemnih voda dobijena primenom alatke Darcy Flow

Sledeći korak u određivanju vremena horizontalnog kretanja podzemnih voda ka vodozahvatnim objektima jeste određivanja putanja kretanja voda ka izvorištu. U tu svrhu primenjena je alatka *Particle Track* (Esri, 2014) kojom se dobijaju trase podzemnih voda iz izabrane tačke. Da bi se dobio pravac kretanja voda ka zadatoj tački (ka bunaru), prvo je bilo neophodno izvršiti inverziju oleate pravca kretanja podzemnih voda (*Flow Direction*). U cilju dobijanja strujnica ka bunaru iz svih pravaca napravljena je posebna oleata (*Particles*) koja je uključila grupu od po 20 tačaka ravnomerno raspoređenih oko svakog bunara na udaljenosti od 5 m. Koristeći oleate pravca i intenziteta kretanja podzemnih voda primenom alatke *Particle Track* dobijene su putanje (trase) kretanja podzemnih voda ka svakoj od pomenutih tačaka (slika 9.18). Time je dobijena karta na kojoj je jasno izdvojen deo aluvijona u kojem se podzemne vode kreću ka bunarima.



Slika 9.18. Trase kretanja podzemnih voda ka vodozahvatnim objektima dobijene primenom alatke Particle Track

Dobijene trase su iskorišćene za dobijanje karte parametra t_h . Prelomne trase tačaka su prvo pretvorene u tačkaste objekte, pri čemu je svaka tačka zadržala vrednost vremena putovanja vode do vodozahvatnog objekta. Interpolacijom ovih tačaka dobijena je rasterska karta parametra t_h na kojoj svaka tačka predstavlja vreme u danima koje je potrebno da podzemne vode doputuju do vodozahvatnog objekta (slika 9.19).



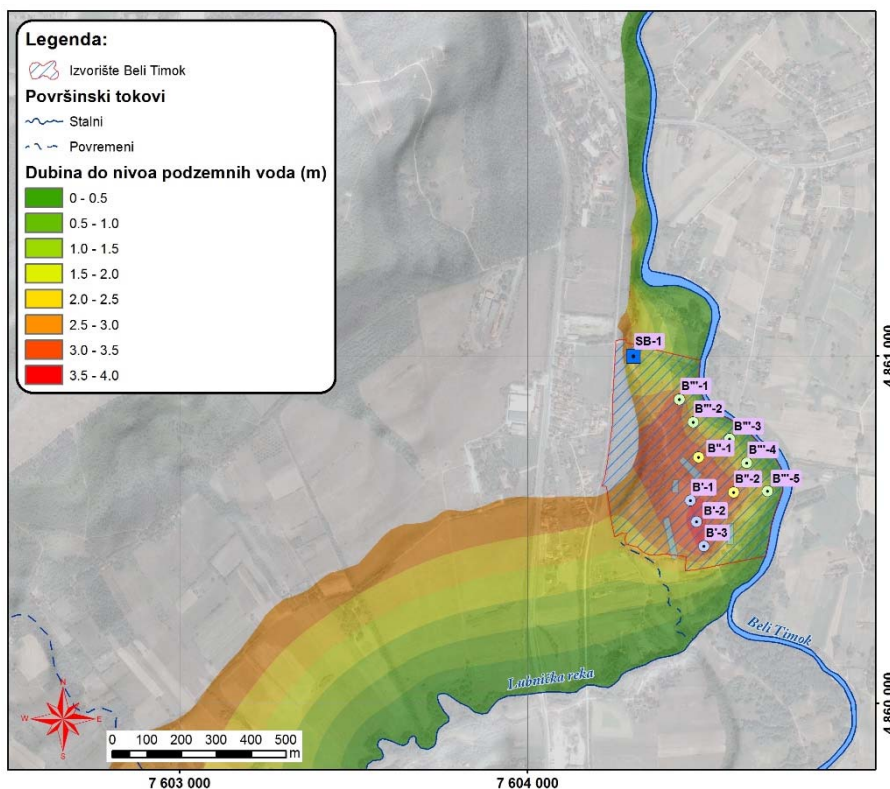
Slika 9.19. Karta parametra t_h

Dobijena karta parametra t_h pokazuje da na najvećem delu područja izvorišta podzemne vode putuju do vodozahvatnih objekata za manje od godinu dana. Vreme se drastično povećava u jugozapadnom delu izvorišta gde analiza pokazuje da je potrebno i više godina da voda polako doputuje do najbližih bunara. Dobijeni podaci su očekivani kada se uzme u obzir da su vrednosti koeficijenta filtracije za uslove aluvijalnih sedimenata relativno mali, kao i to da hidraulički gradijenti imaju takođe male vrednosti.

9.10.2. Određivanje vremena vertikalnog kretanja podzemnih voda

Za uspešnu primenu *TIME-INPUT* metode za procenu vremena koje je potrebno da se podzemne vode transportuju sa površine terena do izdanske zone bilo je neophodno odrediti dva faktora koji direktno utiču na ukupno vreme: faktor Vreme i faktor Ulaz.

Uzimajući u obzir geološku građu aluvijalnog kompleksa, tj. prisustvo isključivo nevezanih sedimenata, za proračun vremena vertikalnog kretanja korišćeni su isključivo debljine i koeficijenti filtracije slojeva u nadizdanskoj zoni. Prvi korak bio je proračun debljine nadizdanske zone koji je za svaku tačku istražnog područja određen kao razlika između elevacionog modela terena i karte nivoa podzemnih voda. Za vrednosti nivoa podzemnih voda na prostoru samog izvorišta korišćeni su najviši nivoi podzemnih voda (u periodima kada bunari nisu bili u funkciji). Pri tom je područje rasprostranjenja aluvijalne izdani na levoj obali Lubničke reke i Belog Timoka podeljeno u više klasa u zavisnosti od srednje dubine do nivoa podzemnih voda (slika 9.20).

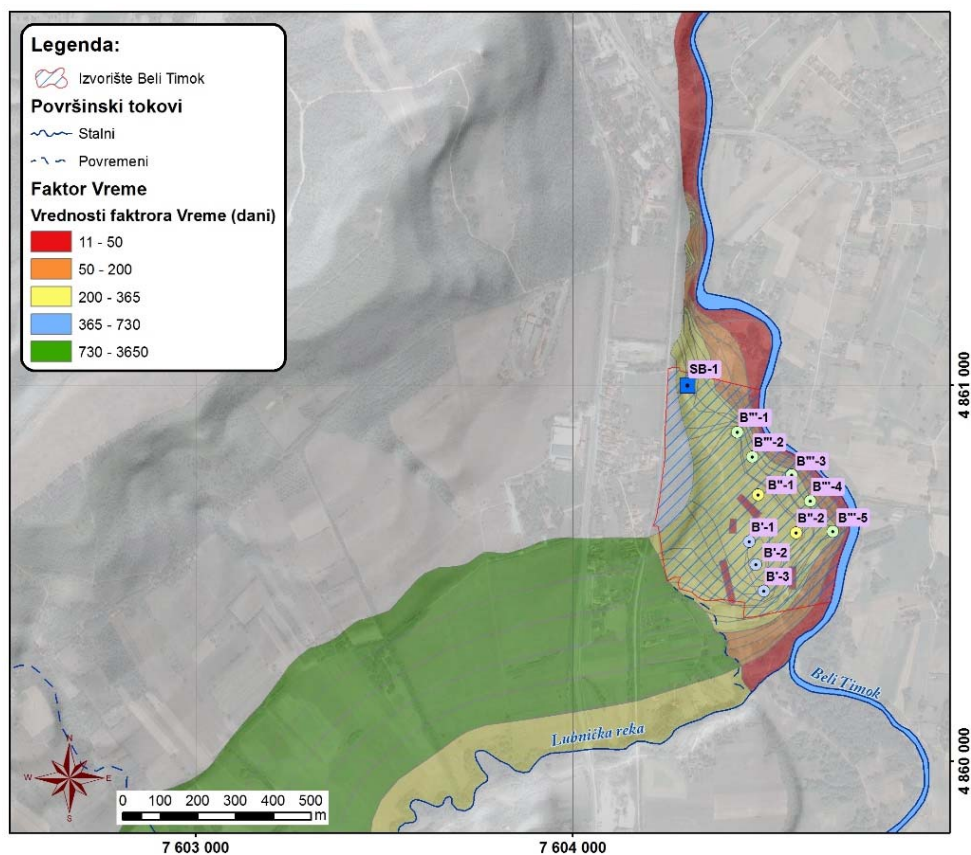


Slika 9.20. Karta srednje dubine do nivoa podzemnih voda za područje rasprostranjenja aluvijalne izdani na levoj obali Lubničke reke i Belog Timoka

Nakon što je određena debljina nadizdanske zone u svakoj tački aluvijalne izdani, izvršeno je oduzimanje debljine zemljišnog pokrivača pri čemu je dobijena debljina sedimenata u zoni aeracije ispod tla. Pored proračuna debljine, za svaki sloj prostorno su zadati koeficijenti filtracije. Na bazi koeficijenta filtracije i debljine slojeva izvršen je

proračun vremena kretanja vode kroz svaki sloj pojedinačno. S obzirom na to da na području rasprostranjenja aluvijalne izdani ne postoje konsolidovane stene, za proračun faktora Vreme nisu analizirani pojedini parametri kao što su postojanje tektonskih struktura i pad slojevitosti stena. Ukupna veličina parametra Vreme je dobijena sumiranjem vremena prolaska vode kroz svaki sloj.

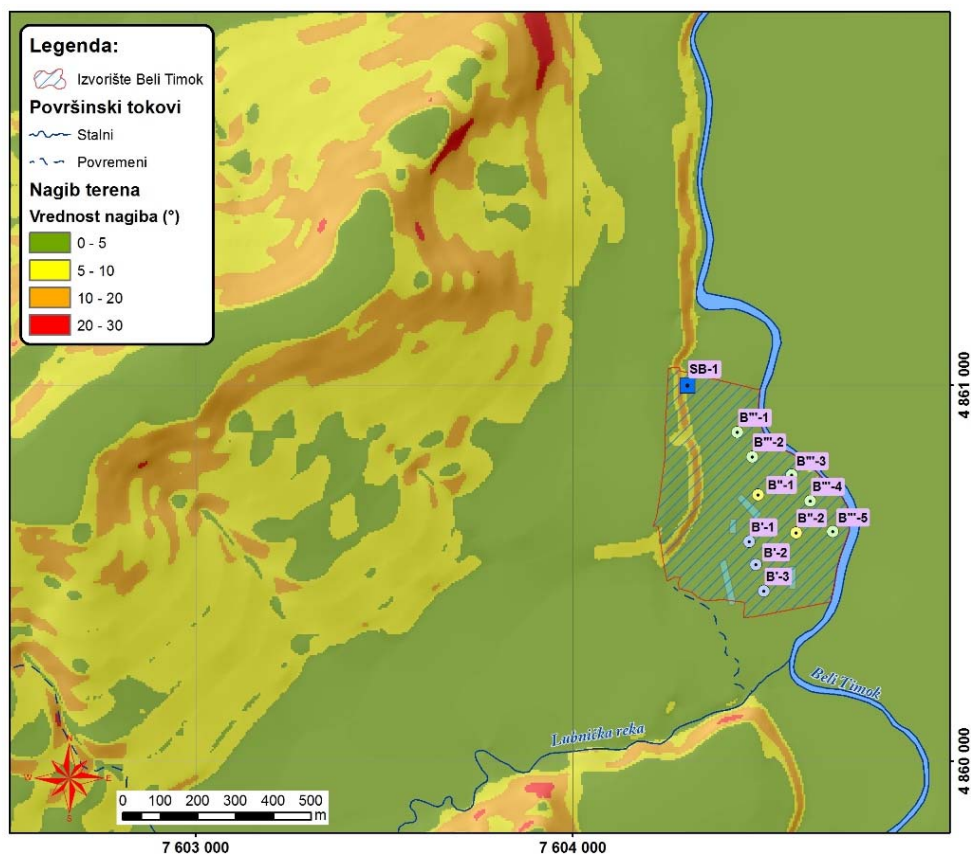
Karta parametra VREME prikazana je na slici 9.21. Dobijena karta pokazala je da se najveći deo zona izvorišta karakteriše vrednostima koje se kreću u intervalu 200-365 dana (do 1 god.), što je rezultat putovanja vode kroz glinoviti aluvijalni pokrivač. Manje vrednosti su dobijene u delovima izvorišta koja su bliže Belom Timoku zbog manje debljine nadizdanske zone. Najmanje vrednosti su proračunate za prostor koji je obuhvaćen infiltracionim bazenima. U njima je skinut gotovo kompletan površinski prekrivač, pa je samim tim i najmanje vreme potrebno površinskoj vodi da doputuje do nivoa podzemnih voda.



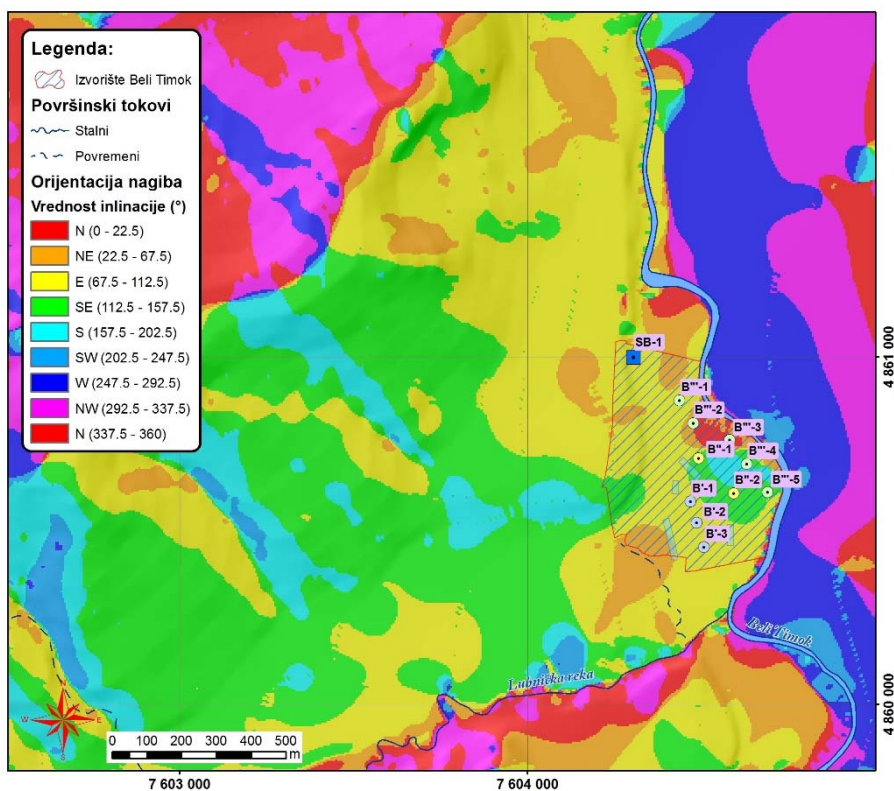
Slika 9.21. Karta faktora VREME

Za proračun faktora Ulaz (Input) prvo je urađen proračun faktora radijacije α koji je neophodan za proračun realne evapotranspiracije. Za dobijanje ovog parametra prethodno su urađene dve oleate: oleata nagiba terena i oleata inklinacije (orijentacija nagiba terena). Za dobijanje ovih karata korišćene su alatke *Slope* i *Aspect* koje su deo programske ekstenzije *3D Analyst* programskog paketa *ArgGIS* (Esri, 2014). Za prostornu analizu korišćen je elevacioni model terena (rasterska podloga sa veličinom tačke 5 x 5 m). Dobijena karta nagiba terena je dalje klasifikovana u 6 klasa (0-5°, 6-10°, 11-20°, 21-30°, 31-45° i 46-90°, slika 9.22). Primenom alatke *Aspekt* odmah se dobija klasifikovan raster sa 8 izdvojenih klasa (N, NE, E, SE, E, SW, W, NW, slika 9.23).

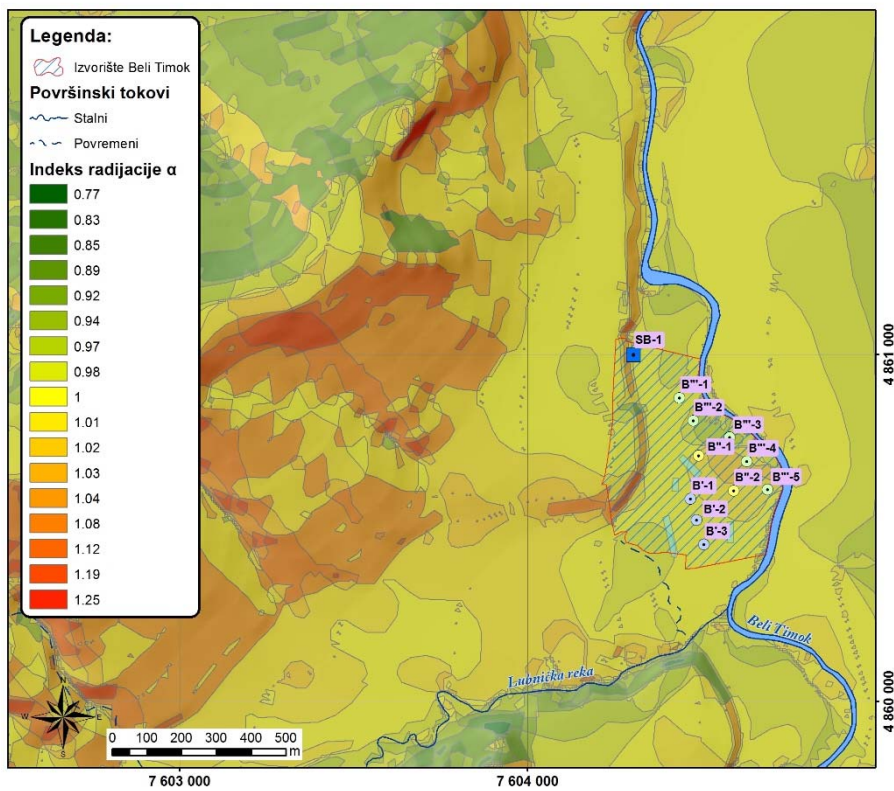
Ovako klasifikovane rasterske oleate su prvo konvertovane u vektorske podloge (poligoni), čime je olakšano njihovo preklapanje (*Overlay*). U zavisnosti od vrednosti ovih podloga, svakom pojedinačnom poligonu je dodeljena vrednost indeksa radijacije α (slika 9.24).



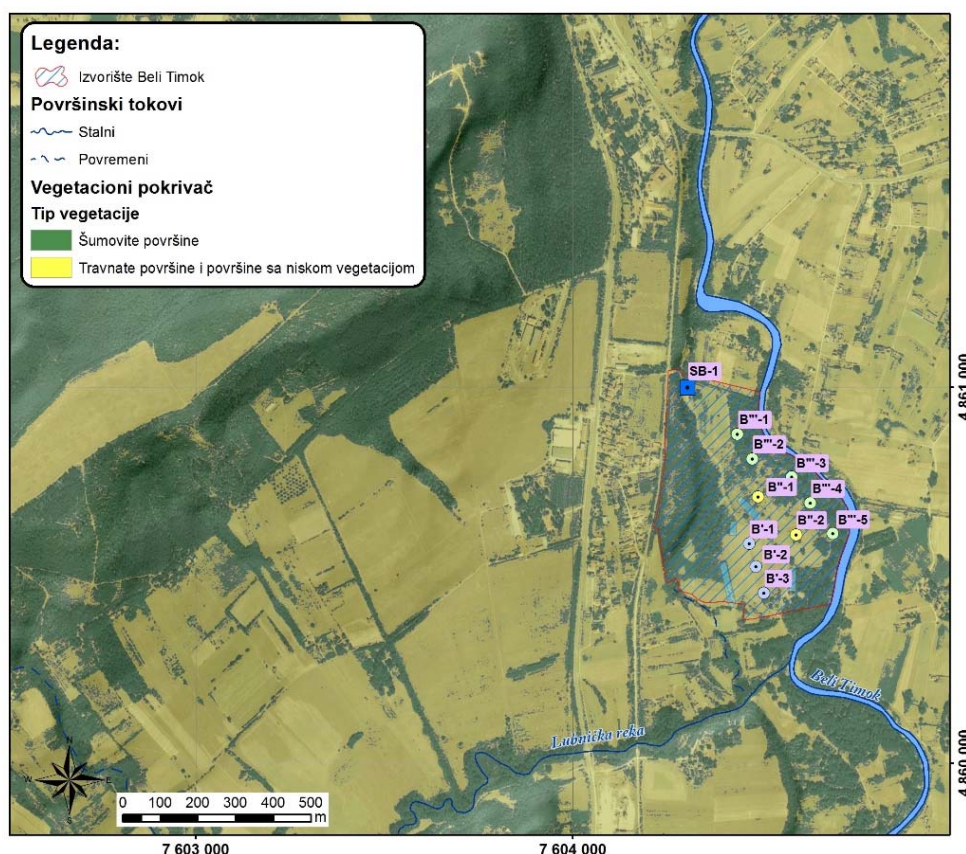
Slika 9.22. Karta prostorne distribucije nagiba terena



Slika 9.23. Karta prostorne distribucije orijentacije nagiba terena

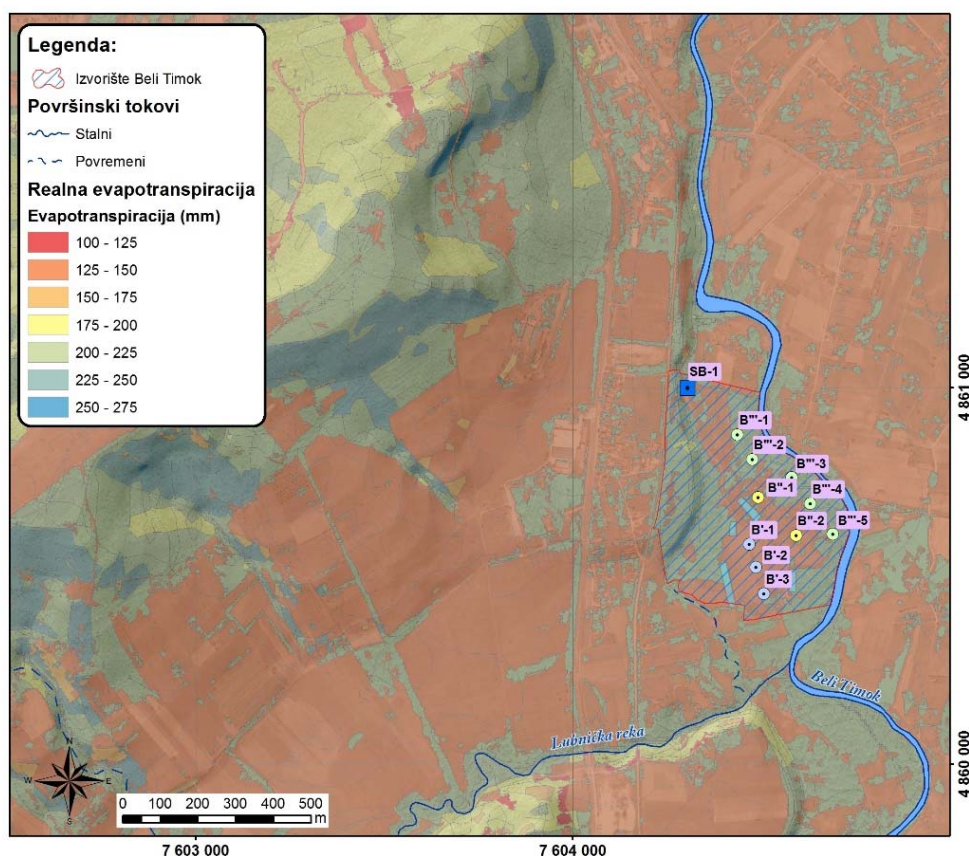
Slika 9.24. Karta prostorne distribucije indeksa radijacije α

Drugi korak u proračunu evapotranspiracije jeste proračun potencijalne infiltracije (faktor ET). Analizom satelitskog snimka (slika 9.25) izdvojene su dve klase terena: šumovite površine, i travnate površine i površine sa niskom vegetacijom. Prvoj klasi je dodeljena vrednost od 35 %, dok je drugoj vrednost 23 %.



Slika 9.25. Karta prostorne distribucije vegetacionih klasa

Preklapanjem oleate prostorne distribucije vegetacionih klasa sa oleatom indeksa radijacije i množenjem ovih vrednosti sa vrednoću prosečnih višegodišnjih padavina za teritoriju Zaječara (600 mm) dobijena je karta realne evapotranspiracije (slika 9.26).



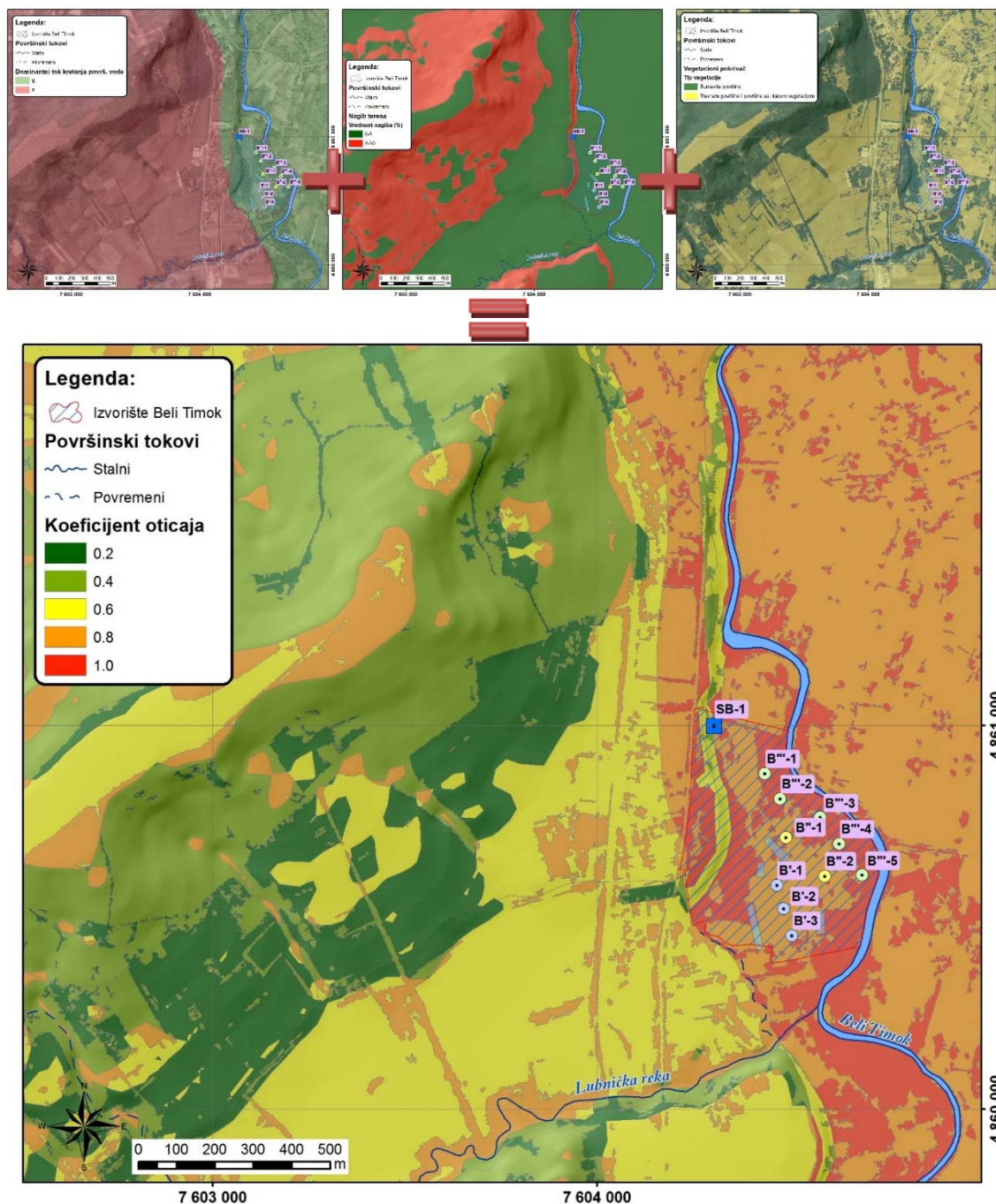
Slika 9.26. Karta prostorne distribucije evapotranspiracije

Za proračun koeficijenta oticaja korišćene su tri podloge: pedološka karta, karta nagiba terena i karta vegetacije. Na bazi karte pedoloških karakteristika terena izvršena je procena dominantnog tipa kretanja površinske vode, nakon čega je u zavisnosti od veličine nagiba terena (u %) i tipa vegetacije zadata vrednost koeficijenta oticaja za čitavo područje istraživanja (slika 9.27).

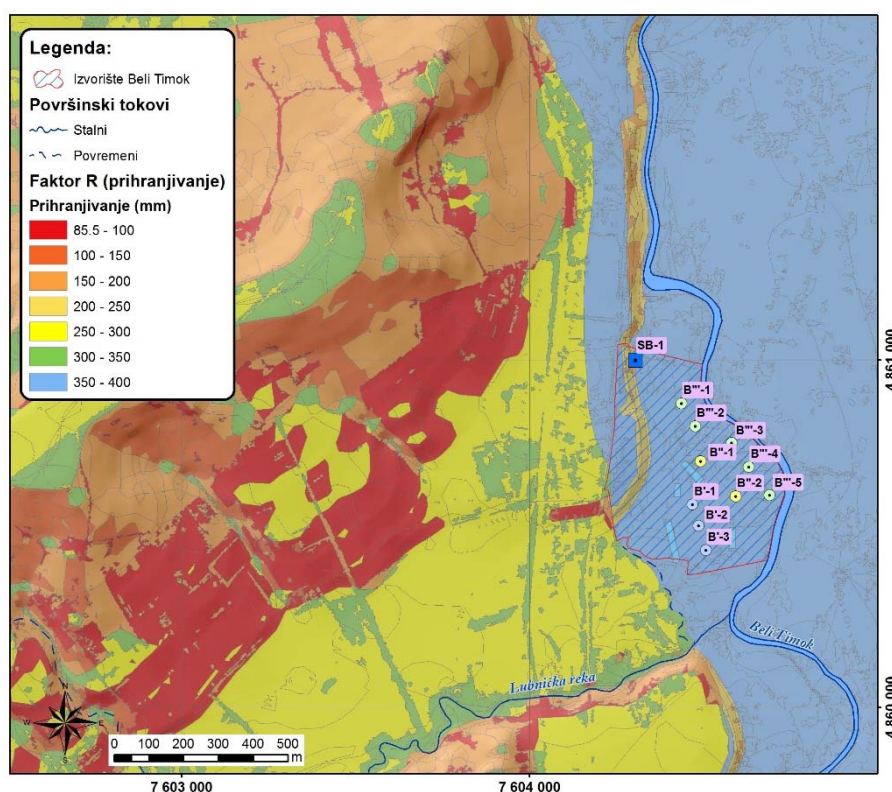
Primenom pomenute metodologije dobijena je karta oticaja prema kojoj je teren klasifikovan na 5 različitih klasa (od 0,2 do 1,0). Male vrednosti ovog koeficijenta uglavnom su vezane za područja sa većim nagibom, gde najveći deo vode površinski otekne. Visoke vrednosti koeficijenta oticaja karakteristične su za ravničarske delove terena (područje izvorišta) gde je oticaj minimalan.

Preklapanjem karte koeficijenta oticaja sa kartom realne evapotranspiracije (slika 9.26) dobijena je karta na kojoj je za svaki poligon izvršen proračun veličine prihranjivanja. Pri

proračunu je od srednje vrednosti prosečnih višegodišnjih padavina oduzeta vrednost realne evapotranspiracije, a dobijeni rezultat pomnožen sa koeficijentom oticaja. Kao krajnji rezultat dobijena je karta faktora R, tj. veličine prihranjivanja u mm (slika 9.28).



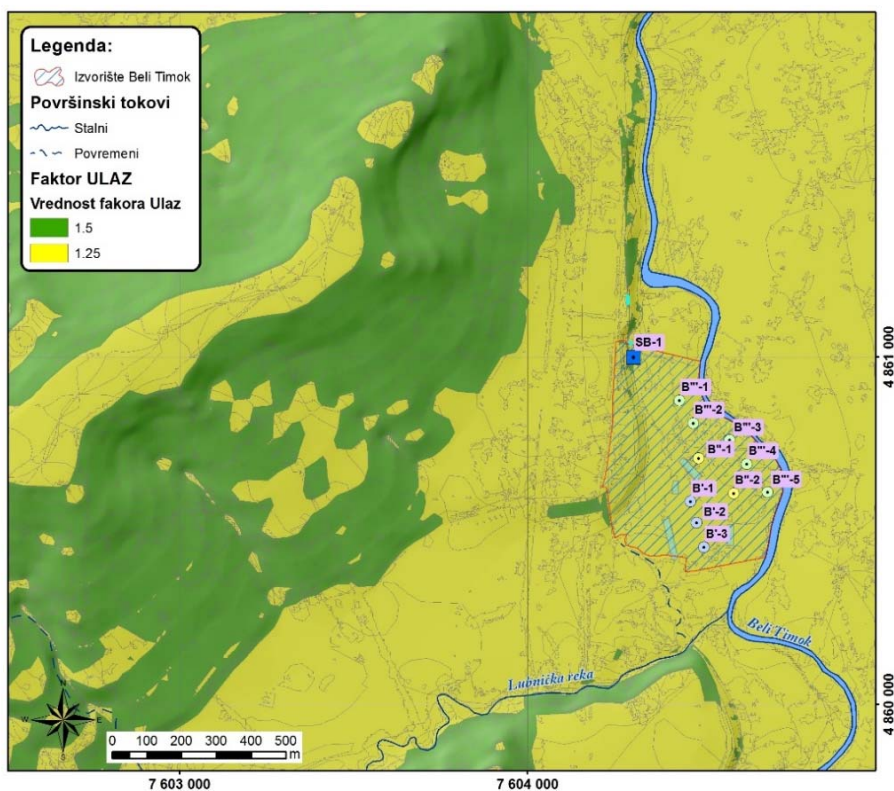
Slika 9.27. Proračun koeficijenta oticaja



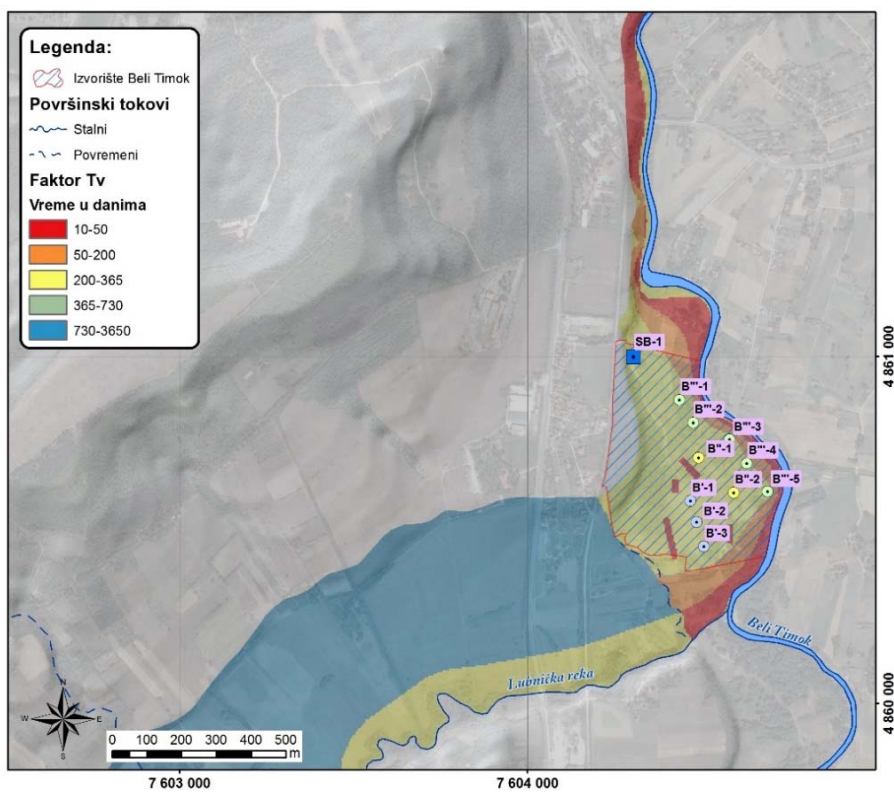
Slika 9.28. Karta prostorne distribucije prihranjivanja kao rezultat infiltracije padavina

Karta prihranjivanja je dalje klasifikovana u dve klase (0-200 mm i 200-400 mm) i svakoj klasi su dodeljene vrednosti faktora ULAZ (1,5 i 1,25). Karta faktora ULAZ je prikana na slici 9.29.

Poslednji korak u proračunu vremena vertikalnog kretanja vode kroz nadzidansku zonu jeste preklapanje faktora VREME (slika 9.21) i faktora ULAZ (slika 9.29). Množenjem vrednosti faktora VREME sa vrednostima faktora ULAZ dobijen je parametar t_v (slika 9.30).



Slika 9.29. Karta prostorne distribucije faktora ULAZ

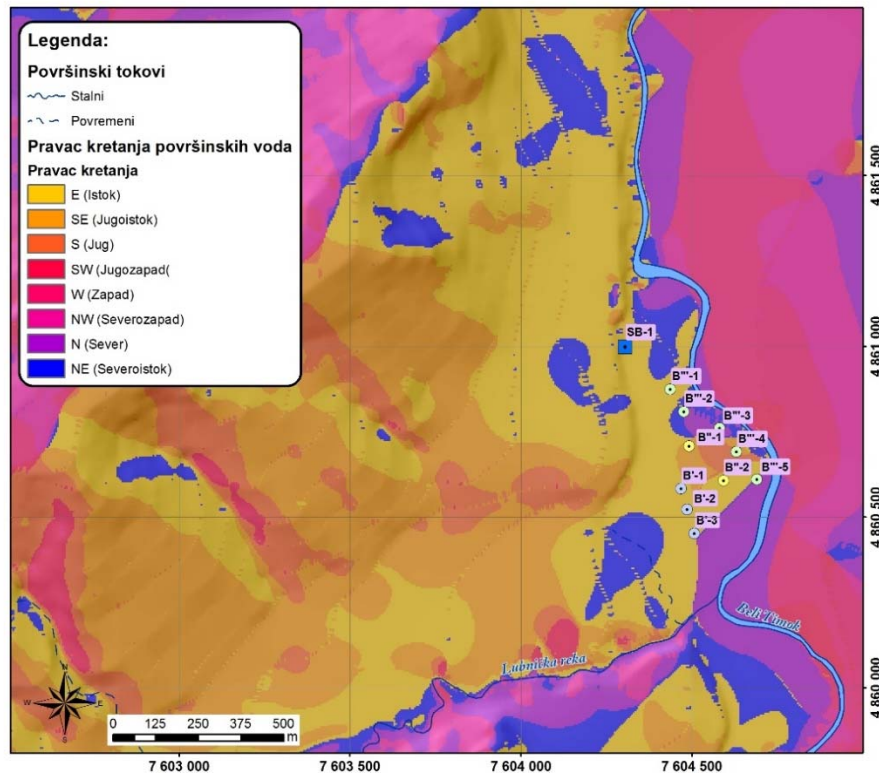


Slika 9.30. Karta parametra t_v

Slično kao i kod faktor Vreme, karta parametra t_v , je pokazala da se najveći deo zona izvorišta karakteriše vrednostima koje se kreću u intervalu 200-365 dana (do 1 god.). Najmanje vrednosti su dobijene u delovima izvorišta bližim Belom Timoku, gde je nivo podzemnih voda najbliži površini terena. Svakako najmanje vrednosti (<20 dana) dobijene su za područja infiltracionih bazena.

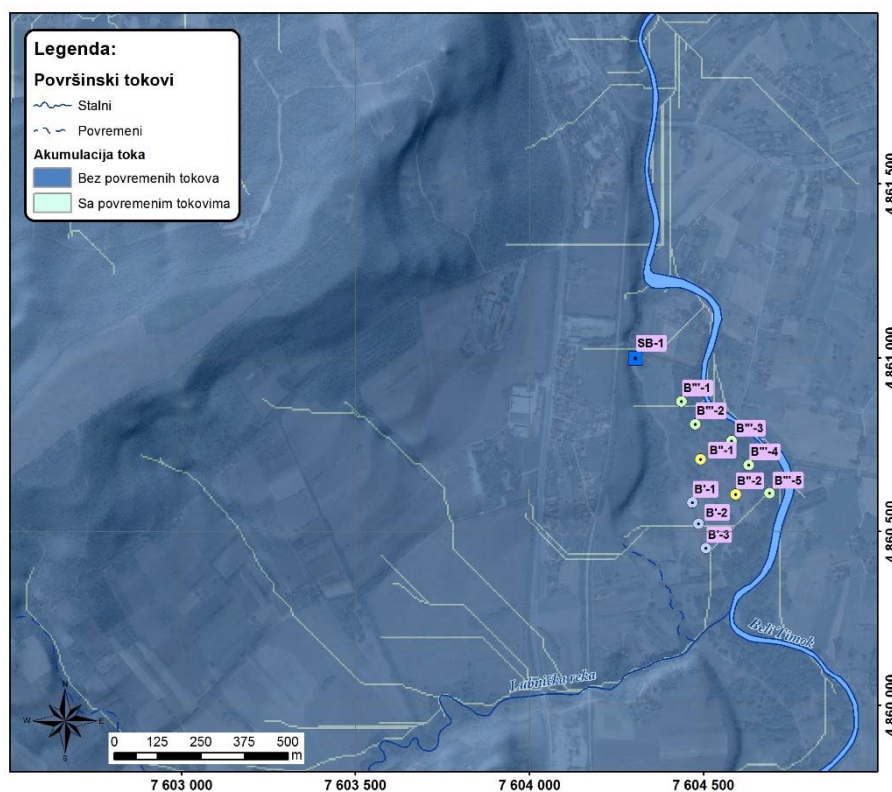
9.10.3. Određivanje vremena kretanja površinskih voda

Prvi korak u analizi kretanja površinske vode ka izvorištu „Beli Timok“ predstavlja priprema hidrološki ispravnog elevacionog (DEM) modela terena. DEM model terena koji je pripremljen interpolacijom topografskih izohipsi, kota terena i rečnih tokova je analiziran korišćenjem oleate pravca nagiba terena (*Flow Direction*) i alatke *Sink* (*Hydrology tools, Spacial analyst* ekstenzija, Esri, 2014). Nakon što su detektovane mikrodepresije, iste su ispunjene alatkom *Sink*, pri čemu je dobijen hidrološki ispravan DEM model terena. Na bazi ovako pripremljenog modela terena ponovo je napravljena oleata pravca nagiba terena primenom alatke *Flow Direction* (slika 9.31).



Slika 9.31. Karta pravca kretanja (tečenja) površinskih voda

Korišćenjem oleate pravca kretanja površinskih voda i primenom alatke *Flow Accumulation* dobijena je karta na kojoj su izdvojene trase povremenih tokova po kojima se javlja kanalsko tečenje površinskih voda (slika 9.32).

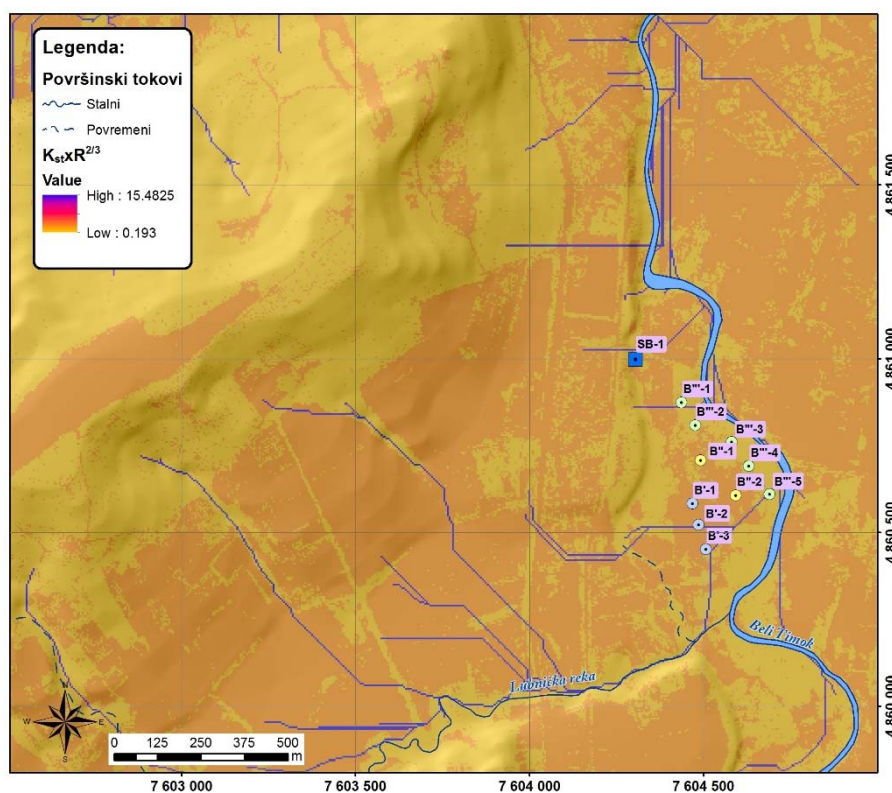


Slika 9.32. Karta tokova sa kanalskim tečenjem površinskih voda

Izdvojeni tokovi su rangirani, pri čemu su za svaku klasu povremenog vodotoka zadate različite vrednosti hidrauličkog radijusa i koeficijenta K_{st} (inverzna vrednost Maningovog koeficijenta hrapavosti). Za najmanje tokove je korišćena vrednost hidrauličkog radijusa od $r=0,03$ m, dok je za vodotoke drugog reda korišćena vrednost hidrauličkog radijusa od $r=0,12$ m. Za kanale ovih tokova korišćena je vrednost Maningovog koeficijenta hrapavosti za hrapave površine $n=0,05$ ($K_{st}=20$).

Za ostatak područja istraživanja (u delovima gde se ne javlja kanalsko tečenje) vrednosti K_{st} su zadavane prema vegetacionom pokrivaču ($K_{st}=2$ tj. $n=0,5$ za šumovita područja i $K_{st}=5$ tj. $n=0,2$ za travnata područja i kultivisana tla sa ostatkom vegetacije).

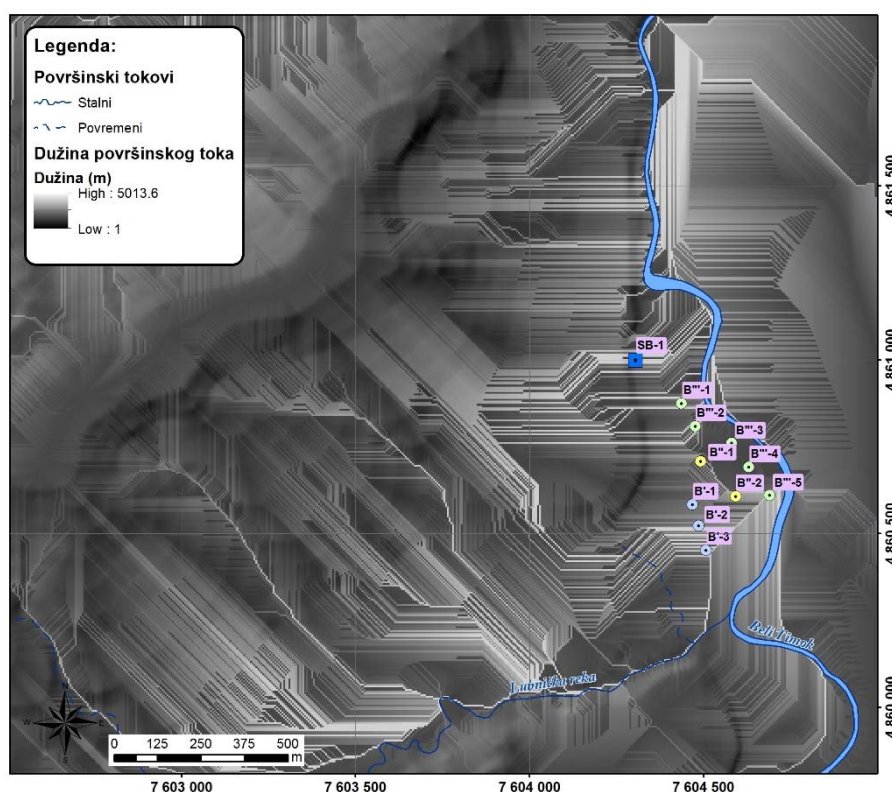
Na bazi zadatih vrednosti za K i r dobijena je karta $K_{st} \cdot r^{2/3}$ za čitavo područje (slika 9.33).



Slika 9.33. Karta $K_{st} \cdot r^{2/3}$

Za dobijanje karte brzine tečenja površinske vode neophodno je bilo pripremiti i kartu dužina kretanja površinskih tokova. Za te potrebe korišćena je alatka *Flow Length* (*Hydrology Toolset, Spatial Analyst Extension*). Dobijena karta (slika 9.34) u svakoj tački pokazuje ukupnu dužinu povremenog ili stalnog vodotoka uzvodno od te tačke. Ova karta je bila neophodna u proračunu brzine kretanja površinskih voda kako bi se za tokove dužine do 100 m primenila jednačina tečenja po ravni (*sheet flow*), a nakon toga jednačina za plitki koncentrisani tok i jednačina za kanalsko tečenje.

Poslednja komponenta u proračunu brzine kretanja površinskih voda jeste oleata nagiba terena (izražena u m/m). Ova oleata je ranije pripremljena i korišćena u proračunu faktora ULAZ (slika 9.27).

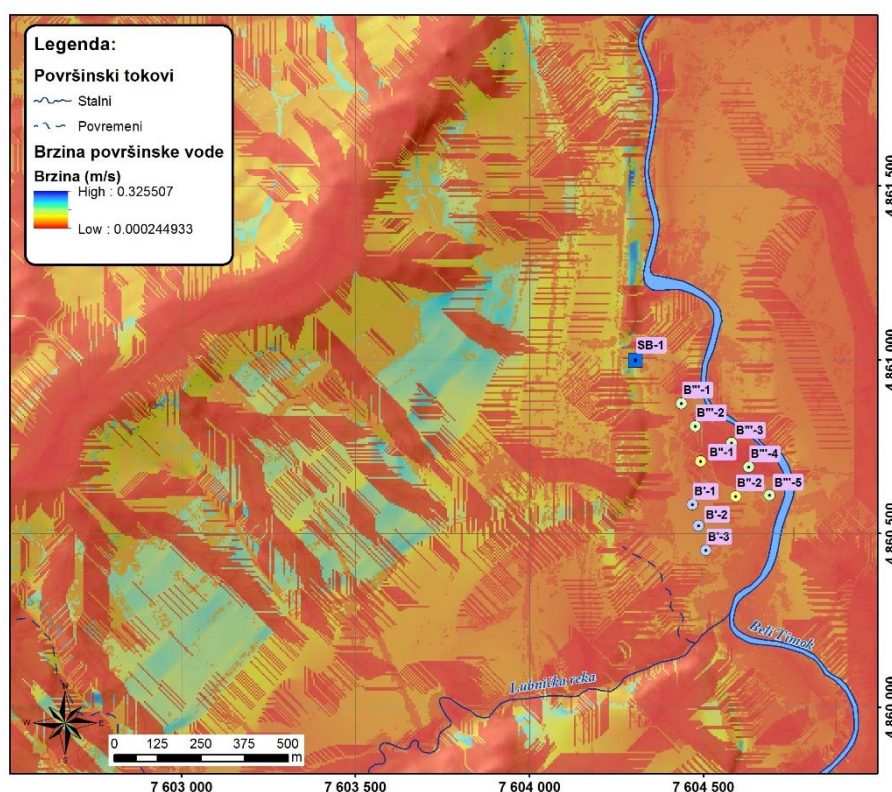


Slika 9.34. Karta dužina površinskih tokova

Za proračun brzine kretanja površinske vode korišćena je alatka *Raster Calculator*, pri čemu je u svakoj tački izračunata brzina u zavisnosti od tipa tečenja. Pri proračunu je korišćena sledeća jednačina:

$$BrzinaTecenja.tif = Con("FlowLenght.tif" > 100, "KxR.tif" * SquareRoot("SlopePercent.tif"/100), ("FlowLenght.tif" * 10 * (("SlopePercent.tif"/100) ^ 0.4))/(3600*0.091*((1/"KxR.tif") ^ 0.8) * ("FlowLenght.tif" ^ 0.8))$$

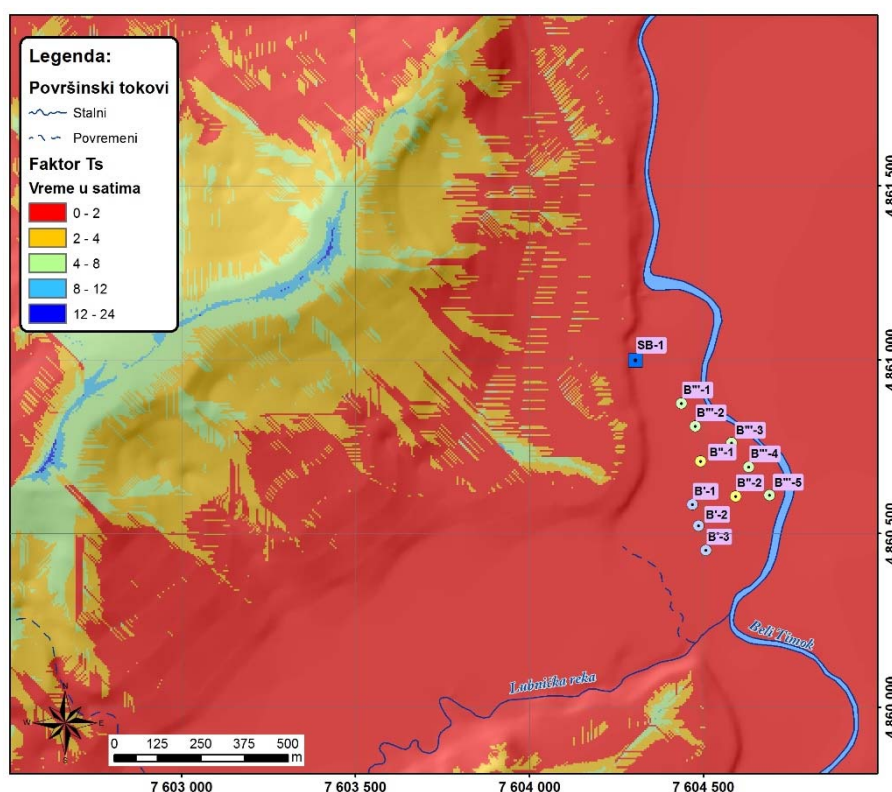
Na ovaj način je dobijena karta brzina površinskih voda (slika 9.35), pri čemu je za tokove dužine do 100 m brzina računata po jednačini za tečenje po ravni (*Sheet Flow*), dok je za ostatak terena brzina računa preko Manningove jednačine za tečenje po ravni i za kanalsko tečenje.



Slika 9.35. Karta brzina površinskih voda

Poslednji korak u određivanju vremena kretanja površinske vode ka izvoru podzemnih voda „Beli Timok“ jeste primena alatke *Flow Length*, pri čemu je za svaku tačku kao težinski faktor korišćena inverzna vrednost brzine kretanja površinske vode. Pri proračunu je vreme računato od kontakta aluvijona i rečne terase, pa do početka površinskog toka, tako da je simulirano realno vreme koje je potrebno da površinska voda iz neke tačke doputuje do aluvijalne izdani. Karta faktora t_s je prikazana na slici 9.36.

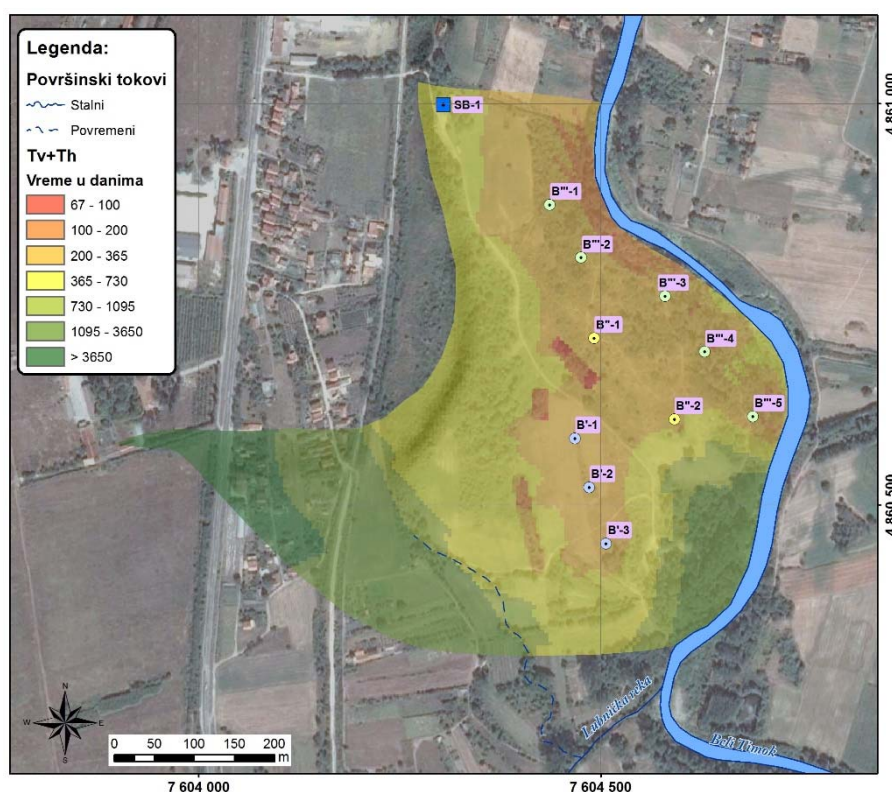
Karta faktora t_s pokazuje da površinske vode koje se slivaju niz brdo Kraljevica doputuju do izvorišta veoma brzo, najčešće za period do 12 h. Razlog ovome je mala udaljenost najviših vrhova do kontakta sa aluvijalnim sedimentima (prosečna daljina oko 1 km). Prosečna brzina kretanja površinske vode od 0,1 m/s je posledica nagiba terena zapadno od izvorišta. Sa ovakvim dužinama putanja, kao i brzinom kretanja površinski voda, sasvim je očekivano da površinske vode mogu za relativno kratko vreme stići do samog izvorišta.

Slika 9.36. Karta faktora t_s

9.10.4. Izrada finalne karte ranjivosti izvorišta podzemnih voda

U analizi ukupne ranjivosti izvorišta podzemnih voda prvo je sračunato ukupno vreme putovanja vode za područje rasprostranjenja aluvijalnih naslaga. Ovo vreme je dobijeno alatkom *Raster Calculator* prostim sabiranjem vrednosti za t_v i t_h u svakoj tački aluvijalne ravni (slika 9.37).

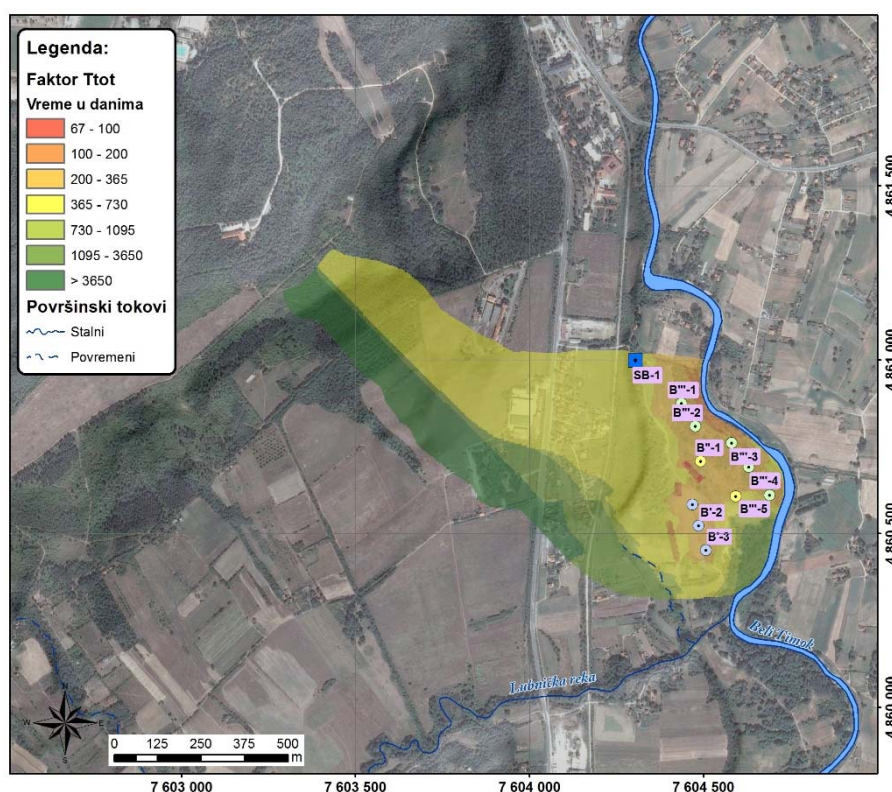
Na dobijenoj karti se vidi da je za najveći deo izvorišta dobijena vrednost od 200 dana pa do 2 godine, što je većim delom rezultat sporog transporta vode kroz nadizdansku zonu. U jugozapadnom delu izvorišta vrednosti vremena putovanja prelaze 3 godine, što je posledica spore filtracije podzemne vode kroz izdan. Najmanje vrednosti ukupnog vremena su dobijene za infiltracione bazene, kao i za područje neposredno pored reke Beli Timok.



Slika 9.37. Karta ukupnog vremena putovanja vode ka vodozahvatnim objektima za područje sliva izvorišta u aluvijalnoj ravni

Poslednji korak u analizi ukupnog vremena kretanja površinskih i podzemnih voda ka vodozahvatnim objektima jeste uključivanje i komponente površinskog kretanja vode sa brda Kraljevica. Na vrednosti koje su dobijene analizom vremena površinskog kretanja vode (faktor t_s slika 9.36) dodate su vrednosti faktora t_v+t_h u tačkama koje se nalaze na obodu aluvijona gde prestaje površinsko kretanje vode i gde počinje infiltracija.

Dobijena karta (slika 9.38) pokazuje slične rezultate kao i prethodno prikazana karta (slika 9.37), pri čemu je sada uključen i deo terena koji se spira prema izvorištu „Beli Timok“. I pored toga što se površinsko kretanje odvija veoma brzo (manje od 1 dana), dodavanjem vremena koje je potrebno da se ta ista površinska voda infiltrira i horizontalno doputuje do vodozahvata su dobijene vrednosti od preko godinu dana.



Slika 9.38. Karta ukupnog vremena putovanja vode ka vodozahvatnim objektima (t_{10})

Dugogodišnja eksploatacija izvorišta ukazala je na odličan kvalitet podzemnih voda, što ide u prilog tezi da nadzidanska zona u zoni izvorišta ima dobru samoprečišćavajuću moć. Čak i u slučaju pojave kontaminanata u zoni izvorišta, usled dugog transporta do izdanske zone, isti se zadržavaju u zoni aeracije i vremenom umanjuju različitim procesima. Interesantna je činjenica da u toku dvogodišnjeg osmatranja kvaliteta podzemnih voda nije uočena njihova bakteriološka neispravnost, iako je to čest slučaj za izvorišta koja kaptiraju aluvijalne nanose. Vreme putovanja vode infiltrirane kroz nadzidansku zonu je veće od vremena opstanka mikroorganizama, pa samim tim imamo i kontinualan kvalitet podzemnih voda.

Rezultati prikazani na karti ukupnog vremena kretanja podzemnih voda do vodozahvatnih objekata ukazuju na to da je izvorište sa površine terena najranjivije na lokacijama napuštenih infiltracionih bazena. Na ove delove terena usmerena je najveća pažnja u sprečavanju aktivnosti koje mogu da ugroze kvalitet podzemnih voda. Međutim, jedna ovakva analiza pokazuje kolika je opasnost od zagađivanja podzemnih voda u slučaju

iskopavanja šljunka i odstranjivanje zaštitnog povlatnog sloja. U praksi su veoma česti primeri nekontrolisanog eksploataisanja aluvijalnih sedimenata. Na ovakvim lokacijama se vertikalno vreme putovanja t_v smanjuje na minimum, pa se zaštita svodi isključivo na filtraciju vode kroz izdansku zonu. Ovo posebno može biti opasno na obodu aluvijalnih sedimenata, jer se brzim transportom površinske vode mogu veoma lako transportovati i kontaminanti do same izdani.

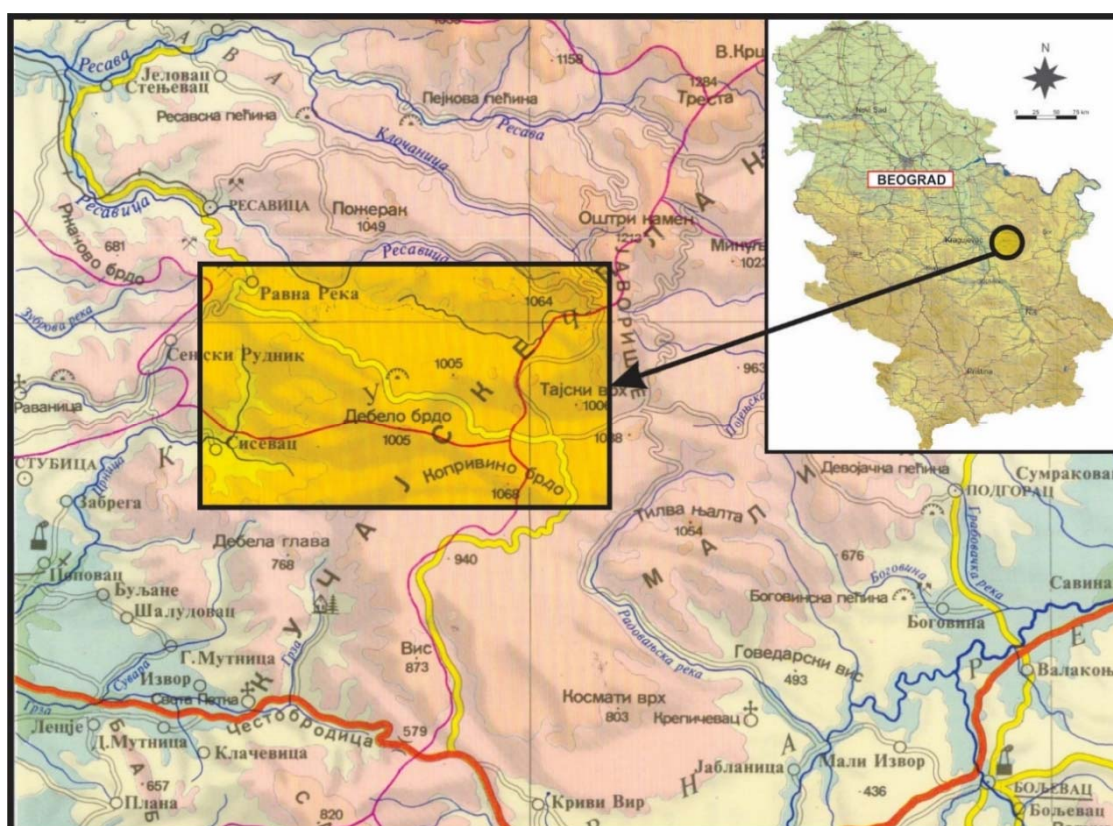
10. ZAŠTITA PODZEMNIH VODA IZVORIŠTA „VRELO CRNICE“

10.1. Geografski položaj vrela Crnice

Vrelo Crnice nalazi se u lokalnosti Sisevac oko 130 km jugoistočno od Beograda, odnosno oko 20 km istočno od Čuprije (slika 10.1). Njegov sliv pripada planinskom masivu u stručnoj literaturi poznatom kao zapadni Kučaj. U neposrednoj blizini vrela nalazi se srednjevekovni manastir Sisevac.

Vrelo Crnice drenira karstifikovane gornjojurske i donjokredne krečnjake. U lokalnosti Sisevac gde ističe, od vrela nastaje reka Crnica, desna pritoka Velike Morave, jedini stalni vodotok u ovom području.

Asfaltnom saobraćajnicom vrelo i njegovo okruženje su povezani sa Čuprijom koja predstavlja administrativni centar u ovom delu Srbije.



Slika 10.1. Geografski položaj sliva vrela Crnice

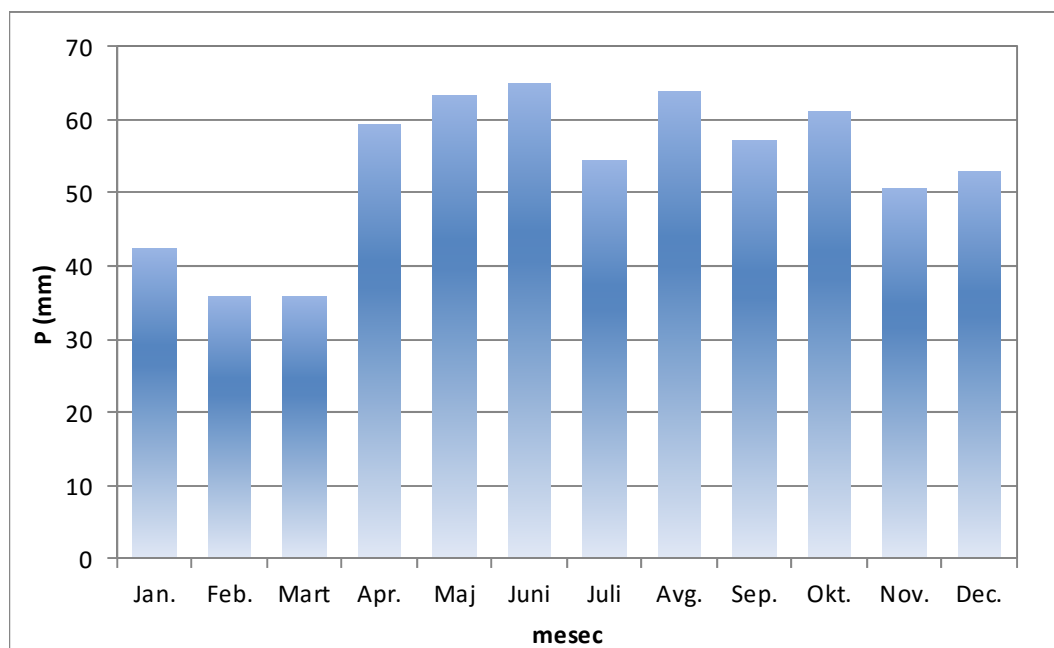
10.2. Klimatske karakteristike

U slivu vrela Crnice vlada umereno kontinentalna klima sa toplim letima i hladnim zimama, sa jasno izraženim prelaznim godišnjim dobima. Viši delovi terena (sa visinama preko 900 m) imaju karakteristike planinskog tipa klimata. Najbliža klimatološka stanica sa nadmorskom visinom približno jednakoj Sisevcu je Žagubica (314 mm). U daljem tekstu dat je prikaz osnovnih klimatskih parametara (padavine i temperatura vazduha). Srednja godišnja vrednost padavina za stanicu Žagubica iznosi 641,6 mm.

Padavine. Za potrebe analize pluviometrijskog režima i njegovog uticaja na režim podzemnih i površinskih voda istražnog područja korišćeni su podaci Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije sa klimatološke stanice Žagubica u periodu od 1991–2010. god (tabela 10.1, slika 10.2). Na osnovu prezentovanih podataka, može se konstatovati da raspodela padavina preko godine pokazuje modifikovani kontinentalni režim, kod koga su maksimalne srednje mesečne količine padavina u junu i avgustu, a meseci sa najmanje padavina su februar i mart.

Tabela 10.1. Prosečne mesečne i godišnja suma padavina u mm za klimatološku stanicu Žagubica za period 1991 – 2010. godina (RHMZ Srbije)

	Jan.	Feb.	Mart	Apr.	Maj	Juni	Juli	Avg.	Sep.	Okt.	Nov.	Dec.	P _{god}
P_{sr}	42,3	35,8	35,9	59,3	63,3	64,9	54,4	64,0	57,2	61,1	50,4	52,9	641,6
P_{min}	7,3	8,2	3,1	2,5	23,4	7,3	4,7	0,0	8,0	1,9	10,3	13,9	464,1
P_{max}	100,5	96,3	79,6	87,1	161,3	116,5	154,2	191,2	149,9	251,6	114,7	105,9	880,3



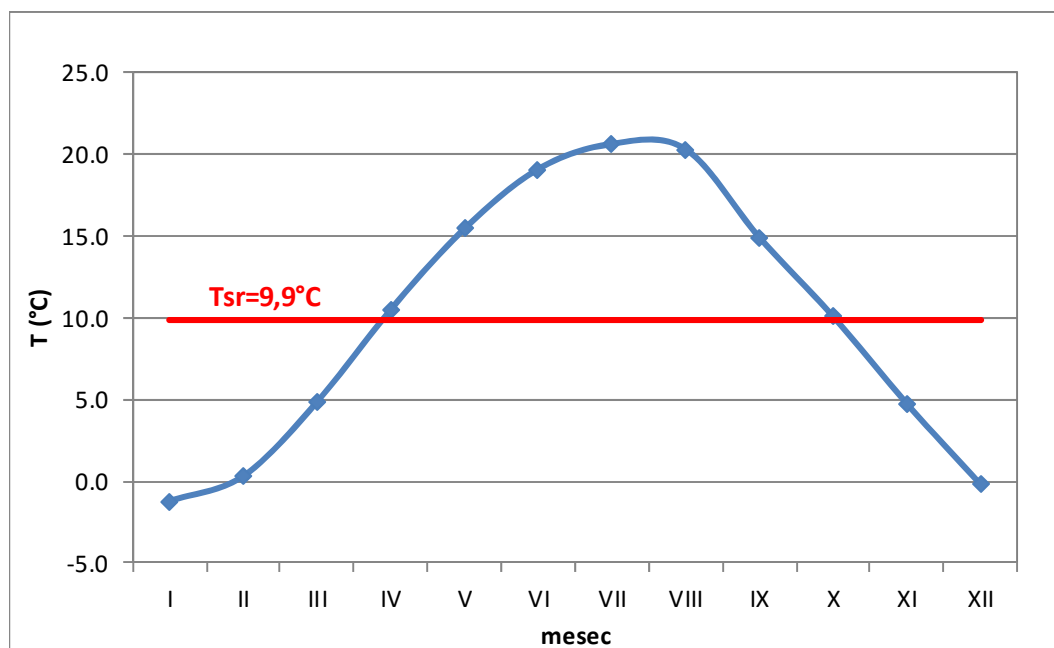
Slika 10.2. Histogram srednjih mesečnih suma padavina za klimatološku stanicu Žagubica za period 1991 – 2010. godina (RHMZ Srbije)

Temperatura vazduha.

Za definisanje temperaturnog režima u istražnom području korišćeni su podaci merenja temperature vazduha sa klimatološke stanice Žagubica (314 mm) za period 1991-2010. godine. Srednja višegodišnja temperatura vazduha za osmatrani period na ovoj stanici iznosi 9,9 °C. Najniže srednje mesečne temperature vazduha vezane su za mesec januar, a najviše za mesec juli (tabela 10.2, slika 10.3).

Tabela 10.2. Prosečne mesečne i srednja višegodišnja temperatura vazduha (°C) za klimatološku stanicu Žagubica za period 1991 – 2010. godina (RHMZ Srbije)

	Jan.	Feb.	Mart	Apr.	Maj	Juni	Juli	Avg.	Sep.	Okt.	Nov.	Dec.	T _{god}
T _{sr}	-1,2	0,3	4,8	10,5	15,4	19,1	20,6	20,3	14,9	10,1	4,7	-0,2	9,9
T _{min}	-4,2	-5,8	-0,2	4,8	11,6	17,2	18,3	17,6	11,9	6,0	-2,4	-4,4	8,5
T _{max}	3,7	4,8	8,7	13,1	17,7	20,8	23,2	23,4	19,0	12,8	10,3	2,5	11,4



Slika 10.3. Dijagram srednjemesečnih temperatura vazduha (°C) za klimatološku stanicu Žagubica za period 1991 – 2010. godine (RHMZ Srbije)

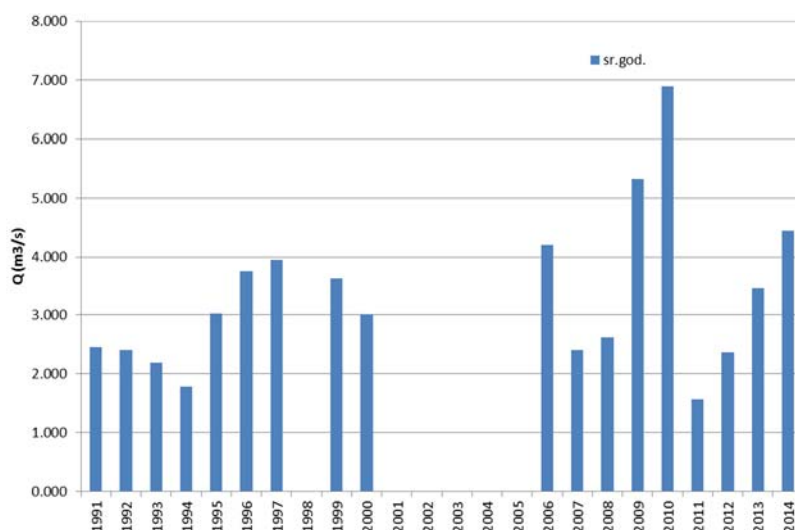
10.3. Hidrografske i hidrološke karakteristike

Reka Crnica predstavlja najveći tok u neposrednom području istraživanja. Formira se na račun isticanja iz razbijenog karstnog vrela u Sisevcu, istočno od Čuprije, u oblasti zapadnog Kučaja. Vrelo ističe na 348 m nadmorske visine. Površina sliva Crnice do ušća u Veliku Moravu iznosi 122 km².

Crnica u svom izvorišnom delu prima nekoliko manjih tokova koji se formiraju na račun isticanja iz karstnih vrela: Jablanički potok, Daršljivica i Jeremijski potok koji su najveći povremeni površinski tokovi u području istraživanja.

Za analizu hidroloških karakteristika rečnog toka Crnice, korišćeni su podaci hidroloških merenja na mernom profilu "Paraćin" u Paraćinu, formiranom od strane RHMZ Srbije. Srednji višegodišnji proticaji Crnice iznose 3,44 m³/s, što odgovara modulu oticaja od 10,15 l/s/km². Minimum srednje mesečnih proticaja zabeležen je u septembru 2014. godine (0,117 m³/s), a maksimalni srednje mesečni proticaj u martu

2009. godine ($21,6 \text{ m}^3/\text{s}$), što je 185 puta veća vrednost u odnosu na najmanju zabeleženu vrednost za posmatrani period.



Slika 10.4. Dijagram srednjih godišnjih proticaja na reci Crnici u m^3/s , za period merenja 1991-2014. godine na vodomernom profilu "Paraćin" (po podacima RHMZ)

Režim Crnice uslovljen je režimom karstnih vrela koja formiraju kako tok Crnice, tako i njenih pritoka. Maksimalni srednje mesečni proticaji Crnice javljaju se u periodu februar – april koji se poklapa sa topljenjem snega u slivu, a minimalni u periodu jul-oktobar, u vreme minimalnih količina atmosferskih padavina.

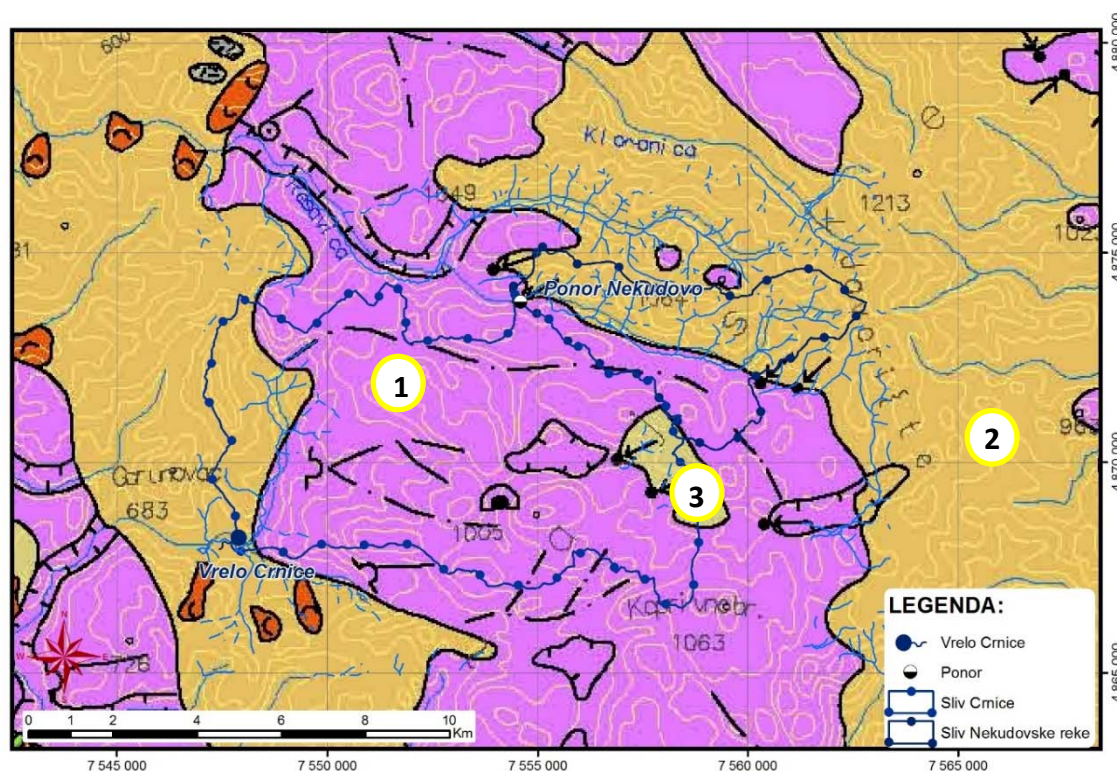
U severnom delu područja istraživanja protiče Nekudovska reka, nekadašnja leva pritoka reke Resavice. Ova reka se formira od nekoliko manjih izvora koji dreniraju slabo ispucale paleozojske stene zapadnog Kučaja. Nakon desetak kilometara tečenja preko nekarbonatne podloge, reka stupa na podlogu izgrađenu od karstifikovanih karbonatnih stena, pri čemu dolazi do kompletnog gubitka vode u ponor Nekudovske reke. Ponor se nalazi na nadmorskoj visini od 630 m n.m. Mesto poniranja predstavlja okapinu formiranu u dnu krečnjačkog odseka visine oko 30 m. Otvor ponora je mali, te ne može pri jačem doticanju svu vodu primiti. To dovodi do ujezeravanja, a ponekad i do prelivanja niz suhu dolinu (Cvijić, 1895).

Opitom trasiranja ponora Nekudovske reke natrijum-fluoresceinom, utvrđena je podzemna piraterija vrela Crnice u odnosu na topografsku pripadnost Nekudovske reke slivu Resavice (Palavestrić, 1970; Petrović, 1986).

10.4. Geomorfološke karakteristike

Reljef terena bliže i šire okoline Sisevca je tipično planinski sa nadmorskim visinama od oko 345 m n.m. u području isticanja vrela Crnice, pa do preko 1.000 m n.m. u krajnjim istočnim delovima sliva.

U morfološkom pogledu najveći deo slivnog područja vrela Crnice karakteriše se karstnim reljefom (slika 10.5). Razvijeni su mnogi oblici karstnog reljefa, i površinski i podzemni.



Slika 10.5. Geomorfološka karta šire okoline sliva vrela Crnice (prema Geomorfološkoj karti Srbije 1:300 000) 1 – područje razvoja kraških oblika; 2 – područje intenzivnog spiranja i jaružanja; 3 – područje umerenog spiranja i jaružanja;

Rečna mreža na nekarbonatnoj, odnosno podlozi od paleozojskih škriljavih stena je normalno razvijena. Pripada slivu Nekudovske reke, površine oko 20 km², koja nastaje od nekoliko manjih tokova. Ima duboko zasečeni tok i blage dolinske strane (Maksimović and Mrvaljević, 1958; Petrović, 1986). Nadmorske visine u slivu kreću se od 1005 m n.m. na kontaktu sa karstnom površi Male Brezovice (karbonatni tereni) do 1062 m n.m. u najvišim delovima izgrađenim od paleozojskih metamorfita (nekarbonatni tereni). Posle veoma kratkog toka na karbonatnoj podlozi reka ponire u jednu nisku, a široku pećinu u okviru karstne površi (slika 10.6).



Slika 10.6. Ponor Nekudovske reke (foto S. Magazinović)

Krečnjačka površ isprepletana suvim dolinama i izdubljena brojnim vrtačama ima nadmorsku visinu 800-1005 m n.m.. Javljuju se skoro svi karakteristični površinski (škrape, vrtače, uvale) i podzemni oblici (jame i pećine). Na krečnjačkoj podlozi nema stalnih vodotoka. Skoro sva količina atmosferskih padavina nakon isparavanja ponire (Marković, 1954; Milojević, 1962).

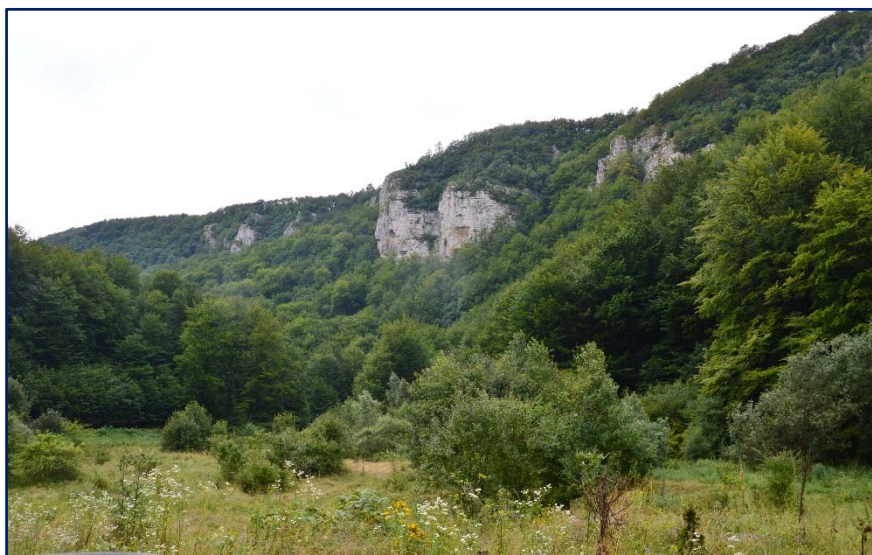
Neposredno pored vrela Crnice nalazi se pećina u Sisevcu. Predstavlja više kanale, tj. povremeno aktivne kanale vrela Crnice. Na samom ulazu u objekat sa leve strane zapaža se mali otvor koji predstavlja ulaz u stalno aktivnu zonu ovog vrela. Glavni kanal je dug

oko 52 m i tunelskog je tipa, a celi speleološki objekat se može svrstati u povremeno aktivne izvorske objekte. Ukupna dužina pećinskih kanala je 138 m (Milanović, 2012).

Aluvijalna ravan reke Crnice je jedini savremeni akumulativni oblik u području istraživanja, koji predstavlja kontrast u morfološkom pogledu okolnom planinskom reljefu. Nastala je linijskom erozijom usled velike količine vode na vrelu Crnice, usled male otpornosti permskih peščara i bujičnog karaktera Jablaničkog i Jeremijskog potoka, koji su naneli velike količine vučenog materijala nizvodno od vrela Crnice.

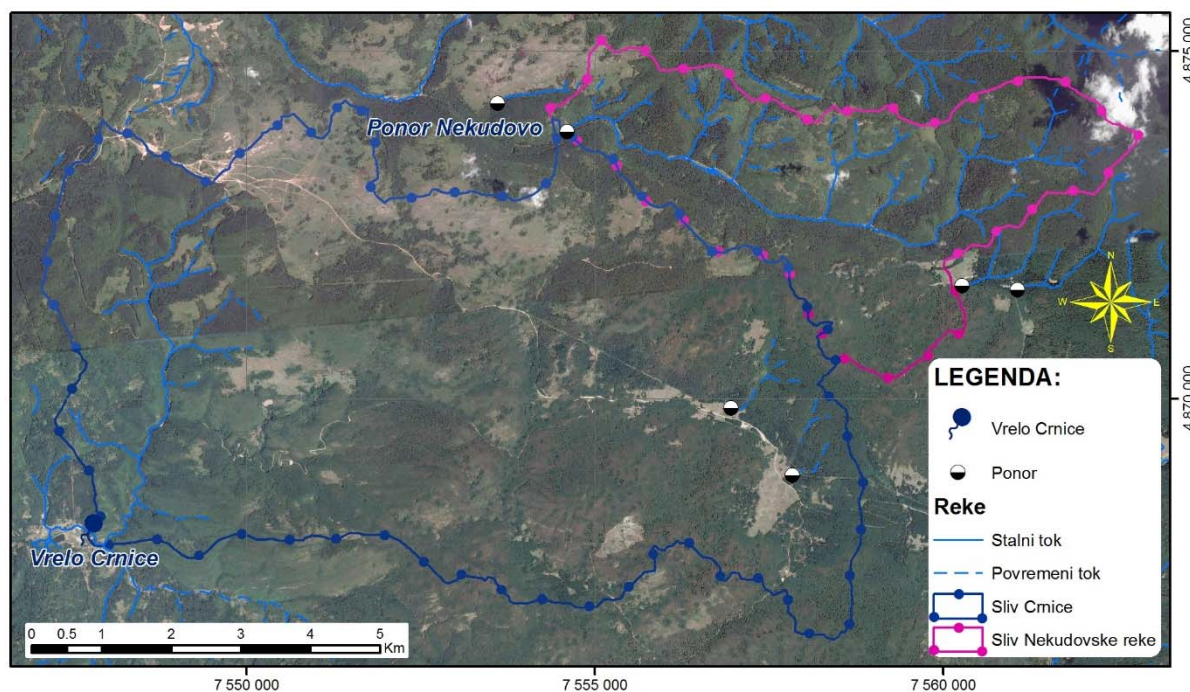
10.5. Vegetacioni pokrivač

Najveći deo istražnog područja se karakteriše prisustvom guste šume koja se sastoji od velikog broja raznovrsnog drveća. Guste šume su zastupljene u centralnim i istočnim delovima istražnog područja. Nadmorske visine ograničavaju prisustvo četinarara, pa su šume sastavljene od listopadnog drveća, pre svega bukve, a zatim i jasena, jasike (slika 10.7).



Slika 10.7. Gusta šumska vegetacija u slivu Nekudovske reke (foto S.Magazinović)

U severnom delu područja istraživanja, u okolini naselja Ravna Reka (područje Pasuljanske livade – Dobra voda) veći deo terena je prekriven niskom travnatom vegetacijom (slika 10.8).



Slika 10.8. Satelitski snimak sliva vrela Crnice (Google Maps, 2015)

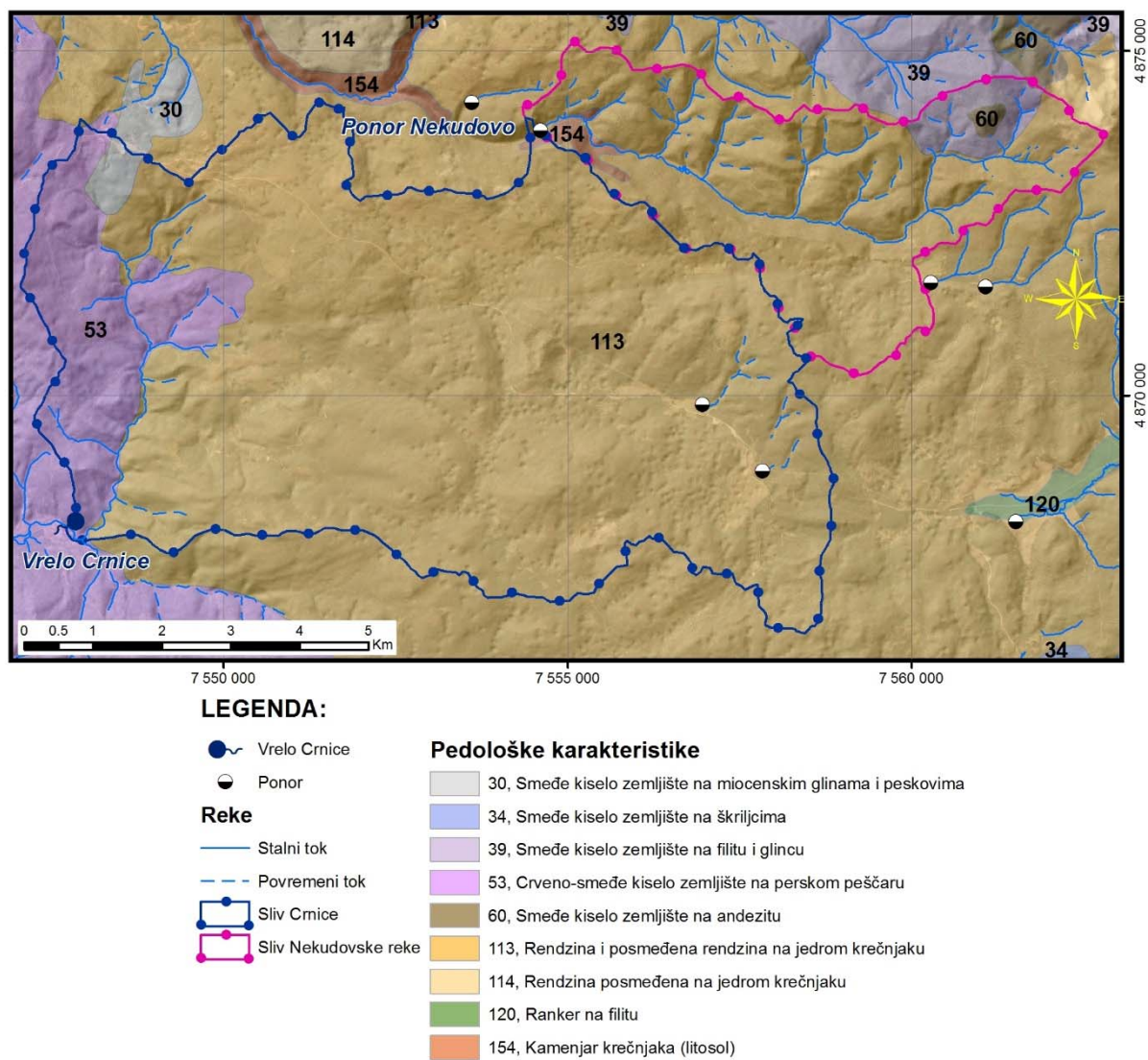
10.6. Pedološke karakteristike tla

Analiza pedoloških karakteristika istražnog područja prikazana je na bazi podataka sa Osnovne Pedološke karte 1:50000 (listovi Petrovac 4 i Paraćin 2). Detaljne karakteristike izdvojenih tipova zemljišta date su na osnovu podataka koje prikazuju Antić i dr. (1987).

Prema pedološkim karakteristikama terena izdvojeni su sledeći tipovi zemljišta (slika 10.9):

- smeđe kiselo zemljište na miocenskim glinama i peskovima,
- smeđe kiselo zemljište na škriljcima,
- smeđe kiselo zemljište na filitima i glincima,
- smeđe kiselo zemljište na andezitu,

- crveno-smeđe kiselo zemljište na perskom peščaru,
- rendzina i posmeđena rendzina na jedrom krečnjaku,
- posmeđena rendzina na jedrom krečnjaku,
- ranker na filitu i
- kamenjar krečnjaka.



Slika 10.9. Pedološka karta sliva vrela Crnice

(po autorima osnovne pedološke karte 1:50 000, listovi Petrovac 4 i Paraćin 2)

Sva zastupljena zemljišta na istražnom području moguće je svrstati u tri grupe.

Prvu grupu zemljišta čine smeđa kisela zemljišta. Zajednička osobina im je jače ili slabije izražena smeđa boja, žuto smeđa ili rudo smeđa koja potiče od hidratiranih oksida gvožđa čije je nastajanje rezultat dezintegracije matičnog supstrata i prelaska primarnih u sekundarne minerale (Antić, 1987). Kisela smeđa zemljišta se odlikuju dubinom od oko 100 cm, lakim mehaničkim sastavom u kome glinovita frakcija ne prelazi 20 %, dok je sadržaj peskovite frakcije preko 50 %. Kisela smeđa zemljišta formirana na podlozi od permskog peščara imaju crvenkasto-smeđu boju zbog crvene boje matične stene.

Drugu grupu čine rendzine čije rasprostranjenje se uglavnom vezuje za rasprostranjenje krečnjaka. Karakteriše ih mala debljina (do 40 cm) i visok sadržaj humusne materije (rendzine su podtip crnica). U pojedinim delovima krečnjačkih terena razvoj zemljišta je još uvek u početnoj evolucionoj fazi, pa je u tim delovima na pedološkoj karti zemljište označeno kao kamenjar krečnjaka (litosol).

Trećoj grupi zemljišta pripadaju rankeri koji imaju veoma malo rasprostranjenje u krajnjem istočnom delu područja istraživanja. To su humusno-silikatna zemljišta male debljine i velikog sadržaja peskovite frakcije.

10.7. Geološka građa i tektonika terena

Najstarije otkrivene stene u širem istražnom području su paleozojske starosti, a najmlađe tvorevine kvartarne starosti (slika 10.10).

Paleozoik (Pz)

Od paleozojskih sedimenata paleontološki su dokazane i izdvojene tvorevine ordovicijuma, silura, devona i perma.

Ordovicijum (O). Tvorevine ordovicijuma su na površini terena otkrivene severoistočno od Sisevca. Predstavljene su filitima, argilošistima i peščarima. Peščari se nalaze u nižim

delovima stuba u vidu paketa slojeva sočivastog načina pojavljivanja. Viši delovi stuba su izgrađeni od argilofilita i filita sa ređim sočivima laporaca. Imaju jasno izraženu slojevitost sa mestimičnim pojavljivanjem slojnog klivaža. Debljina ordovicijumskih tvorevina iznosi oko 700 m.

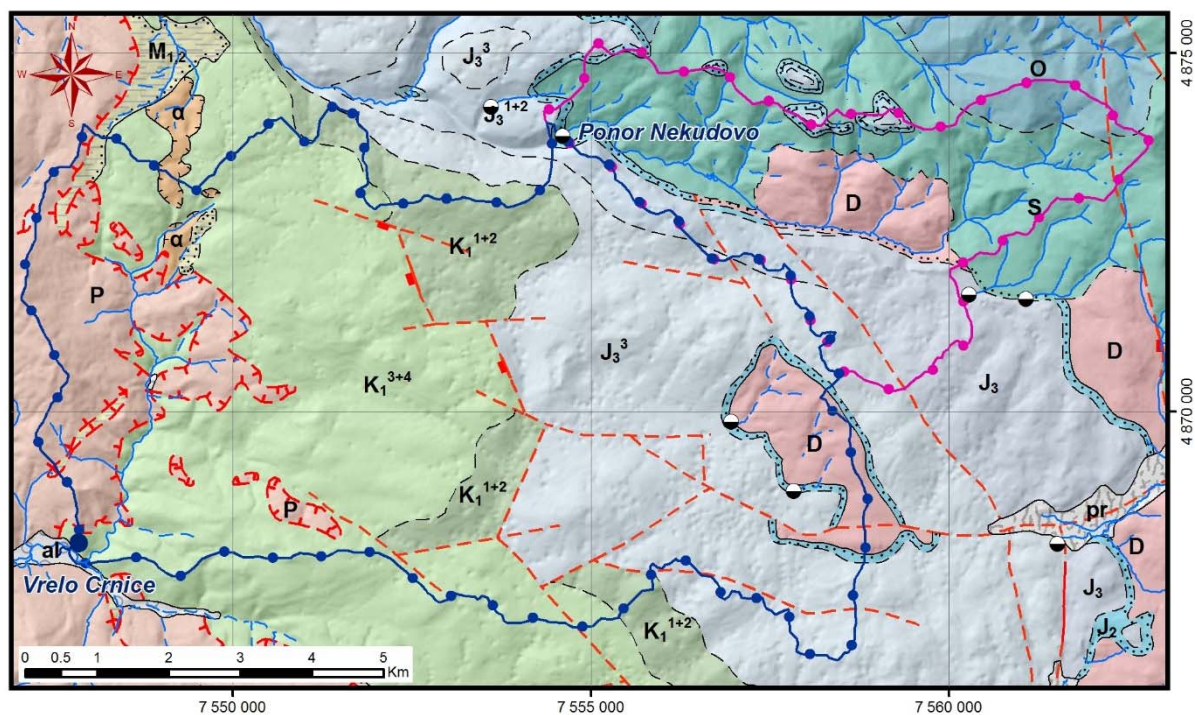
Silur (S). Silurski smetamorfti su otkriveni u jezgru Kučaja. Predstavljani su metapeščarima, argilošistima, lilitima, metamorfisanim glincima i krečnjacima koji su u pojedinim lokalnostima znatno ubrani. Vodonepropusni su, a u njihovoj površinskoj raspadini se formira slaba izdan. Debljina ovih sedimenata iznosi maksimalno do 400 m.

Devon (D). U području Troglan Bara - Mala Brezovica devonske stene su otkrivene u vidu erozionog prozora, odnosno oaze u jurskim sedimentnim stenama na površini od oko 3 km². Predstavljaju vidljivi zapadni deo jezgra antiklinale Kučaja i Beljanice. Devonske tvorevine su predstavljene peščarima koji imaju dominantno učešće, sa proslojcima konglomerata i metamorfisanih peskovitih glinaca u naizmeničnom smenjivanju. Debljina kompleksa devonskih tvorevina je veća od 1.000 m (Veselinović et al., 1970).

Perm (P). Preko karbonatnih stena Kučaja, na zapadu u vidu navlake leže mlađe paleozojske stene predstavljene permskim crvenim peščarima. To su tvorevine kontinentalno-pustinjskog tipa velike debljine izgrađene od srednjozrnih i sitnozrnih peščara crvene boje. Na osnovu podataka dobijenih bušenjem i rudarskim radovima, kao i površinskim ispitivanjima, navlačenje crvenih peščara se pored urgonskih krečnjaka ispoljava i preko autohtonog slatkovodnog miocena (Nešić, 1957; Maksimović, 1956).

Mezozoik (Mz)

Stenske mase mezozojske starosti izdvajaju se kao najvažnije za analizirano karstno vrelo Crnice, jer u njihovom sastavu dominiraju karbonatni sedimenti srednje i gornje jure i donje krede (slika 10.10, slika 10.11). One imaju i najveće prostranstvo, ne samo u području istraživanja, već i u njegovoj široj okolini.

**LEGENDA:**

- Vrelo Crnice
- Ponor

Reke

- Stalni tok
- Povremeni tok
- Sliv Crnice
- Sliv Nekudovske reke

Geološke granice

- Normalna granica, utvrđena
- Normalna granica, pokrivena ili nesigurno locirana
- Erozijska ili tektonsko-erozijska granica, utvrđena
- Erozijska ili tektonsko-erozijska granica, pokrivena
- Granica intruziva, utvrđena
- Granica intruziva, pokrivena
- Rased, osmatran
- Rased, pokriven ili nesigurno lociran
- Rased, pretpostavljen
- Relativno spušten blok
- Čelo navlake, pokriveno ili nesigurno locirano

Izdanak kartirane jedinice

- al; Aluvijum
- pr; Proluvijum
- M_{1,2}; Konglomerati, arkozni peščari, ugalj, laporci i gline
- α; Dacito-andenziti Ridanjsko-krepoljinske zone
- K_{1,3+4}; Krečnjaci i orbitalisni peščari, dolomiti
- K_{1,1+2}; Slojeviti i bankoviti krečnjaci
- J_{3,3}; Bankoviti i masivni krečnjaci i dolomiti
- J_{3,1+2}; Krečnjaci sa rožnacima (oksford i kimeridž)
- J₃; Neraščlanjeni krečnjaci gomje jure
- J_{2,3}; Krečnjaci i dolomiti srednje i gornje jure
- J₂; Klastiti i laporovito peskoviti krečnjaci
- P; Formacija crvenih peščara
- D; Konglomerati i peščari sa prosljocima argilošista
- S; Peščari, argilošisti, liditi, metamorfisani glinci i krečnjaci
- O; Metamorfisani peščari i argilošisti ordovicijuma

Slika 10.10. Geološka karta područja sliva vrele Crnice

(geološka podloga prema podacima Veselinović et al., 1968; Antonijević et al., 1968)

Jura (J). Na širem području istraživanja taloženje jurskih sedimenata počelo je u *srednjoj juri - dogeru (J₂)* kada su stvoreni konglomerati, peščari i laporovito-peskoviti krečnjaci debljine oko 50 m.

Kao posebna facija srednje jure sa verovatnim prelazima u gornju, izdvaja se serija dolomita i dolomitičnih krečnjaka ($J_{2,3}$) koji skoro redovno leži preko dogerskih sedimentnih stena. Mestimično dostižu debljinu do 100 m.

Gornja jura (J_3). Gornjojurske tvorevine predstavljene su različitim vrstama krečnjaka sa najvećim rasprostranjenjem istočno od Troglan Bare. U slivu vrela Crnice prisutni su oksford-kimeridžki i titonski krečnjaci.

Oksfordski i kimeridžki kat (J_3^{1+2}). Ovom delu gornje jure odgovara serija slojevitih i bankovitih krečnjaka sa rožnacima, ređe dolomita i dolomitičnih krečnjaka debljine oko 200 m.

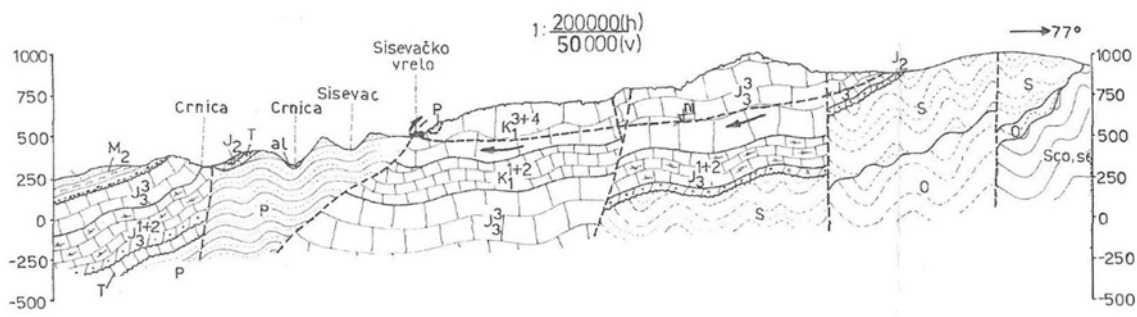
Preko krečnjaka oksforda i kimeridža leži debeo *titonski (J_3^3)* karbonatni kompleks. Sačinjavaju ga bankoviti, sprudni i subsprudni krečnjaci sa bogatom faunom karakterističnom za takvu vrstu sedimentacije. Debljina titonskih krečnjaka je velika i iznosi oko 300 m.

Kreda (K). Od svih mezozojskih tvorevina na području Kučaja, pa i u slivu vrela Crnice, najveće rasprostranjene imaju sedimentne stene donje krede. One sa titonskim krečnjacima grade kontinualnu seriju neritskih sprudnih i subsprudnih sedimenata (Veselinović et al., 1970).

Valendijski i otrivski kat (K_1^{1+2}). Iz titonskih krečnjaka postepeno se razvija serija sivobelih ili rumenkastih, do žućkastih krečnjaka, stvaranih u plitkovodnoj sredini, debljine oko 250 m, koja po položaju odgovara valendijskom i otrivskom katu, tj. neokomu. Ovaj deo donje krede je veoma siromašan fosilnim ostacima, pa je njegova granica na karti najvećim delom pretpostavljena. Krečnjaci valendijskog i otrivskog kata su pretežno kriptokristalasti, ređe oolitični, i siromašni ostacima mikrofaune.

Baremski i aptski kat (K_1^{3+4}). Ovaj deo donje krede ukupne debljine oko 300 m, po M. Veselinović i dr. (1970), karakterišu slojeviti i bankoviti krečnjaci sprudnog i subsprudnog

tipa, koji jednim delom odgovaraju tipičnoj urgonskoj faciji donje krede mediteranskih oblasti.



Slika 10.11. Geološki profil kroz područje istraživanja (Stevanović, 1991)

Tercijar (Tc)

Normalan tok sedimentacije je povremeno bio prekidan vulkanskim aktivnostima. Tako je tokom *paleogena* počelo izlivanje dacito-andezita koji pripadaju velikoj eruptivnoj zoni koja se prostire iz Rumunije preko Dunava kroz istočnu Srbiju. Na širem području istraživanja mase dacito-andezitskih stena na površini terena su najrasprostranjenije severno od Sisevca gde probijaju i metamorfišu crvene peščare i sedimente urgonske facije.

Neogen (Ng). Tvorevine neogena na području istraživanja ne zahvataju veliko rasprostranjenje. Uglavnom pripadaju miocenu i njihovo facijalno razviće je jezersko, limničko, fluvijalno-limničko i kontinentalno, a severozapadno od Popovca i brakično.

Donji i srednji miocen (M_{1,2}). Sedimenti koji odgovaraju donjem i srednjem miocenu otkriveni su na malom prostranstvu uglavnom duž kontakta beljaničkog autohtona i navlake crvenih peščara. U litološkom pogledu ovaj deo miocena je izgrađen od bazalnih konglomerata, peščara, peskovitih glina, uglja, laporaca, laporovitih krečnjaka i glina. Njihova debljina je procenjena na oko 200-250 m. U samom pojasu crvenih peščara, jugoistočno od vrela Crnice, nalaze se tektonske klippe manjih dimenzija izgrađene od liskunovitih peščara i peskovitih krečnjaka, koje su na osnovu pronađene faune svrstane u donji trijas (Nešić 1957; Maksimović, 1956).

Kvartar (Q)

Kvartarne tvorevine su vrlo malo zastupljene. Pripadaju im aluvijalni nanosi, proluvijalne naslage, bigar i sipari.

Aluvijum (al). Aluvijalni sedimenti su izdvojeni u rečnim dolinama Crnice. U sastav aluvijuma ulaze šljunkovi, peskovi i gline, uglavnom neznatne debljine.

Izvorski bigrovi (i) se mogu naći u neposrednoj blizini karstnih izvora. Nemaju veliko rasprostranjenje.

Proluvijum (pr). Proluvijum (pr) je zastupljen na području velike Brezovice. Pretežno je izgrađen od kristalastih škriljaca i paleozojskih sedimenata, peščara, argilošista, lidita, crvenih permskih peščara i ređe mezozojskih krečnjaka.

Sipar (s). Sipari su predstavljeni najčešće nevezanim isključivo krečnjačkim materijalom ili mešavinom krečnjačkog materijala i materijala iz podine. Prate strme krečnjačke odseke na Kučaju i Beljanici.

Tektonika terena

Teren bliže i šire okoline područja istraživanja odlikuje se složenim tektonskim sklopom. On se nalazi, u najširem smislu, u karpato-balkanskom luku, u jedinstvenom planinskom vencu Kučajskih planina i Beljanice. Tektonska struktura se odlikuje kraljuštima u zapadnom delu i naborima i vertikalnim dislokacijama u istočnom delu područja istraživanja.

Područje istraživanja zahvata sledeće tektonske jedinice:

- *navlaka crvenih peščara (i mezozojskih krečnjaka) i*
- *kučajsko-beljanička antiklinala.*

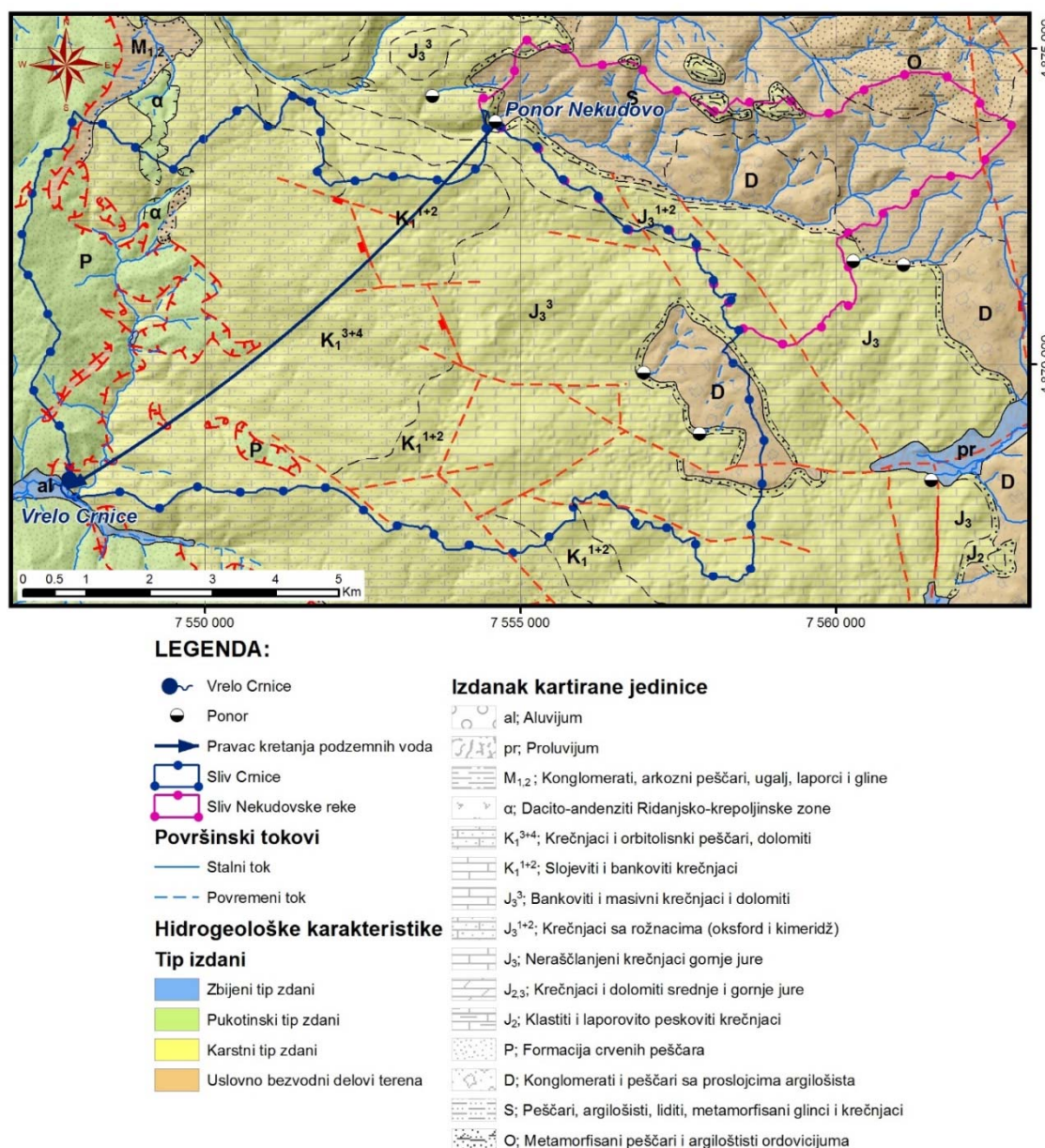
Navlaka crvenih permskih pešćara i mezozojskih krečnjaka (ravanička monoklinala) ima veliki značaj za formiranje vrela Crnice. Ova navlaka, odnosno crveni permški pešćari su navučeni preko mezozojskih krečnjaka na zapadnom obodu Kučaja, kao i u celoj gornjačkoj zoni. Navlačenje je vršeno sa zapadne strane prema istoku, veoma intenzivno i na velikim rastojanjima. To se vidi po ostacima navlake permskih crvenih pešćara zapadno od Debelog brda. Navlačenje se odigralo posle stvaranja donjomiocenskih i srednjomiocenskih slatkovodnih jezerskih sedimenata ($M_{1,2}$?), što se najbolje vidi po transgresivnom položaju gornjomiocenskih sedimenata. Ova tektonska kretanja se poklapaju sa štajerskom fazom nabiranja, u kojoj je došlo do navlačenja i kraljuštanja ravaničke monoklinala preko senjsko-resavskih donjo-srednjomiocenskih ugljunosnih sedimenata koji su i sami učestvovali u tim kretanjima.

Područje istraživanja jednim delom zahvata zapadne delove kučajske, odnosno *kučajsko-beljaničke antiklinale*, koja predstavlja autohtono područje za deo gornjačkog parahtona. Teme ove velike antiklinale čine paleozojske stene devonske, silurske i ordovicijumske starosti. Padni uglovi jurskih i donjokrednih sedimenata su relativno blagi, i u celini retko prelaze 30° . U centralnom delu Kučaja, odnosno u području temena antiklinale, slojevi su skoro horizontalni. Prisutni rasedi u području Debelog brda grade jednostavnu parketnu strukturu. Po mišljenju Martinovića (2009) postoje indicacije da je na području Sisevca, prisutan i "crnički rased", iako nije registrovan u toku izrade OGK Lista K34-008 Boljevac (Veselnović et al., 1970).

10.8. Hidrogeološke karakteristike istražnog područja

Osnovne hidrogeološke karakteristike šireg istražnog područja relativno dobro su poznate na osnovu rezultata ranijih geoloških istraživanja, pre svega kartiranja terena, geofizičkih ispitivanja, istražnog bušenja za potrebe iznalaženja uglja, podzemnih i termalnih voda. Na bazi svih istraživanja mogu se izdvojiti sledeći tipovi izdani (slika 10.12):

- zbijeni tip izdani
- karstni tip izdani
- pukotinski tip izdani i
- uslovno bezvodni delovi terena



Slika 10.12. Hidrogeološka karta područja sliva vrelo Crnice

(geološka podloga prema podacima Veselinović et al. 1968, Antonijević et al. 1968)

Zbijeni tip izdani. Formiran je u aluvijalnim nanosima reke Crnice. U sastavu pomenutih nanosa učestvuju šljunkovi, peskovi i gline. Podzemne vode se karakterišu dobrom hidrauličkom vezom sa površinskim. Prihranjivanje ove izdani je uglavnom na račun infiltracije površinskih voda Crnice, ali i infiltracijom atmosferskih voda. Izdan nema veći značaj u području istraživanja zbog male površine rasprostranjenja kao i male debljine aluvijalnih sedimenata.

Karstni tip izdani. U gornjojurskom i donjokrednom karbonatnom kompleksu formirana je prostrana karstna izdan (slika 10.12). Zastupljene su oksford-kimeridžske (J_3^{1+2}), titonske (J_3^3), valendin-otrivske (K_1^{1+2}) i urgonske (K_1^{3+4}) karbonatne stene, debljine veće od 500 m. To su različite vrste masivnih i slojevitih pretežno zoogenih krečnjaka (Nešić, 1957; Maksimović & Mrvaljević, 1958; Veselinović et al. 1970; Antonijević et al. 1970). U njima je formirana jedinstvena karstna izdan sa različitostima u pogledu hidrodinamičkih karakteristika nivoa podzemnih voda.

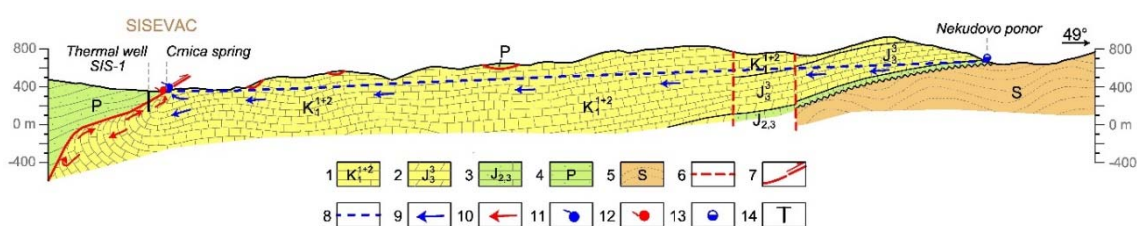
Istočno od vrela Crnice izdan je formirana u otvorenoj hidrogeološkoj strukturi, sa nivoom koji je slobodan. Zapadno od vrela, u krečnjacima preko kojih su navučeni crveni permski peščari, nivo izdani je pod pritiskom (slika 10.13). Pored karaktera nivoa podzemnih voda, podzemne vode u karstnoj izdani ispod navlake generalno imaju povećane temperature.

Prihranjivanje izdani masom (vodom) se vrši od infiltracije padavina u otvorenim karstnim terenima Kučaja, kao i direktnom infiltracijom voda površinskih tokova u ponore i ponorske zone. Najveća efektivna infiltracija voda od atmosferskih padavina je u ogolićenim krečnjačkim depresijama u reljefu (vrtače, uvale). Dna ovih depresija najčešće su prekrivena tanjim slojem crvenice i deluvijalno proluvijalnim nanosom, što umanjuje veličinu efektivne infiltracije. U sušnom periodu hranjenje izdani je veoma otežano, kada znatan deo prispelih padavina odlazi na zasićenje nadizdanske zone i evapotranspiraciju, usled povišene temperature i bujne vegetacije. Nasuprot ovom, u vlažnom periodu, uticaj gore pomenutih činilaca praktično je zanemarljiv, tako da vrednosti veličina infiltracije mogu biti znatno veće

Pored infiltracije atmosferskih padavina, značajnu ulogu u prihranjivanju karstne izdani imaju površinski vodotoci čiji tokovi protiču preko karbonatnih stena. Posle opita "bojenja" ponora u potoku Nekudovo, utvrđeno je da postoji hidraulička veza između njega i vrela Crnice. Ubačena boja se na vrelu pojavila nakon 184 sati. Na osnovu vremena za koje je obeleživač prevalio put dužine 8,500 m, određena je brzina toka $v=0,0126$ m/s (Stevanović 1991; Jemcov, 2000; Miladinović, 2000; Milanović, 2012). Na osnovu analize prostornog položaja regionalnih ruptura, izdvojena je transverzalna ruptura orijentacije SI-JZ, tj. rased Nekudovo-Sisevac, koja ujedno i predstavlja vezu vrela Crnice i ponora

Nekudovske reke (Jemcov, 2000). Pored ponora Nekudovske reke, u slivu Crnice postoji još par ponora u području Troglan Bare u kojima se ulivaju povremeni tokovi koji dotiču sa devonske podloge.

Dreniranje karstne izdani vrši se preko nekoliko hladnih i termalnih izvora na malom prostoru u području Sisevca (slika 10.12 i slika 10.13). Deo podzemnih voda ističe direktno u rečno korito Crnice na kontaktu karbonatskog kompleksa i permjskih peščara, zavisno od hidroloških prilika.



Slika 10.13. Hidrogeološki profil kroz sliv vrela Crnice

1. Krečnjaci (karstna izdan); 2. Krečnjaci i dolomiti (karstna izdan); 3. peščari laporci i krečnjaci (pukotinska izdan); 4. crveni permjski peščari (pukotinska izdan); 5. peščari i konglomerati (uslovno-bezvodni delovi terena); 6. Rased; 7. Navlaka; 8. Nivo podzemnih voda; 9. Generalni pravac kretanja podzemnih voda; 10. Pravac kretanja termalnih voda; 11. Vrelo Crnice; 12. Termalni izvor; 13. Ponor; 14. Bunar.

Pukotinski tip izdani. Pukotinska izdan formirana je u permjskim peščarima kao posledica litološkog sastava i tektonske oštećenosti nastale tokom rasedanja, navlačenja i kraljuštanja ove serije preko mezozojskog kompleksa. Ovaj tip izdani karakteriše nejednak stepen ispucalosti u planu i profilu. Izdan je formirana u tektonski oštećenim zonama u površinskom jače raspadnutom delu terena. Mogućnost akumuliranja značajnijih količina izdanskih voda je relativno mala i vezana je isključivo za krupne rasedne zone i pukotinske sisteme.

Uslovno bezvodni delovi terena. Deo nekarbonatnog kompleksa koga izgrađuju paleozojske (ordovicijumske, silurske i devonske) tvorevine svrstan je u terene siromašne podzemnim vodama, tj. u uslovno bezvodne delove terena. Ove slabo do potpuno vodonepropusne stene predstavljaju direktnu podinu karstifikovanim

karbonatnim stenama mezozojske starosti. U kori raspadanja paleozojskih stena mogu da se jave manje akumulacije podzemnih voda, ali su to generalno bezvodni tereni koji predstavljaju barijeru kretanju karstnih izdanskih voda.

Ovim terenima pripadaju i miocenske sedimentne tvorevine zapadno od karbonatnog kompleksa. Izgrađene od peščara, glinaca, laporaca i glina, ove sedimentne tvorevine predstavljaju slabo vodopropusne, često i potpuno vodonepropusne sredine, koje kao i paleozojske predstavljaju barijeru kretanja karstnih podzemnih voda.

10.9. Karstno izvorište „Vrelo Crnice“

Vrelo Crnice predstavlja razbijeno karstno izvorište koje drenira veći deo karstne izdani zapadnog Kučaja. Izvorište se sastoji od više karstnih izvora na kontaktu urgonskih krečnjaka i crvenih permskih peščara (Milojević, 1962). Najviši izvorišni krak formira se uzvodno od glavnih pojava i često presušuje. Drugi izvorišni krak (slika 10.14) formira se kod pećinskog kanala visine oko 2 m i prohodne dužine od 52 m (Milanović, 2012). Pored pećine, isticanje se vrši i iz drugog potopljenog pećinskog kanala koji nikad ne presušuje, pa se može smatrati da se od ove izvorske pećina formira rečni tok Crnice.

Oko 50 m nizvodno od vrela, iz pećine naspram nekadašnjeg hotela "Borje" nalazi se vrelo "Stara kaptaza". U periodu od oktobra 1977. do kraja 1979. godine izdašnost ovog vrela je bila ujednačena i kretala se od 10-20 l/s (Stevanović, 1991). Na oko 50 m nizvodnije, nalazi se četvrta izvorišna zona (slika 10.15) koja je kaptirana za potrebe vodosnabdevanja Sisevca, Ravne reke, Senjskog rudnika i Resavice. Ovo je najizdašnije vrelo na izvorištu (Cvijić, 1893).



Slika 10.14. Drugi izvorišni krak vrela Crnice (foto I. Jemcov)

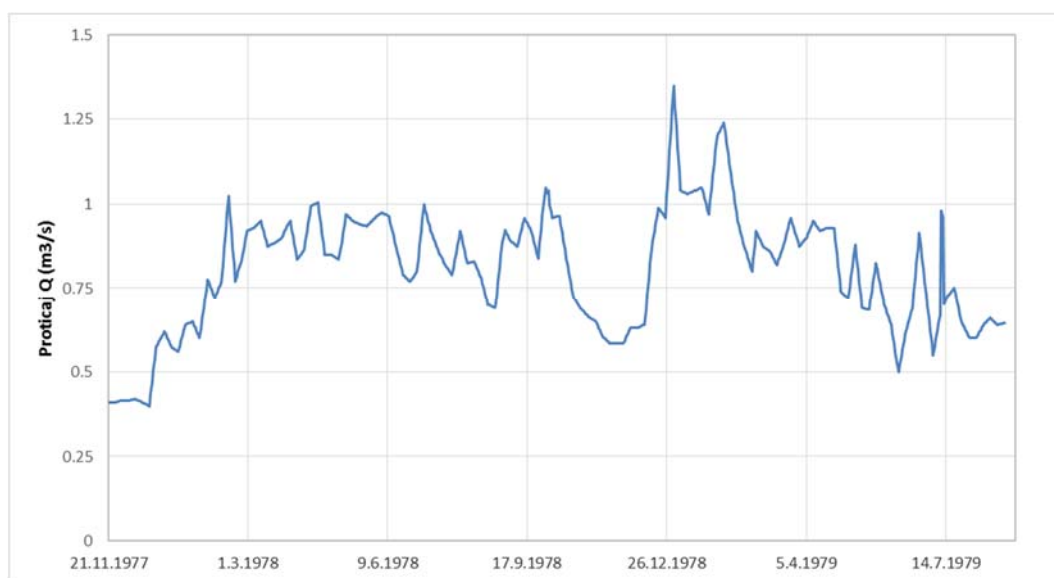


Slika 10.15. Glavni izvorišni krak vrela Crnice

Na bazi rezultata režimskih osmatranja u periodu 1978-1980. (slika 10.16), zabeležena je minimalna izdašnost izvorišta od $Q_{\min} = 280$ l/s, dok je u istom periodu maksimalna izdašnost vrela iznosila $Q_{\max} = 1300$ l/s (Jemcov, 2000). U periodu od 1998-2002. godine u više navrata su vršena hidrometrijska merenja sumarne izdašnosti vrela pri

čemu je 26.08.2002. zabeležena maksimalna izdašnost od 2420 l/s (Jemcov, 2002 - nepublikovani materijal)

U neposrednoj blizini vrela Crnice nalazi se i termalni izvor izdašnosti oko 10 l/s, sa temperaturom vode koja varira od 26-34 °C (Protić, 1995).

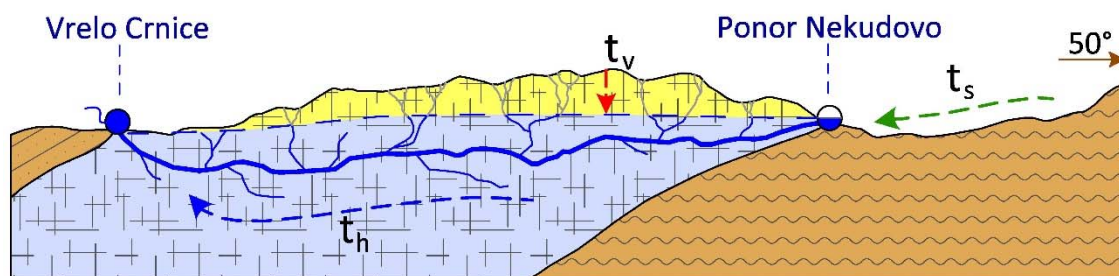


Slika 10.16. Hidrogram proticaja vrela Crnice (1978-1980. godina)

10.10. Primena TDM metode za ocenu ranjivosti podzemnih voda izvorišta „Vrelo Crnice“

Na osnovu rezultata ranijih geoloških i hidrogeoloških istraživanja možemo zaključiti da vrelo Crnice drenira kompleksan karstni hidrogeološki sistem koji se karakteriše dvostrukim prihranjivanjem: difuznim, infiltracijom padavina na čitavom području sliva i koncentrisanim, preko ponora u slivu Nekudovske reke, kao i u slivu nekoliko manjih ponora. Samim tim i zaštita podzemnih voda ovog vrela predstavlja kompleksan zadatak koji zahteva analizu svih parametara koji utiču na prihranjivanje karstne izdani, kao i kretanje podzemne vode i potencijalnih kontaminanata kroz ovu izdan.

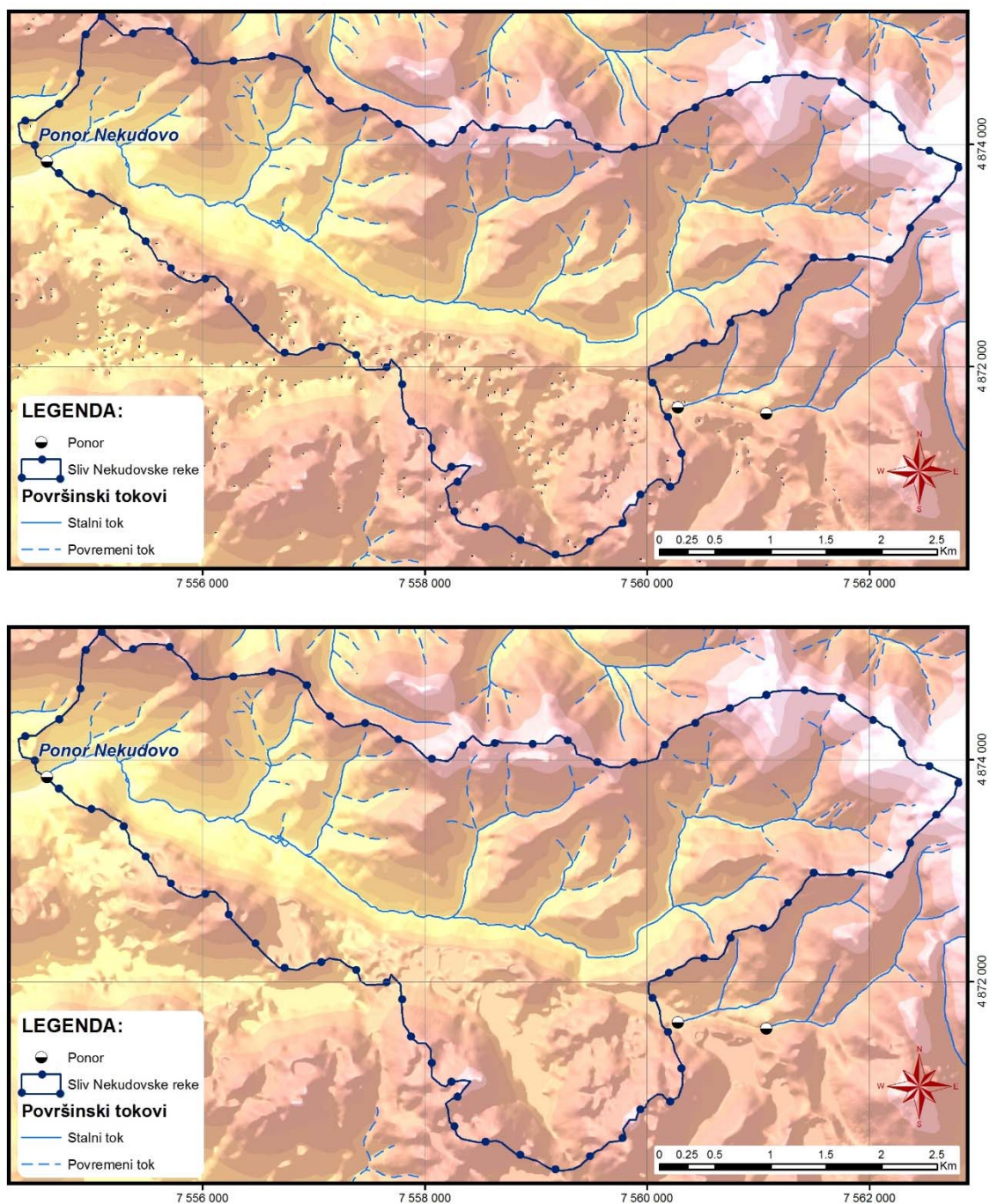
Konceptualni model zaštite ovog vrela prikazan je na slici 10.17. Model uključuje analizu transporta vode u slivu Nekudovske reke, zatim filtraciju vode kroz nadzidansku zonu i na kraju kretanje podzemne vode kroz karstne kanale i kroz matričnu poroznost karbonatnih stena.



Slika 10.17. Konceptualni model zaštite karstnog vrela Crnice

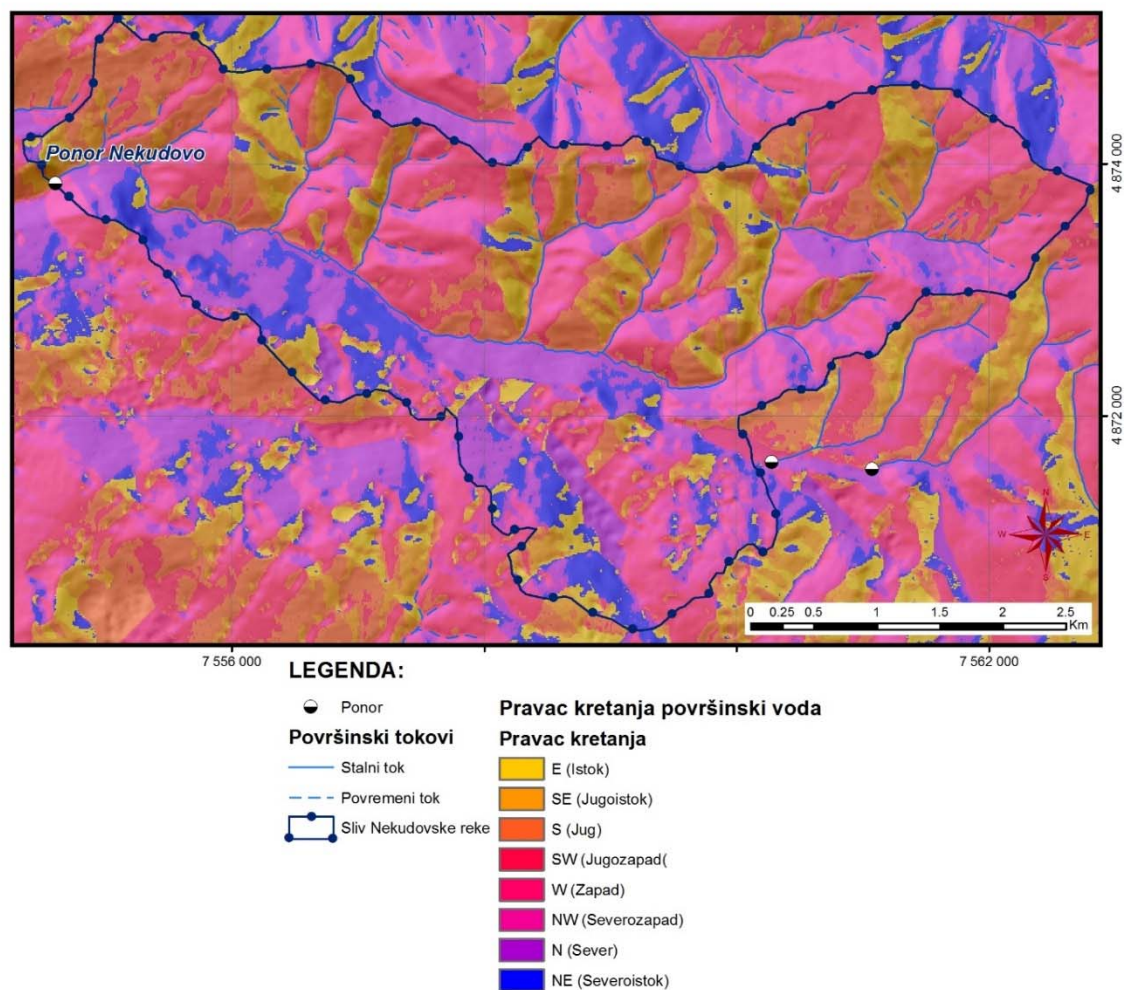
10.10.1. Određivanje vremena kretanja površinskih voda

Prva komponenta koja je analizirana i određena u procesu određivanja ukupnog vremena kretanja vode ka vrelu Crnica, jeste analiza kretanja površinskih voda u slivu Nekudovske reke. Analiza površinskog kretanja vode zahteva hidrološki ispravan elevacioni model. U tu svrhu prvo je pripremljen DEM model terena procesom interpolacije topografskih izohipsi, kota terena i rečnih tokova. Ispunjavanje mikro depresija u terenu posebno je važan zadatak za delove terena izgrađene od karbonatnih tvorevina. Površinski karstni oblici kao što su vrtače, uvale i sl., mogu da poremete pravce kretanja površinske vode, pa je zato neophodno ispuniti sve mikro depresije (slika 10.18) alatom *Fill* (*Hydrology tools, Spacial analyst* ekstenzija).



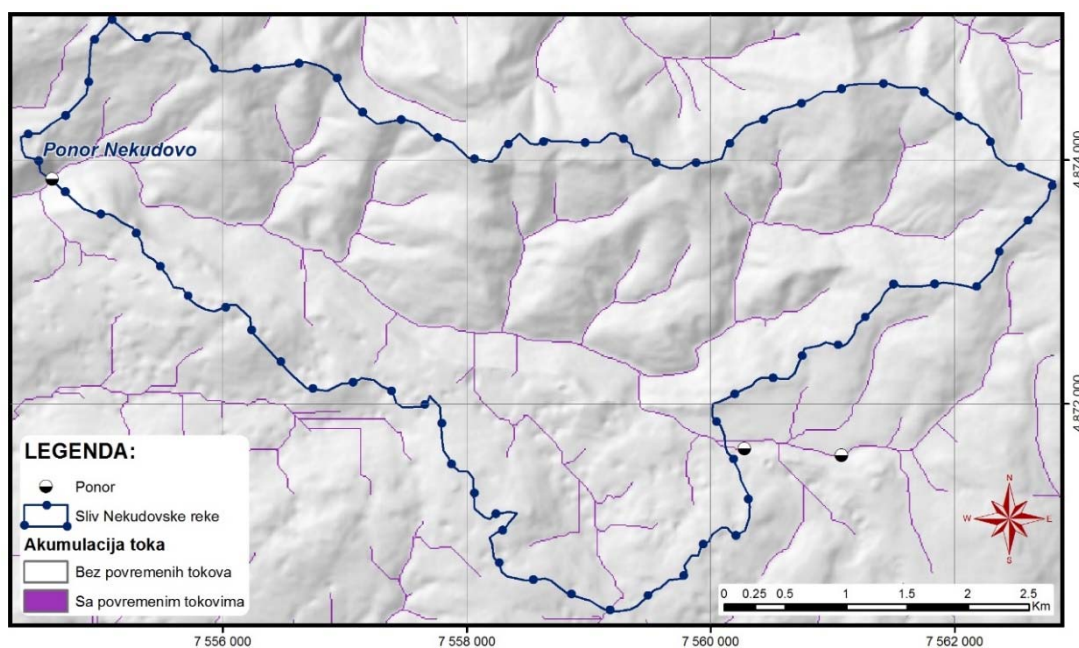
Slika 10.18. Elevacioni model terena procesom interpolacije sa obeleženim mikro depresijama (crne tačke) i hidrološki ispravan elevacioni model dobijen alatom Sink

Nakon što je dobijen hidrološki ispravan DEM model terena, ponovo je napravljena karta pravca kretanja površinskih voda primenom alatke *Flow Direction* (slika 10.19).



Slika 10.19. Karta pravca kretanja (tečenja) površinskih voda

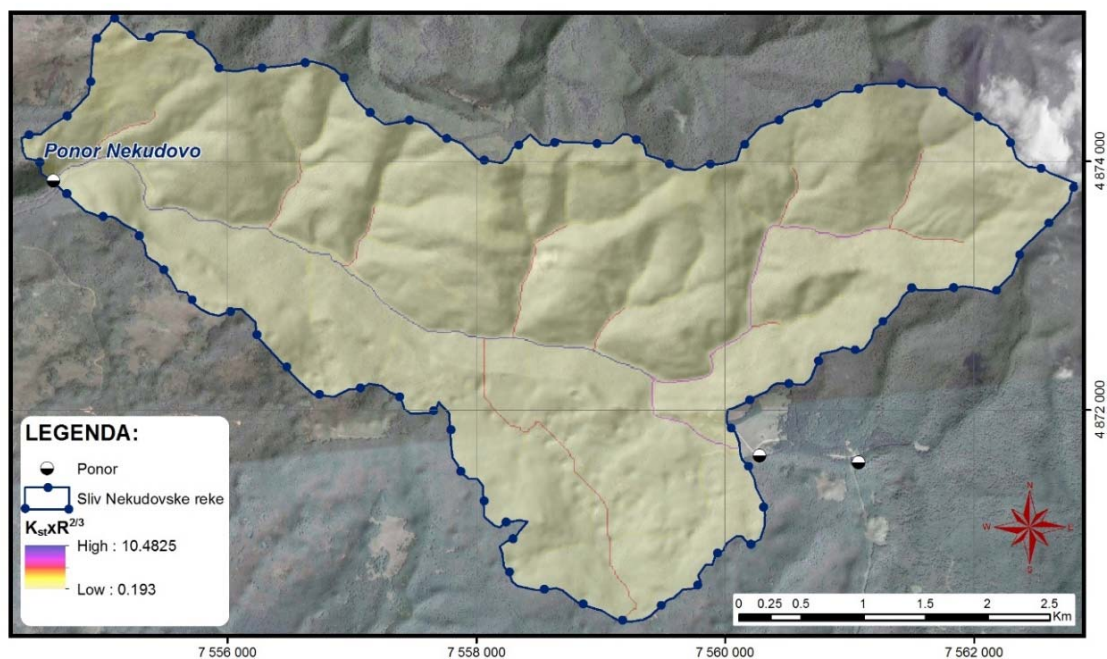
Primenom analize *Flow Accumulation* uz upotrebu karte pravca kretanja površinskih voda dobijena je karta tečenja (akumulacije tečenja) površinske vode odnosno karta na kojoj tačke sa većim vrednostima predstavljaju trase površinskih tokova koji se formiraju nakon obilnijih padavina (slika 10.20).



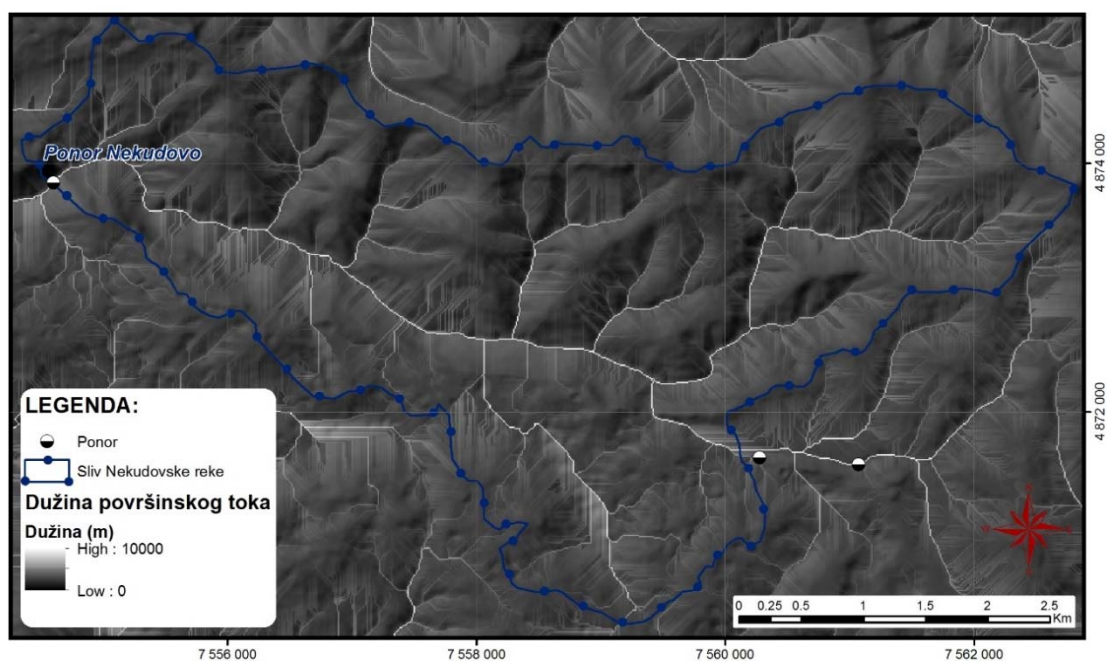
Slika 10.20. Karta povremenih i stalnih površinskih tokova kretanja površinskih voda

Izdvojeni tokovi su zatim kategorisani prema veličini i za svaki tok su zadate vrednosti hidrauličkog radijusa r i koeficijenta K_{st} koji predstavlja inverznu vrednost Maningovog koeficijenta hrapavosti. Za najveći tok (Nekudovska reka) zadate su najveće vrednosti hidrauličkog radijusa r , tako da je za parametar $K_{st} \cdot r^{2/3}$ dodeljena vrednost 10, dok je za najmanje vodotoke dodeljena vrednost $K_{st} \cdot r^{2/3} = 2$. U proračunu je za sve vodotoke korišćena vrednost Maningovog koeficijenta hrapavosti za hrapave površine $n=0,05$ ($K_{st}=20$).

Na ostalom delu sliva Nekudovske reke vrednosti K_{st} zadavane su prema vegetacionom pokrivaču, pri čemu je vrednost $K_{st}=2$ ($n=0,5$) zadata za šumovita područja i $K_{st}=5$ ($n=0,2$) za travnata područja. Karta $K_{st} \cdot r^{2/3}$ za sliv Nekudovske reke prikazana je na slici 10.21.

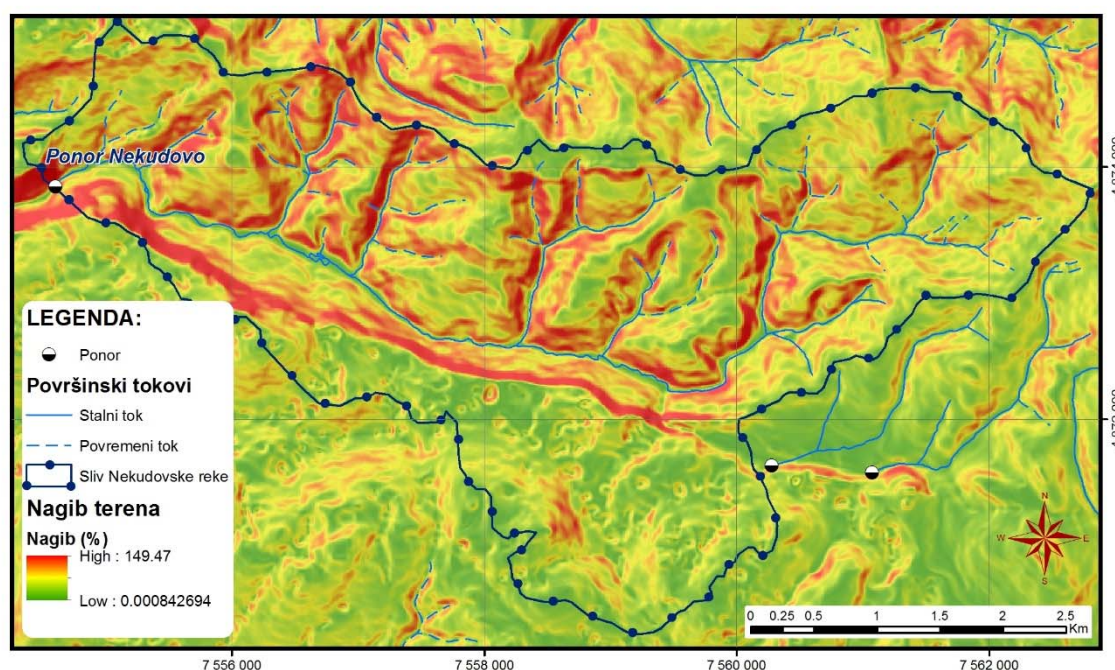
Slika 10.21. Karta $K_{st} \cdot r^{2/3}$

U postupku proračuna vremena kretanja površinskih voda pripremljena je i karta dužina kretanja površinskih tokova. Kod ove karte (slika 10.22) svaka tačka pokazuje ukupnu dužinu povremenog ili površinskog vodotoka uzvodno od te tačke. Ova oleata dobijen je primenom *Flow Length* alatke.



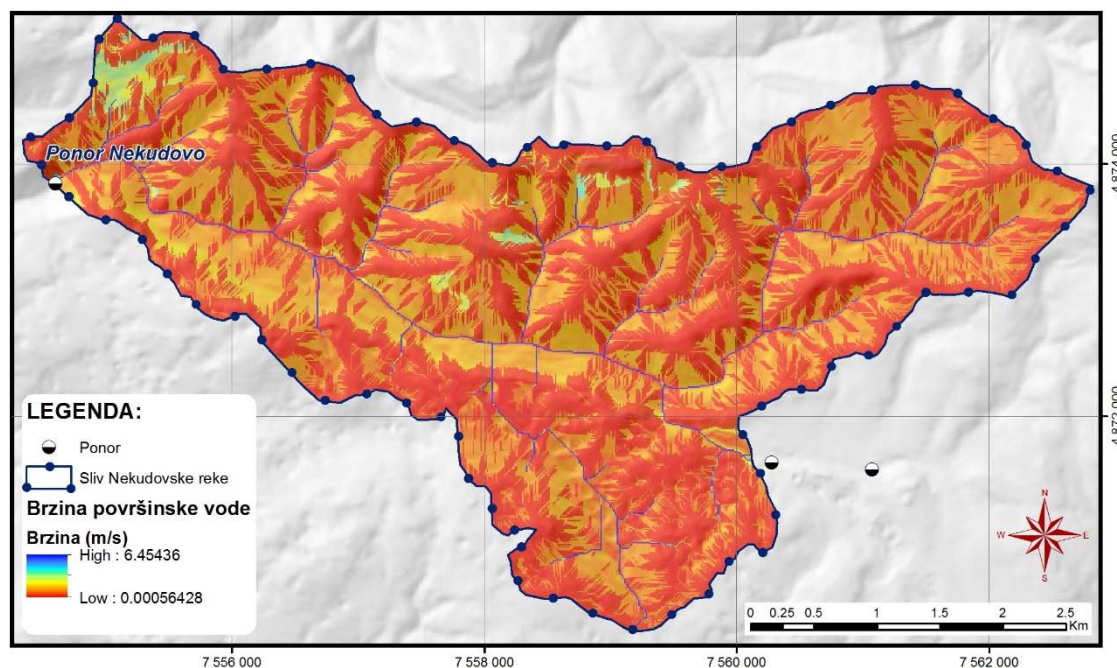
Slika 10.22. Karta dužina površinskih tokova

Na proračun brzine kretanja površinskih voda pored karaktera hrapavosti terena i veličine površinskih tokova u velikoj meri utiče i nagib terena. Primenom alatki za prostornu analizu DEM terena dobijena je karta nagiba terena (slika 10.23) na kojoj su nagibi terena izraženi u procentima. Karta pokazuje da je severni deo sliva sa velikim promenama u nagibu, što je rezultat intenzivne erozije (jaružanja) koja se dešava u stenama paleozojske starosti. Sa druge strane, južni deo sliva se karakteriše pretežno malim nagibima (karstni plato iznad reke), osim strmih padina koje padaju direktno ka reci.



Slika 10.23. Karta nagiba terena u slivu Nekudovske reke

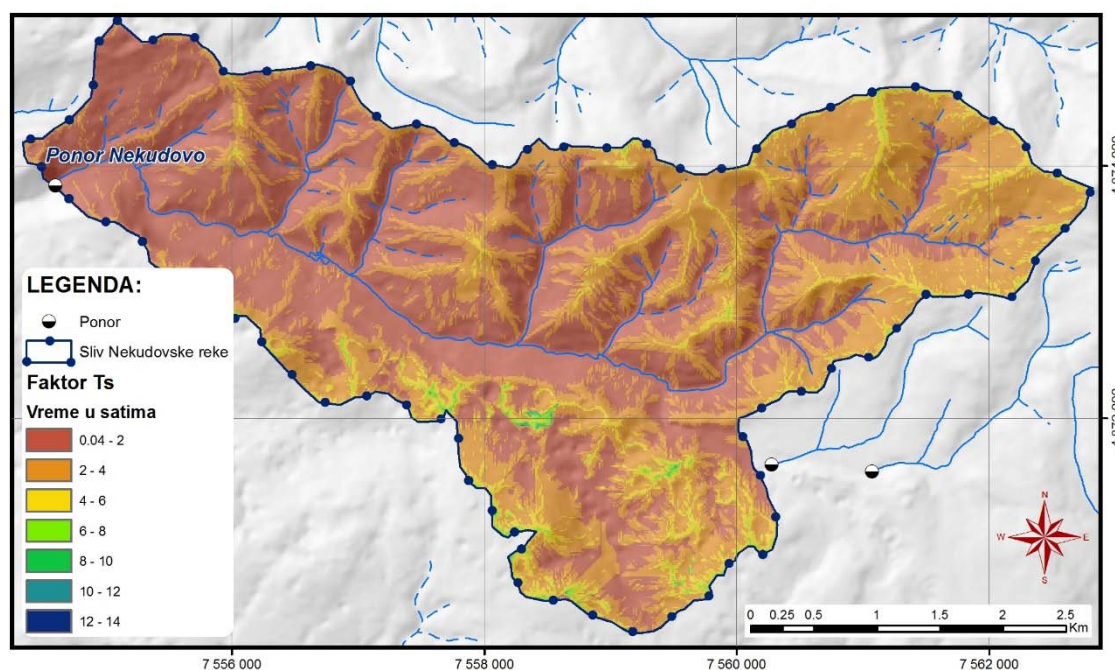
Kombinacijom karte $K_{st}r^{-2/3}$ i karte nagiba terena, i primenom jednačina za različite vrste kretanja površinski voda (tečenje po ravni, plitko potpovršinsko tečenje i kanalsko tečenje) dobijena je karta brzina kretanja površinskih voda (slika 10.24). Proračun je završen primenom alatke *Raster Calculator* koristeći sličnu jednačinu koja je prikazana u poglavlju 9.10.3.



Slika 10.24. Karta brzina površinskih voda u slivu Nekudovske reke

Nakon proračuna brzine kretanja površinske vode u svakoj tački pristupilo se proračunu vremena kretanja površinske vode do ponorske zone. Prvo je dobijena oleata inverzne vrednosti brzine kretanja površinske vode. Ova oleata korišćena je kao težinski faktor pri primeni alatke *Flow Length*, pri čemu je omogućen proračun vremena kretanja vode kroz svaku tačku (piksel) i akumulacijom ovih vremena dobijena je karta faktora t_s (slika 10.25).

Dobijena karta faktora t_s pokazuje da je maksimalno vreme kretanje površinske vode oko 14 sati i ovo vreme se vezuje za terene u krajnjem severoistočnom i južnom delu sliva Nekudovske reke. U zapadnom delu sliva vreme putovanja je veoma malo, uglavnom do 4 sata, što je rezultat izrazito strmih nagiba terena koji favorizuju brzo površinsko spiranje vode i samim tim brz transport potencijalnih kontaminanata do ponorske zone.

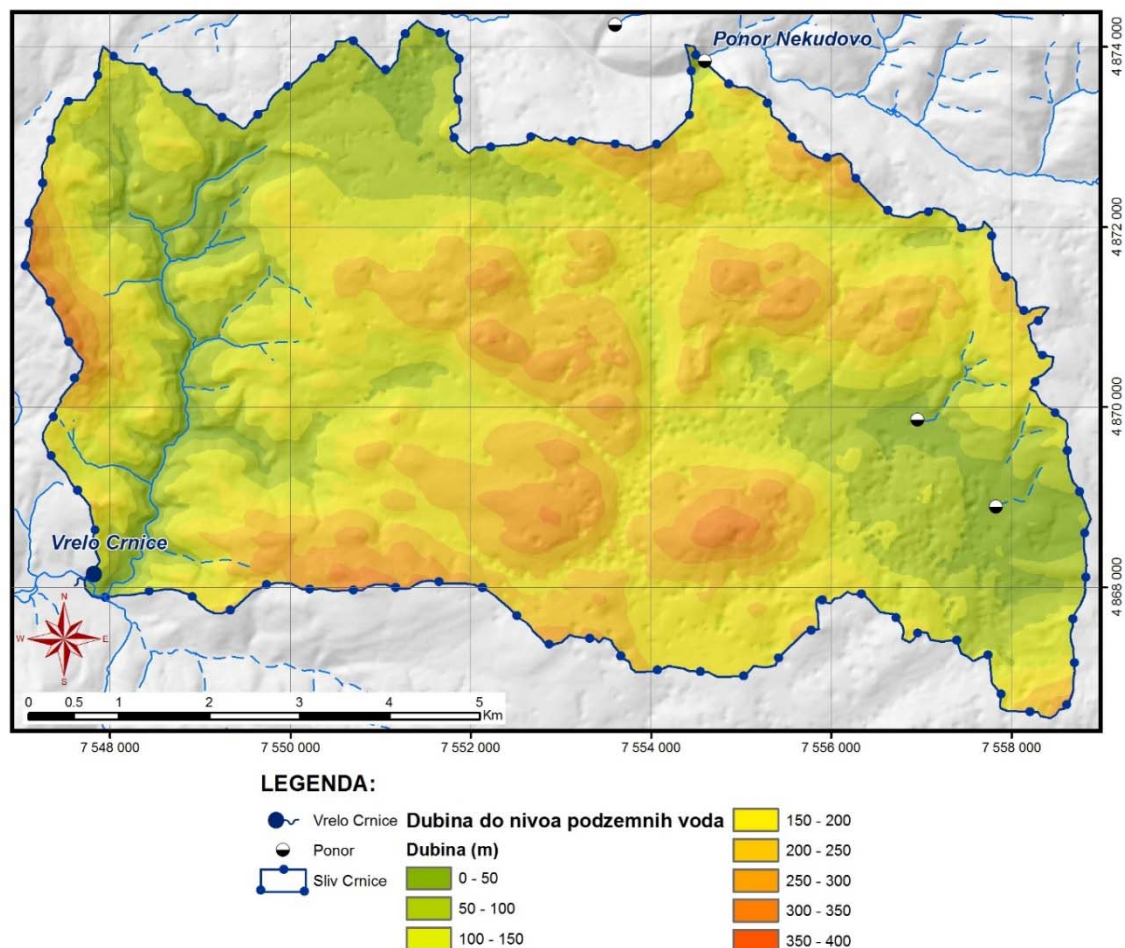
Slika 10.25. Karta faktora t_s

10.10.2. Određivanje vremena vertikalnog kretanja podzemnih voda

Vreme vertikalnog kretanja podzemnih voda kroz nadizdansku zonu procenjeno je primenom *TIME-INPUT* metode. Posebno je analiziran faktor VREME koji direktno zavisi od debljine tla i stena u nadizdanskoj zoni i koeficijena filtracije za svaki sloj. Faktor Ulaz predstavlja parametar koji zavisi od veličine infiltracije i on je procenjen na bazi više subfaktora koji utiču na ovaj proces (sunčeva radijacija, prisustvo vegetacije, veličina oticaja i sl.).

Prvi korak u proceni faktora VREME jeste određivanje debljine nadizdanske zone. S obzirom na to da u slivu vrela Crnice nema istražnih bušotina ili bunara, nivo podzemnih voda karstne izdani je posredno procenjen na bazi nadmorske visine izvora, vodotoka, ponora (zone gde je nivo blizu površine terena). Na ostalim delovima rasprostranjenja karstne izdani najmanje vrednosti debljine nadizdanske zone su zadavane na područjima depresija (područje Dobra Voda, Troglan Bara, Mala Brezovica i sl.), dok su najveće vrednosti dodeljene delovima terena sa najvišim

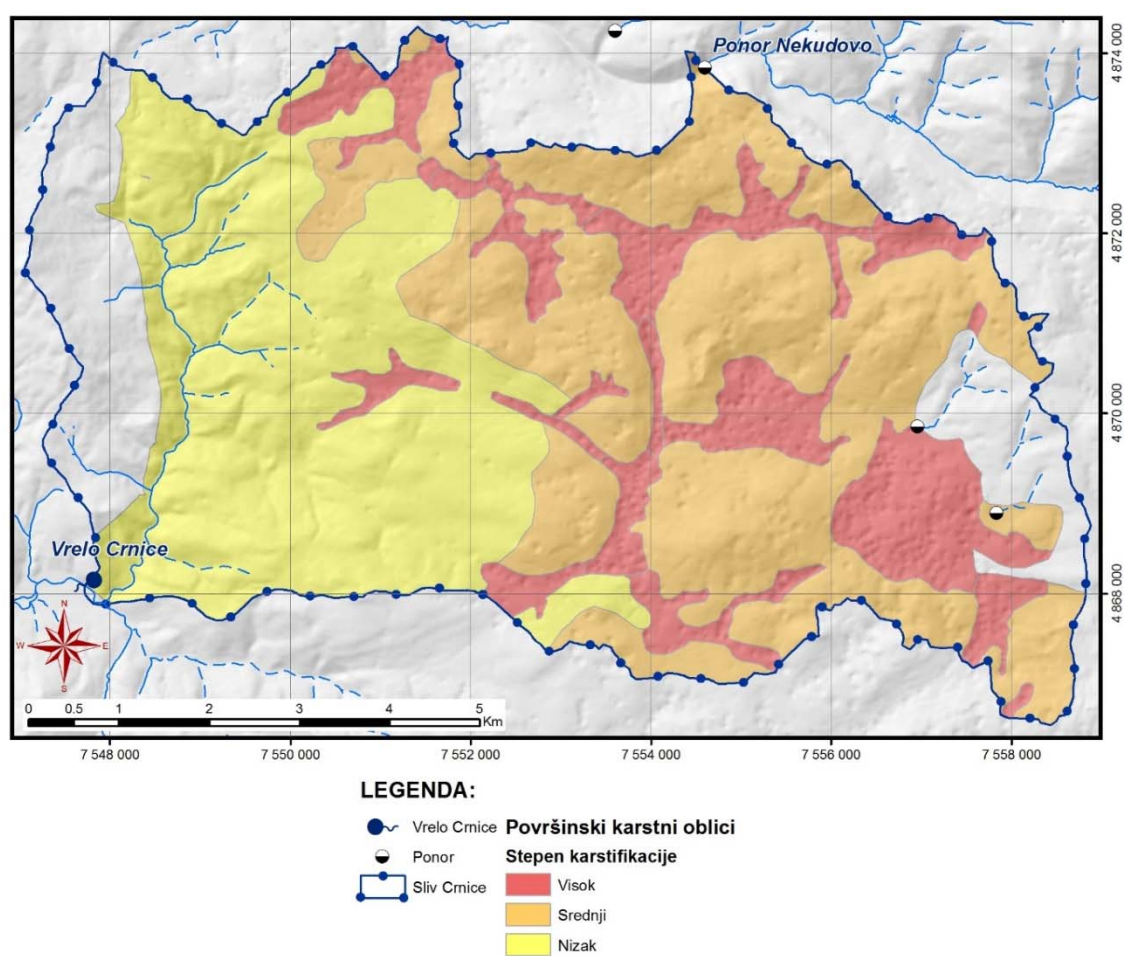
nadmorskim visinama (Debelo Brdo, Progorska kosa, Tilva ku Čekjar, Darica, Prisakar, Klokotar Mare i dr.). Kao rezultat interpolacije ovih debljina dobijena je karta debljine nadzidske zone prikazana na slici 10.26).



Slika 10.26. Karta srednje dubine do nivoa podzemnih voda (debljina nadzidske zone) za područje sliva vrelo Crnice

Sa dobijenom kartom debljine nadzidske zone pristupilo se određivanju debljine svih slojeva u zoni aeracije. Analizom pedološke karte istražnog područja (slika 10.9) prvo su zadate prosečne debljine tla prema tipu zemljišta i svakom tipu zemljišta su zadate različite vrednosti koeficijenta filtracije. Tako na primer, najveći deo terena izgrađen od karstifikovanih krečnjaka je prekriven rendzinom za koju je zadata prosečna debljina od 0,5 m i $K_f=5 \cdot 10^{-5}$ m/s (Shaap et al., 1999).

Oduzimanjem debljine tla od debljine nadizdanske zone dobija se ukupna debljina slojeva (stenske mase) iznad nivoa podzemnih voda. Za delove terena izgrađene od karstifikovanih krečnjaka zadate su različite vrednosti koeficijenta filtracije u zavisnosti od procenjenog stepena karstifikacije (Paloc, 1985). Više vrednosti koeficijenta filtracije su zadate u delovima terena sa velikim brojem površinskih karstnih oblika (pre svega vrtača), dok su niže vrednosti zadate za delove terena izgrađene od peskovitih krečnjaka i dolomita urgonske starosti sa odsustvom površinskih karstnih oblika (slika 10.27).

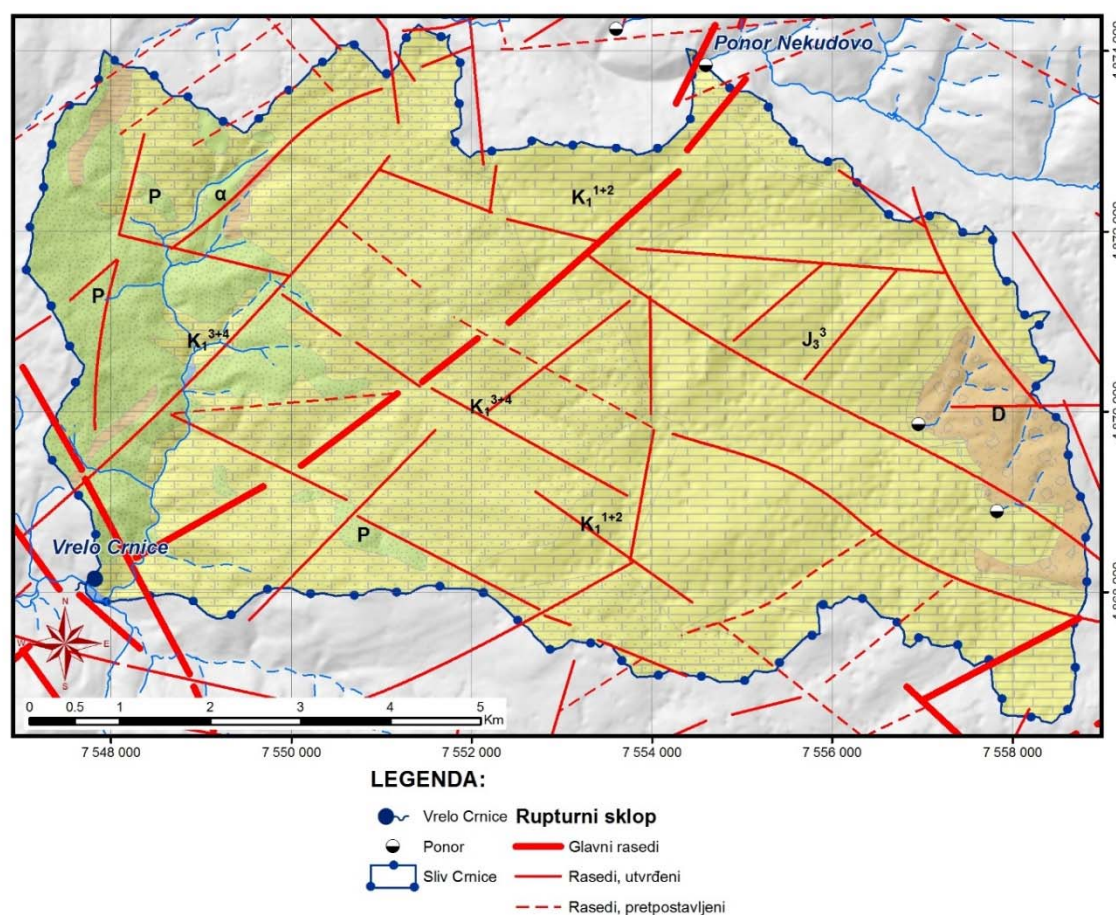


Slika 10.27. Karta razvijenosti površinskih oblika karstifikacije za područje sliva vrelo Crnice

U zapadnom delu sliva vrelo Crnice koji su izgrađeni od crvenih permskih peščara izvršena je procena debljine ovih sedimenata koji su navučeni preko krednih krečnjaka.

U ovom delu terena su zadavane dvojne vrednosti koeficijenta filtracije (za karbonatne tvorevine i za stene koje ih pokrivaju), čime je omogućena realna ocena vremena kretanja infiltrirajuće vode kroz sve slojeve u nadizdanskoj zoni.

Kako bi se uključio i uticaj struktura na brzinu procesa infiltracije, u čitav postupak je inkorporiran i korektivni faktor koji se odnosi na prisustvo raseda. Za određivanje ovog faktora korišćena je karta rupturnog sklopa dobijena strukturnom analizom ovog područja prikazana na slici 10.28 (Jemcov, 2000). Oko ovih struktura su prvo izdvojene tampon zone (50 m oko glavnih struktura i 20 m oko ostalih struktura) i za ove zone su zadate korektivne vrednosti faktora raseda (20 za glavne strukture i 10 za ostale strukture). Time je vreme vertikalnog kretanja vode kroz stene nadizdanske zone znatno smanjeno u zonama postojanja ovih struktura.

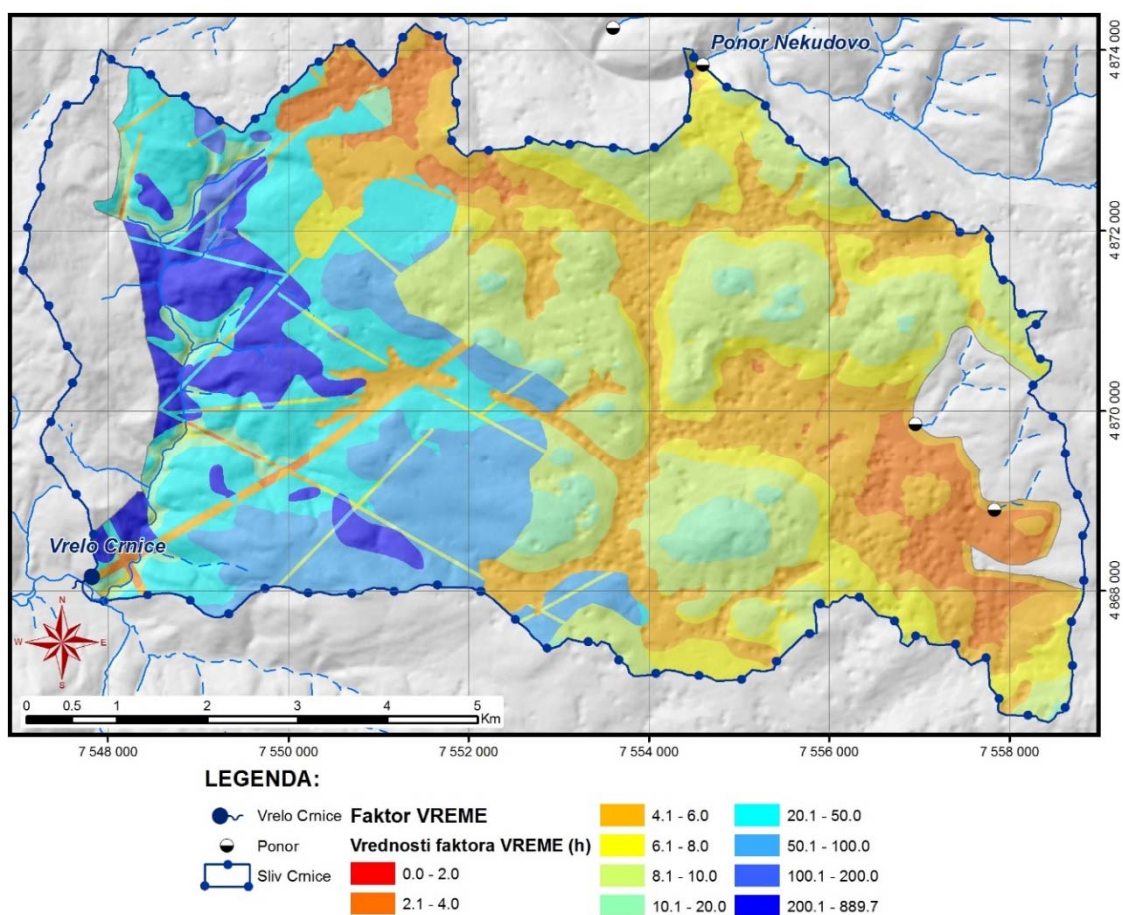


Slika 10.28. Karta rupturnog sklopa za područje sliva vrele Crnice (Jemcov, 2000)

Ukupno vreme vertikalnog kretanja podzemnih voda, tj. faktor *VREME*, dobijeno je sumiranjem vremena vertikalnog kretanja vode kroz tlo i vremena kretanja vode kroz slojeve stena u nadizdanskoj zoni. Karta parametra Vreme prikazana je na slici 10.29. Dobijena karta je pokazala da je najmanje vremena potrebno da se voda infiltrira u zoni rasprostranjenja intenzivno karstifikovanih stena (područje Dobra Voda, Troglan Bara, Mala Brezovica i sl.). U ovim područjima je procenjeno da je potrebno svega nekoliko sati da se padavine infiltriraju i stignu do nivoa podzemnih voda. Ovakvi rezultati su očekivani i u skladu sa mnogim istraživanjima vezanim za transport vode u nadizdanskoj zoni karstnih sistema (Pronk et al., 2009).

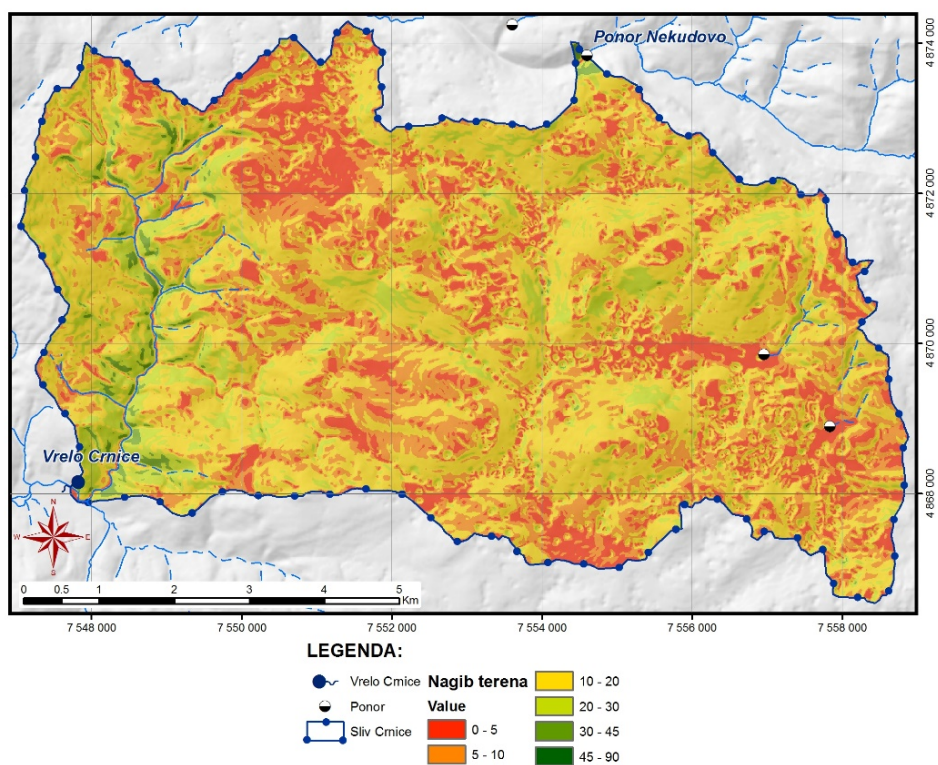
Nešto veće vrednosti vremena vertikalnog kretanja podzemne vode su dobijene za ostatak područja u kojem je formirana karstna izdan. Tako na primer, potrebno je uglavnom ne više od jednog dana da se padavine transportuju do nivoa podzemnih voda u oblasti rasprostranjenja jurskih krečnjaka sa vidljivim površinskim karstnim oblicima. Kredni krečnjaci i dolomiti se karakterišu manjim stepenom karstifikacije, pa je samim tim i više vremena potrebno (1-4 dana) da površinska voda prođe zonu aeracije. Najveće vrednosti su dobijene za delove karbonatnih terena koje su pokriveni nekarbonatnim stenama (navlaka permskih peščara). Kao rezultat analize rupturnih oblika koji presecaju stenske mase, u zoni rasprostranjenja ovih oblika dobijene su niže vrednosti vremena putovanja jer su korektivnim koeficijentima povećane vrednosti koeficijenta filtracije, čime je skraćeno vreme potrebno da voda doputuje do nivoa podzemnih voda.

Dobijena karta faktora *VREME* nije urađena za kompletan sliv vrela Crnice (slika 10.29). Iz sliva su izuzeti delovi terena u krajnjem zapadnom delu sliva (tereni izgrađeni od permskih peščara). Iz ove analize takođe su izuzeti delovi terena izgrađeni od devonskih tvorevina u krajnjem istočnom delu sliva. Za njih je karakteristično intenzivno spiranje površinskih voda ka karbonatnim delovima sliva, stoga je u tim delovima sliva urađena analiza vremena površinskog kretanja vode po istoj metodologiji kao i za sliv Nekudovske reke.

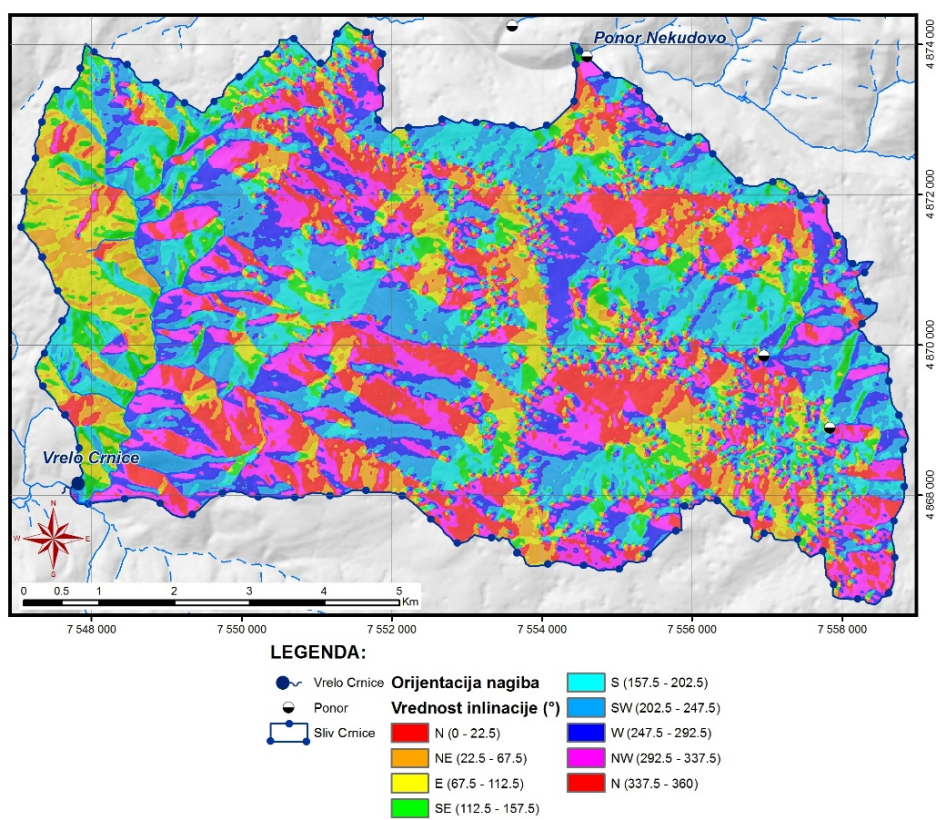


Slika 10.29. Karta faktora VREME

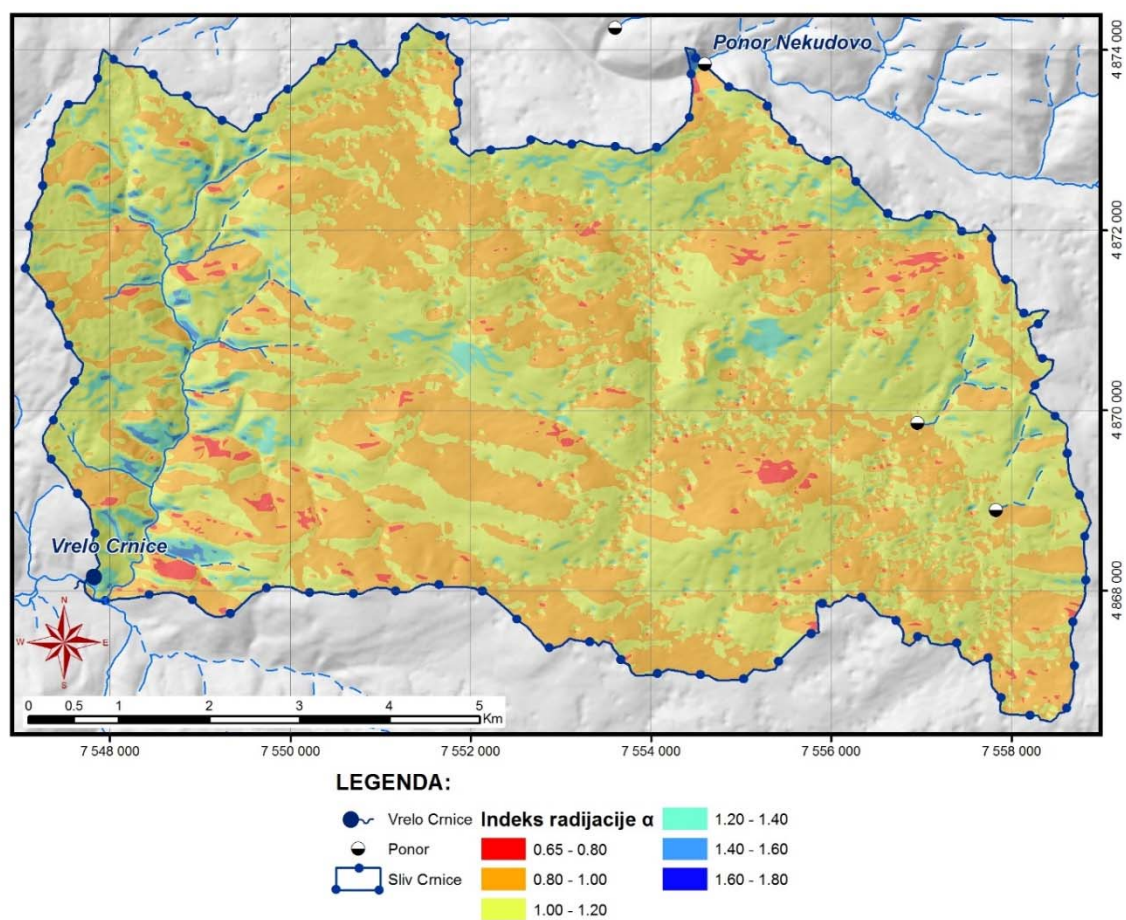
Slično kao i kod izvorišta Beli Timok, u proračunu faktora *ULAZ* (Input) prvo je izvršena procena faktora radijacije α kao neophodne podloge u procesu ocene realne evapostranspiracije. Prostornom analizom digitalnog elevacionog modela (alatke *Slope* i *Aspect*) dobijene su dve podloge: nagib terena (slika 10.30) i inklinacija (slika 10.31). Prema stepenu nagiba prva karta je klasifikovana u 6 klasa (0-5°, 6-10°, 11-20°, 21-30°, 31-45° i 46-90°), dok je u zavisnosti od orijentacije nagiba terena druga karta klasifikovana u 8 pravaca (N, NE, E, SE, E, SW, W, NW). Prema preporukama autora TIME-INPUT metode, za svaku klasu nagiba i inklinacije je zadata različita vrednost faktora radijacije, čime je dobijena karta faktora radijacije α (slika 10.32).



Slika 10.30. Karta prostorne distribucije nagiba terena

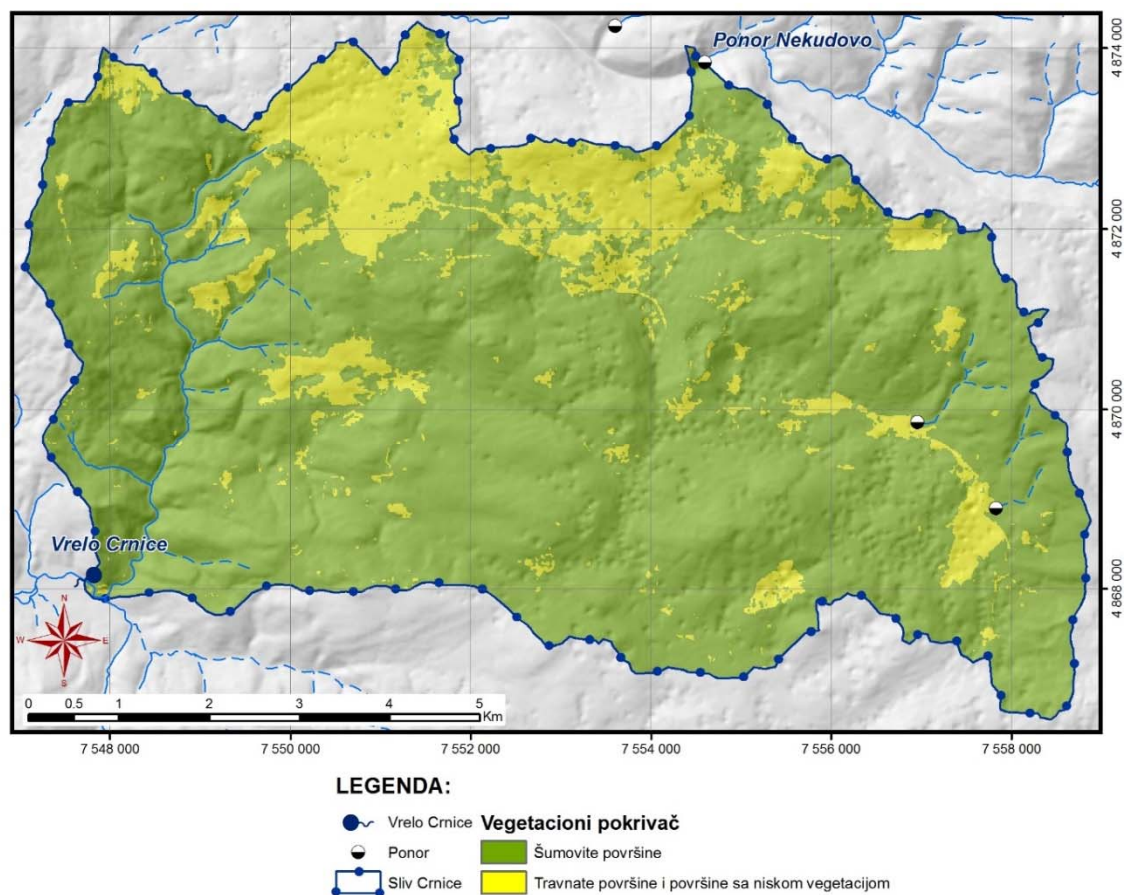


Slika 10.31. Karta prostorne distribucije orijentacije nagiba terena



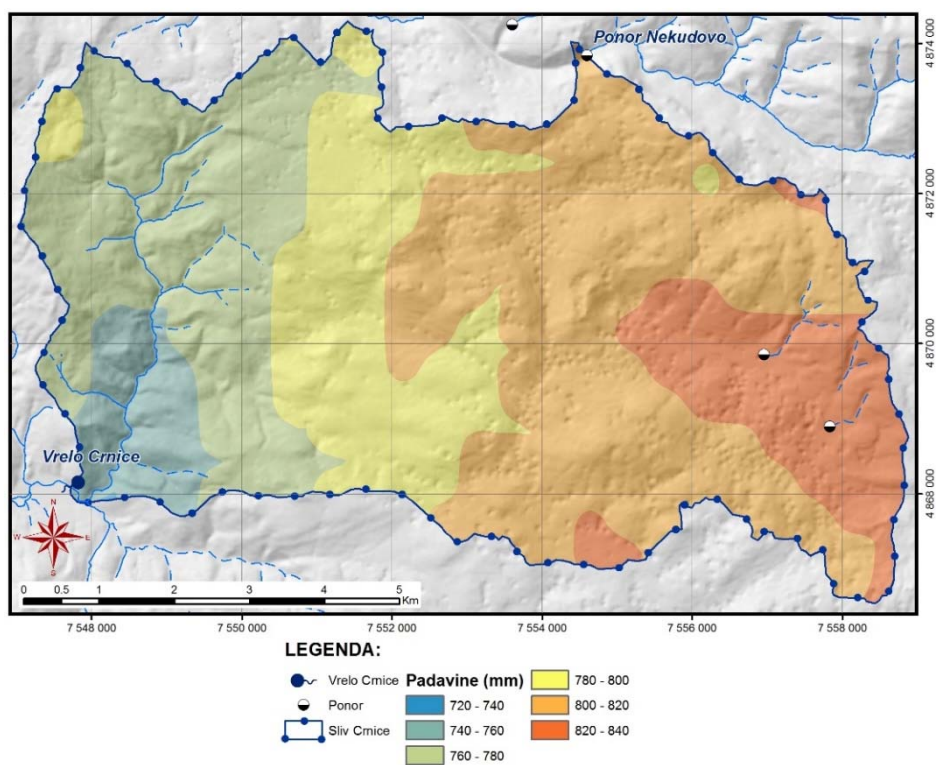
Slika 10.32. Karta prostorne distribucije indeksa radijacije α

Nakon proračuna indeksa radijacije izvršena je i ocena potencijalne evapotranspiracije (faktor ET). Analizom satelitskog snimka (slika 10.8) izdvojene su dve klase terena: šumovite površine, i travnate površine i površine sa niskom vegetacijom (slika 10.33). Za klasu šuma su dodeljene vrednosti od 35 %, dok je za ostatak područja dodeljena vrednost od 23 %.

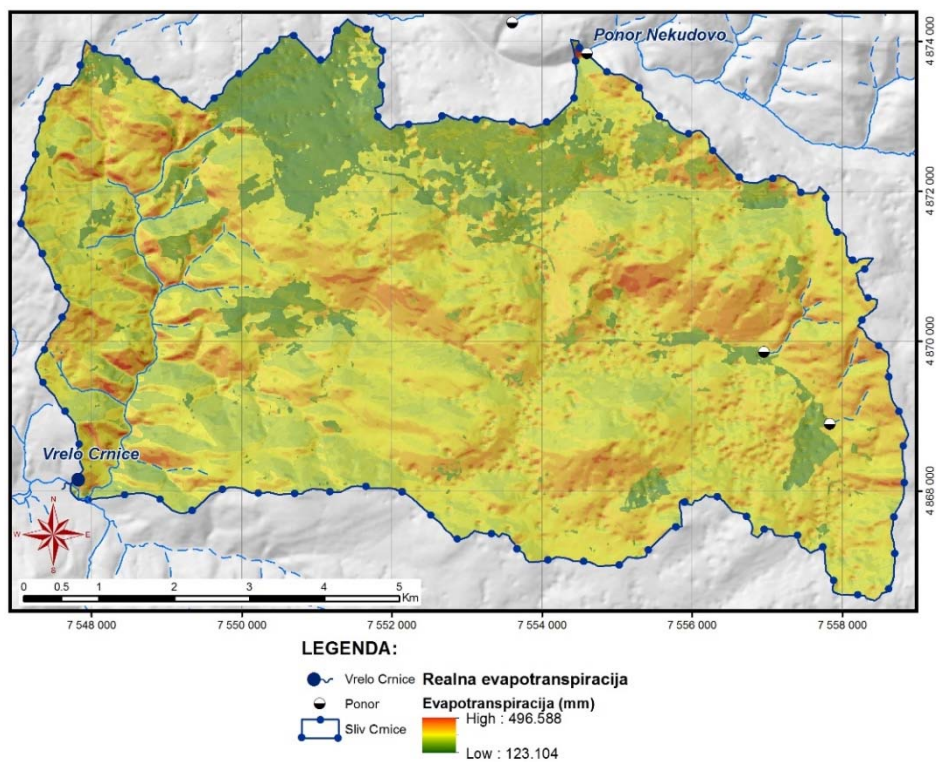


Slika 10.33. Karta prostorne distribucije vegetacionih klasa

Preklapanjem oleate prostorne distribucije vegetacionih klasa sa oleatom indeksa radijacije i množenjem ovih vrednosti sa vrednoću prosečnih višegodišnjih padavina za područje sliva vrela Crnice (slika 10.34) dobijena je karta realne evapotranspiracije izražena u mm vodenog stuba (slika 10.35).

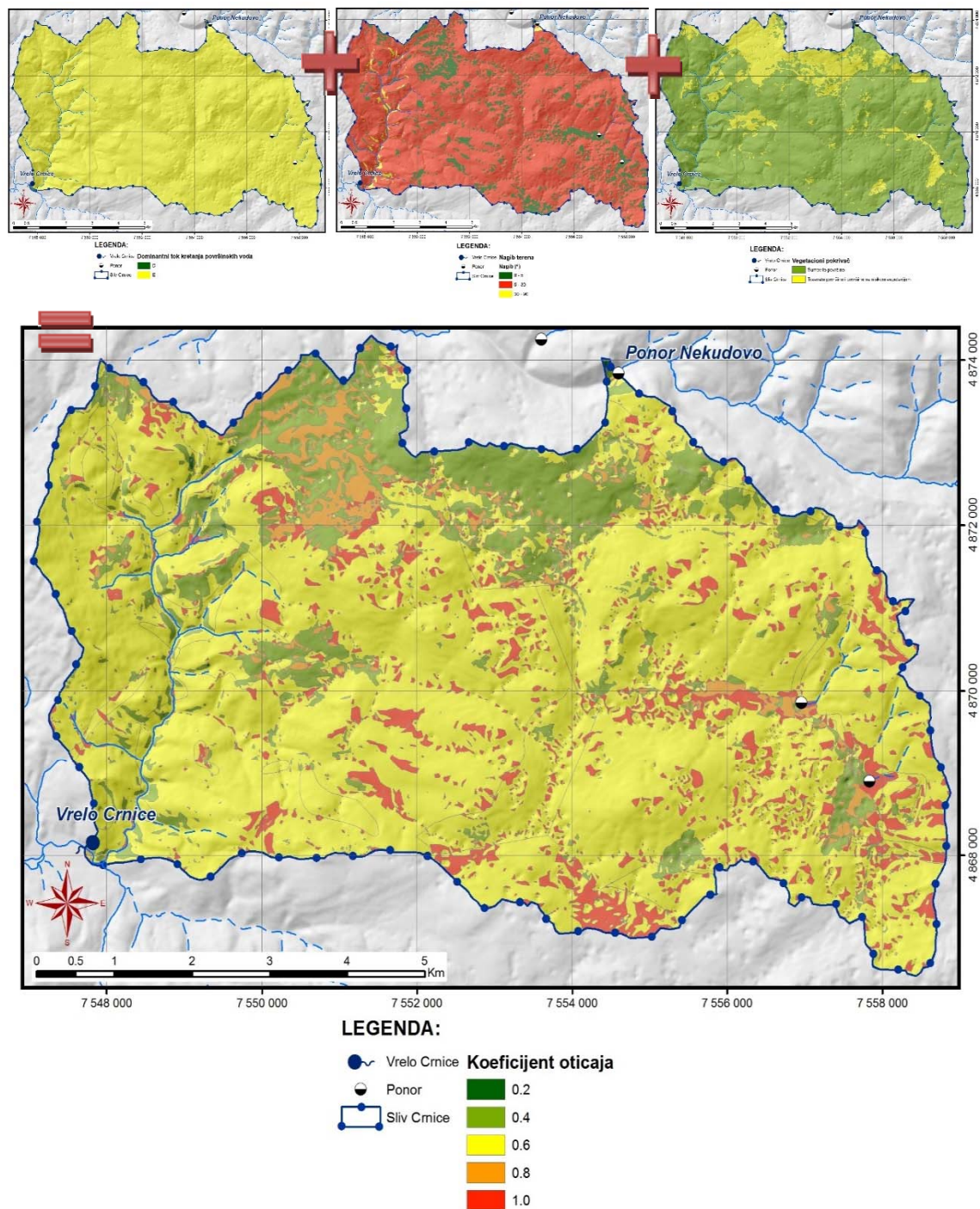


Slika 10.34. Karta prostorne distribucije srednjih višegodišnjih padavina na području sliva vrelo Crnice za period 1947-2006. (RHMZ)



Slika 10.35. Karta prostorne distribucije evapotranspiracije za područje sliva vrelo Crnice

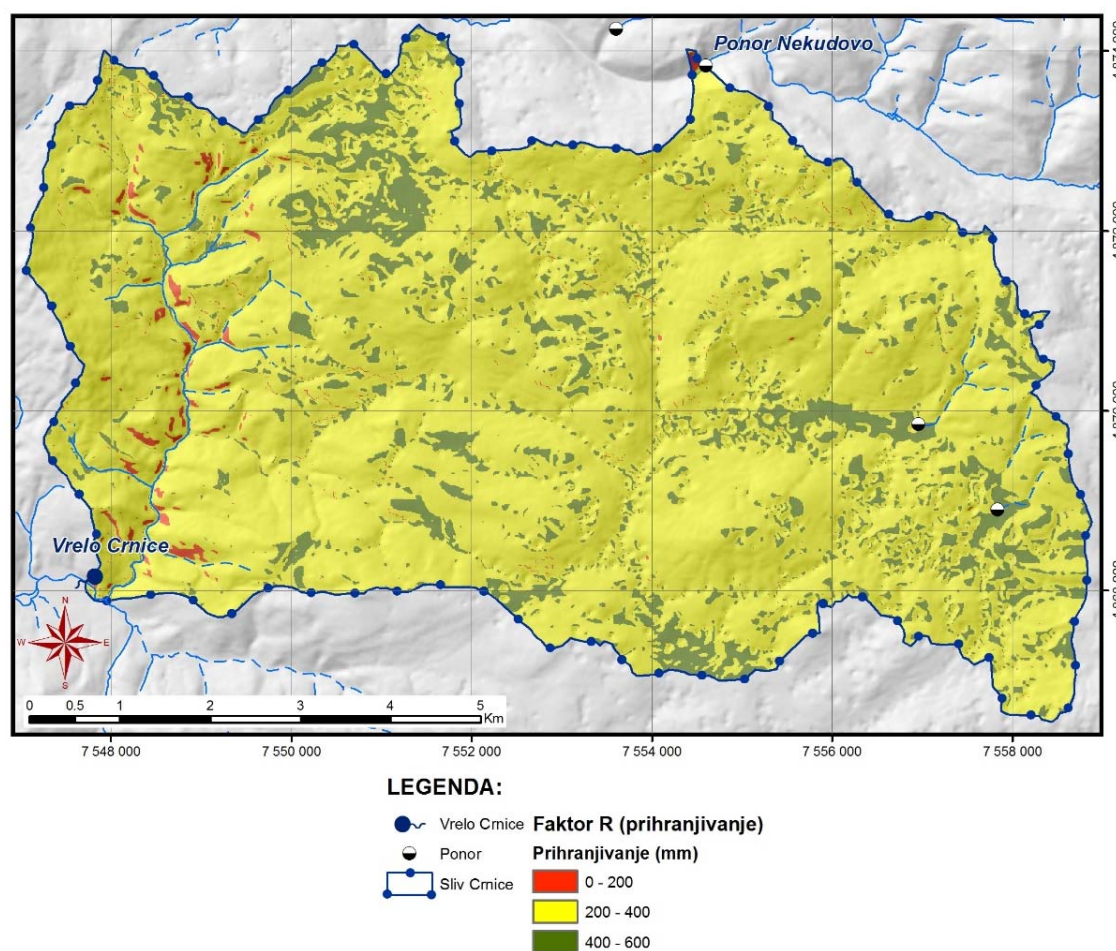
Za proračun koeficijenta oticaja korišćene su tri podloge: pedološka karta, karta nagiba terena i karta vegetacije. Pedološka karta je iskorišćena kako bi se procenio dominantni tip kretanja površinskih voda. U zavisnosti od veličine nagiba terena i tipa vegetacije izdvojeni su poligoni sa različitim vrednostima ovih parametara i onda je svakom poligonu zadata vrednost koeficijenta oticaja (slika 10.36).



Slika 10.36. Proračun koeficijenta oticaja za područje sliva vrelo Crnice

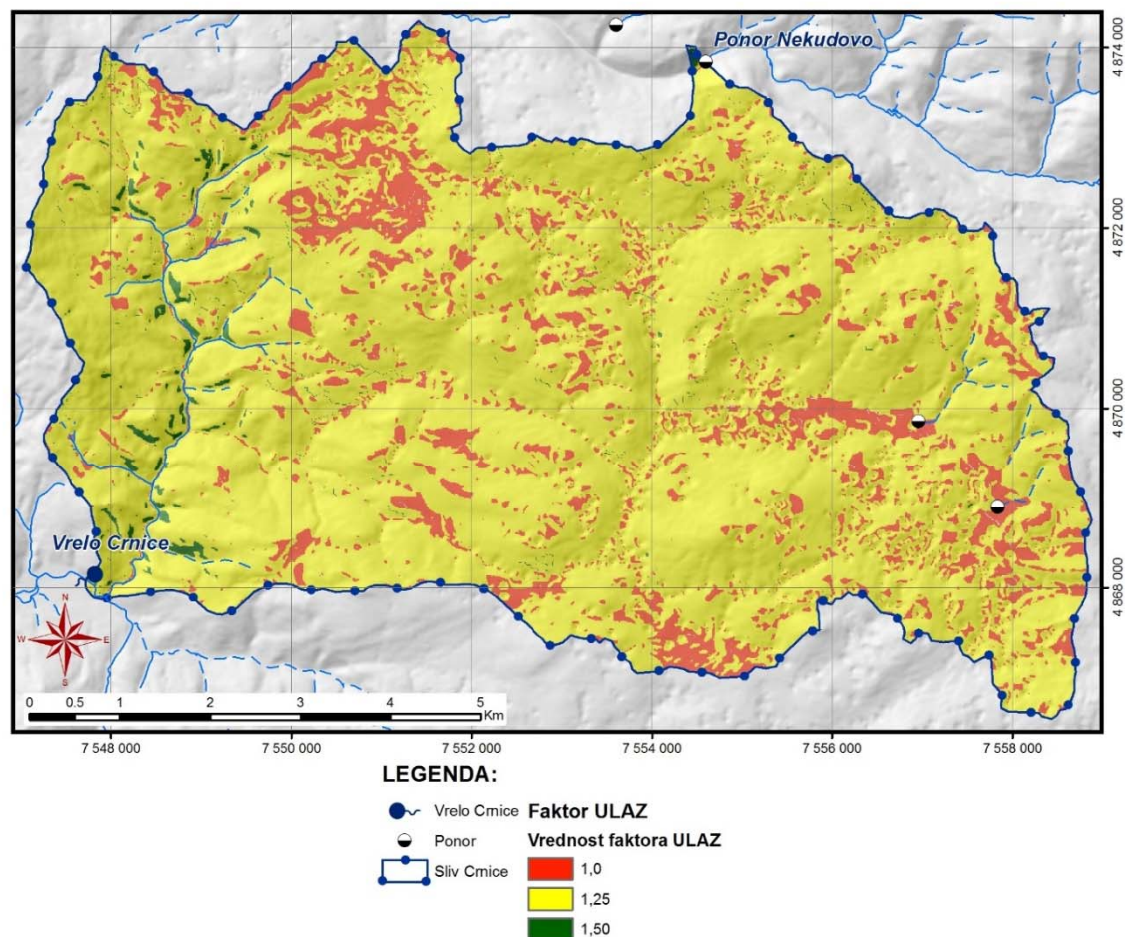
Na dobijenoj karti koeficijenta oticaja je izdvojeno 5 različitih klasa (od 0.2 do 1.0). Najmanje vrednosti koeficijenta oticaja znače da je oticaj veliki, odnosno da najveći deo padavina koji ne ispari otekne putem povremenih i stalnih površinskih tokova. Najveće vrednosti koeficijenta oticaja označavaju minimalan oticaj, odnosno značajnu infiltraciju padavina. Ove vrednosti su dobijene za najravnije delove karstnog platoa prekrivene šumskom vegetacijom.

Preklapanjem oleate padavina, evapotranspiracije i koeficijenta oticaja omogućen je proračun veličine prihranjivanja. U svakoj tački je od veličine padavina oduzeta veličina evapotranspiracije, a dobijena vrednost pomnožena sa koeficijentom oticaja. Kao rezultat dobijena je karta faktora R, tj. veličine prihranjivanja u mm (slika 10.37).



Slika 10.37. Karta prostorne distribucije prihranjivanja kao rezultat infiltracije padavina

Karta prihranjivanja je dalje klasifikovana u tri klase (0-200, 200-400 i 400-600 mm) i svakoj klasi su dodeljene vrednosti faktora ULAZ (1,5, 1,25 i 1,0). Karta faktora ULAZ prikazana je na slici 10.38.

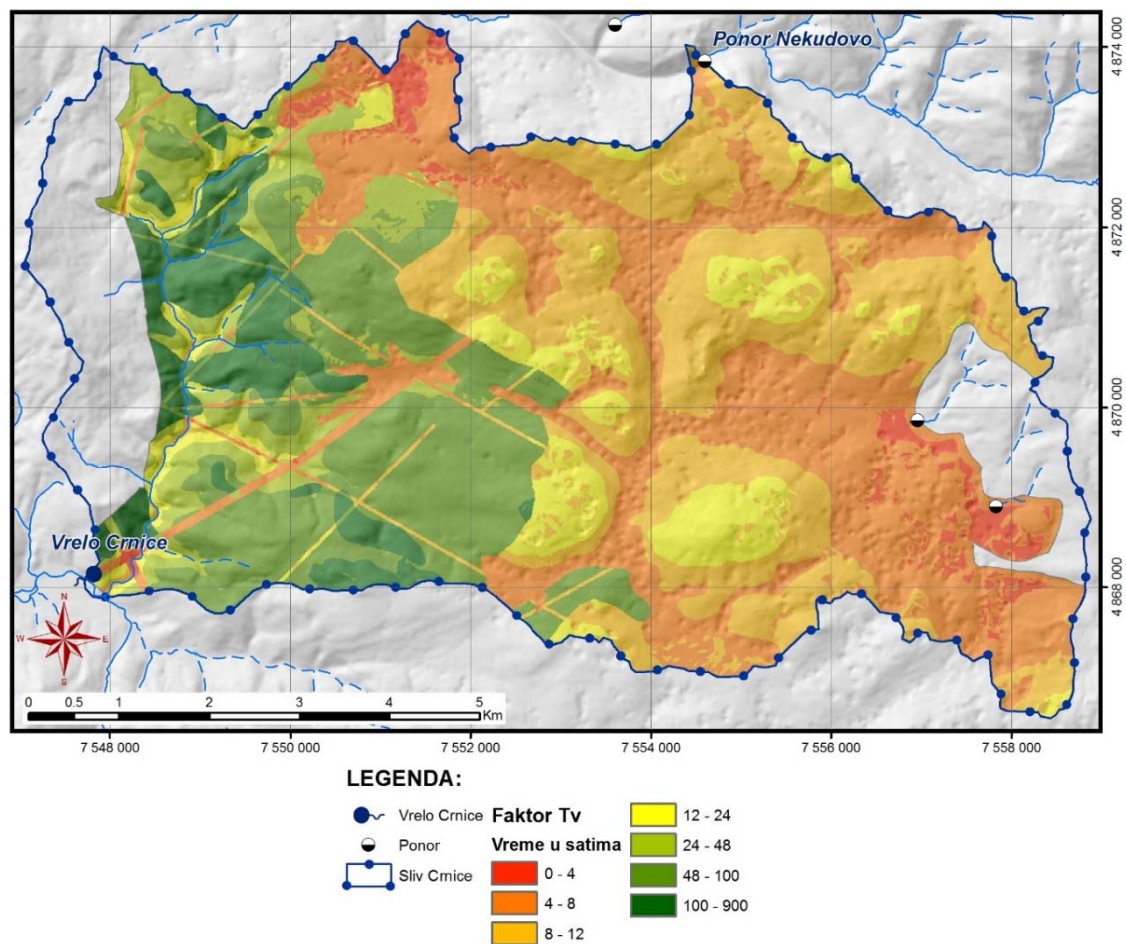


Slika 10.38. Karta prostorne distribucije faktora ULAZ

Nakon dobijanja karte faktora *ULAZ* ista je preklapljena sa kartom faktora *VREME* (slika 10.29). U svakoj tačke su ove dve vrednosti pomnožene, pri čemu je dobijeno ukupno vreme vertikalnog kretanja vode kroz nadizdansku zonu, odnosno karta faktora t_v (slika 10.39).

Slično kao i kod faktor Vreme, karta faktora t_v je pokazala da se najveći deo sliva vrele Crnice karakteriše malim vrednostima (do 1 dan) za područje intenzivno karstifikovanih stena i do 4 dana za ostale karbonatne tvorevine. Najveće vrednosti vremena vertikalnog

kretanja podzemnih voda su dobijene za delove karsta koji su prekriveni nekarbonatnim stenama, koji drastično smanjuju vreme transporta vode kroz nadizdansku zonu.



Slika 10.39. Karta parametra t_v

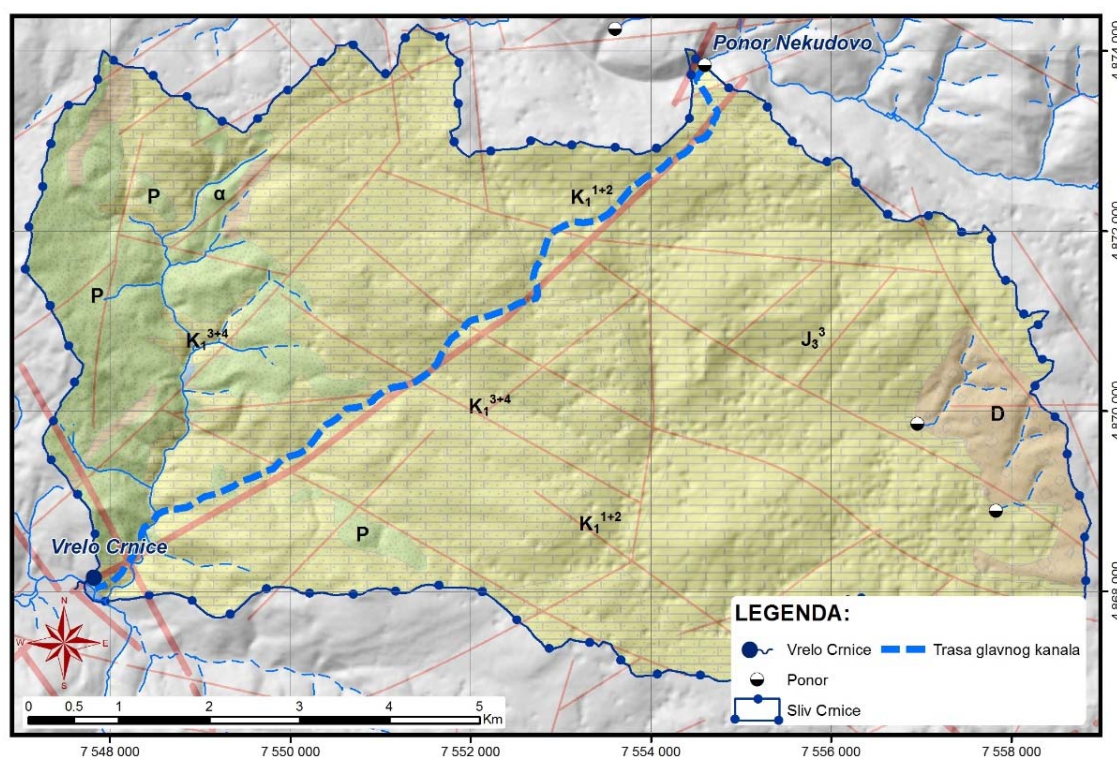
10.10.3. Određivanje vremena horizontalnog kretanja podzemnih voda

Procena vremena horizontalnog kretanja podzemne vode u karstnim terenima predstavlja veoma težak zadatak koji u sebi nosi veliku dozu subjektivnosti. Zbog izrazite anizotropnosti karbonatnih tvorevina, karstni sistemi se karakterišu dvojnomo poroznošću (Ford & Williams, 2007). Kao rezultat postojanja matriksne poroznosti, kao i mreže pukotina i prslina male poroznosti, kretanje podzemne vode u karstu može biti

„sporo“ (*Diffuse flow*). Međutim, postojanje makropora (kaverni, pukotina i prslina) uslovljava postojanje „brzog“ kretanja podzemne vode (*Free flow*)

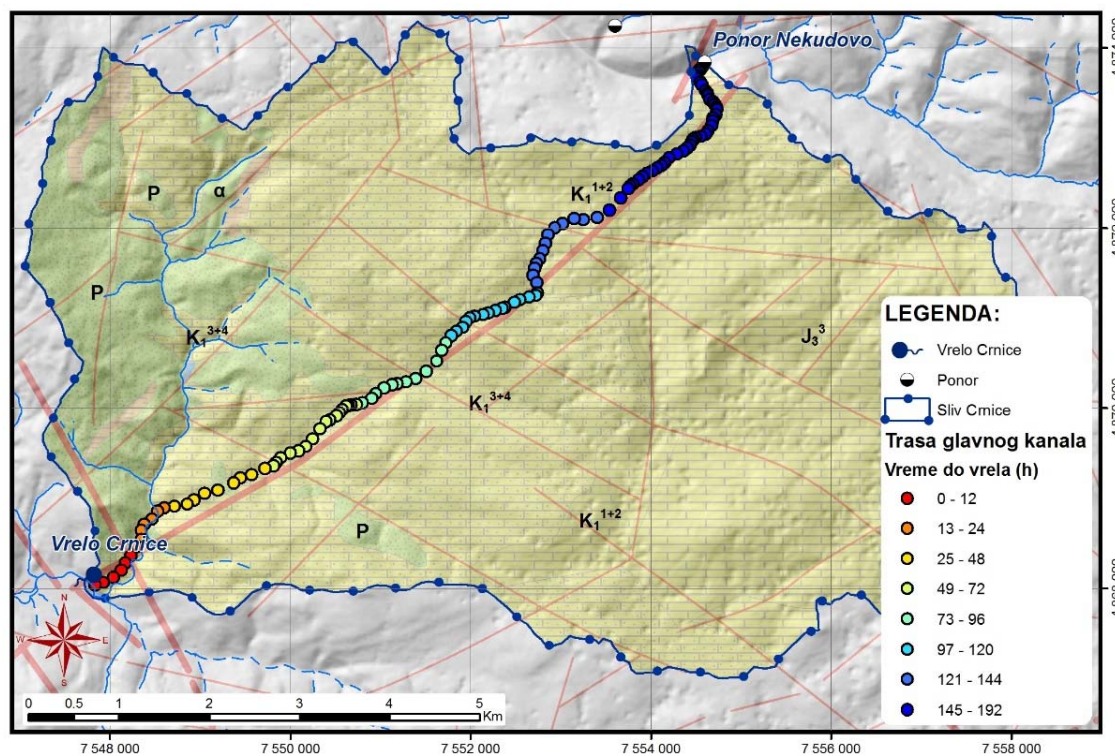
U proračunu vremena horizontalnog kretanja podzemne vode krenulo se od relativno poznate karakteristike karstnog sistema koji se drenira na vrelo Crnice, a to je dokazana hidraulička veza između ponora Nekudovske reke i vrela. Opirom bojenja koji je izveden u novembru 1970. godine dobijen je podatak da voda koja koncentrisano ponire u ponor putuje kroz karstni sistem do vrela za 194 sata. Na tom putu od približno 9000 metara voda se kreće prosečnom brzinom od 46 m/h pri hidrauličkom gradijentu od 0,03.

Prvi korak u oceni vremena horizontalnog kretanja podzemne vode ka vrelu bio je određivanje položaja glavnog kanala koji povezuje ponor i vrelo. Prostornim položajem glavnih struktura i orijentacijom položaja vrtača iscrtana je trasa glavnog kanala (slika 10.40).



Slika 10.40. Trasa glavnog kanala između ponora Nekudovske reke i vrela Crnice

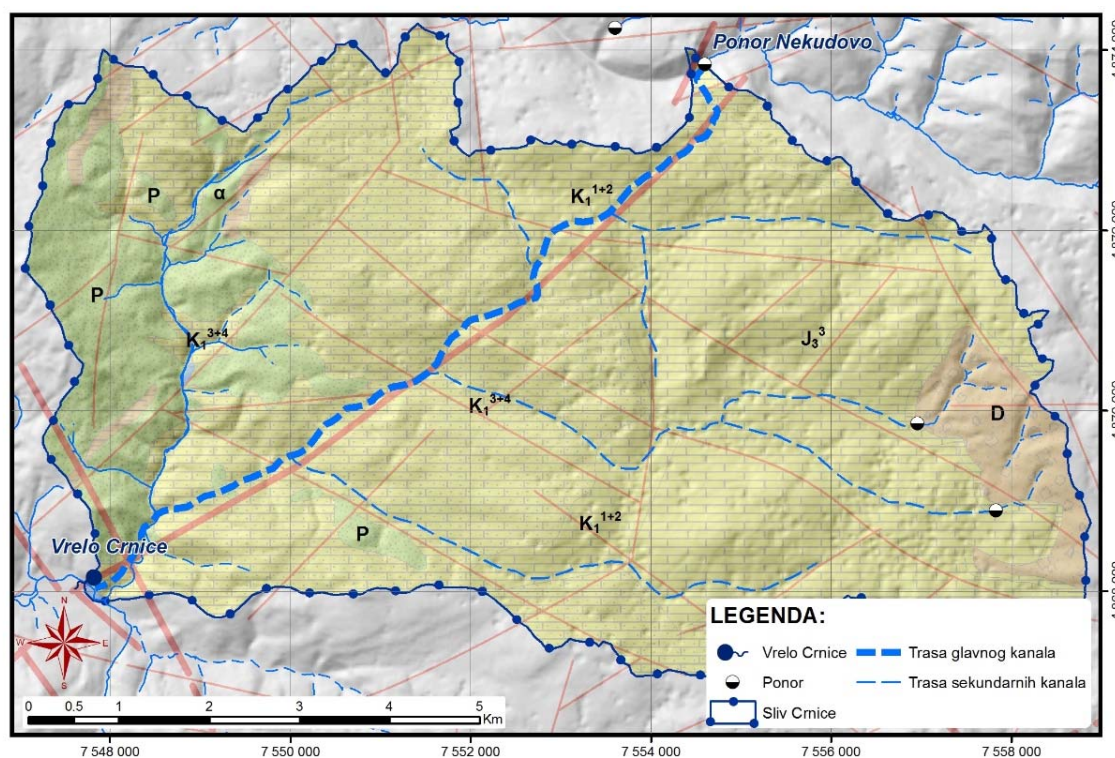
Trasa je u ArcGIS okruženju predstavljena kao 2D poliliniija, kojoj su zadate vrednosti vremena putovanja trasera kroz sistem (194 sata za tačku ponora i 0 sati za tačku vrele). Nakon toga je 2D trasa pretvorena u 3D trasu koristeći zadate vrednosti za vreme putovanja vode. Od dobijene trase su zatim na svakih 10 m (*Density Tool*) izvučene prelomne tačke, pri čemu je svaka tačka zadržala vreme koje je potrebno da voda iz te tačke doputuje kroz glavni kanal do vrele (slika 10.41).



Slika 10.41. Tačke na trasi glavnog kanala sa vremenom putovanja vode do vrele Crnice

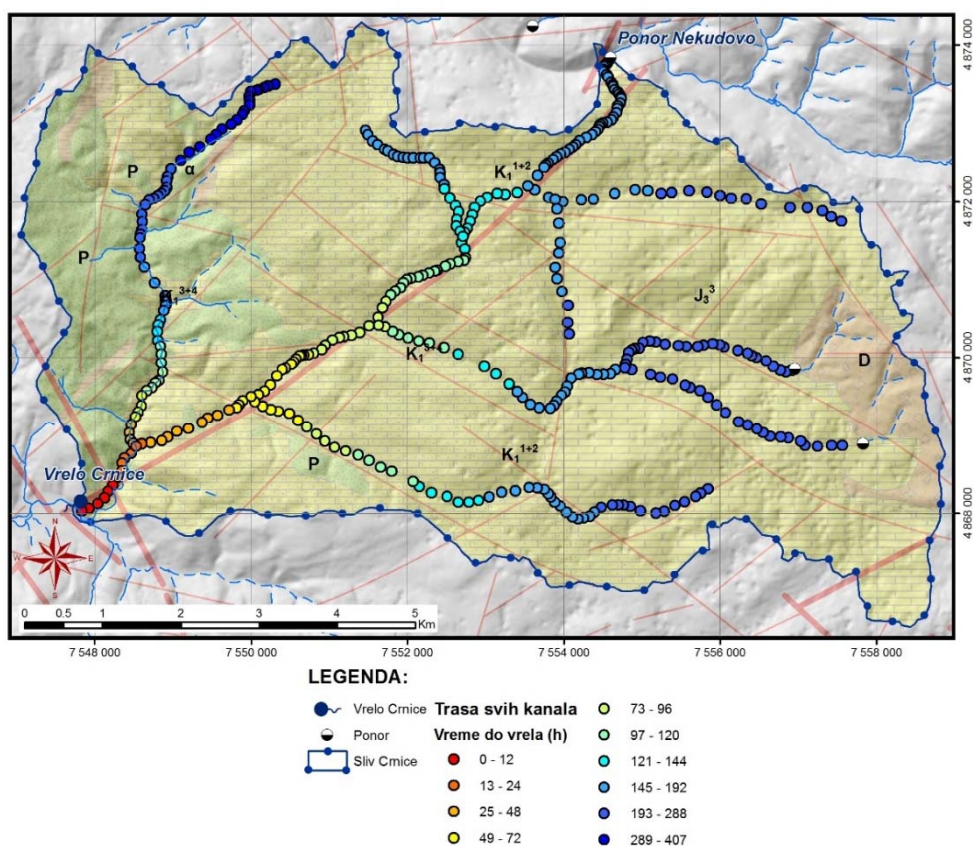
Drugi korak u oceni parametra t_h bio je određivanje položaja sekundarnih karstnih kanala koji gravitiraju ka glavnom kanalu. Na bazi pravaca pružanja glavnih kanala i položaja vrtača pretpostavljeni su kanali II i III reda (slika 10.42). Istom metodologijom kanali su digitalizovani u 2D poliliniije (trase). Na mestu gde se ovi kanali ulivaju u glavni kanal zadate su vrednosti vremena tačaka glavnog kanala. Vreme u početnom delu kanala je izračunato tako što je na krajnje vreme dodato vreme koje je dobijeno deljenjem dužine svake trase i brzine koja je redukovana u odnosu na brzinu kroz glavni kanal. Pretpostavljajući da se manje količine vode kreću kroz kanale II i III reda, brzine za kanale u delovima terena sa intenzivnom karstifikacijom su redukovane na $0,7 \cdot v_{(\text{ponor-vrelo})}$, dok je za kanal sa dubljom cirkulacijom u krečnjacima koji zaležu ispod permskih

peščara zadata vrednost $0,3 \cdot v_{(\text{ponor-vrelo})}$. Sve trase su zatim pretvorene u 3D trase koristeći početne i krajnje vrednosti putovanja podzemne vode, nakon čega su izvučene prelomne tačke sa vremenom potrebnim podzemnoj vodi da doputuje do glavnog kanala, a zatim do vrela (slika 10.43).

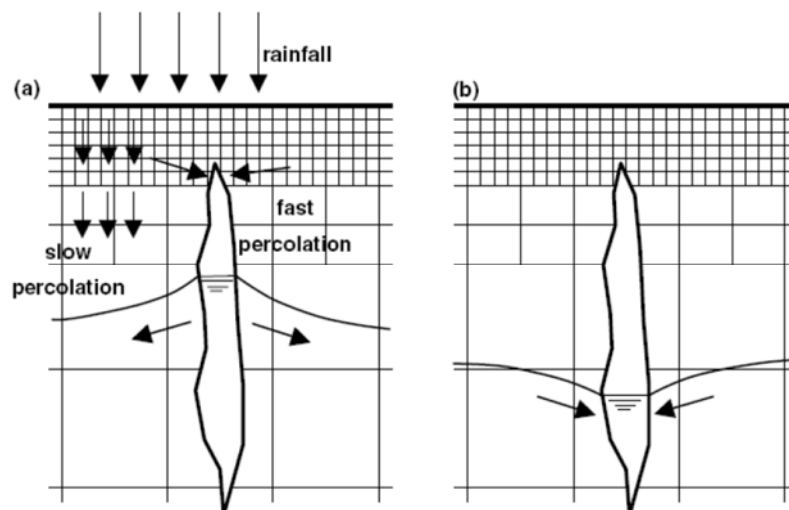


Slika 10.42. Trasa sekundarnih kanala koji gravitiraju ka glavnom kanalu

Ovim postupkom simulirano je vreme kretanja podzemnih voda kroz karstne kanale. Za procenu vremena horizontalnog kretanja kroz matriksnu poroznost uzeta je pretpostavka da izdvojeni karstni kanali predstavljaju lokalne bazise ka kojima podzemne vode gravitiraju. U prirodi ovo i jeste najčešći slučaj, jer se u periodima intenzivnih padavina karstni kanali napune vodom i mogu da hrane ostatak izdani, međutim u najvećem periodu godine, ovi kanali dreniraju izdan i odvođe vodu iz karstnog sistema (slika 10.44).



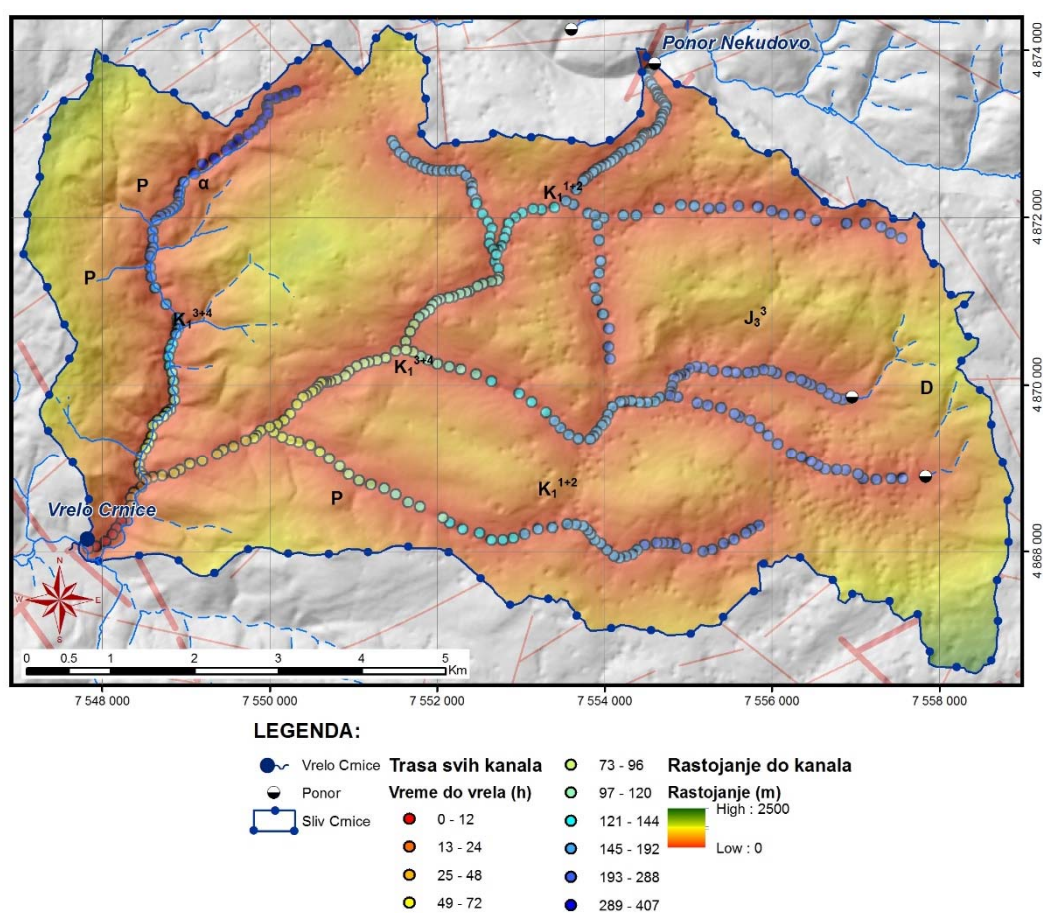
Slika 10.43. Tačke na trasi glavnog i sekundarnih kanala sa vremenom putovanja vode do vrela Crnice



Slika 10.44. Cirkulacija vode u karstnoj mreži velikih pukotina (Drogue, 1992, preuzeto od Jemcov 2000)

A - primer visokog nivoa podzemnih voda, B - primer niskog nivoa podzemnih voda (rainfall - kiša/padavine; slow percolation - spori tok; fast percolation - brzi tok)

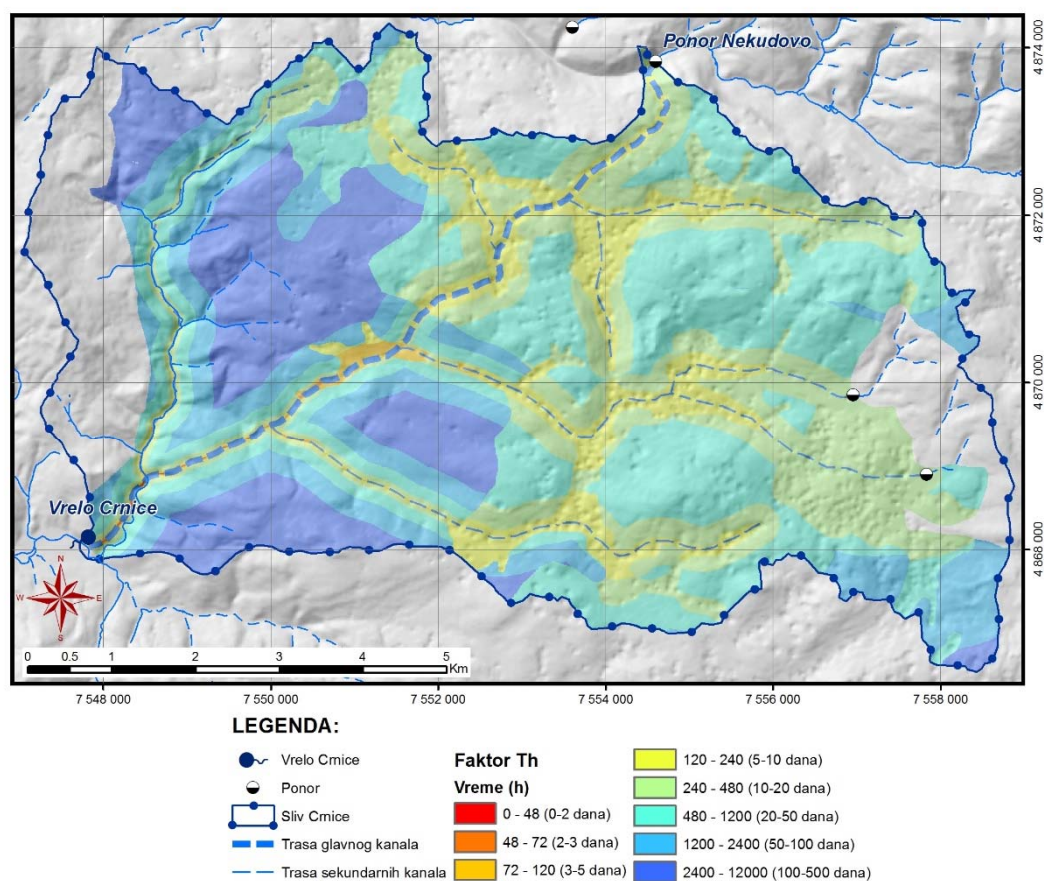
Za simulaciju vremena kretanja kroz matriksnu poroznost prvo je za celo područje sliva vrela Crnice izvršen proračun udaljenosti svake tačke od najbližeg karstnog kanala. U tu svrhu korišćena je alatka *Euclidian Distance* iz programskog dodatka za ArcGIS - *Spatial Analyst*. Primenom ove alatke dobijena je rasterska karta na kojoj je svaka tačka/piksel dobila informaciju o udaljenosti najbližeg kanala (slika 10.45). Deljenjem ove vrednosti sa prosečnom brzinom kretanja vode kroz matriks karbonatnih tvorevina dobijeno je vreme potrebno da voda doputuje iz bilo koje tačke do najbližeg kanala. Prilikom ovog proračuna za brzinu filtracije vode kroz matriksnu poroznost krednih krečnjaka korišćena je vrednost od $v=0,2$ m/h (Teutsch & Sauter, 1991), dok su za jurske krečnjake korišćene uvećane vrednosti, čime je simulirano brže kretanje vode kroz intenzivno karstifikovane stene.



Slika 10.45. Udaljenost tačke do najbližeg karstnog kanala u slivu vrela Crnice

U cilju dobijanja ukupnog vremena koje je potrebno da voda iz bilo koje tačke doputuje do vrela, u svakoj tački sliva je na vreme putovanja kroz matriksnu poroznost dodato i

vreme koje je potrebno da voda iz najbliže tačke kanala doputuje do vrela¹⁰. Time je simulirano realno vreme putovanja vode od trenutka kada ona dopre do saturisane zone, pa do trenutka kada nakon njenog putovanja kroz matriksnu i kavernožnu poroznost karstnog sistema stigne do vrela. Sumiranjem ovih vremena dobijena je vrednost parametra t_h , a samim tim i karta vremena horizontalnog kretanja podzemne vode ka vrelu (slika 10.46).



Slika 10.46. Karta parametra t_h

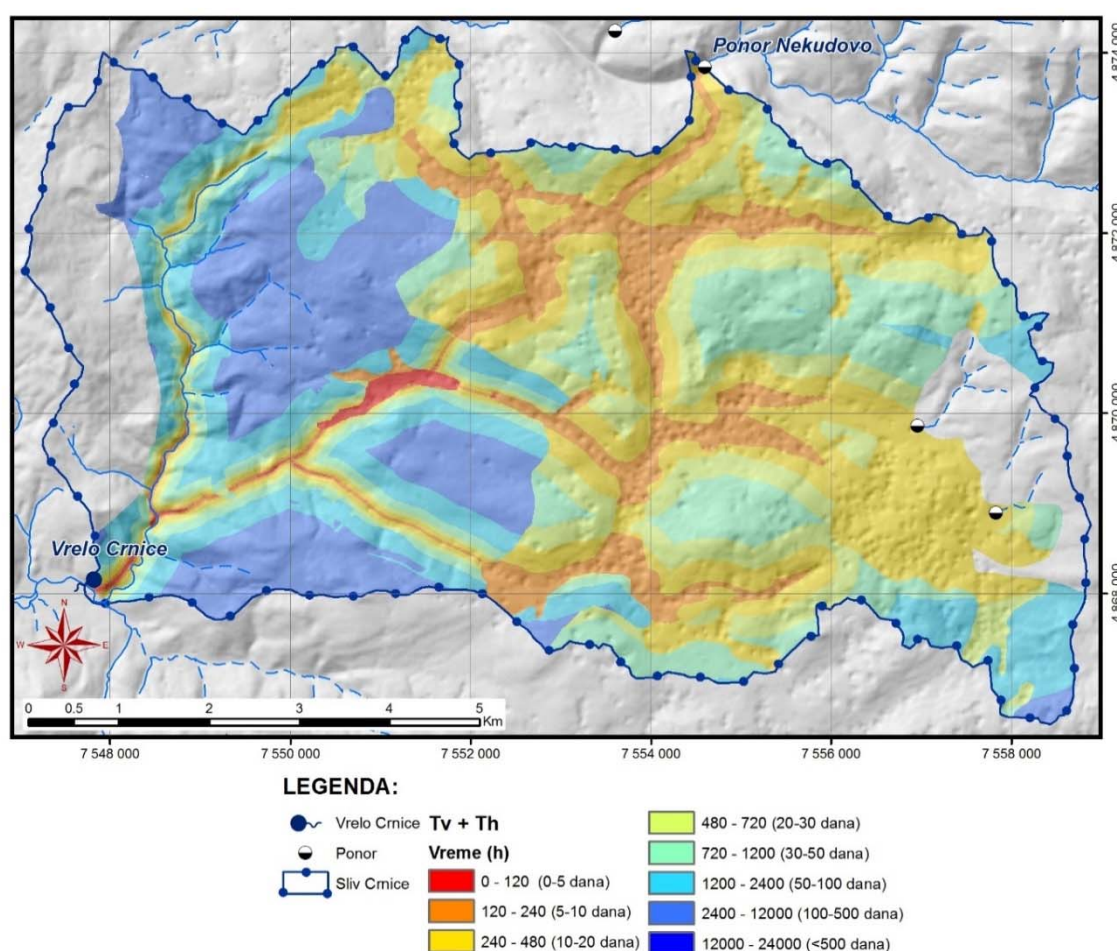
Dobijena karta parametra t_h pokazuje veliki raspon u vremenu horizontalnog kretanja podzemnih voda ka vrelu. Najmanje vrednosti (do 10 dana) dobijene su za zone pružanja karstnih kanala, kao i neposredni prostor oko njih. Udaljavanjem od kanala ovo vreme se uveliko uvećava, pa je na prostoru rasprostranjenja intenzivno karstifikovanih jurskih krečnjaka vreme uvećava do 50 dana. U zapadnom delu područja

¹⁰ Vrednost dobijena primenom alatke Euclidian Allocation (Spatial Analyst ekstenzija za ARCGIS)

gde su karbonatne stene manje karstifikovane i gde se očekuju manje brzine kretanja podzemne vode, vrednosti vremena horizontalnog kretanja kreću se i do preko 1 godine.

10.10.4. Izrada finalne karte ranjivosti izvorišta podzemnih voda

Prvi korak u dobijanju karte ukupnog vremena kretanja vode ka vrelu Crnice je bio spajanje karte vremena vertikalnog (slika 10.39) i horizontalnog (slika 10.46) kretanja podzemnih voda za deo sliva Crnice sa dominantnom difuznom infiltracijom. Primenom alatke *Raster Calculator* prostim sabiranjem vrednosti za t_v i t_h u svakoj tački rasprostranjenja karstne izdani dobijena je karta vremena putovanja vode sa površine terena ka vrelu Crnice za područje sliva sa difuznom infiltracijom (slika 10.47).



Slika 10.47. Karta ukupnog vremena putovanja vode ka vrelu Crnice za područje sliva sa difuznom infiltracijom

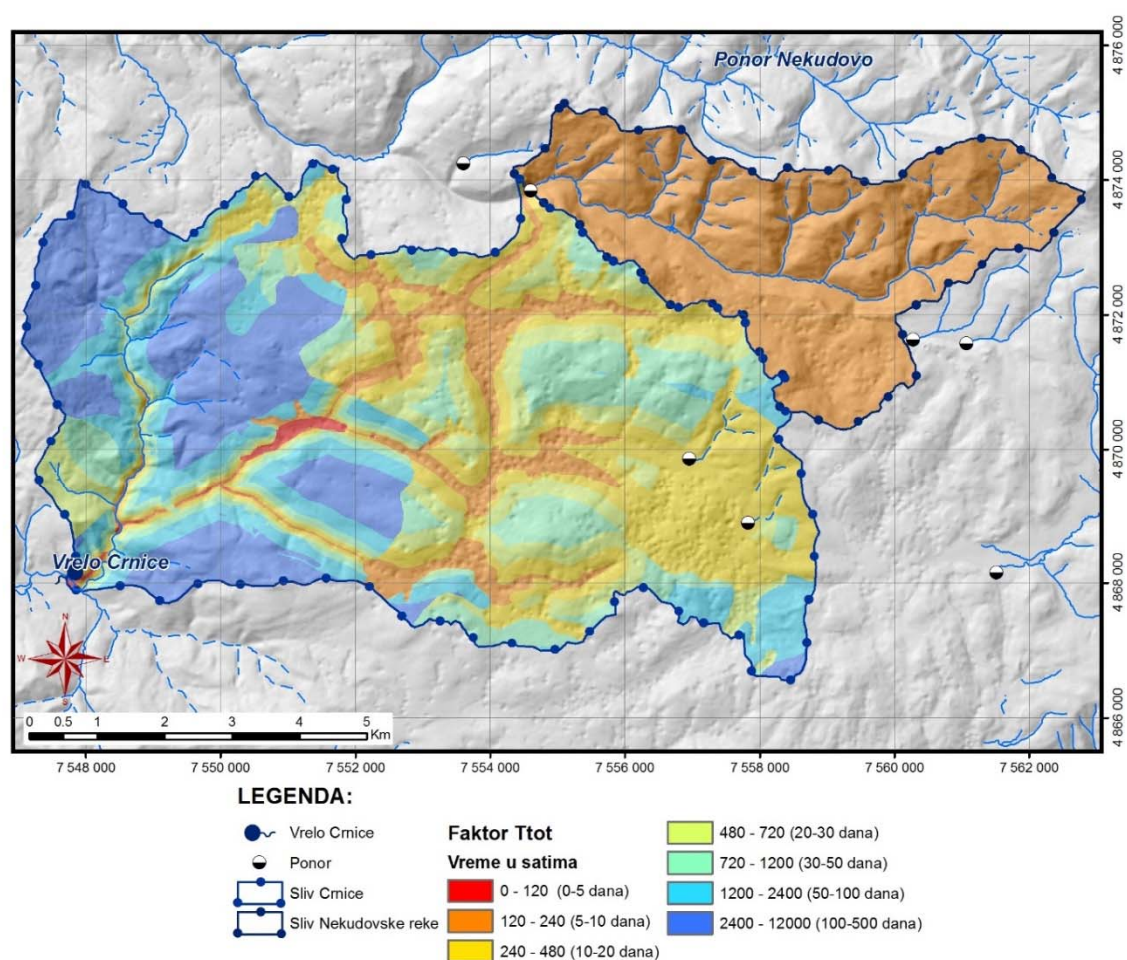
Dobijena karta pokazuje da su najmanje vrednosti vremena putovanja vode od površine terena do vrela Crnice dobijene za područja trasa karstnih kanala, kao i prostor u neposrednoj blizini ovih kanala. U ovim delovima voda sa površine terena doputuje do vrela za najviše 10 dana. Intenzivno karstifikovani tereni u istočnom delu sliva Crnice takođe se karakterišu malim vrednostima vremena (do 30 dana). Manje karstifikovane stene u zapadnom delu sliva, kao i delovi karstne izdani koji su pokriveni manje propusnim sedimentima, se karakterišu značajno dužim vremenima putovanja vode koje je uglavnom u rasponu 100-500 m.

Finalna karta ukupnog vremena kretanja vode ka vrelu Crnice treba da uključi i delove sliva sa površinskim kretanjem vode ka ponorima i ponorskim zonama. Za ove delove terena prethodno je urađen proračun vremena kretanja površinske vode (poglavlje 10.10.1). Na dobijeno vremena je dodato vreme koje je potrebno da voda od ponora ili ponorske zone doputuje do vrela. Tako na primer, na vreme površinskog kretanja vode u slivu Nekudovske reke dodato je vreme od 184 sati, koliko je bilo potrebno obeleživaču da doputuje do vrela. Sličan postupak primenjen je za delove nekarsta u zapadnom delu sliva Crnice, kao i za područje sliva ponora u zoni Troglan Bare (istočni deo sliva izgrađen od devonskih tvorevina). Spajanjem karata svih ovih vremena¹¹ dobijena je karta ukupnog vremena kretanja vode ka slivu vrela Crnice (slika 10.48).

Karta ukupnog vremena kretanja vode ka vrelu Crnice pokazala je da delovi sliva sa najkraćim vremenom putovanja vode do vrela predstavljaju intenzivno karstifikovane stene u istočnom delu sliva. U ovim delovima terena površinske vode ne samo što veoma brzo stignu do izdanske zone, već se nakon toga relativno brzo i transportuju putem karstnih kanala, usled čega je ukupno vreme putovanja vode svedeno na minimum. Kratkim vremenom putovanja takođe se karakterišu i tereni koji su obuhvaćeni slivom Nekudovske reke. U ovim delovima terena površinske vode se veoma brzo speru sa strmih padina i putem površinskih tokova i zatim karstnih kanala relativno brzo stignu do vrela. Sa druge strane kompaktnije karbonatne stene kao i

¹¹ *Alatka „Mosaic to new raster“*

nekarbonatne tvorevine u zapadnom delu sliva karakterišu se znatno dužim vremenom kretanja vode sa površine terena do vrela Crnice.



Slika 10.48. Karta ukupnog vremena putovanja vode ka vrelu Crnice (t_{tot})

Primenjena metodologija za ocenu ranjivosti podzemnih voda u slivu vrela Crnice na bazi vremena putovanja, pokazala je da najranjiviji delovi sliva ne moraju da budu i oni tereni koji su najbliži vrelu. Vreme filtracije vode kroz nadizdansku zonu može znatno da utiče na ukupno vreme kretanja vode ka vrelu i kasnije na predloženu zonu sanitarne zaštite. Na bazi dobijenih rezultata, očigledno je da intenzivno ispućali i karstifikovani tereni koji se nalaze u blizini glavnih karstnih kanala predstavljaju najugroženije zone gde je najlakše ugroziti kvalitet karstnih voda.

Pored toga, slivovi ponirućih vodotoka uvek predstavljaju opasnost za zagađivanje voda karstnih vrela, jer potencijalni kontaminanti mogu veoma brzo da se transportuju do

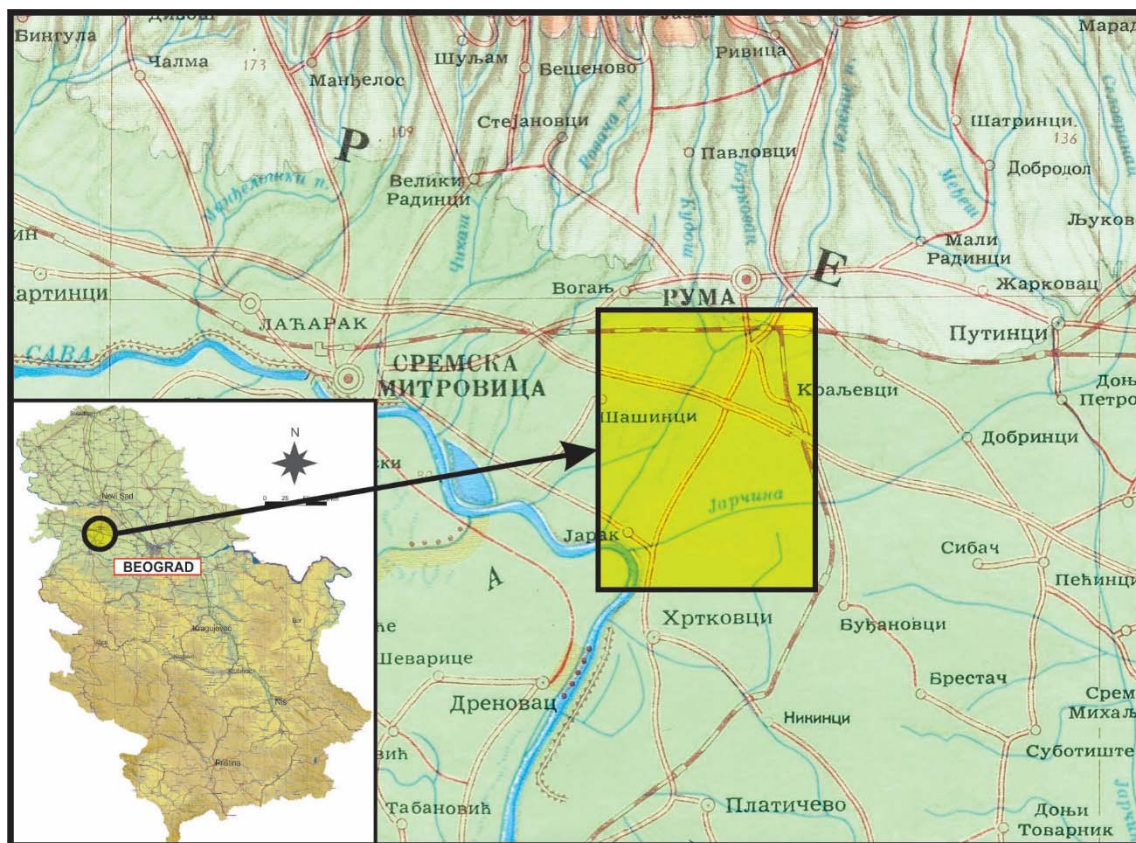
ponora i kasnije do vrela. Pored toga, zbog smanjene difuzne infiltracije, kao i zbog turbulentnog kretanja podzemne vode kroz karstnu izdan, procesi koji mogu da utiču na smanjenje i degradaciju kontaminanata su svedeni na minimum, pa je zaštita izvorišta na ovim područjima još problematičnija.

11. ZAŠTITA PODZEMNIH VODA IZVORIŠTA „FIŠEROV SALAŠ“

11.1. Geografski položaj izvorišta

Izvorište „Fišerov salaš“ nalazi se na oko 7 km južno od grada Rume. Locirano je sa obe strane magistralnog puta Ruma – Šabac, južno od autoputa Beograd-Zagreb (slika 11.1). Koristi se za vodosnabdevanje Rume, ali administrativno ovo područje pripada opštini Sremska Mitrovica.

Teren u području izvorišta pripada južnom obodu Panonske nizije poznatom kao južni Srem. To je zaravnjeni teren sa nadmorskim visinama između 80 i 90 m n.m.



Slika 11.1. Geografski položaj izvorišta „Fišerov Salaš“

11.2. Klimatske karakteristike

Područje izvorišta „Fišerov Salaš“, kao i okolni tereni južnog Srema, odlikuje se umereno-kontinentalnom klimom sa jasno izraženim prelaznim godišnjim dobima. Za nju su karakteristična topla leta i hladne zime. Za ilustraciju opštih klimatskih karakteristika izučavanog terena korišćeni su podaci osmatranja osnovnih klimatskih elemenata od strane RHMZ Srbije sa najbližih meteoroloških stanica.

Padavine

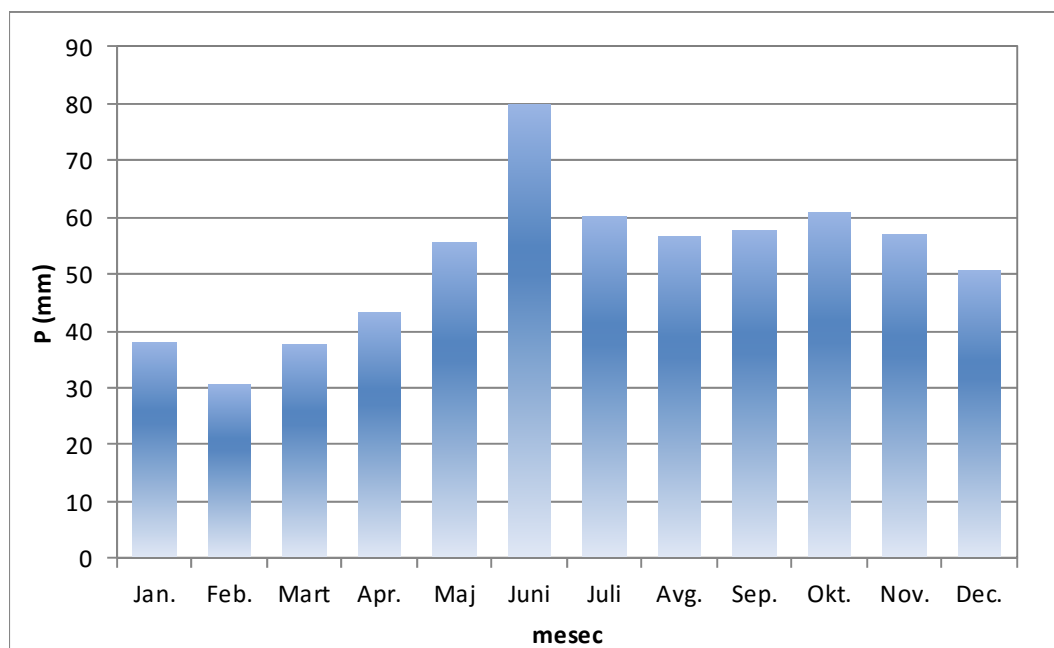
Konkretno pri analizi režima padavina korišćeni su podaci RHMZ-a sa kišomernih stanica Sremska Mitrovica i Šabac, u čijoj blizini se nalazi izvorište (tabele 11.1 i 11.2). Isti su prikazani i grafički (slike 11.2 i 11.3).

Najviše padavina na meteorološkoj stanici Sremska Mitrovica u proseku se izluči tokom meseca juna, a najmanje tokom februara, sa godišnjim prosekom 626,7 mm (tabela 11.1, slika 11.2).

Tabela 11.1. Prosečne mesečne i godišnja suma padavina u mm za klimatološku stanicu Sremska Mitrovica za period 1991 – 2010. godine (RHMZ Srbije)

	Jan.	Feb.	Mart	Apr.	Maj	Juni	Juli	Avg.	Sep.	Okt.	Nov.	Dec.	P _{god}
P_{sr}	37,8	30,4	37,5	43,3	55,4	79,7	60,1	56,4	57,6	60,9	57,0	50,5	626,7
P_{min}	6,3	5,4	3,9	0	14	18,2	13,9	0,1	5,8	6,8	19,6	14,1	298,2
P_{max}	80,2	74,6	80,3	109,8	109	220,4	168,5	156,2	154,9	130,2	111,3	103,9	863,5

Na meteorološkoj stanici Šabac, prosečne maksimalne količine padavina karakteristične su za mesec juni, a minimalne za mesec februar, sa godišnjim prosekom od 684,4 mm (tabela 11.2, slika 11.3).



Slika 11.2. Histogram srednjih mesečnih suma padavina za meteorološku stanicu Sremska Mitrovica za period 1991 – 2010. godine (po podacima RHMZ Srbije)

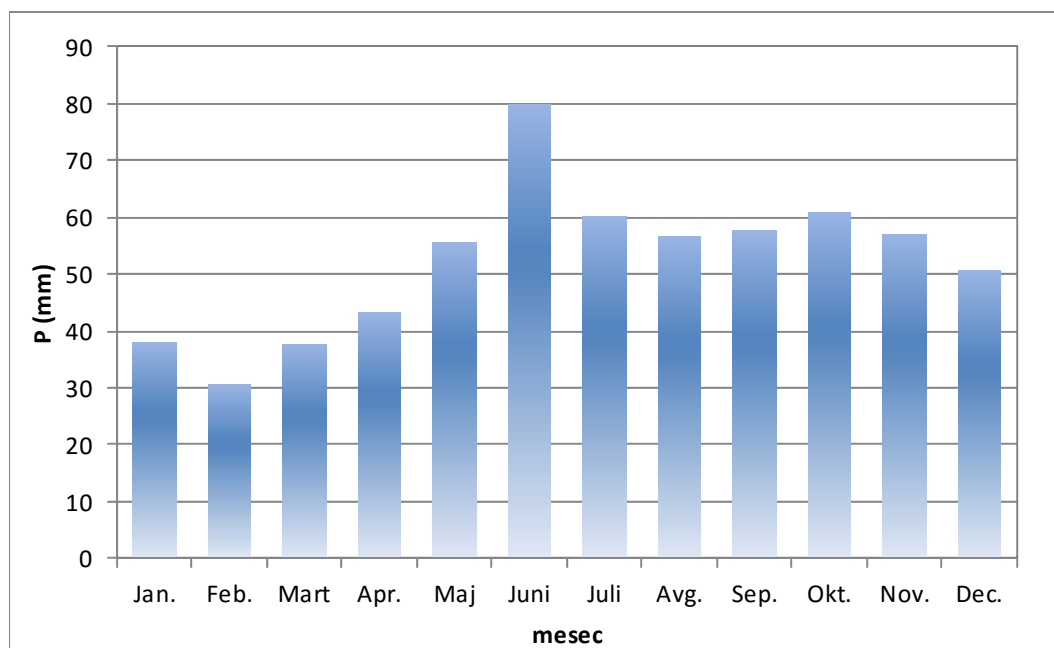
Tabela 11.2. Prosečne mesečne i godišnja suma padavina u mm za meteorološku stanicu Šabac za period 1991 – 2010. godine (RHMZ Srbije)

	Jan.	Feb.	Mart	Apr.	Maj	Juni	Juli	Avg.	Sep.	Okt.	Nov.	Dec.	P _{god}
P_{sr}	49,0	37,6	38,3	46,2	58,5	72,0	63,8	67,8	57,9	63,4	66,3	63,6	684,4
P_{min}	15,6	6,8	5,2	5,2	28,4	16,5	15,6	0	14,8	0	22,8	21,7	540,4
P_{max}	96,3	94,3	91,9	115	86,9	143,9	173,8	160,6	165,5	109,2	125,8	147,2	948,6

Temperatura vazduha

Za analizu temperaturnog režima područja izvorišta korišćeni su podaci RHMZ-a sa meteorološke stanice Sremska Mitrovica i Šabac (tabele 11.3 i 11.4).

Najniže prosečne temperature vazduha u osmatranom periodu na meteorološkoj stanici „Sremska Mitrovica“ javljaju se tokom januara, sa višegodišnjim prosekom od 0,3 °C, a najviše tokom meseca jula, sa višegodišnjim prosekom od 21,8 °C. Prosečne godišnje temperature za ovaj period iznosile su 11,5 °C (tabela 11.3, slika 11.4).

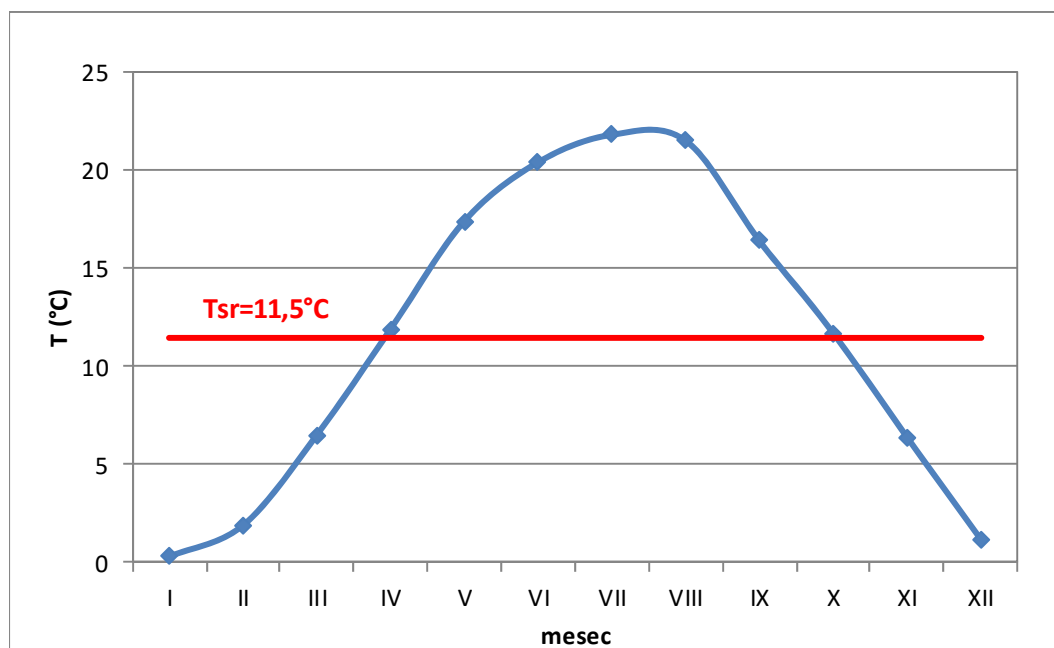


Slika 11.3. Histogram srednjih mesečnih suma padavina za meteorološku stanicu Šabac za period 1991 – 2010. godine (po podacima RHMZ Srbije)

Tabela 11.3. Prosečne mesečne i srednja višegodišnja temperatura vazduha (°C) za meteorološku stanicu Sremska Mitrovica za period 1991 – 2010. godine (RHMZ Srbije)

	Jan.	Feb.	Mart	Apr.	Maj	Juni	Juli	Avg.	Sep.	Okt.	Nov.	Dec.	T _{god}
T_{sr}	0,3	1,9	6,5	11,9	17,4	20,4	21,8	21,5	16,4	11,7	6,4	1,2	11,5
T_{min}	-2,1	-3,8	2,5	7,3	13,1	18,0	19,6	19,1	13,0	8,5	2,6	-3,8	10,3
T_{max}	5,2	6,3	10,1	14,9	20,1	23,5	23,1	24,4	19,8	13,7	10,0	3,7	12,6

Na meteorološkoj stanici „Šabac“ najniže prosečne mesečne temperature vazduha takođe se javljaju u januaru sa višegodišnjim prosekom od -0,4 °C, a najviše tokom meseca jula sa prosekom 21,8 °C (tabela 11.4, slika 11.5). Prosečne godišnje temperature za ovaj period iznosile su 11,5 °C.



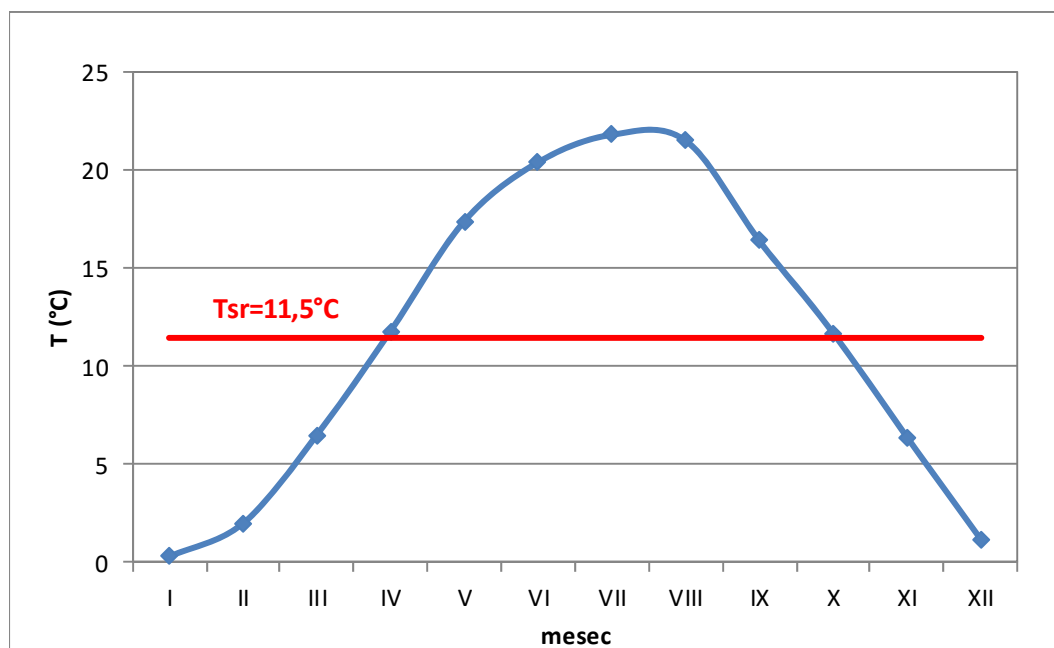
Slika 11.4. Dijagram srednjemesečnih temperatura vazduha (°C) za meteorološku stanicu Sremska Mitrovica za period 1991 – 2010. godine (RHMZ Srbije)

Tabela 11.4. Prosečne mesečne i srednja višegodišnja temperatura vazduha (°C) za meteorološku stanicu Šabac za period 1991 – 2010. godine (RHMZ Srbije)

	Jan.	Feb.	Mart	Apr.	Maj	Juni	Juli	Avg.	Sep.	Okt.	Nov.	Dec.	T _{god}
T _{sr}	0,3	2,0	6,5	11,8	17,4	20,4	21,8	21,5	16,4	11,7	6,4	1,2	11,5
T _{min}	-2,1	-3,8	2,5	7,3	13,0	18,0	19,6	19,1	13,0	8,5	2,6	-3,8	10,3
T _{max}	5,2	6,3	10,1	14,9	20,1	23,5	23,1	24,4	19,8	13,7	10,0	3,7	12,5

11.3. Hidrografske i hidrološke karakteristike

Ovaj deo Srema u hidrografskom smislu pripada slivu Save, odnosno Crnomorskom slivu. Pored reke Save koja protiče u neposrednoj blizini izvorišta, u ovom području prisutna je razgranata mreža kanala čija namena je dreniranje i navodnjavanje poljoprivrednih površina.



Slika 11.5. Dijagram srednjemesečnih temperatura vazduha (°C) za meteorološku stanicu Šabac za period 1991 – 2010. godine (RHMZ Srbije)

Sava, kao tipična ravničarska reka ima široku dolinu. Tok reke Save je krivudav, sa čestim meandriranjem usled čega na mestima nekadašnjeg korita ostaju brojne mrtvaje. U južnom delu Srema, reka Sava formira terasnu ravan širine više kilometara. Njeni maksimalni proticaji javljaju se tokom aprila, a minimalni tokom septembra meseca. Srednji višegodišnji proticaji Save nizvodno od Šapca iznose oko 1600 m³/s (Rašula i saradnici, 1997).

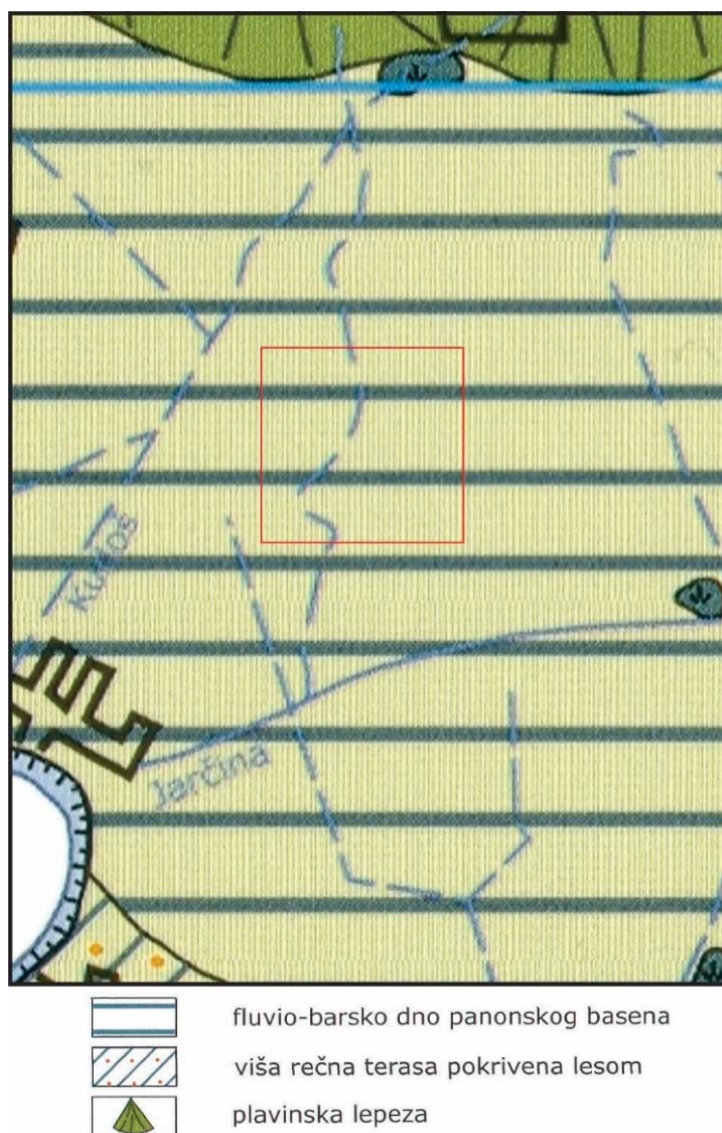
Od kanala, u neposrednoj blizini nalazi se kanal Jarčina koji protiče kroz selo Jarak i koji je spojen sa meandrom Save. Zapadnije od izvorišta, prema Sremskoj Mitrovici proteže se kanal Kudoš.

11.4. Geomorfološke karakteristike

Generalno, šire područje izvorišta „Fišerov Salaš“ pripada Sremu, odnosno južnim delovima prostrane Panonske nizije, i poznato je kao Varoška terasa južnog Srema sa visinom 76-90 m n.m. Konkretno, u zoni izvorišta nadmorske visine ove terase kreću se od 80 do 90 m n.m. Teren izgrađuju lesoidni sedimenti (pesak, glina), što pored

zaravnjenosti terena doprinosi čestom zabarivanju, pa je za potrebe odvodnjavanja poljoprivrednih površina izgrađena mreža kanala. Izdignuta je 2-4 m iznad aluvijalne ravni Save na jugu i u blagom usponu do apsolutne visine od oko 100 m n.m., tj. do sremske lesne zaravni na severu (slika 11.6).

Južno od izvorišta nalazi se aluvijalna ravan Save (inundaciona površ i najmlađa aluvijalna ravan) apsolutne visine 74-85 m n.m (Josipović i Soro, 2012).

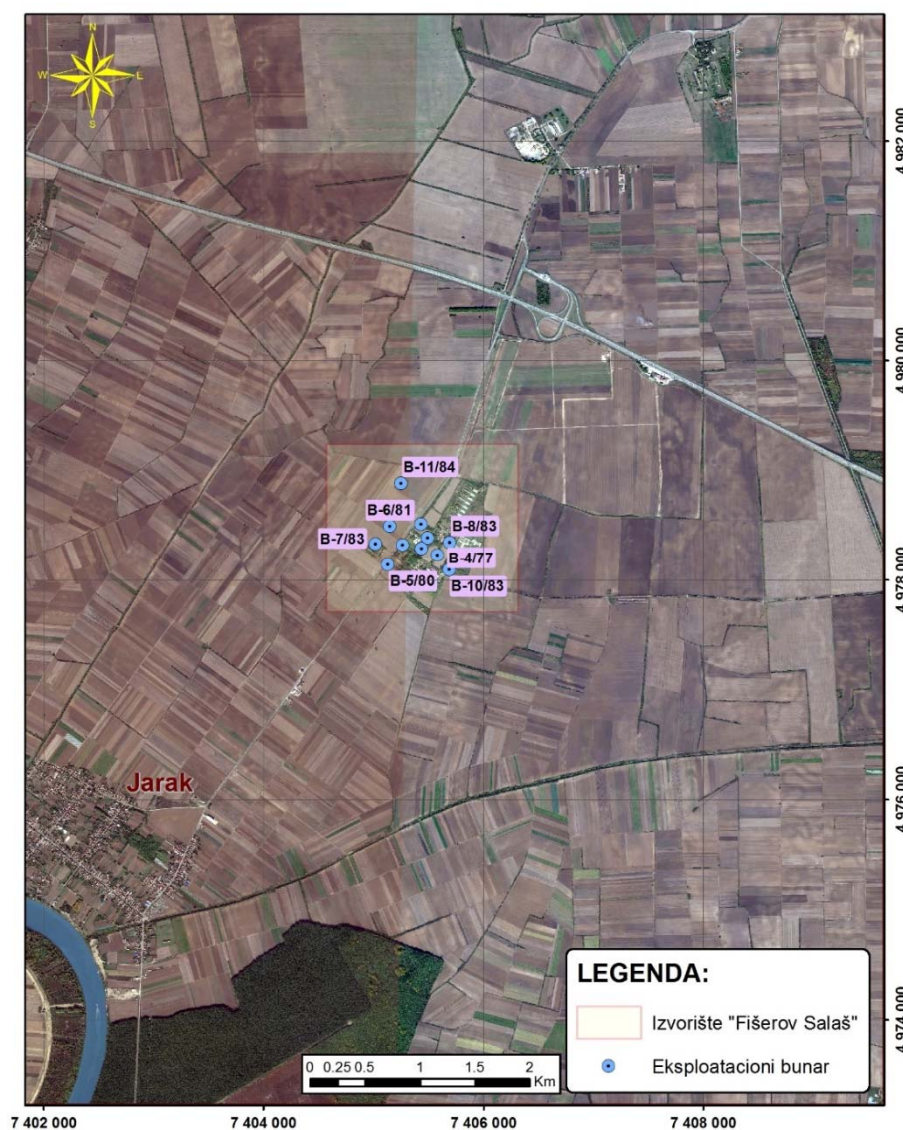


*Slika 11.6. Geomorfološka karta šireg područja izvorišta „Fišerov Salaš“
(Koščal i dr., 2005)*

11.5. Vegetacioni pokrivač

Privreda u Vojvodini je zasnovana na velikom bogatstvu kvalitetnog obradivog zemljišta koje zahvata 84% njene površine. Najveći deo šireg područja izvorišta „Fišerov Salaš“ je pod oranicama (slika 11.7). Oko 70% prinosa sa ovih polja otpada na žitarice, 20% na industrijsko bilje, a 10% na ostale kulture (Manojlović et al. 2014).

U jugozapadnom delu istražnog područja (jugoistočno od sela Jarak) se nalazi šuma Dobreč. Šuma je najvećim delo sastavljena od hrasta lužnjaka i od bagrema.



Slika 11.7. Satelitski snimak šireg područja izvorišta „Fišerov Salaš“ (Google Maps, 2015)

11.6. Pedološke karakteristike tla

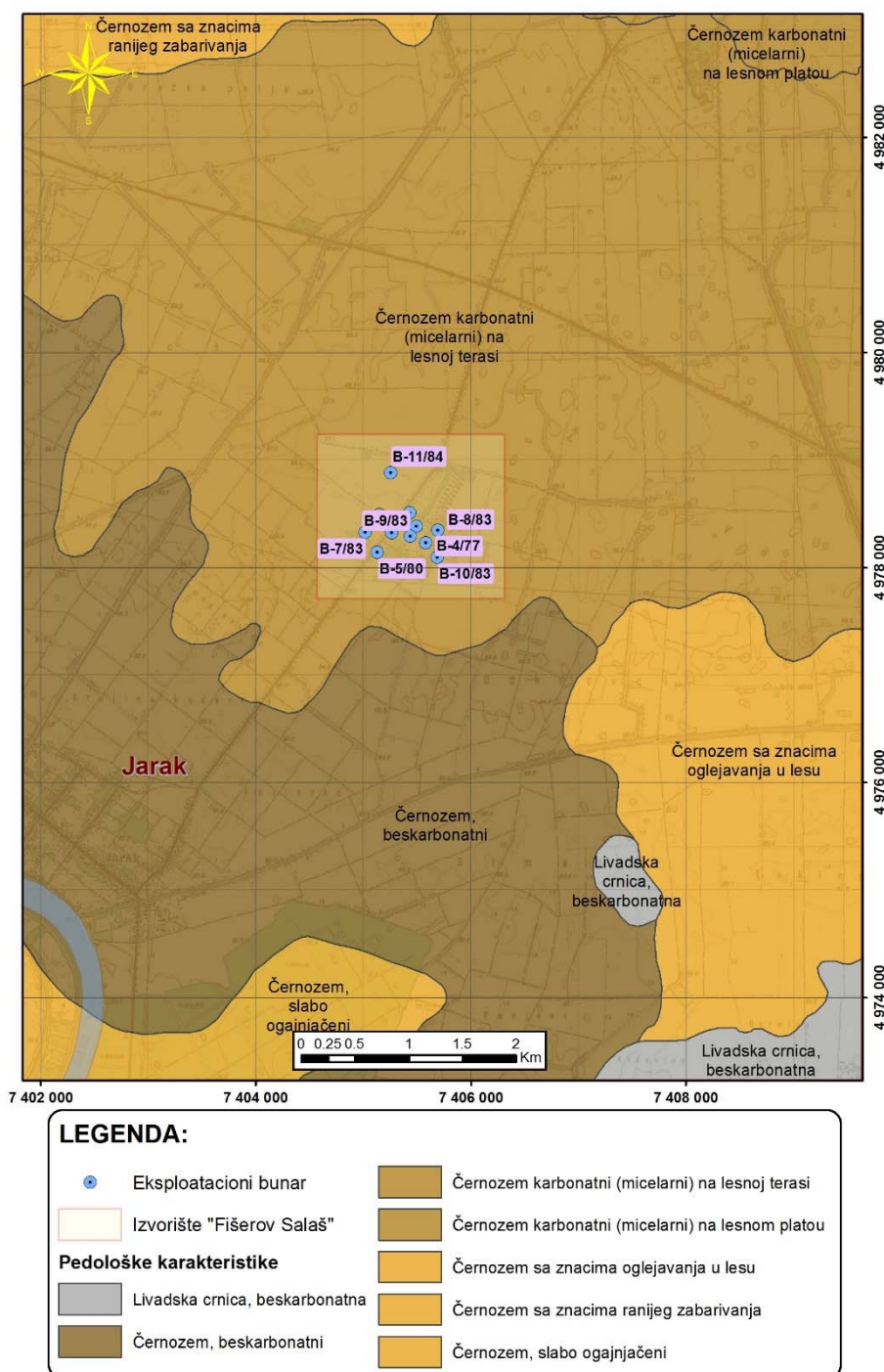
Analiza pedološkog sastava šireg područja izvorišta „Fišerov Salaš“ urađena je na osnovu pedološke karte Vojvodine u razmeri 1:50000 (Nejgebauer et al., 1971). Izdvojeni su sledeći tipovi zemljišta (slika 11.8):

- černoze, beskarbonatni,
- černoze, karbonatni na lesnoj terasi,
- černoze, karbonatni na lesnom platou,
- černoze sa znacima oglejavanja u lesu,
- černoze sa znacima ranijeg zabarivanja,
- černoze, slabo ogajnjačeni i
- livadska crnica, beskarbonatna.

Sva zastupljena zemljišta na širem istražnom području je moguće svrstati u jednu grupu zemljišta tj. u grupu černozema.

Černoze je najrasprostranjeniji tip zemljišta Srema (slika 11.9). U pogledu vodnih, fizičkih i hemijskih osobina, smatra se za najpovoljnije zemljište za poljoprivrednu proizvodnju. Sve horizonte černozema karakteriše visoki sadržaj peskovite komponente (oko 50 %). Sadržaji glinovite komponente manji su od 20%.

Prema aktuelnoj klasifikaciji zemljišta, livadska crnica pripada tipu černozema, oglejenom varijetetu sa smanjenim sadržajem peskovite i povećanim sadržajem prašinate komponente.



Slika 11.8. Pedološka karta šireg područja izvorišta „Fišerov Salaš“ (Nejgebauer et al., 1971)



Slika 11.9. Černozem na lesu i lesolikim sedimentima, karbonatni (Manojlović et al., 2014)

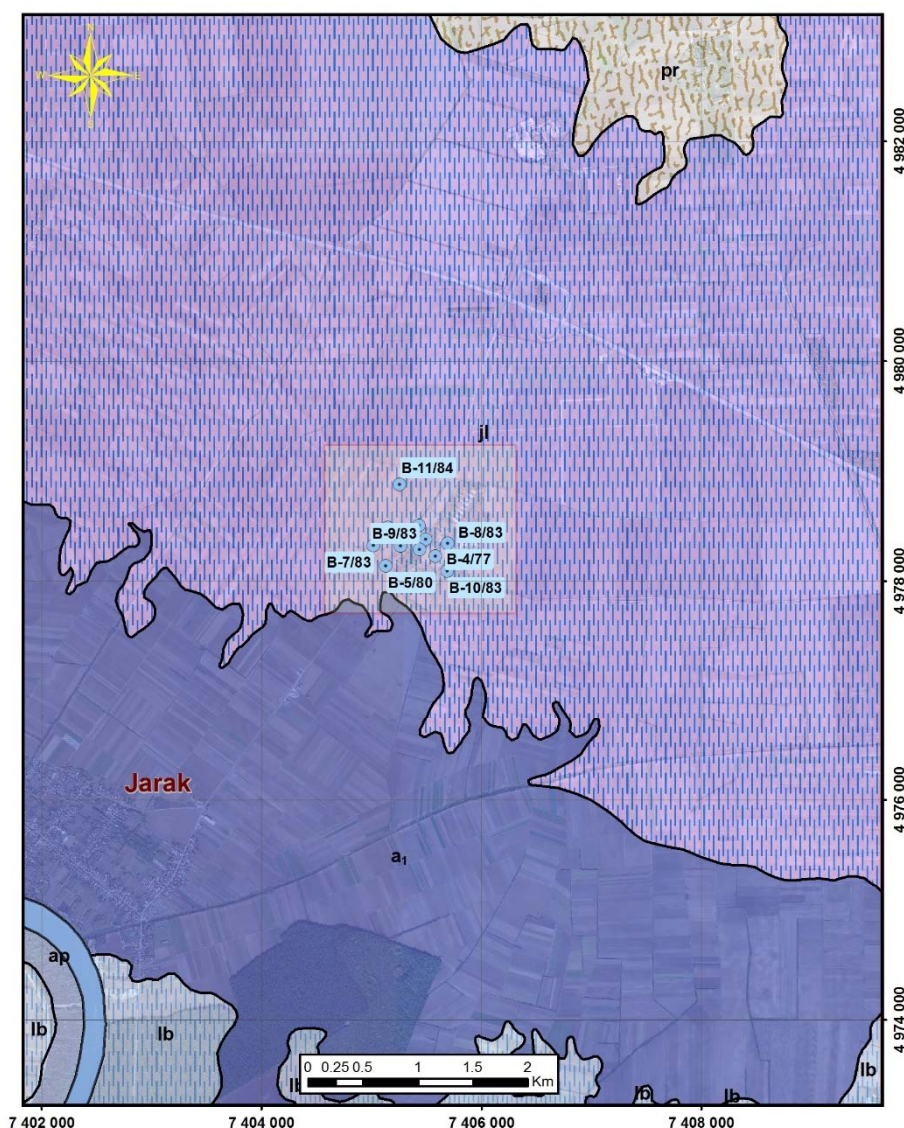
11.7. Geološka građa terena

Šire područje izvorišta „Fišerov Salaš“ izgrađuju sedimenti stvarani tokom pliocena i kvartara (slika 11.10). Podinu pomenutim sedimentima utvrđenu dubokim bušotinama predstavljaju stariji sedimenti i stene, počev od miocenih sedimenata pa nadalje (Rajčević, 1983b). Obzirom na predmetnu problematiku u daljem tekstu biće opisani samo pliocenski i kvartarni sedimenti.

Pliocen (Pl)

Sedimenti pliocena u istražnom području nisu otkriveni na površini terena. Leže ispod debelog kvartarnog pokrivača gde su otkriveni bušenjem. Predstavljani su pontskim i paludinskim slojevima.

Pont (Pl₁). Sedimenti ponta predstavljani su alevritima, peskovima, peskovito-glinovitim alevritima, alevritskim glinama, šljunkovitim glinovito-alevritskim peskovima i dr. Debljina im se kreće od 30 do 100 metara.

**LEGENDA:**

Izvoriste "Fišerov Salaš" Izdanak kartirane jedinice	
	Izvoriste "Fišerov Salaš"
	Eksploatacioni bunar
	ap; Povodanjska facija (alevritski pesak i sugline)
	pr; Proluvijum: pesak, šljunak i sugline
	lb; Lesoidno-barski sedimenti: pesak, glina i suglina
	a ₁ ; Rečna terasa: šljunak, pesak, alevritski pesak i suglina
	jl; Jezersko-lesoidni sedimenti: pesak, gline i rede šljunak

*Slika 11.10. Geološka karta šireg područja izvorišta „Fišerov Salaš“
(geološka podloga prema podacima Rajčević, 1983a)*

Paludinski slojevi (Pl_{2,3}). Sedimenti srednjeg i gornjeg pliocena, na istražnom terenu, su predstavljeni slatkovodnim “paludinskim slojevima”. Otkriveni su na području Rume,

Vognja, Platičeva tokom bušenja za potrebe iznalaženja podzemnih voda, kao i bušenjem za naftu. Generalno gledano, paludinski slojevi istražnog područja predstavljeni su šljunkovima, alevritskim peskovima, peskovito-glinovitim alevritima, alevritskim glinama i glinama sa proslojcima lignita. Granica između paludinskih slojeva i pleistocena prema sadašnjim podacima je postepena (Rajčević, 1983b).

Kvartar

Kvartarne tvorevine prekrivaju celokupnu površinu terena u području izvorišta „Fišerov Salaš“. Na osnovu podataka dobijenih strukturnim i sondažnim bušenjem, kao i fotogeološkom obradom terena, u ovom delu Srema konstatovano je više genetskih tipova kvartarnih sedimenata, od kojih su u neposrednoj zoni izvorišta prisutni jezerski i sedimenti rečnih terasa.

Jezerški sedimenti (j). Jezerske tvorevine na istraženom delu terena pripadaju najstarijem odeljku kvartara - pleistocenu. Konstatovane su bušenjem u okviru sremske depresije. Leže transgresivno preko gornjopontiskih sedimenata i predstavljenih paludinskih tvorevina sa promenljivom debljinom od 50 do 100 m. Po starosti pripadaju najstarijem odeljku kvartara, pleistocenu (slika 11.10). Debljina im je promenjiva. Sedimentacioni ciklus počinje peskovito-šljunkovitim naslagama na dubini 85-100 m, a na pojedinim mestima i preko 100 m. Česte su smene peska, alevritskog peska i alevritskih glina. Na dubini 40-50 m ponovo dolazi do taloženja šljunkovito-peskovitih sedimenata, sa povećanom šljunkovitom komponentom u višim delovima.

Peskovito-šljunkoviti sedimenti predstavljaju značajne vodonosne sredine za vodosnabdevanje naselja i industrije kvalitetnom vodom.

Rečne terase (jl, a₁). Sedimenti rečnih terasa su po starosti svrstani u Holocen. Najveće rasprostranjenje imaju sedimenti tzv. varoške terase (jl) koji prekrivaju neposredno područje izvorišta „Fišerov Salaš“, dok sedimenti rečne terase a₁ imaju rasprostranjenje južno od izvorišta (slika 11.10).

Sedimenti rečne terase (jl) imaju debljinu koja se na osnovu rezultata istražnog bušenja kreće od 20 do 50 m. Izgrađeni su od peska, šljunka, gline, alevritske gline i alevritskih peskovova, kao i proslojaka sitnozrnih peskova. Kod *lesoidno-barskih sedimenata (lb)* u završnom ciklusu sedimentacije preovlađuju alevritske gline koje se nalaze u smeni sa alevritskim peskovima i sitnozrnim peskovima.

Sedimenti rečne terase (a1) formirani su južnije od izvorišta, u priobalnom pojasu reke Save prilikom odlaganja akumulativnih fluvijalnih tvorevina reke Save. Sačinjavaju ih peskoviti šljunkovi i peskovi sa sočivima peskovitih glina. U završnom delu redovno se sreću pretaložene lesoidne alevritske gline sa karbonatnim konkcijama. Debljina terase je 3-10 m.

Facija povodnja (ap) se prostire u neposrednoj blizini toka reke Save. Nastaje pri pojavi velikih voda i izlivanju toka reke iz njenog korita kada dolazi do deponovanja muljevitog peska i alevritskih glina. Debljina ovih naslaga je veoma promenljiva i kreće se 1-5 m, pa čak i do 10 m.

Proluvijum (pr) je predstavljen konusnim plavinama, tj. nanosima povremenih vodenih tokova. Materijal koji je odlagan je različitog sastava. Koren proluvijuma karakterišu krupnozrni šljunkovi, dok u perifernim oblastima dominiraju sitno šljunkovite lesoidne sugline. Debljina proluvijalnih naslaga se kreće oko 10 m. Ovi sedimenti su zastupljeni u krajnjem severnom delu istražnog područja.

11.8. Hidrogeološke karakteristike istražnog područja

Zahvaljujući brojnim istražnim radovima dobijeni su dragoceni podaci za definisanje hidrogeoloških odnosa u ovom delu Srema. Pored brojnih elaborata, studija i druge tehničke dokumentacije, ovi rezultati sadržani su i u publikovanim radovima pojedinih autora (Milojević, 1959; Radojičić i Dobričić, 1969; Josipovići Soro, 2012; itd.).

Sa hidrogeološkog aspekta, šire područje izvorišta „Fišerov Salaš“ karakteriše prisustvo zbijene (aluvijalne) izdani u terasnim sedimentima reke Save, poznatoj pod nazivom *prva izdan* (Josipović i Soro, 2012), zbijene izdani i izdani u plio-kvartarnom kompleksu sedimenata u kojima se odozgo naniže izdvajaju *osnovna izdan* u rečno-jezerskim sedimentima, a u dubljim delovima kompleksa *artenska izdan u pliocenskim sedimentima* (slika 11.11 i 11.12).

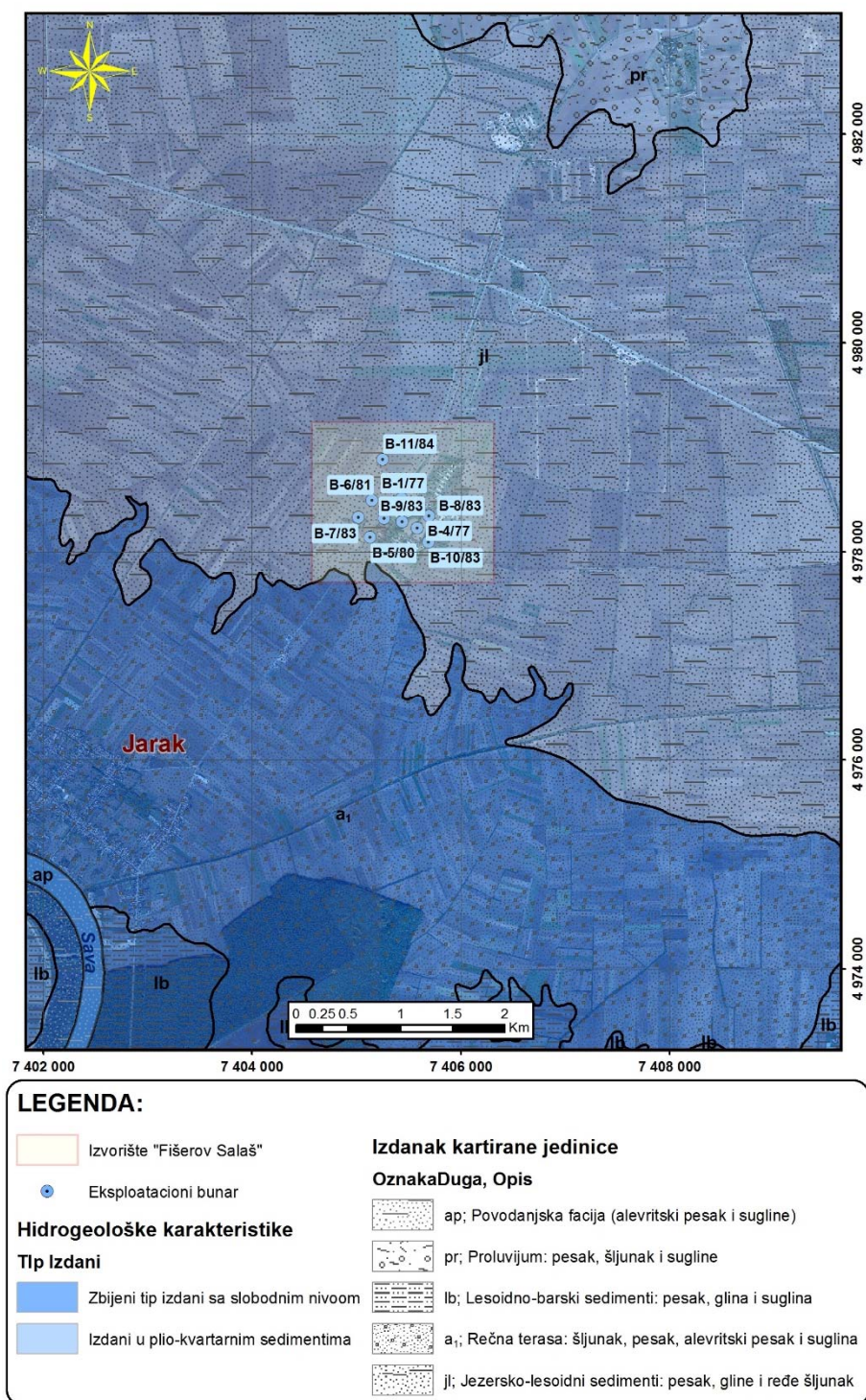
Zbijeni tip izdani sa slobodnim nivoom (prva izdan)

Zbijeni tip izdani sa slobodnim nivoom ima rasprostranjenje u terasnim naslagama Save (a₁) južno od izvorišta „Fišerov Salaš“.

Generalno uzev, u području južnog Srema kome pripada i područje izvorišta, vodonosna sredina u kojoj je formirana izdan prostire se od leve obale reke Save prema severu približno do „varoške“ terase gde isklinjava. Vodonosnu sredinu izgrađuju peskovi i šljunkovi debljine 15-25 m, dobrih filtracionih karakteristika. Vrednosti transmisibilnosti sredine kreću se od $17 \cdot 10^{-3}$ do $31 \cdot 10^{-3}$ m²/s, dok su vrednosti koeficijenta filtracije reda $1 \cdot 10^4$ m/s (Josipović i Soro, 2012).

Povlata vodonosnoj sredini nalazi se na dubini 2-7 m, mestimično na dubini oko 10 m. Na osnovu vrednosti koeficijenata filtracije, alevritski peskovi ($K = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s), alevriti i alevritske gline ($K = 1 \cdot 10^{-9}$ - $1 \cdot 10^{-7}$ m/s) u povlati vodonosne sredine imaju funkciju polupropusnog sloja (Josipović i Soro, 2012).

Podina vodonosne sredine nije uvek jasno definisana. Nekada su to alevriti i alevritske gline, no nekada vodonosna sredina direktno leži preko starijih šljunkovitih naslaga. U proseku, podina se u okviru izvorišta „Jarak“ nalazi na 22-28 m. Za slučaj da aluvijalni šljunkovi leže direktno preko starijih jezerskih, ukupna debljina vodonosne sredine u okviru izvorišta „Jarak“ dostiže debljinu više od 40 m (Vilovski i Andrić, 1987).



*Slika 11.11. Hidrogeološka karta šireg područja izvorišta „Fišerov Salaš“
(geološka podloga prema podacima Rajčević, 1983a)*

Nivo podzemnih voda je slobodan u delu izdani gde je povlatni polupropusni sloj male debljine (do 5 m) i pri niskim vodostajima Save. U većem delu aluvijalne ravni,

posebno pri višim vodostajima Save, izdan ima subarteski nivo. Dubina do nivoa podzemnih voda iznosi 2-6 m. Generalni pravac kretanja podzemnih voda je prema reci Savi (Rašula i saradnici, 1997).

Prihranjivanje izdani u aluvijalnim naslagama ostvaruje se najvećim delom infiltracijom voda rečnih tokova Save i njenih pritoka, infiltracijom atmosferskih taloga i voda iz kanalske mreže. Dreniranje ove izdani vrši se neposrednim isticanjem u rečne tokove u periodima niskih vodostaja. Za podzemne vode ove izdani karakteristična je dobra hidraulička veza sa površinskim vodama reke Save.

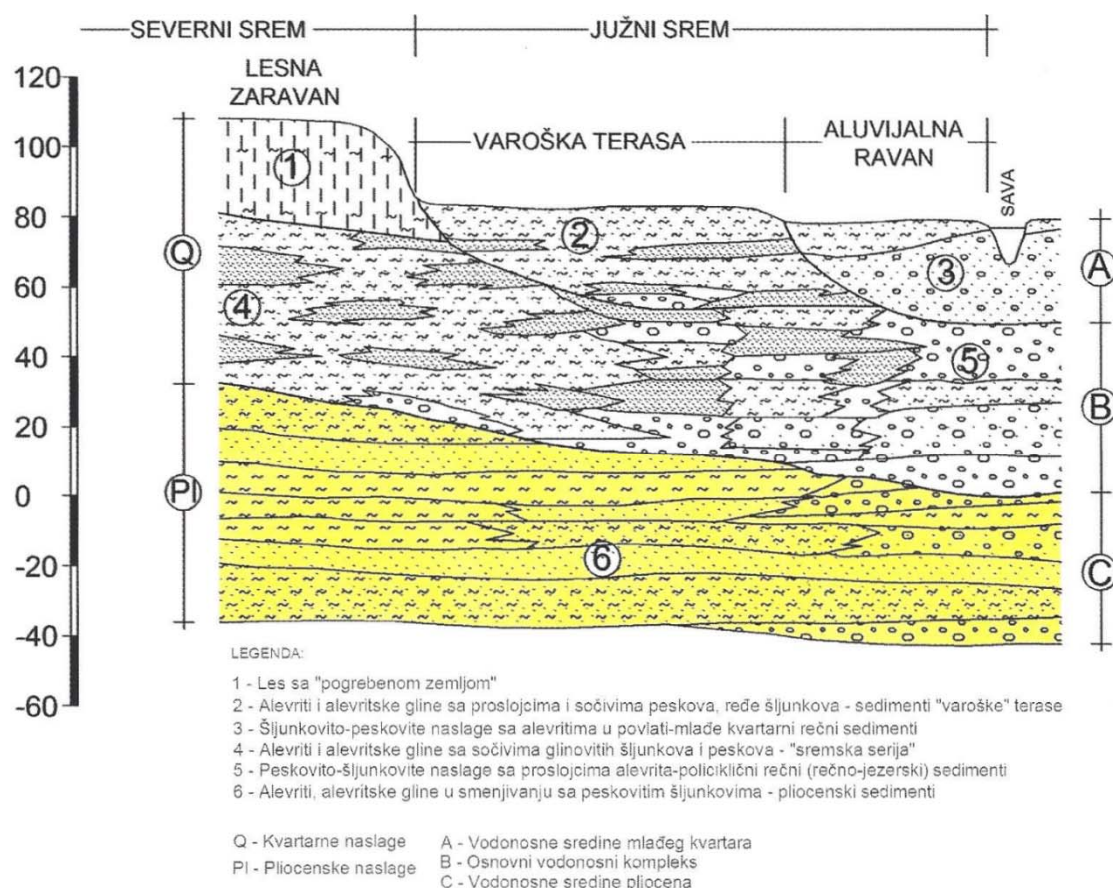
Izdani u plio-kvartarnom kompleksu sedimentata

Od površine terena pa do nekoliko stotina metara smenjuju se vodonosni peskovito-šljunkoviti i slabije propusni do nepropusni glinoviti sedimenti. Na osnovu rezultata brojnih hidrogeoloških istraživanja u području južnog Srema, ali i neposredne okoline izvorišta „Fišerov Salaš“, izdvojene su sledeće izdani (Milojević, 1959; Rajičić i Dobričić, 1969; Vilovski i Andrić, 1987; Josipović i Soro, 2012):

- Izdan u rečno-jezerskim (Osnovna izdan) i
- Izdani u pliocenskim sedimentima.

Granica između rečno-jezerskih i pliocenskih sedimentata u području predmetnog izvorišta se po Josipoviću i Soru (2012) nalazi na oko 90-100 m dubine.

Izdan u rečno-jezerskim sedimentima (Osnovna izdan). Formirana je u šljunkovito-peskovitim naslagama policikličnih rečno-jezerskih sedimentata donjeg pleistocena. Nalazi se na relativno maloj dubini i male je debljine. Dubina do povlate iznosi oko 20 m u priobalju Save, do oko 40 - 50 m (Josipović i Soro, 2012). U području izvorišta debljina ovog polupropusnog sloja kreće se u proseku 39-42 m (Dragišić, 2008). Povlatu vodonosnoj sredini čine pretaloženi les i lesoidni sedimenti, mestimično sa manjim slojevima i proslojcima peskova (Vilovski i Andrić, 1987).



Slika 11.12. Šematski geološki profil u području južnog Srema (Josipović i Soro, 2012)

Ukupna debljina vodonosnog kompleksa u zoni Jarak-Klenak iznosi 15-22 m. Filtracione karakteristike osnovne vodonosne sredine približno su istih vrednosti kao i kod rečne faze (Josipović i Soro, 2012). Koeficijenti filtracije su reda veličine 10^{-3} cm/s, a šljunkova 10^{-2} cm/s.

Izdan je sa subarteskim, lokalno arteskim nivoom. U južnim delovima rasprostranjenja izdan je hidraulički vezana sa tzv. prvom izdani. Pored glavne vodonosne sredine, do dubine od 80-90 m javlja se nekoliko manjih slojeva i proslojaka vodonosnih peskova.

Prihranjivanje izdani je slabo na račun procurivanja podzemnih voda iz gornjih delova terena kroz polupropusne alevrite u povlati izdani. Isto tako postoji mogućnost doticaja sa severa iz vodonosnih sredina. U priobalju Save prihranjivanje izdani se vrši i na

račun infiltracije površinskih voda. Dreniranje izdani vrši se prelivanjem u druge vodonosne horizonte u prirodnim uslovima, i crpenjem bunarima za različite potrebe.

Izdani u vodonosnim sredinama pliocena. Ispod kvartarnih sedimenata leže vodonosne sredine pliocena (gornji pont i paludinski slojevi). U litološkom pogledu predstavljeni su peskovima, šljunkovima, glinama i njihovim varijetetima. Paketi neogenih sedimenata posmatrano u profilu i horizontalnom rasprostranjenju, karakterišu se čestim smenjivanjem vodonosnih (šljunkovi i peskovi) i slabovodopropusnih ili nepropusnih sedimenata (gline, alevritske i peskovite glina). Vodonosnu sredinu izgrađuju sitnozrni, prašnasti, mestimično i zaglinjeni peskovi sa vrednostima koeficijenta filtracije reda 10^{-3} - 10^{-5} cm/s, u čijoj se podini i povlati nalaze različite vrste glina (peskovite, alevritske, plavičaste, žute, sive, itd.).

Sinklinalan položaj vodonosnih sredina uslovio je visoke arteske pritiske u vodonosnim sredinama, tako da većina bunara koja ih kaptira ima arteski karakter. Istražnim bušenjem konstatovano je više arteskih horizonata. Na osnovu rezultata istražnog bušenja u lokalnosti Fišerov Salaš na dubinama 100-150 m, konstatovana su najčešće 2, a ponegde i 3 vodonosna sloja (Vilovski i Andrić, 1987; Dragišić, 2008; Josipović i Soro, 2012).

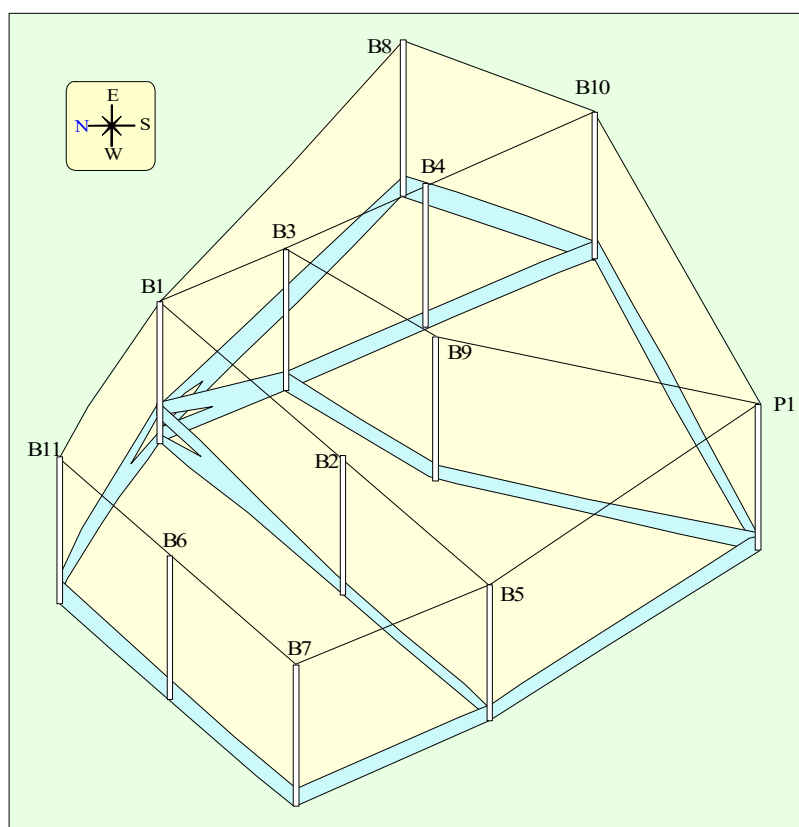
Prihranjivanje izdani vrši se infiltracijom padavina na severnim padinama Cera (Pocerina i Posavina) i južnim padinama Fruške Gore, tj. tamo gde su ove tvorevine otkrivene na površini terena, kao i doticajem iz susednih izdani sa kojima se ostvaruje fizički kontakt.

U prirodnim uslovima dreniranje izdani vrši se prelivanjem u dublje ili pliće vodonosne horizonte. Intenzivno dreniranje arteskih horizonta odvija se u novonastalim uslovima preko arteskih i subarteskih bunara koji se koriste za potrebe vodosnabdevanja. Povećane potrebe za vodom i sve veća eksploatacija voda iz vodozahvatnih objekata doveli su do toga da arteske izdani na teritoriji i Srema i čitave Vojvodine iz stanja početnog pozitivnog piježometarskog nivoa padom nivoa pređu iz arteskog u subarteski tip izdani.

Po hemijskom sastavu podzemne vode u pliocenskim vodonosnim sredinama su male mineralizacije hidrokarbonatne klase pretežno magnezijumsko-kalcijumske grupe.

11.9. Izvorište podzemnih voda „Fišerov Salaš“

Izvorište “Fišerov Salaš” nalazi se na području opštine Sremska Mitrovica, sa leve i desne strane magistralnog puta Ruma – Šabac, na oko 7 km od grada Rume. Formiranje izvorišta započeto je 1977.-e godine, a do danas je izvedeno jedanaest eksploatacionih bunara (slika 11.13). U eksploataciju je trenutno uključeno ukupno osam bunara. Tri bunara se nalaze van eksploatacije iz tehničkih ili nerešenih imovinskih odnosa (bunari B-4, B-7 i B-9).



Slika 11.13. Sačasti blok dijagram zone izvorišta “Fišerov Salaš” (Pušić, 1990)

Dubina bunara se u proseku kreće od 141 do 151 m. Kaptirani su slojevi peskova, zaglinjenih i šljunkovitih peskova na dubinama od 110 – 150 m (tabela 11.5). Na osnovu rezultata opita crpenja vode iz pojedinačnih bunara (povraćaj nivoa), dobijene su sledeće vrednosti filtracionih parametara vodonosne sredine:

- Transmisibilnost ($T = 5,26 \cdot 10^{-3} - 7,44 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$),
- Koeficijent filtracije ($K = 2,42 \cdot 10^{-4} - 3,43 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$).

Tabela. 11.5. Pregled dubina i kaptiranih intervala u bunarima izvorišta „Fišerov Salaš“
(Dragišić, 2008)

Oznaka bunara	Dubina bunara (m)	Kaptirani interval (m)
B-1/77	150	124-144
B-2/77	148	109-140
B-3/77	145	130-142
B-4/77	145	130-142
B-5/80	145	122-140
B-6/81	141	120-140
B-7/83	141	120-140
B-8/83	151	130-150
B-9/83	150	127-145
B-10/83	150	125-140
B-11/84	141	105-111 i 118-137

Pojedinačna izdašnost bunara iznosi oko 10 l/s. Kako svi bunari izvorišta kaptiraju istu izdan, rezerve podzemnih voda izvorišta sračunate su na osnovu rezultata spregnutih testova svih 8 aktivnih bunara i one iznose 72 l/s.

Tokom prvih deset godina kontinualne eksploatacije podzemnih voda u izvorištu, pijezometarski nivo je sa dubine od 4,10 m (statički nivo), opao na oko 30 m u 1987. godini (Pušić, 1990).

Po hemijskom sastavu kaptirane podzemne vode izvorišta „Fišerov Salaš“ su malo mineralizovane vode hidrokarbonatno-magnezijumsko-kalcijumskog tipa (Dragišić, 2008).

11.10. Primena TDM metode za ocenu ranjivosti podzemnih voda izvorišta „Fišerov Salaš“

U periodu od 2005-2012. godine u području izvorišta „Fišerov Salaš“ izvedena su obimna hidrogeološka istraživanja u cilju definisanja rezervi podzemnih voda (Dragišić, Krmpotić, 2006), kao i u cilju određivanja zona sanitarne zaštite (Dragišić, 2008). Pored opita crpenja pojedinačnih bunara i izvorišta u celini preko spregnutog testa, uspostavljen je monitoring eksploatacionih količina izvorišta, padavina, nivoa i osnovnih parametara kvaliteta podzemnih voda, a sve u cilju izrade hidrodinamičkog modela izvorišta.

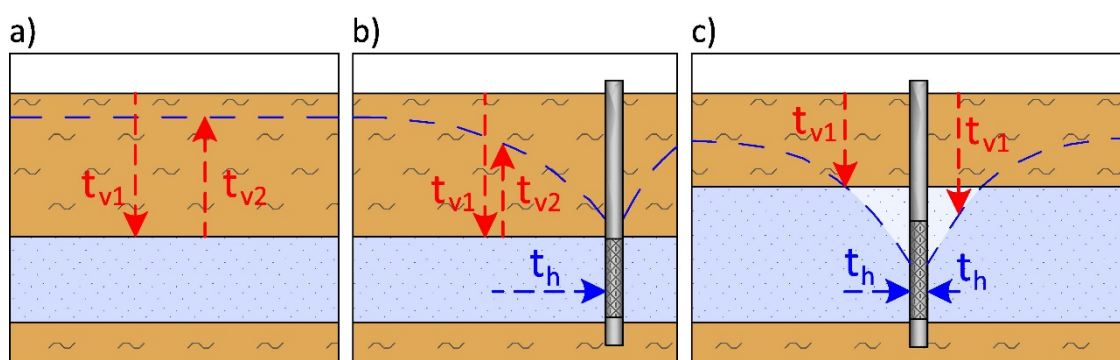
Na modelu je simulirano strujanje podzemnih voda u široj okolini izvorišta, pri ukupnom eksploatacionom kapacitetu izvorišta od 72 l/s. Za ove uslove eksploatacije, procenjeno je vreme horizontalnog kretanja podzemnih voda ka bunarima i dobijeni rezultati su iskorišćeni za definisanje II i III zone sanitarne zaštite (Dragišić, 2008).

Kako je pretpostavka da se prihranjivanje izdani koja je kaptirana bunarima na izvorištu „Fišerov Salaš“ odvija na račun infiltracije padavina na padinama Cera i Fruške Gore (Josipović i Soro, 2012), u analizi ukupnog vremena kretanja podzemnih voda ka bunarima nije uzimana u obzir vremenska komponenta površinskog kretanja vode. Velika udaljenost zona prihranjivanja od izvorišta čini ovaj parametar beznačajnim u ukupnom vremenu kretanja vode ka bunarima. Samim tim, konceptualni model zaštite izvorišta „Fišerov Salaš“ obuhvata dve komponente: vreme horizontalnog kretanja podzemnih voda ka bunarima i vreme vertikalnog kretanja vode sa površine terena.

Poseban problem u proračunu vertikalnog kretanja vode sa površine terena predstavlja arteso-subarteso pritisak kojim se karakteriše kaptirani pliocenski vodonosni horizont. Kako su podzemne vode pod pritiskom, one pod dejstvom hidrostatičkih pritisaka teže da se kreću vertikalno naviše, tj. prema površini terena.

Većina metoda za ocenu ranjivosti podzemnih voda ne uzima u obzir pomenuti pritisak koji smanjuje njihovu ranjivost, otežavajući kontaminantima da sa površine terena

dopru do izdanske zone. Primenom pojedinih metoda (COP, PI, GOD) postoji mogućnost da se zaštitnoj funkciji slojeva nadizdanske zone dodaju dodatni poeni u cilju naglašavanja pritiska izdanske zone, čime se ranjivost smanjuje. Međutim, ni kod jedne metode ne postoji mehanizam kojim bi se zaštitna funkcija nadizdanske zone evaluirala uzimajući u obzir veličinu pritiska vodonosnog horizonta. Zato su pri analizi vremena vertikalnog kretanja podzemnih voda uzete u obzir dve komponente (slika 11.14a). Kod prve komponente (vreme t_{v1}) računa se vreme potrebno da voda doputuje sa površine terena do izdanske zone (pod pretpostavkom da je nivo podzemnih voda u nivou povlate vodonosnog horizonta i da je pravac hidrauličkog gradijenta vertikalno naniže). Kod druge komponente (vreme t_{v2}) računa se vreme potrebno da se podzemna voda filtracijom popne iz izdani do visine koja odgovara visini piježometarskog pritiska.

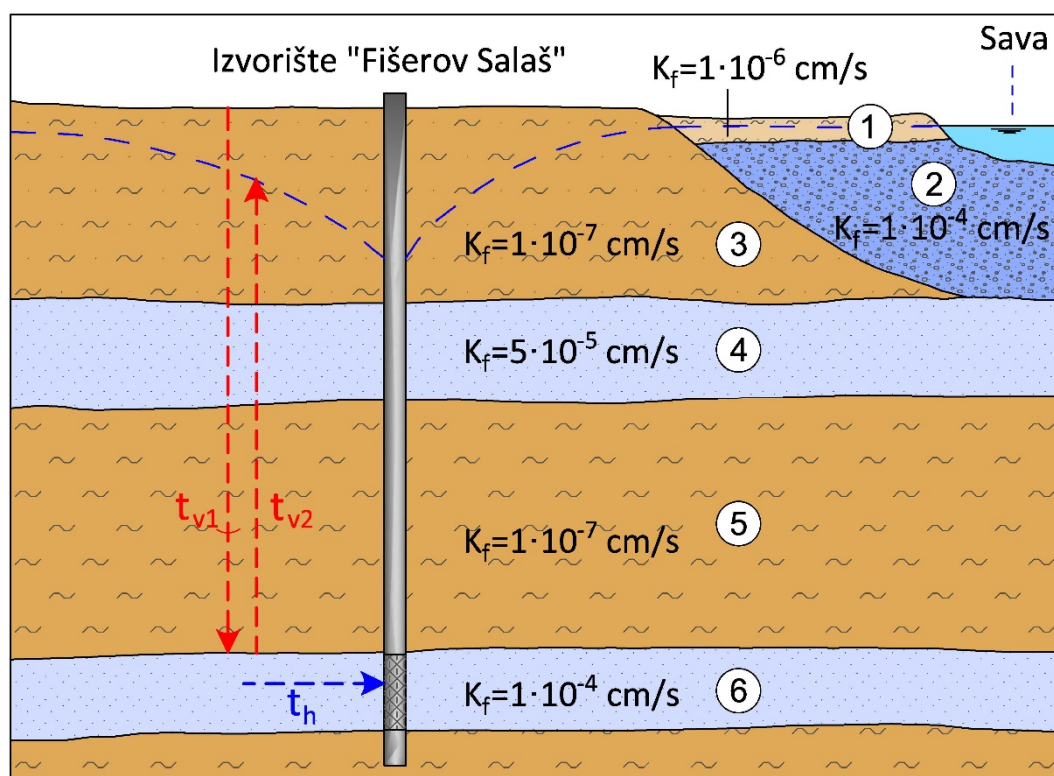


Slika 11.14. Konceptualni model ocene ranjivosti podzemnih voda kod izdani pod pritiskom
 a) komponente vremena vertikalnog kretanja podzemnih voda u prirodnim uslovima; b) komponente vremena vertikalnog kretanja podzemnih voda u uslovima eksploatacije; c) komponente vremena vertikalnog kretanja podzemnih voda u uslovima formiranja slobodne izdani u zoni uticaja bunara

Ovakav pristup u oceni ranjivosti podzemnih voda nije u potpunosti zasnovan na realnim uslovima filtracije voda kod izdani pod pritiskom. Niti će voda sa površine terena težiti da dopre do izdanske zone kada je izdan pod pritiskom, niti će voda iz izdani ići nagore u uslovima kada je horizontalna komponenta kretanja vode ka bunarima mnogo više izražena od vertikalnog kretanja podzemnih voda.

Procena vremena vertikalnog kretanja t_{v1} i t_{v2} pruža nam realnu mogućnost za sagledavanje prirodnih uslova zaštite podzemnih voda i evoluiranje veličine zaštite koju pruža pritisak arteso-subarteso izdani. Ovakvim pristupom moguće je bolje

sagledavanje uticaja eksploatacije na ranjivost podzemnih voda (slika 11.14b). Tokom eksploatacije podzemnih voda u zoni izvorišta dolazi do smanjenja pijezometarskog nivoa, u nekim slučajevima i do stvaranje izdani sa slobodnim nivoom. Uslovi eksploatacije podzemnih voda neće uticati na prvu komponentu vremena vertikalnog kretanja podzemnih voda t_{v1} , jer ona zavisi od fizičkih karakteristika slojeva u povlati izdanske zone. Međutim, eksploatacijom dolazi do smanjenja pijezometarskog pritiska, a samim tim do smanjenja vremena vertikalnog kretanja t_{v2} . U pojedinim situacijama t_{v2} se može i u potpunosti izgubiti, pa je u takvim uslovima eksploatacije ranjivost podzemnih voda znatno veća (slika 11.14c). Imajući u vidu napred iznete činjenice, konceptualni model zaštite izvorišta „Fišerov Salaš“ urađen je tako da obuhvati obe komponente vertikalnog i horizontalnu komponentu kretanja podzemnih voda kroz izdansku zonu (slika 11.15).



Slika 11.15. Konceptualni model zaštite izvorišta „Fišerov Salaš“

- 1) povlata izdani u rečnim sedimentima; 2) izdan u rečnim sedimentima; 3) povlata osnovne izdani u rečno-jezerskim sedimentima; 4) osnova izdani u rečno-jezerskim sedimentima; 5) povlata izdani u pliocenskim sedimentima; 6) izdan u pliocenskim sedimentima;

11.10.1. Određivanje vremena horizontalnog kretanja podzemnih voda

Za potrebe ocene horizontalne komponente kretanja podzemnih voda, tj. vremena horizontalnog kretanja vode ka bunarima, korišćeni su rezultati hidrodinamičkog modeliranja. Prvi hidrodinamički model strujanja podzemnih voda za izvorište „Fišerov Salaš“ urađen je od strane M. Pušića 1990. godine. Inovirani model izvorišta za potrebe utvrđivanja rezervi urađen je 2006. godine (Polomčić, 2006).

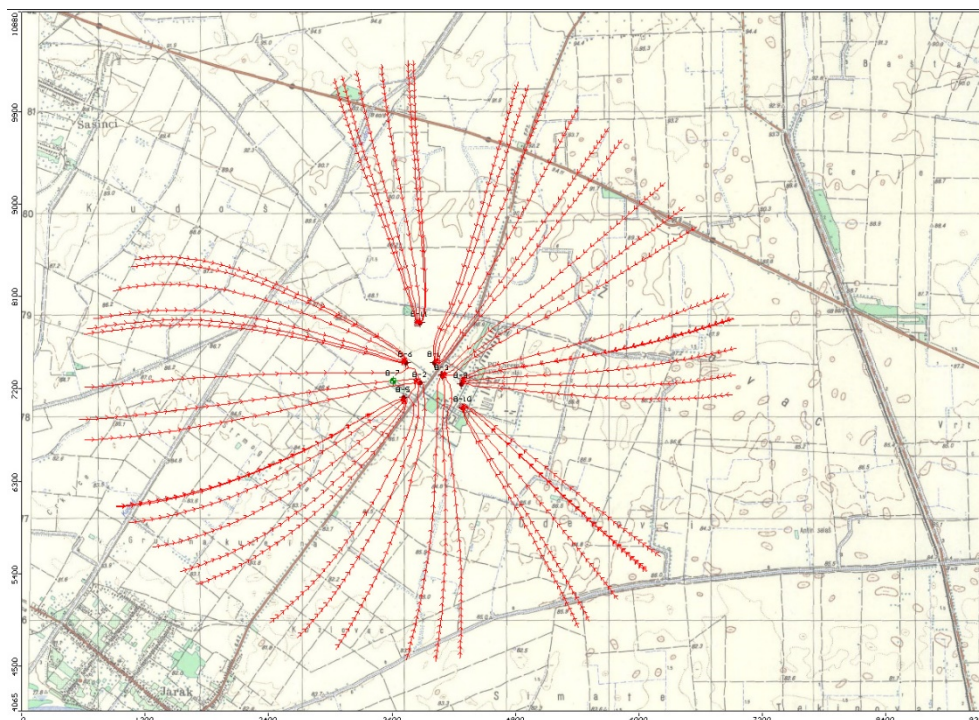
Inovirani model urađen je u programu Visual Modflow, pri čemu je obuhvaćen prostor od 9500 m x 13000 m (površina od 123,5 km²). Diskretizacija strujnog polja u planu izvedena je sa osnovnom veličinom ćelija 125 m x 125 m. U zoni izvorišta pogašćena je mrežom kvadrata dimenzija 25 m x 25 m.

Posmatrano u vertikalnom profilu, model je urađen kao dvoslojeviti model sa prvim, izolatorsko-vodonosnim slojem (kompleks povlatnih peskovitih i glinovitih sedimenata) i drugim vodonosnim slojem koji odgovara izdani u pliocenskim peskovima.

Na hidrodinamičkom modelu izvorišta usvojeni su sledeći granični uslovi:

- Kontura sa zadatim potencijalom (*General head boundary*) – granica koja je izdvojena na osnovu poznatih hidrogeoloških karakteristika i vrednosti pijezometarskog nivoa na udaljenju koje odgovara oblastima prihranjivanja ove izdani;
- Granični uslov sa zadatim proticajem (eksploatacioni bunari na izvorištu).

Nakon uspešno izvršene kalibracije modela, urađena je simulacija strujanja podzemnih voda pri radu izvorišta kapacitetom od 72 l/s. Dobijeni rezultati iskorišćeni su za izradu karte rasporeda strujnica oko bunara (slika 11.16) koje pokazuju udaljenje potrebno da se do bunara filtrira voda za određeni period (50 dana, 200 dana).

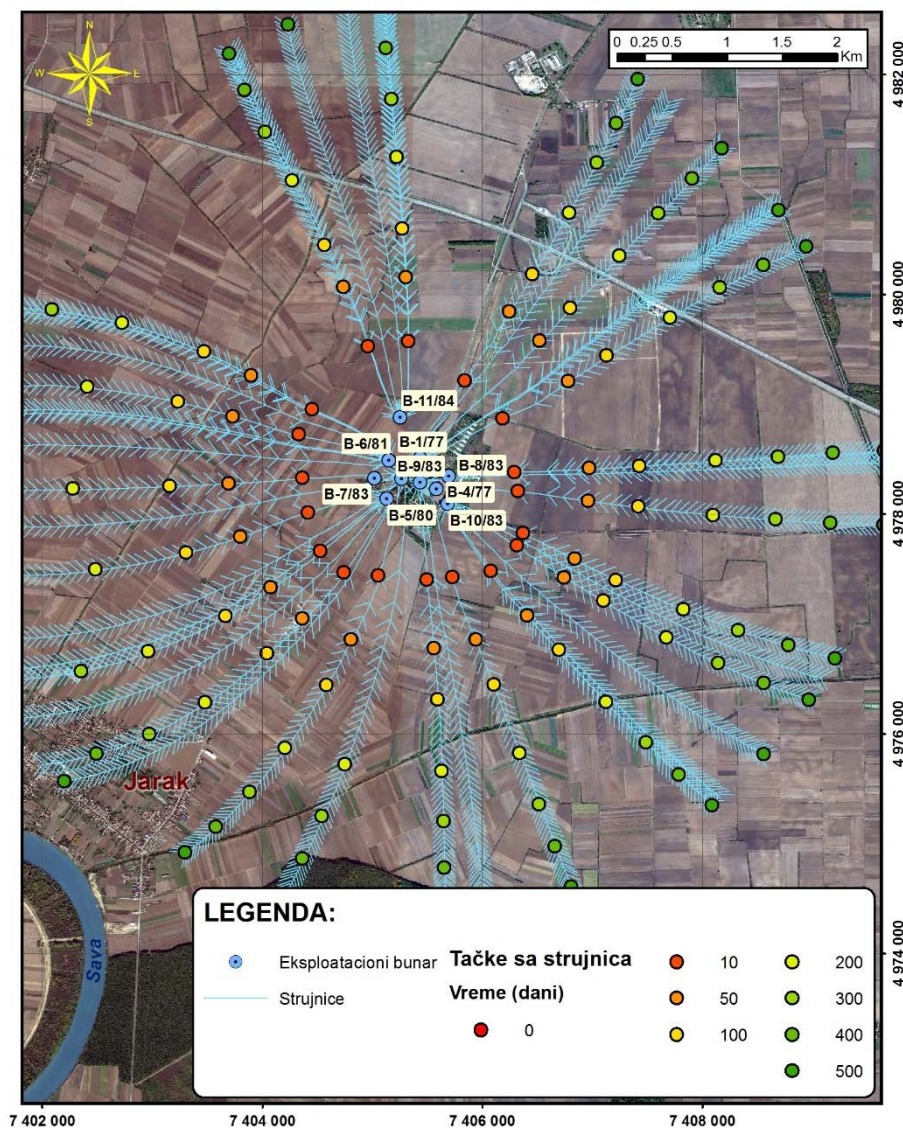


Slika 11.16. Raspored strujnica oko eksploatacionih bunara izvorišta „Fišerov Salaš“ koje pokazuju udaljenje potrebno da se do bunara filtrira voda za 200 dana (Polomčić, 2006)

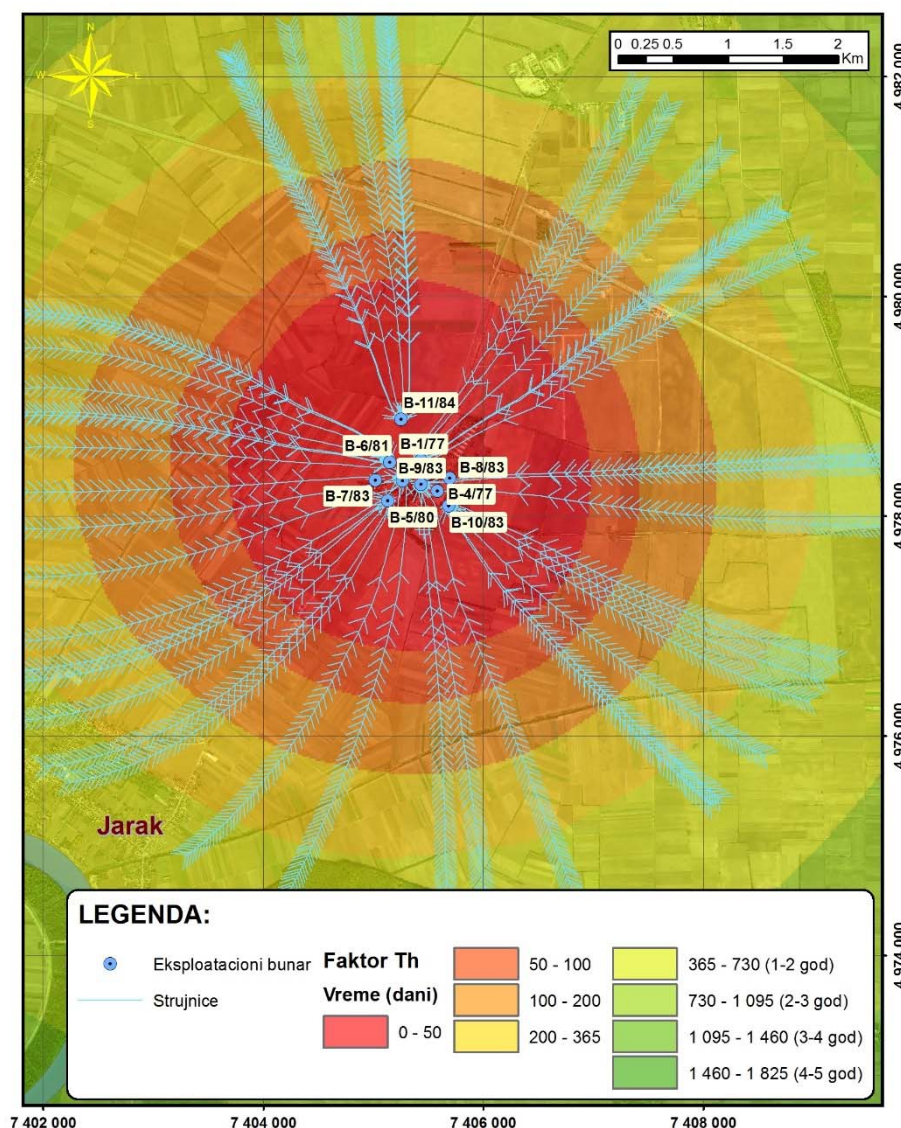
Karta vremena horizontalnog kretanja podzemnih voda ka eksploatacionim bunarima urađena je u ArcGIS okruženju na bazi prostornog položaja strujnica kretanja podzemnih voda. Vektorske linije strujnica iz programskog paketa Visual Modflow su unesene u ArcGIS program. Strelice koje presecaju strujnice označavaju vremenske preseke od 10 dana tako da ukupna strujnica pokazuje put podzemne vode prema bunaru od 500 dana (slika 11.17).

Na izdvojenim strujnicama izabrane su tačke sa različitim vremenskim presecima (10, 50, 100, 200, 300, 400 i 500 dana). Izdvojene tačke su nakon toga iskorišćene za interpolaciju¹², čime je dobijena karta vremena horizontalnog kretanja podzemnih voda ka bunarima odnosno karta faktora t_h (slika 11.18).

¹² *Primenom Spline alatke (3D Analyst ekstenzija)*



Slika 11.17. Tačke na trasi strujnica sa različitim vremenima horizontalnog putovanja ka vodozahvatnim objektima

Slika 11.18. Karta parametra t_h

Dobijena karta faktora t_h pokazuje relativno ravnomerno povećavanje vremena horizontalnog kretanja podzemne vode sa udaljavanjem od bunara. Svakako najveće brzine kretanja podzemnih voda su u neposrednoj zoni izvorišta (do 50 dana, $v=25$ m/dan), dok se daljim udaljavanjem od bunara smanjuju i brzine kretanja. Tako na primer, u prostoru dalje od izvorišta, gde vreme putovanja vode ka bunarima iznosi preko 365 dana, brzina se smanjuje na svega 4 m/dan. U krajnjim delovima analiziranog područja vrednosti vremena horizontalnog kretanja podzemne vode do bunara kreću se i do 1825 dana odnosno do 5 godina.

11.10.2. Određivanje vremena vertikalnog kretanja podzemnih voda

Kao što je i prikazano u konceptualnom modelu zaštite izvorišta „Fišerov Salaš“ (slika 11.15), u postupku proračuna vremena vertikalnog kretanja podzemnih voda posebno su računane dve komponente: vreme t_{v1} potrebno da voda doputuje sa površine terena do vodonosnog horizonta i vreme t_{v2} potrebno da se podzemna voda filtracijom popne iz izdani do visine koja odgovara visini pijezometarskog pritiska. Pored toga, za vreme t_{v1} izvršena je korekcija prema veličini prihranjivanja odnosno faktora ULAZ.

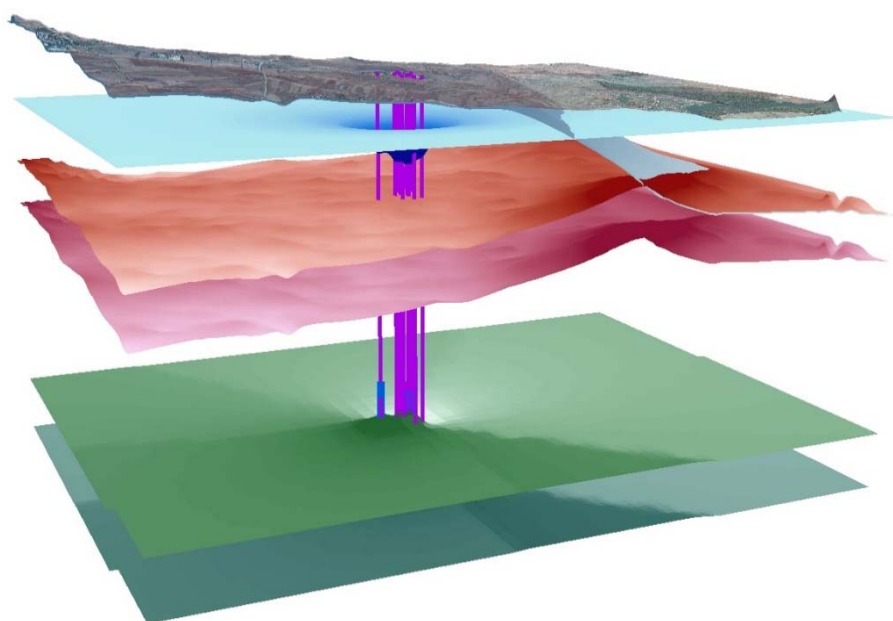
Prvi korak u proceni vremena t_{v1} i t_{v2} bio je da se na širem području izvorišta „Fišerov Salaš“ definiše debljina svih slojeva od površine terena do kaptiranog vodonosnog horizonta (slika 11.19). U tu svrhu prvo su interpolovane debljine svih slojeva počev od najgornjeg sloja koji predstavlja povlatu prve izdani u terasnim naslagama Save. U interpolaciji ovog sloja zadate su nulte vrednosti na prostoru gde terasni sedimenti nisu prisutni, dok su u južnom delu istražnog područja zadate vrednosti debljine od 5 m.

Sličan postupak primenjen je i kod modelovanja drugog sloja, odnosno izdani u terasnim sedimentima. Nulta vrednost zadata je na čitavom prostoru gde terasni sedimenti nisu prisutni, dok se debljine u južnom delu povećavaju u proseku do 15-20 m, maksimalno do 25 m u blizini Save.

Treći sloj predstavlja povlata osnovne izdani u rečno-jezerskim sedimentima. Ovaj sloj ima najveću debljinu u severnim delovima analiziranog područja (oko 50 m). U zoni izvorišta debljina ovog sloja je u proseku oko 40 m (dubina na kojoj se nalazi osnovna izdan). Na jugu se njegova debljina postepeno smanjuje, tako da u nekim delovima ovaj sloj u potpunosti isklinjava, čime se ostvaruje hidraulička veza između osnovne izdani i izdani u rečnoj terasi Save.

Četvrti sloj predstavlja osnovna izdani u rečno jezerskim sedimentima. S obzirom na to da je debljina ove izdani relativno ujednačena u prostoru, za čitavo istražno područje je interpolovana sa prosečnom debljinom¹³ od 16 m.

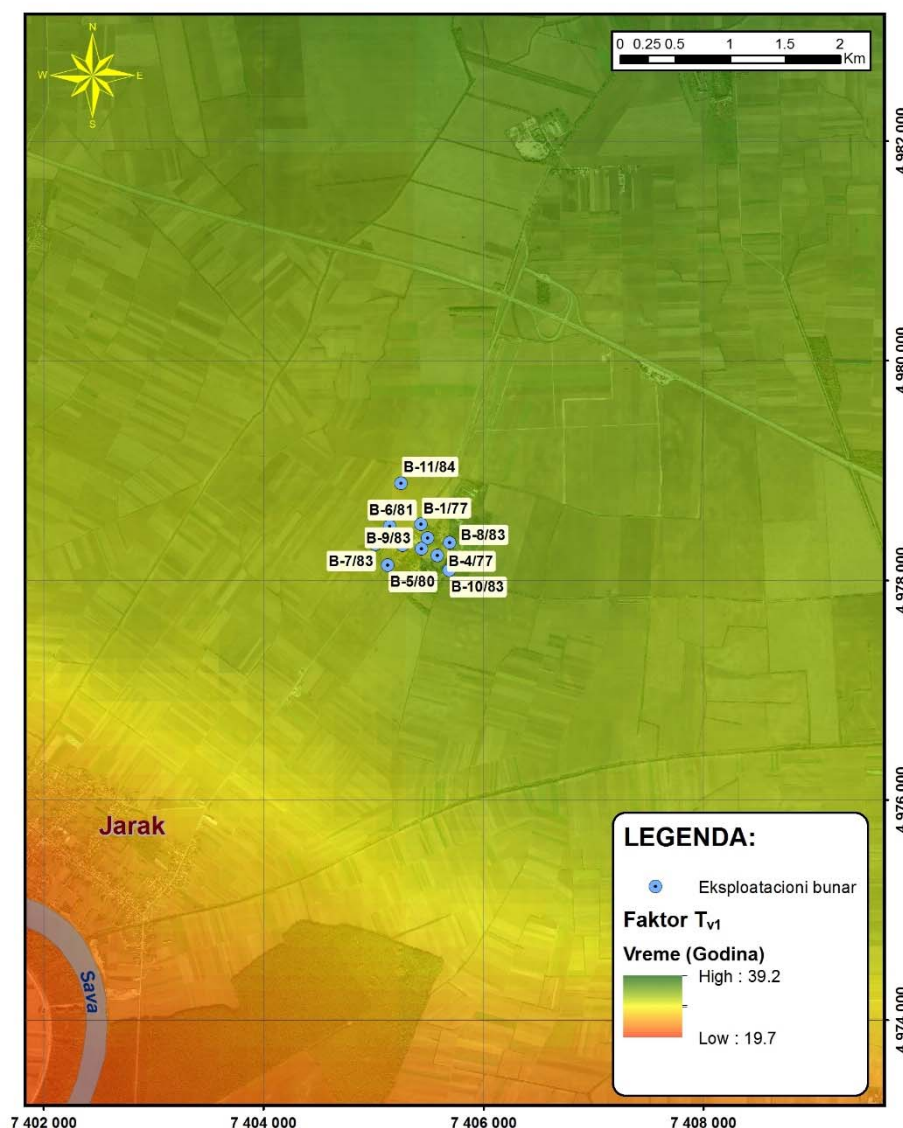
Debljina petog sloja koji predstavlja povlatu izdani u pliocenskim sedimentima, dobijena je tako što je od ukupne debljine nadizdanske zone (prvi modelski sloj u hidrodinamičkom modelu) oduzeta debljina sva četiri sloja koji se nalaze u povlati ovog horizonta.



Slika 11.19. Granice između slojeva u nadizdanskoj zoni

Proračun vremena kretanja vode sa površine terena do izdani u pliocenskim sedimentima t_{vI} izvršen je alatom *Raster Calculator*, tako što je debljina svakog sloja podeljena sa prosečnim koeficijentom filtracije tog sloja (poglavlje 11.15). Vrednost faktora t_{vI} dobijena je kao suma ovih količnika (slika 11.20).

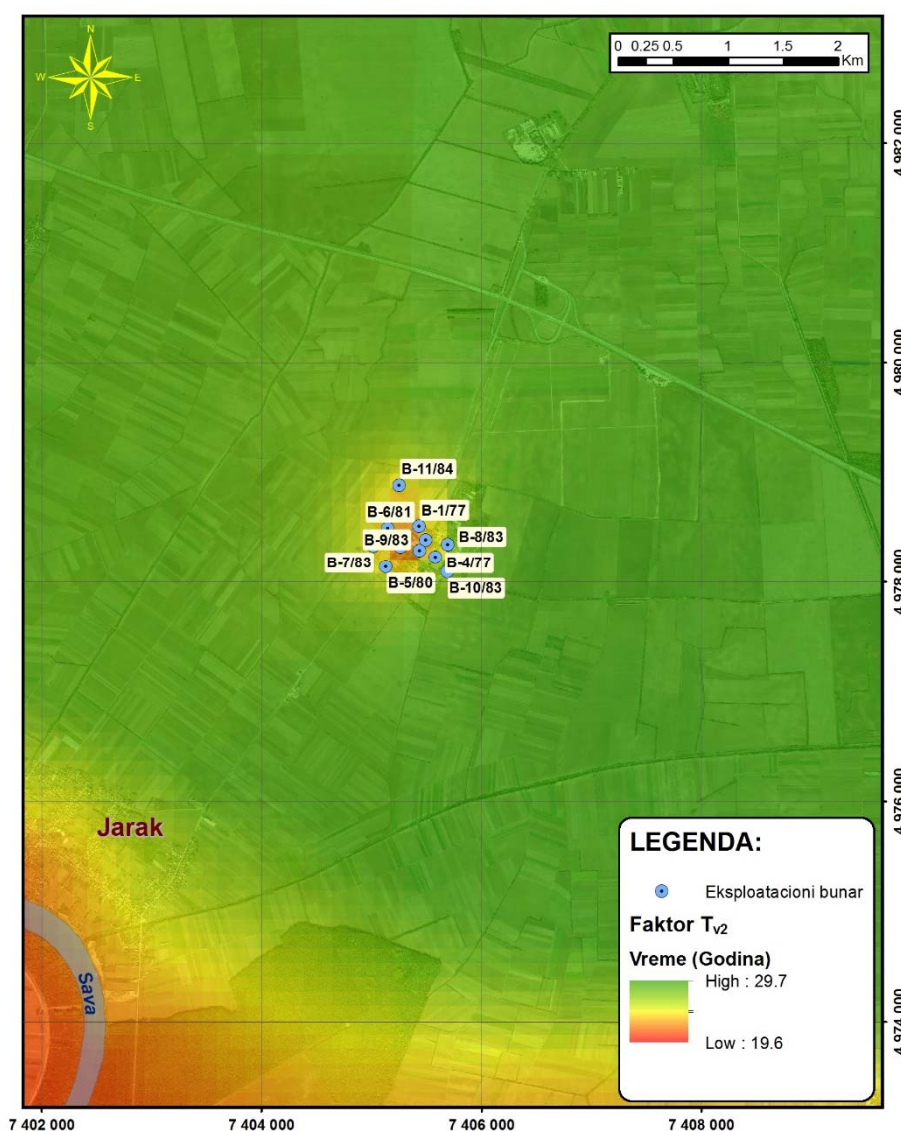
¹³ Veličina koja odgovara debljini osnovne izdani dobijena bušenjem eksploatacionih bunara izvorišta „Fišerov Salaš“



Slika 11.20. Karta parametra t_{v1}

Za dobijanje parametra t_{v2} kojim se procenjuje vreme potrebno da se podzemna voda filtracijom popne iz izdani do visine koja odgovara visini pijezometarskog pritiska korišćen je sličan postupak kao kod procene vremena t_{v1} . Vreme t_{v2} je proračunato alatkom *Raster Calculator*, tako što je podeljena debljina svih slojeva od povlate izdani u pliocenskim sedimentima do visine pijezometarskog nivoa. Za visinu pijezometarskog nivoa u svakoj tački područja istraživanja korišćena je oleata pritiska u drugom hidrodinamičkom modelskom sloju, u uslovima rada izvorišta sa kapacitetom od 72 l/s.

Kao rezultat ovog proračuna, dobijena je karta vremena t_{v2} se vrednostima koje se kreću od 19-30 godina (slika 11.21). Pri tom se ove vrednosti u neposrednoj zoni izvorišta smanjuju sa 30 na 22 godine, kao rezultat smanjenja pijezometarskog pritiska u uslovima funkcionisanja izvorišta.



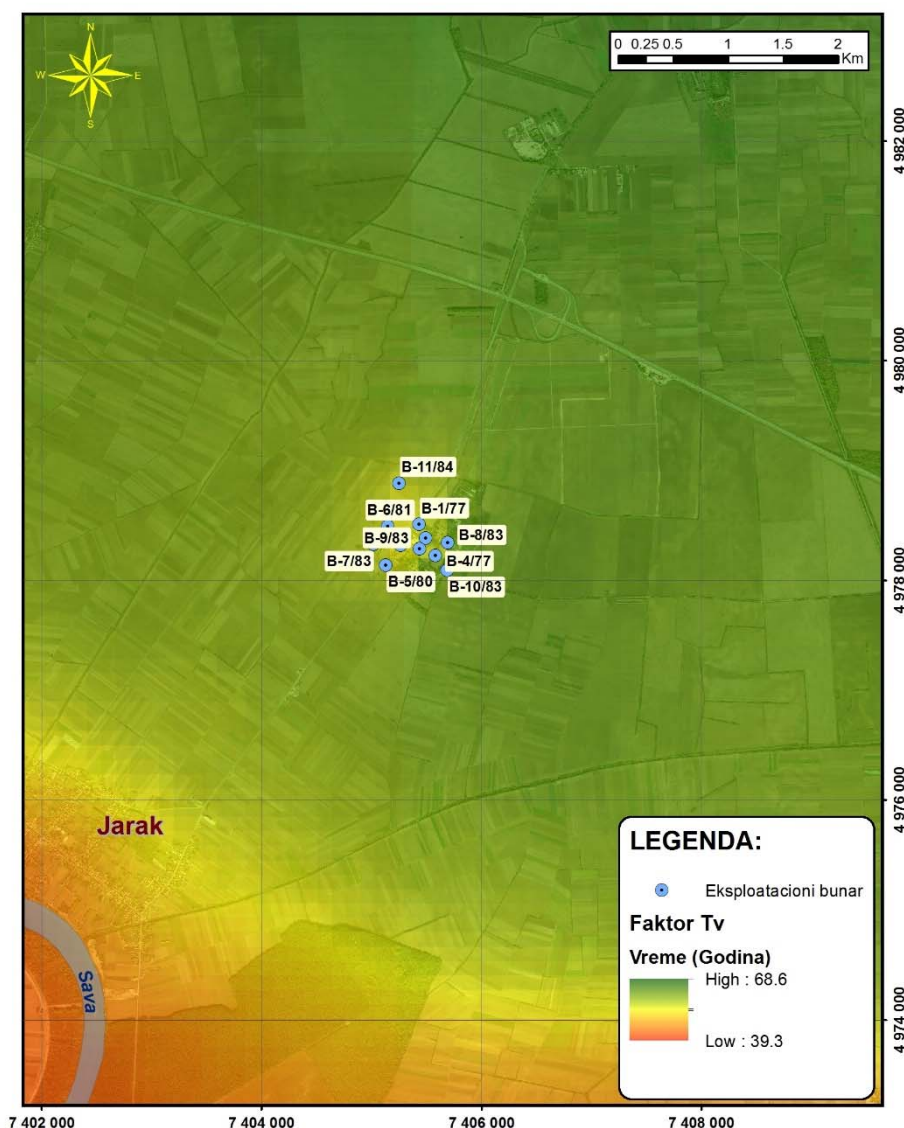
Slika 11.21. Karta parametra t_{v2}

Poslednji korak u proceni vremena vertikalnog kretanja podzemnih voda u okviru izvorišta „Fišerov Salaš“ je ocena faktora ULAZ koji prema autorima Time Input metode zavisi od veličine prihranjivanja. Za ovaj faktor nisu kreirane posebne oleate obzirom da je veći deo parametara koji se koriste u proračunu ovog faktora u potpunosti

uniforman. Tako se na primer, za veličinu indeksa radijacije α na čitavom području može uzeti vrednost od 1,0 jer je nagib terena izuzetno mali sa vrednostima do 2° . Takođe, za koeficijent oticaja može se uzeti vrednost od 1,0 za čitavo područje zbog značajne debljine zemljišta i malog nagiba terena. Jedina razlika u vrednostima koje ulaze u proračun faktora ULAZ jeste veličina evapotranspiracije. Za ovu vrednost se za čitav prostor može usvojiti veličina od 23 % osim za prostor Dobrečke šume gde je evapotranspiracija nešto veća i iznosi 35 %.

Oduzimanjem vrednosti evapotranspiracije od prosečne veličine godišnjih padavina za čitavo područje (620-680 mm) i množenjem sa koeficijentom oticaja dobijaju se vrednosti godišnjeg prihranjivanja koje za područje Dobrečke šume iznose oko 440 mm, a za ostatak područja oko 470 mm. Ove veličine prihranjivanja spadaju u klasu od 400-600 mm, tako da je vrednost parametra ULAZ za čitavo područje 1,0.

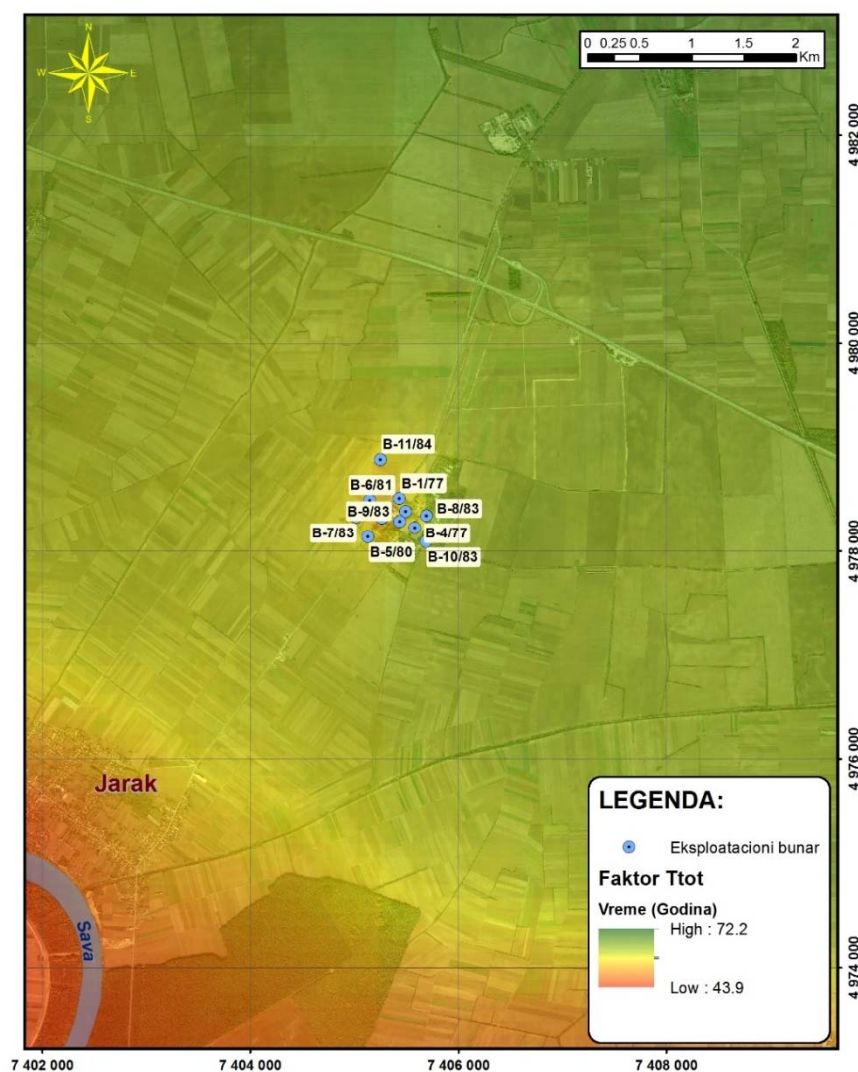
Ukupno vreme vertikalnog kretanja podzemnih voda, odnosno faktor t_v , dobijeno je formulom: $t_v = t_{v1} \cdot ULAZ + t_{v2}$. Dobijena karta vremena vertikalnog kretanja vode (slika 11.22) pokazuje da se vrednost faktora t_v kreće od 39 godina u južnom delu do 69 godina u severnom delu područja istraživanja. Kao rezultat dugotrajnog rada bunara i smanjenja subarteskog pritiska u zoni izvorišta, vrednosti faktora t_v se smanjuju sa 60 na približno 55 godina. Ovo ukazuje na to da višegodišnje funkcionisanje izvorišta ne utiče bitno na povećanje ranjivosti podzemnih voda i da su podzemne vode u izdani u pliocenskim sedimentima i dalje veoma zaštićene od zagađivanja sa površine terena.



Slika 11.22. Karta parametra t_v

11.10.3. Izrada finalne karte ranjivosti izvorišta podzemnih voda

Finalna karta ukupnog vremena kretanja vode ka vodozahvatnim objektima (bunarima) izvorišta „Fišerov Salaš“ dobijena je tako što su u svakoj tački sumirane vrednosti parametra t_h i t_v . Prethodno su vrednosti parametra t_h pretvorene u godine kako bi bile sabrane iste jedinice. Finalna karta ranjivosti izvorišta „Fišerov Salaš“ prikazana je na slici 11.23.



Slika 11.23. Karta parametra t_{tot}

Finalna karta ukupnog vremena kretanja podzemnih voda je u velikoj meri sa sličnim vrednostima vremena kao i karta faktora t_v . Razlog za ovo su relativno mala vremena parametra t_h koja u ukupnom vremenu učestvuju sa malim procentom. Drugim rečima, vrednosti vremena vertikalnog kretanja podzemnih voda imaju dominantnu ulogu u zaštiti podzemnih voda koje su kaptirane bunarima na izvorištu.

Velike vrednosti ukupnog vremena putovanja (faktor t_{tot}) ukazuju na to da su podzemne vode izdani u pliocenskim sedimentima u potpunosti zaštićene sa površine terena. Sam režim eksploatacije izvorišta ne uzrokuje značajno povećanje ranjivosti podzemnih voda, tako da ranjivost na čitavom prostoru ostaje veoma niska.

12. REZULTATI I DISKUSIJA

Za primenu TDM metode za zaštitu podzemnih voda u ovom radu analizirana su tri izvorišta podzemnih voda različita po svojim geološkim, hidrogeološkim i hidrodinamičkim karakteristikama, ali i načinu zahvatanja podzemnih voda. Na izvorištima „Beli Timok“ i „Fišerov Salaš“ bunarima se kaptiraju podzemne vode intergranularne izdani, pri čemu se kod prvog izvorišta kaptira prva, plitka aluvijalna izdan, a kod drugog duboka, neogena izdan. Sa druge strane, na izvorištu „Vrelo Crnice“ zahvataju se podzemne vode karstno-pukotinske izdani. TDM metoda je uspešno primenjena na sva tri izvorišta pri čemu su dobijene karte vremena površinskog i podzemnog kretanja voda koje znatno olakšavaju proces definisanja zona sanitarne zaštite.

12.1. Predlog zona sanitarne zaštite primenom TDM metode

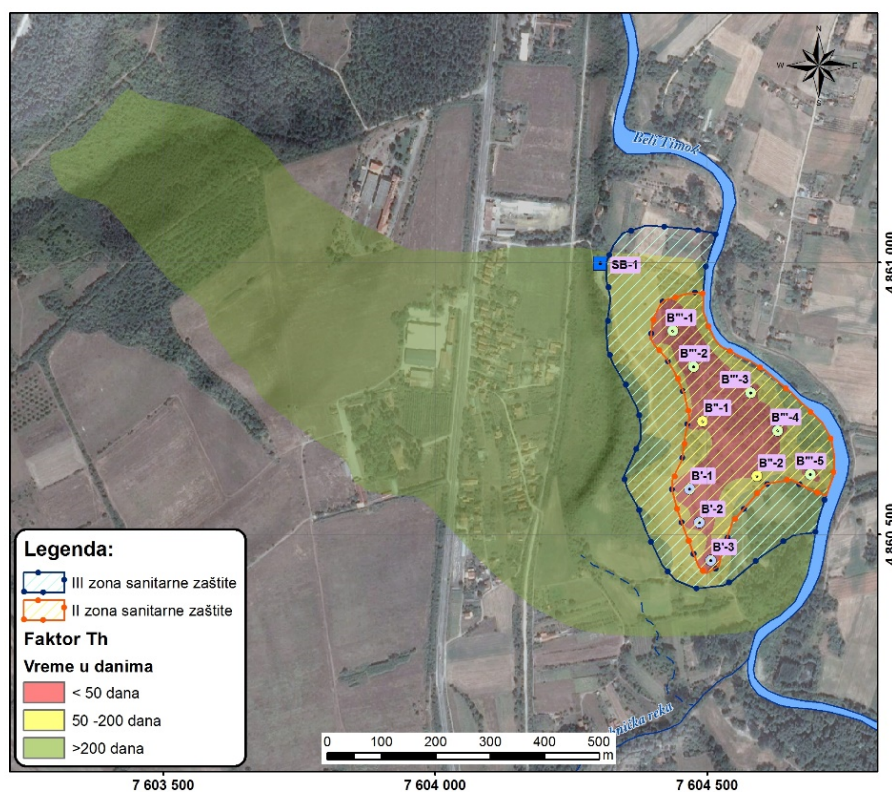
Primenom prikazane metodologije za ocenu ranjivosti izvorišta podzemnih voda dobijaju se komponente vremena površinskog, vertikalnog i horizontalnog kretanja vode. Njihovo sagledavanje je od posebnog značaja pošto one mogu značajno uticati na veličinu projektovanih zona sanitarne zaštite. Prema aktuelnoj zakonskoj regulativi¹³ u Srbiji, vreme putovanja vode do vodozahvatnog objekta (50 i 200 dana za zbijeni tip izdani i 1 dan i čitav sliv za izdani karstno-pukotinskog tipa) predstavlja osnovni kriterijum pri određivanju veličina sanitarnih zona.

Izvorište „Beli Timok“

Primenom TDM metodologije na području izvorišta „Beli Timok“ dobijene su sve tri karte vremena površinskog t_s , vertikalnog t_v i horizontalnog t_h kretanja vode ka vodozahvatnim objektima. Korišćenjem isključivo karte vremena horizontalnog t_h

¹³ *Pravilnik o načinu određivanja i održavanja zona sanitarne zaštite izvorišta vodosnabdevanje (Službeni glasnik RS, 92/2008)*

kretanja podzemnih voda, možemo izdvojiti II i III zonu sanitarne zaštite u skladu sa dosadašnjom praksom određivanja zona sanitarne zaštite u R. Srbiji. Ovako izdvojene zone bi obuhvatile prostor od 0,08 km² za II zonu i 0,17 km² za II zonu zaštite (slika 12.1).



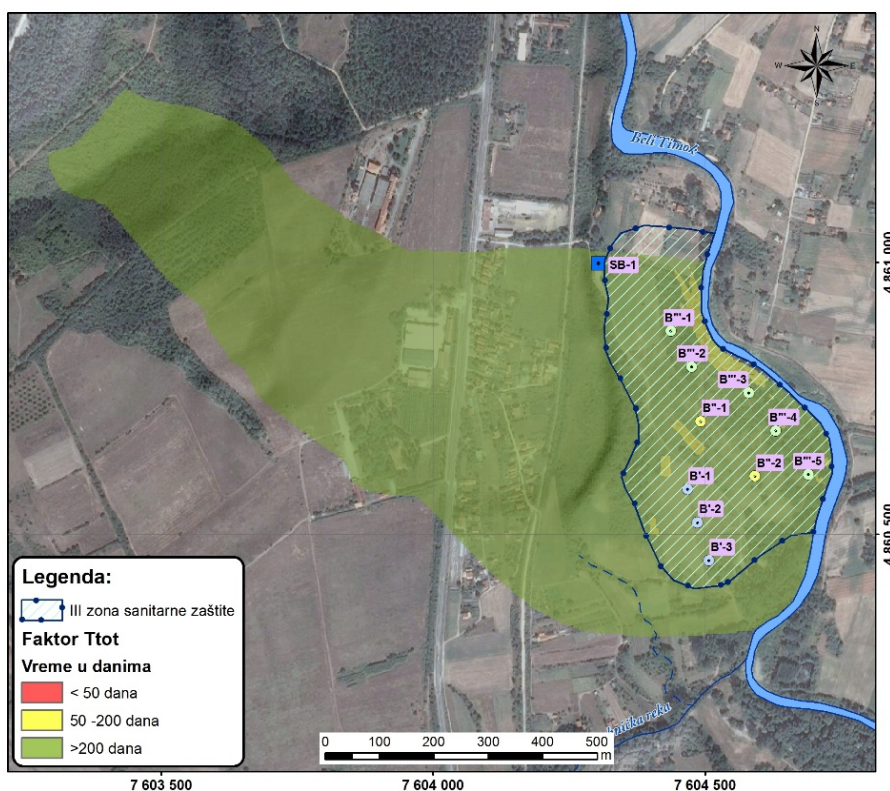
Slika 12.1. Karta zona sanitarne zaštite izvorišta „Beli Timok“ određenih na osnovu vremena horizontalnog kretanja podzemnih voda t_h

Međutim, ovakav pristup ne uzima u obzir površinsko i horizontalno kretanje vode. Pri određivanju zona sanitarne zaštite baziranom na ukupnom vremenu kretanja vode t_{tot} , izgled zona se može drastično promeniti obzirom da u konkretnom slučaju nadizdanska zona ima značajnu ulogu u zaštiti podzemnih voda. Naime, vreme kretanja vode kroz zonu aeracije utiče na ukupno vreme putovanja vode sa površine, tako da se na području izvorišta ne mogu izdvojiti delovi terena sa vremenom putovanja manjim od 50 dana. Isto tako, male su i površine (infiltracioni bazeni, područje između bunara i reke i sl.) sa vremenom putovanja od 50-200 dana.

To teorijski znači da bi zone sanitarne zaštite mogle da se redukuju isključivo na ova područja. Međutim, osnovna namena uspostavljanja zona sanitarne zaštite je da se

obezbedi kvalitet podzemnih voda i spreči moguće zagađivanje, ne samo sa površine terena već i direktno kroz izdansku zonu.

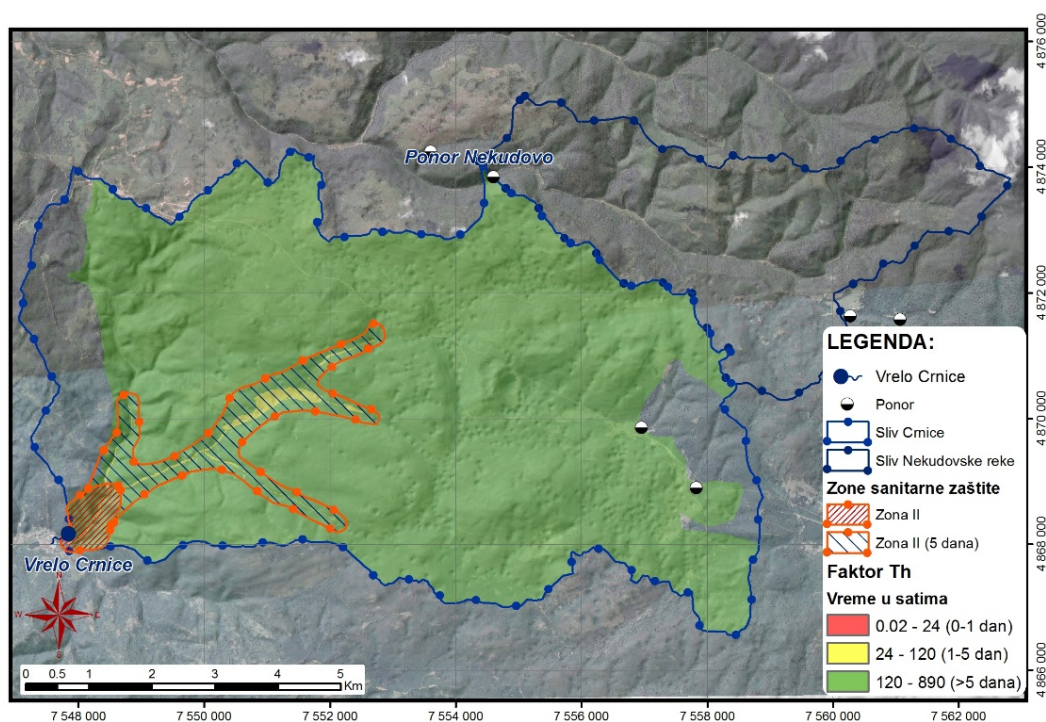
Imajući u vidu da je debljina nadizdanske zone relativno mala, radovima kojima se prodire u izdansku zonu, moguće je direktno zagađivanje podzemnih voda. U cilju sprečavanja ovakvih aktivnosti, neophodno je uspostavljanje III-e zone sanitarne zaštite, ali tako da ona bude definisana na bazi horizontalnog t_h kretanja vode ka vodozahvatnim objektima (slika 12.2). Ovakvim rešenjem, sprečava se buduće narušavanje kvaliteta podzemnih voda izvođenjem radova koji narušavaju zaštitni pokrivač u ovoj zoni.



Slika 12.2. Karta zona sanitarne zaštite izvorišta „Beli Timok“ određenih na osnovu ukupnog vremena kretanja podzemnih voda t_{tot}

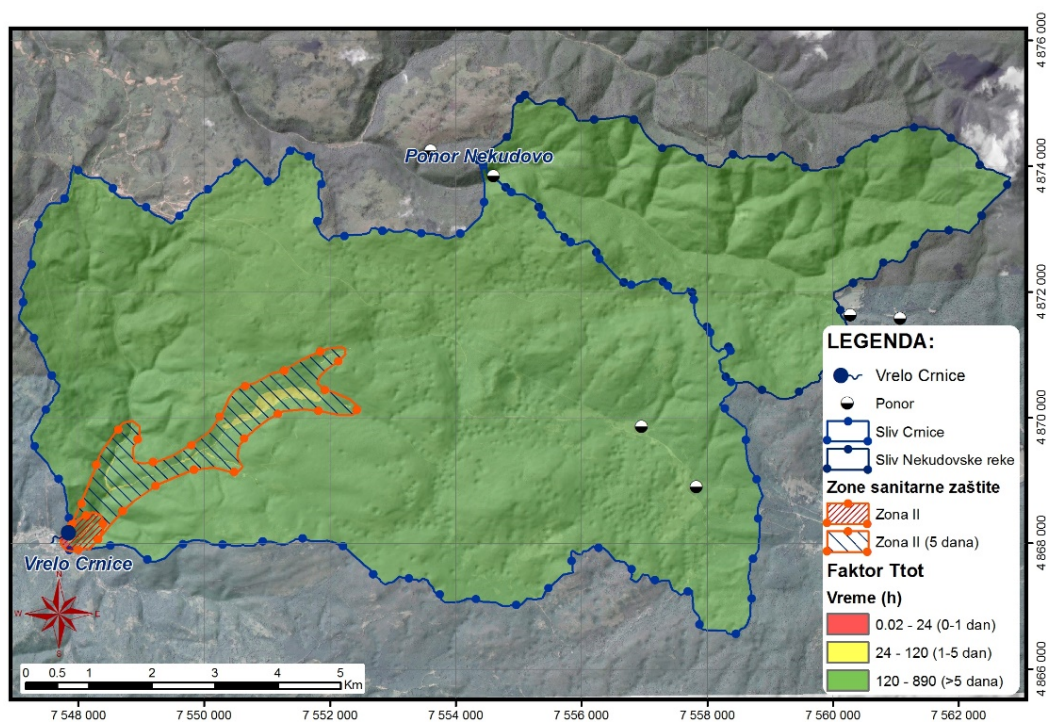
Izvorište „Vrelo Crnice“

Slično kao i kod izvorišta „Beli Timok“, za izvorište „Vrelo Crnice“ prvo su određene zone sanitarne zaštite na bazi vremena horizontalnog (t_h), a zatim i na bazi ukupnog kretanja (t_{tot}) vode ka vrelu. Kod izvorišta u Srbiji koja kaptiraju karstno-pukotinske izdani, praksa je da se II zona sanitarne zaštite određuje na osnovu jednodnevnog vremena putovanja vode do izvora ili bunara. Na bazi ove prakse, a uzimajući u obzir horizontalno kretanje vode, izdvojena je II zona sanitarne zaštite koja obuhvata prostor od 0,72 km² (slika 12.3). Pored ove zone, na istoj slici izdvojena je i II zona sanitarne zaštite prema 5-to dnevnom vremenu putovanja vode (prema nacrtu novog pravilnika o određivanju i održavanju zona sanitarne zaštite). Treća (III) zona sanitarne zaštite ne određuje se prema vremenu putovanja, već samo prema veličini sliva. Samim tim, ova zona obuhvata čitav sliv vrela Crnice uključujući i sliv Nekudovske reke.



Slika 12.3. Karta zona sanitarne zaštite izvorišta „Vrelo Crnice“ određenih na osnovu vremena horizontalnog kretanja podzemnih voda t_h

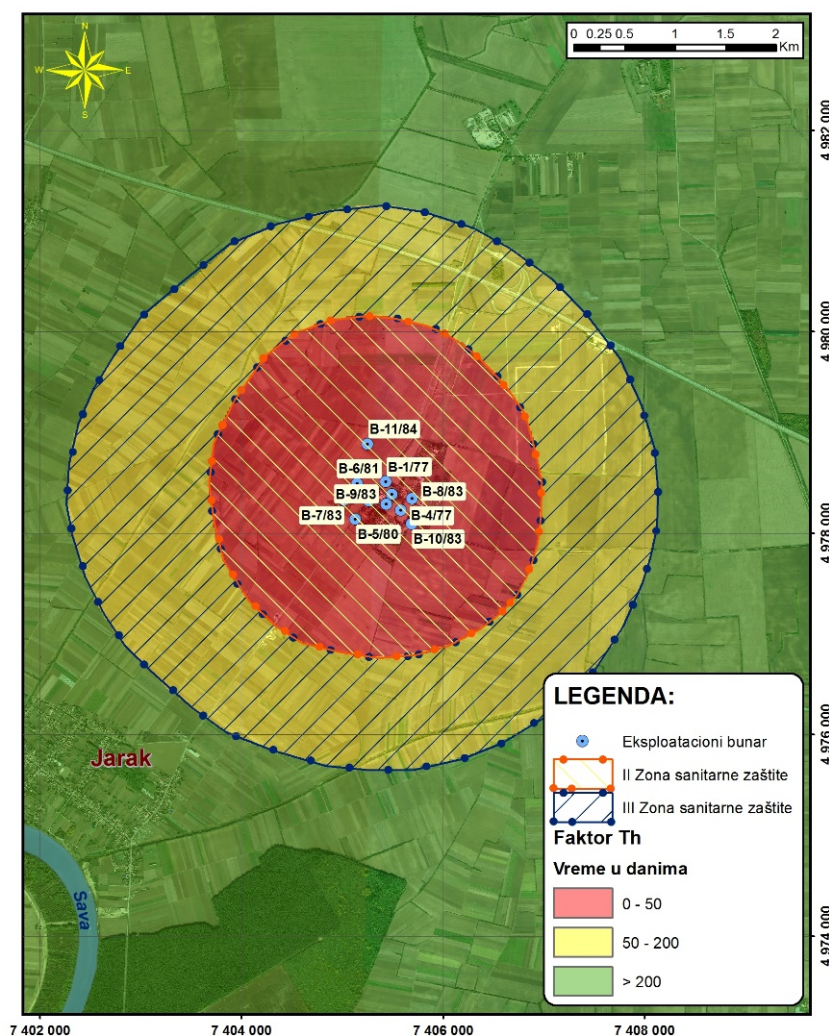
Ako se pri proračunu zona sanitarne zaštite uzmu u obzir sve komponente kretanja vode, odnosno ukupno vreme putovanja vode kroz karstni sistem, II zona sanitarne zaštite obuhvatila bi znatno manju površinu ($0,28 \text{ km}^2$). Slično smanjenje veličine zone zaštite primetno je i kod određivanja na bazi 5-to dnevnog vremena putovanja ($3,18 \text{ km}^2$ umesto $3,87 \text{ km}^2$). Karta II zone sanitarne zaštite određena na bazi ukupnog vremena kretanja vode prikazana je na slici 12.4.



Slika 12.4. Karta zona sanitarne zaštite izvorišta „Vrelo Crnice“ određenih na osnovu ukupnog vremena kretanja podzemnih voda t_{tot}

Izvorište „Fišerov Salaš“

Značajnu karakteristiku izvorišta „Fišerov Salaš“ predstavlja dubina kaptiranog vodonosnog sloja i arteso-subarteso karakter nivoa podzemnih voda. Zone sanitarne zaštite izvorišta su ranijim istraživanjima usvojene na bazi vremena horizontalnog kretanja vode kroz vodonosni horizont (slika 12.5). Vreme kretanja dobijeno je hidrodinamičkim modeliranjem tako da su II i III zona projektovane na bazi 50-to dnevnog i 200-to dnevnog vremena putovanja podzemne vode ka eksploatacionim bunarima.

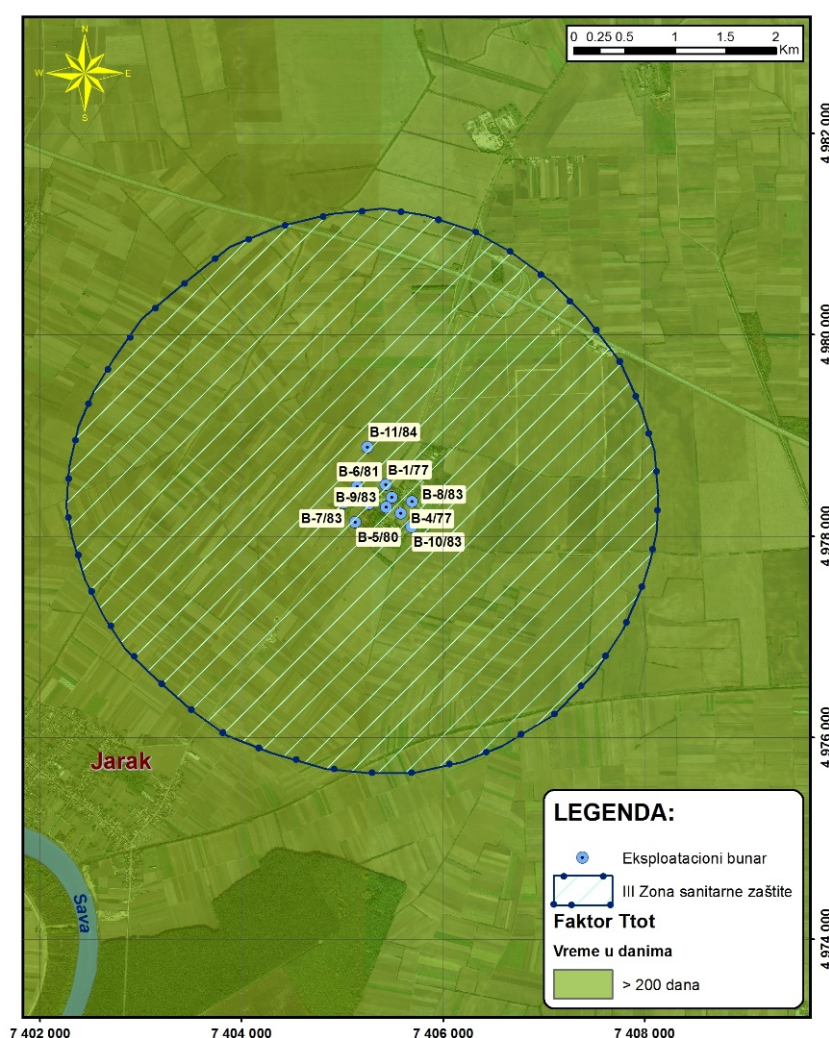


Slika 12.5. Karta zona sanitarne zaštite izvorišta „Fišerov Salaš“ određenih na osnovu vremena horizontalnog kretanja podzemnih voda t_h

Rezultati primene TDM metode pokazali su da nadizdanska zona ima značajnu funkciju u zaštiti podzemnih voda. Velika debljina povlatnih slojeva i postojeći subarteski pritisak za rezultat imaju vrednosti vremena vertikalnog kretanja vode od preko 40 godina.

Kao rezultat ovakvog vremena u potpunosti je opravdano da se i II i III zona sanitarne zaštite u potpunosti smanje, jer je nadizdanska zona sposobna da spreči bilo kakav uticaj zagađujućih supstanci sa površine terena. Sa druge strane, slično izvorištu „Beli Timok“, i izvorište „Fišerov Salaš“ treba zaštititi od budućih aktivnosti u okviru izdanske zone kojima bi mogle direktno da se zagađe podzemne vode pliocenske izdani. Kako bi

se sprečile ovakve aktivnosti, izvorištu je potrebna III zona, koja bi se definisala na osnovu vremena horizontalnog kretanja podzemne vode ka bunarima (slika 12.6). Najbitnija funkcija ove zone bila bi sprečavanje izvođenja radova kojima bi se vršio prodor u vodonosni horizont. U njoj ne bi bilo potrebno primenjivati sve mere koje su po pravilniku propisane za II i za III zonu sanitarne zaštite. To se odnosi na upotrebu veštačkog đubriva, tečnog i čvrstog stajnjaka, pesticida, herbicida i insekticida, uzgajanje i ispašu stoke. Isto tako, postoji mogućnost dozvole stambene izgradnje jer ona nikako ne može uticati na duboku kaptiranu izdan.



Slika 12.6. Karta zona sanitarne zaštite izvorišta „Fišerov Salaš“ određenih na osnovu ukupnog vremena kretanja podzemnih voda t_{tot}

12.2. Potrebne podloge za primenu TDM metode

Primena TDM metodologije za zaštitu izvorišta podzemnih voda zahteva veliki broj ulaznih podataka. Da bi se koristili u procesu proračuna pojedinih komponenti vremena kretanja površinskih i podzemnih voda, ovi podaci moraju prethodno da se prostorno digitalizuju, zatim obrade i vizualizuju izradom tematskih karata.

U tabeli 12.1 dat je prikaz potrebnih parametara odnosno ulaznih podataka koji su neophodni za primenu pojedinih metoda za ocenu ranjivosti podzemnih voda (DRASTIC, PI i COP metode) i izabranih metoda za ocenu ranjivosti izvorišta podzemnih voda (COP+K, Slovenački pristup i TDM metoda).

Tabela 12.1. Parametri koji su neophodni u oceni ranjivosti podzemnih voda i oceni ranjivosti izvorišta površinskih voda

Parametar	Metoda	Metode za ocenu ranjivosti podzemnih voda (resource vulnerability)			Metode za ocenu ranjivosti izvorišta podzemnih voda (source vulnerability)		
		DRASTIC	PI	COP	COP+K	Slovenački pristup	TDM
Nagib terena		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Orijentacija nagiba terena		-	-	-	-	-	✓
Vegetacija		-	✓	✓	✓	✓	✓
Zemljišni prekrivač		-	-	-	-	-	✓
Tlo (Debljina tla)		-	✓	✓	✓	✓	✓
Tlo (Tekstura i sastav)		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Tlo (Efektivna vlažnost)		-	✓	-	-	-	-
Dubina do nivoa podzemnih voda		✓	✓ ^a	✓ ^a	✓ ^a	✓ ^a	✓
Debljina stena u nadizdanskoj zoni		-	✓	✓	✓	✓	✓
Hidrogeološke karakteristike stena u nadizdanskoj zoni		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Hidrodinamičke karakteristike izdani ^c		-	✓	✓	✓	✓	✓
Veza izdani sa površinskim vodama		-	✓	✓	✓	✓	✓
Geomorfološke karakteristike		-	✓	✓	✓	✓	✓

Epikarst	-	✓	-	-	✓	✓
Prihranjivanje izdani	✓	✓	✓ ^b	✓ ^b	-	✓
Sumarne padavine	✓ ^b	✓ ^b	✓	✓	-	✓
Intenzitet padavina			✓	✓	✓	✓
Hidrogeološke karakteristike izdanske zone	✓	-	-	✓	✓	✓
Koeficijent filtracije stena u kojima je formirana izdan	✓	-	-	-	-	✓
Vreme putovanja podzemne vode	-	-	-	✓	✓	✓

^a indirektno preko debljine nadizdanske zone

^b delimično

^c izdan pod pritiskom ili sa slobodnim nivoom

Kao što se iz tabele 12.1 vidi, postoji velika razlika u broju parametara neophodnih za primenu pojedinih metoda. Posebno se razlikuju metode za ocenu ranjivosti podzemnih voda (izdani) i ranjivosti izvorišta podzemnih voda u pogledu karakterizacije izdanske zone (tip poroznosti, stepen ispucalosti ili karstifikacije, koeficijent filtracije sredine u kojoj je formirana izdan, vreme putovanja kroz izdansku zonu i sl.). Ovo je i razumljivo, jer metode za ocenu ranjivosti izvorišta moraju da sagledaju faktore koji utiču na horizontalno kretanje podzemnih voda ka vodozahvatnom objektu.

Generalno za primenu svih metoda neophodno je dobro poznavanje pedoloških karakteristika tla, sastava stena ili sedimenata u nadizdanskoj zoni, kao i debljine nadizdanske zone, odnosno dubine do nivoa podzemnih voda. Većina metoda takođe uzima u obzir hidrodinamičke karakteristike kaptirane izdani (sa slobodnim nivoom ili pod pritiskom), pri čemu jedino TDM metoda uzima u obzir i veličinu piježometarskog pritiska.

Većina metoda analizira faktore koji utiču na evapotranspiraciju i time indirektno na veličinu prihranjivanja. Ovo se posebno odnosi na nagib terena i razvijenost vegetacije. Međutim, TDM metoda analizira i orijentaciju nagiba terena kao i zemljišni pokrivač koji se koristi prilikom analize površinskog kretanja vode odnosno određivanja koeficijenta hrapavosti.

Interesantno je da neke metode za ocenu ranjivosti podzemnih voda uzimaju u obzir veličinu prihranjivanja (DRASTIC, PI), dok pojedine metode za ocenu ranjivosti izvorišta (COP+K, Slovenački pristup) analiziraju intenzitet padavina i/ili sumarne padavine. TDM metoda koristi i veličinu padavina (pri određivanju veličine prihranjivanja kao podloge za određivanje vremena vertikalnog kretanja podzemnih voda) i intenzitet padavina (kod analize vremena površinskog kretanja voda).

Iz svega iznetog, može se zaključiti da je za primenu TDM metode potrebno dobro poznavanje čitavog hidrogeološkog sistema počev od sagledavanja uslova infiltracije, zatim kretanja infiltrirane vode kroz nadizdansku zonu, pa do mesta gde se vrši zahvatanje podzemnih voda.

12.3. Prednosti i nedostaci TDM metode

TDM metoda predstavljena u disertaciji koristi više parametara koji utiču na ukupno vreme putovanja površinske i podzemne vode ka vodozahvatnom objektu. Samim tim ona ima i određene prednosti, ali i nedostataka.

Među prednostima koje treba naglasiti su sledeće:

- Dobijeni rezultati, tj. karte ranjivosti izvorišta podzemnih voda su kompletno u funkciji vremena putovanja vode, pa je samim tim olakšano razumevanje i njihovo korišćenje;
- Upotreba parametarskih skala i rangiranja je znatno smanjena u odnosu na klasične metode za ocenu ranjivosti izvorišta podzemnih voda, pa je zbog toga subjektivnost dovedena na niži nivo;
- Rezultat proračuna, odnosno indeks ranjivosti je kod klasičnih metoda za ocenu ranjivosti izvorišta podzemnih voda obično bezdimenzionalna veličina. Kod TDM metode finalni rezultat izražen je u vremenu, pa je samim tim i validacija dobijenih rezultata znatno olakšana;
- TDM metoda se može primeniti za određivanje veličine sanitarnih zona za izvorišta podzemnih voda formiranih u različitim hidrogeološkim sredinama;

- Primena TDM metode moguća je u različitim hidrološkim uslovima, ili pri različitim uslovima eksploatacije.
- Prilikom primene TDM metode za ocenu ranjivosti izvorišta podzemnih voda moguće je uraditi kartu vremena putovanja samo na bazi površinskog (t_s) i vertikalnog (t_v) vremena kretanja vode. Time se dobija karta ranjivosti podzemnih voda (*resource vulnerability*) koja je takođe bazirana na vremenu putovanja vode do izdanske zone.
- Metodologija proračuna pojedinih komponenti (vreme površinskog, vertikalnog i horizontalnog kretanja podzemnih voda) može se veoma lako unaprediti u slučaju postojanja direktnih merenja vremena kretanja površinske ili podzemne vode.
- U slučaju neophodnosti analize ranjivosti izvorišta na specifične kontaminante (npr. patogeni mikroorganizmi), proračun ranjivosti izvorišta podzemnih voda je znatno olakšan, jer je opšta ranjivost izražena preko vremena.

Najbitnija prednost prikazane metodologije jeste jednostavnost u primeni dobijenih rezultata u procesu delineacije sanitarnih zona. Na prikazanim primerima zone sanitarne zaštite su veoma lako izdvojene prema domaćoj zakonskoj regulativi. Čak i u slučaju promene regulative, odnosno vremena putovanja vode koje se koristi u određivanju zona, dobijene karte ranjivosti mogu se i dalje uspešno koristiti pri definisanju veličina zona.

Predstavljena metodologija ima i nedostataka. To su pre svega:

- Subjektivnost, odnosno uticaj ljudskog faktora u proceni pojedinih parametara je i dalje veliki. Izražavanje ranjivosti preko vremena putovanja vode predstavlja napredak zbog lakoće razumevanja dobijenih rezultata, međutim procena pojedinih podloga će i dalje zavisiti od stručnosti onoga ko primenjuje metodu.
- Prilikom primene TDM metode, za svaki analizirani parametar se pripremaju namenske karte. Od preciznosti i razmere tih karata će zavisiti i preciznost i kvalitet finalne karte ranjivosti, odnosno vremena putovanja vode do vodozahvatnog objekta;

- Slično kao i kod metoda za ocenu ranjivosti podzemnih voda, primena TDM metode zahteva validaciju dobijenih karata. Za validaciju se preporučuju opiti trasiranja, analiza hidrograma i hemograma, bakteriološke analize, matematički modeli i sl. Pored značajnih finansijskih sredstava koja treba izdvojiti, rezultati validacije mogu biti diskutabilni, pogotovo kada je potrebno da se potvrde dugačka vremena putovanja podzemne vode (meseci, godine).

11. ZAKLJUČAK

Zaštita izvorišta podzemnih voda uglavnom se zasniva na primeni preventivnih mera za zaštitu podzemnih voda koje uključuju uspostavljanje zona sanitarne zaštite. Proces delineacije zona sanitarne zaštite sadrži značajnu nesigurnost pri čemu treba naglasiti da univerzalna metodologija primenljiva za izvorišta u različitim hidrogeološkim sredinama ne postoji.

Osnovni naučni doprinos doktorske disertacije je razvoj nove metodologije za zaštitu podzemnih voda. Analizom svih faktora koji utiču na sudbinu kretanja vode do vodozahvatnog objekta kreirana je TDM metoda. Metoda posebno analizira tri komponente kretanja: vreme kretanja površinske vode t_s , vreme kretanja kroz nadizdansku zonu t_v i vreme kretanja vode kroz izdansku zonu t_h . Za svaku komponentu vremena dat je prikaz proračuna. Radi dokazivanja primenljivosti metode pri određivanju zona sanitarne zaštite, odabrana su tri izvorišta različita po hidrogeološkim karakteristikama.

Na izvorištu „Beli Timok“ plitkim bunarima kaptirani su vodonosni aluvijalni nanosi Belog Timoka. Primenom TDM metode analizirano je ukupno vreme putovanja vode sa površine terena do eksploatacionih bunara. Analiza je pokazala da nadizdanska zona u okviru izvorišta ima značajnu zaštitnu funkciju. Uzimajući u obzir ukupno vreme putovanja vode t_{tot} , TDM metoda pruža mogućnost smanjenja veličina zona sanitarne zaštite u odnosu na klasičnu metodologiju određivanja zona sanitarne zaštite.

Rezultati primene TDM metode za ocenu ranjivosti izvorišta „Vrelo Crnice“ pokazali su značaj evaluacije svih komponenti kretanja površinskih i podzemnih voda. Primenjena metodologija pokazala je da najranjiviji delovi u slivu vrela Crnice ne moraju da budu i oni tereni koji su najbliži vrelu. Vreme transporta vode, samim tim i potencijalnih zagađujućih supstanci, znatno je kraće u slivu Nekudovske reke u odnosu na veliki deo

sliva koji je bliži vrelu. Primenom TDM metode dat je predlog II zone sanitarne zaštite koja zahvata tri puta manju površinu u odnosu na zonu dobijenu klasičnim postupkom.

Izvorište „Fišerov Salaš“ kaptira duboke vodonosne slojeve pod pritiskom, pa se samim tim i karakteriše dobrom prirodnom zaštitom podzemnih voda. Primenom TDM metode izvršena je procena vremena vertikalnog kretanja podzemnih voda, a dobijene vrednosti ukazuju na mogućnost smanjenja II i III zone sanitarne zaštite. I pored toga što je dugogodišnja eksploatacija podzemnih voda na ovom izvorištu uticala na veliko smanjenje pijezometarskog nivoa u zoni izvorišta, analiza je pokazala da ovakav režim depresijacije nivoa ne utiče bitno na ranjivost podzemnih voda.

Rezultati primene TDM metode pokazuju da se metodologija lako može primeniti kod izvorišta u različitim hidrogeološkim sredinama, uzimanjem u obzir brojnih specifičnosti kojima se karakterišu pojedini tipovi izdani. Pored toga, u obzir mogu biti uzeti različiti hidrološki uslovi, kao i različiti uslovi eksploatacije izvorišta. Konkretno, rezultati predstavljaju karte vremena putovanja vode do vodozahvatnog objekta. Ovakvo razumljivi rezultati omogućavaju lakšu primenu metode.

Najvažnija primena TDM metode predstavlja mogućnost direktne delineacije veličina sanitarnih zona na bazi dobijenih rezultata. Na dobijenoj karti ranjivosti izvorišta za svaku tačku se jednostavno može odrediti pripadnost određenoj sanitarnoj zoni u zavisnosti od vrednosti ukupnog vremena putovanja. Ovakav pristup u određivanju zona sanitarne zaštite doprinosi ne samo realnijem određivanju veličina zona sanitarne zaštite, već i boljem razumevanju celokupnog hidrogeološkog sistema, uključujući uslove prihranjivanja, zaštitnu ulogu nadizdanske zone i proces kretanja podzemne vode ka vodozahvatnom objektu.

Imajući u vidu da TDM metoda analizira sve tri komponente vremena kretanja površinskih i podzemnih voda, dalji pravac razvoja ove metodologije treba da obuhvati unapređenje proračuna vremena pojedinih komponenti kretanja vode. To se pre svega odnosi na vreme kretanja vode kroz nadizdansku i izdansku zonu.

Značajno unapređenje predstavljene metodologije moguće je uvođenjem karakteristika kontaminanata. Konkretno, za područja sa intenzivnom poljoprivrednom proizvodnjom, moguće je analizirati upotrebu pojedinih veštačkih đubriva, pesticida i herbicida i proceniti njihovo kretanje i degradaciju na putu do vodozahvatnog objekta.

U Beogradu,
30.03.2016.

Autor

mr Vladimir Živanović, dipl. inž.

LITERATURA

Publikovana literatura

1. **Andreo, B., Ravbar, N., Vias, J.M. (2009)** Source vulnerability mapping in carbonate (karst) aquifers by extension of the COP method: application to pilot sites. *Hydrogeology Journal, Volume 17, Issue 3*, pp 749-758.
2. **Antić, M., Jović, N., Avdalović, V. (1987)** *Pedologija*, Naučna Knjiga, Beograd.
3. **Antonijević, I., Veselinović, M., Đorđević, M., Kalenić, M., Krstić, B., Karajačić, Lj. (1970)** *Osnovna geološka karta, Tumač za list Žagubica, L 34-140*, Savezni geološki zavod, Beograd.
4. **Antonijević, I., Dorđević, M., Veselinović, M., Krstić, B., Kalenić, M., Andelković, J., Karajčić, A., Rakić, B., Banković, V., Jovanović, S. (1968)** *Osnovna geološka karta, list Žagubica, L 34-128*, Fond Saveznog geološkog zavoda, Beograd.
5. **Biondic, B. (2000)** Karst groundwater protection: the case of the Rijeka region, Croatia. *Acta carsologica*, 29/1, 2, 33-46, Ljubljana.
6. **Biondic, B., Biondic, R., Dukaric, F. (1998)** Protection of karst aquifers in the Dinarides in Croatia. *Environmental Geology* 34 (4).
7. **Brenčić M., Prestor J., Kompore B., Matoz H., Kranjc S. (2009)** Integrated approach to delineation of drinking water protection zones. *Geologija* 52/2, 175-182, Ljubljana.
8. **Carey, M., Hayes, P., Renner, A. (2009)** Groundwater Source Protection Zones. Review of Methods, Integrated catchment science programme, Science report: SC070004/SR1, *Environment Agency*, Bristol, UK.
9. **Chave, P., Howard, G., Schijven, J., Appleyard, S., Fladerer, F. and Schimon, W. (2006)** Groundwater protection zones. In Schmoll, O., Howard, G., Chilton, J., Chorus, I. (Ed.) 2006. *Protecting Groundwater for Health*,

- Managing the Quality of Drinking-water Sources. IWA Publishing, London, 678p.
10. **Civita, M. (2008)** An improved method for delineating source protection zones for karst springs based on analysis of recession curve data. *Hydrogeology Journal* (2008) 16: 855-869.
 11. **Connecticut Department of Transportation (ConnDOT) (2001)** ConnDOT Drainage Manual, Chapter 6. Hydrology, Connecticut Department of Transportation, URL <http://www.ct.gov/dot/cwp/view.asp?a=3200&q=260100>, Newington, Connecticut (poslednji pristup: 30.03.2016).
 12. **Conservation Engineering Division (1986)** Urban hydrology for small watersheds, National Resources Conservation Service, U.S. Dep. Agric., Tech. Rel. No. 55 (1975)
 13. **Conservation Engineering Division (2010)** Time of Concentration, In. Part 630 Hydrology National Engineering Handbook, National Resources Conservation Service, U.S. Dep. Agric.
 14. **COST Action 65 (1995)** Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas, Final report (COST action 65), European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development, Report EUR 16547 EN: 446 p., Brüssel, Luxemburg
 15. **Cowan, W.L. (1956)** Estimating hydraulic roughness coefficients: *Agricultural Engineering*, v. 37, no. 7, p. 473-475.
 16. **Cvijić, J. (1893)** Geografska ispitivanja u oblasti Kučaja i u istočnoj Srbiji. *Geološki anali Balkanskog poluostrva*, knj. V, sv. 1, Beograd, s. 7 – 172.
 17. **Cvijić, J. (1895)** Karst. Geografska monografija. Državna štamparija, Beograd, s. 1-173.
 18. **Delleur, J. (2007)** Elementary Groundwater Flow and Transport Processes. In: *The Handbook of Groundwater Engineering*, Second Edition, Edited by Jacques W. Delleur. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton-London-New York, 3.1-3.45.
 19. **Doerfliger, N., and Zwahlen, F. (1997)** EPIK: A new method for outlining of protection areas in karstic environment, *Karst Waters and Environmental Impacts*, Gunay and Johnson (eds.), Balkema, Rotterdam

20. **Doerfliger N., Jeannin PY., Zwahlen F. (1999)** Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method), *Environmental Geology* 39 (2), 165-176
21. **Dokmanović, P. (1999)** Hidrogeologija tercijarnih basena Srbije. Zadužbina Andrejević, Beograd.
22. **Dragišić, V. (1997)** Opšta hidrogeologija. Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 1-434.
23. **Dragišić, V., Živanović, V. (2014)** Opšta hidrogeologija. Rudarsko-geološki fakultet. Beograd.
24. **Dukić, D. (1973)** *Hidrografske karakteristike istočne Srbije*. Zbornik radova geografskog instituta „J. Cvijić“, knj. 26, Beograd.
25. **EEA (2007)**. CLC2006 technical guidelines. Copenhagen, European Environment Agency.
26. **Engman, E.T. (1986)**. Roughness coefficients for routing surface runoff. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 112 (1): 39-53.
27. **ESRI (2014)** ArcGIS Desktop: Release 10.2. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute
28. **Expósito, J. L., Esteller, M. V., Paredes, J., Rico, C., Franco, R. (2010)** Groundwater Protection Using Vulnerability Maps and Wellhead Protection Area (WHPA): A Case Study in Mexico. *Water Resources Management*. Volume 24, Issue 15, pp 4219-4236
29. **Filipović, B. (1997)** Istorijski razvoj jugoslavenske hidrogeologije i stanje hidrogeološke istraženosti. U: Monografija 100 godina hidrogeologije u Jugoslaviji, Beograd, 31-46.
30. **Filipović, B. Dimitrijević, N. (1990)** Razvoj hidrogeologije u Srbiji do II-og svetskog rata. *Geološki anali Balkanskog poluostrva*, knjiga LIII/1, Beograd, 175-182.
31. **Filipović, B., Komatina, M., Igrutinović, D., Živković, J., Perić, J. (1977)** *Uslovi i mogućnosti vodosnabdevanja SR Srbije bez pokrajina na bazi korišćenja podzemnih voda*. Zbornik radova, knjiga I, Savetovanje o uslovima i mogućnostima vodosnabdevanja SR Srbije bez SAP-a na bazi korišćenja podzemnih voda. Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, RSIZ za geološka

- istraživanja, Geozavod, Institut „Jaroslav Černi“, Geosonda, Geoinstitut, Beograd.
32. **Filipović, B., Vujasinović, S. (1982)** Zaštita podzemnih voda. OOUR grupa za hidrogeologiju Rudarsko-geološkog fakulteta u Beogradu, Beograd, 1-358.
 33. **Ford D.C., Williams P. (2007)** Karst hydrogeology and geomorphology. Wiley, Chichester
 34. **Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D’Elia, M., Paris, M. (2002)** Groundwater Quality Protection, a guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies, The International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, Washington, USA
 35. **Garcia-Garcia, A., Martinez-Navarrete, C. (2005)** Protection of groundwater intended for human consumption in the water framework directive: strategies and regulation applied in some European countries, Polish Geological Institute Special Papers, 18 (2005): 28-32
 36. **Goldscheider, N. (2002)** Hydrogeology and vulnerability of karst systems – examples from the Northern Alps and Swabian Alb, PhD Thesis (Dissertation), Fakultät für Bio und Geowissenschaften, University of Karlsruhe, 236 s, Karlsruhe.
 37. **Goldscheider, N. (2010)** Delineation of spring protection zones. In: Groundwater Hydrology of Springs: Engineering, Theory, Management, and Sustainability (Editors: N. Kresic & Z. Stevanovic), Elsevier, B/H, 305-338.
 38. **Goldscheider, N., Drew D. (2007)** Methods in Karst Hydrogeology. Taylor & Francis. International Contributions to Hydrogeology.
 39. **Grubić, A. (1997)** Svetolik Radovanović i njegovi pionirski radovi iz hidrogeologije i geotermije. U: Monografija 100 godina hidrogeologije u Jugoslaviji, Beograd, 7-12.
 40. **GSI (1999)** Groundwater Protection Schemes, Department of the Environment and Local Government, Environmental Protection Agency, Geological Survey of Ireland
 41. **Igrutinović, D., Nikolić, J. (1977)** *Hidrogeološke odlike aluvijona Timoka i dela Dunava (Istočna Srbija)*. Zbornik radova, Knjiga I, Savetovanje o uslovima i mogućnostima vodosnabdevanja SR Srbije bez SAP-a na bazi korišćenja podzemnih voda. Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, RSIZ za geološka

- istraživanja, Geozavod, Institut „Jaroslav Černi“, Geosonda, Geoinstitut, Beograd.
42. **Jemcov, I. (2008)** Bilans karstnih izdanskih voda i optimizacija rešenja njihovog zahvata na primerima iz Srbije. Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 1-396
 43. **Jemcov, I. (2000)** Mogućnosti dugoročnog vodosnabdevanja podzemnim vodama gradova centralnog Pomoravlja. Magistarski rad. Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
 44. **Josipović, J., Soro, A. (2012)** Podzemne vode Vojvodine. Monografija, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, 1-207, Beograd.
 45. **Kavouri, K., Plagnes, V., Tremoulet, J., Dörfliger, N., Reijiba, F., Marchet, P. (2011)** PaPRIKA: a method for estimating karst resource and source vulnerability—application to the Ouyse karst system (southwest France). *Hydrogeology Journal* 19, 339-353
 46. **Komatina, M. (1992)** Hidrogeologija u Srbiji i svetu u poslednjih sto godina. Zapisnici Srpskog geološkog društva, Jubilarna knjiga 1981-1991, Beograd, 199-209.
 47. **Košćal, M., Menković, Lj., Mijatović, M., Knežević, M. (2005)** Geomorfološka karta autonomne pokrajine Vojvodine 1 : 300 000, Geozavod – Gemini, Beograd.
 48. **Kraemer, S.R., Haitjema, H.M., and Kelson, V.A. (2005)** Working with WhAEM2000; Capture zone delineation for a city wellfield in a valley fill glacial outwash aquifer supporting wellhead protection. EPA/600/R-00/022, United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, DC, 77 p.
 49. **Kralik, M. (2001)** Strategie Zum Schutz Der Karst-Wassergebiete In Österreich, Umweltbundesamt GmbH, Wien, 99p
 50. **Kralik, M. & Keimel T. (2003)** Time-input, an innovative groundwater-vulnerability assessment scheme: application to an alpine test site. *Environmental Geology* 44:679-686
 51. **Kresic, N. (2007)** Hydrology and groundwater modelling, Second edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, 807p.

52. **Kresic N. (2009)** Groundwater Resources; Sustainability, Management and Restoration. McGraw-Hill, New York, 852 p.
53. **Kresic, N. (2013)** Water in karst: Management, Vulnerability, and Restoration. McGraw-Hill, New York, 708 p.
54. **Krešić, N., Vujasinović, S., Matic, I. (2006)** Remedijacija podzemnih voda i geosredine. Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 1-385.
55. **Maksimović, B. (1956)** Geološki i tektonski odnosi ugljonosnog terena Senjsko-resavskih rudnika i njegovog oboda. Posebna izdanja Geološkog instituta „Jovan Žujović“, knjiga 6, Beograd, s. 1 - 104.
56. **Maksimović, B., Mrvaljević, N. (1958)** Prilog geologiji centralnog Kučaja. Zbornik radova Geološkog instituta „Jovan Žujović“, knjiga 10, Beograd, s. 35-55.
57. **Manojlović, M., Bogdanović, D., Lazić, S., Nešić, Lj. (2014)** Plodnost i opterećenost zemljišta u pograničnom području. Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad.
58. **Margane, A. (2003b)**: Guideline for the Delineation of Groundwater Protection Zones. Technical Cooperation Project ‘Management, Protection and Sustainable Use of Groundwater and Soil Resources in the Arab Region’, Technical Reports Vol. 5, prepared by BGR & ACSAD, BGR archive no. 122917:5, 329 p., 1 CD; Damascus
59. **Marin, A.I., Andreo, B., Jimenez-Sanchez, M., Domínguez-Cuesta, M.J., Melendez-Asensio, M. (2012)** Delineating protection areas for caves using contamination vulnerability mapping techniques: the case of Herrerias Cave, Asturias, Spain. Journal of Cave and Karst Studies, v. 74, no. 1, p. 103-115.
60. **Marković, J. (1954)** Reljef sliva Crnice i Grze. Srpska akademija nauka, Zbornik radova, Geografski institut, knjiga 7, Beograd, s. 19-81.
61. **Miladinović, B. (2000)** Hidrogeologija REMBAS-a. Zadužbina Andrejević, Beograd, s.1-110.
62. **Milanovic, P. (2000)** Geological engineering in karst, Dams, reservoirs, grouting, groundwater protection, water tapping, tunnelling, Zebra Publishing Ltd., Belgrade.

63. **Milanović, S. (2012)** Speleologija i speleoronjenje u hidrogeologiji karsta. Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, s. 1-314.
64. **Milivojević, M. (1997)** „Podzemne vode“ od Svetolika Radovanovića-prva knjiga i prvi srpski udžbenik hidrogeologije i geotermologije. U: Monografija 100 godina hidrogeologije u Jugoslaviji, Beograd, 13-29.
65. **Milojević, N. i saradnici (1976)** *Geologija Srbije, knj. VIII-1, Hidrogeologija*. Zavod za regionalnu geologiju i paleontologiju, Beograd.
66. **Milojević, N. (1959)** Hidrogeološke prilike Srema. Anali Balkanskog poluostrva, knj. XXVI, 229-253, Beograd.
67. **Milojević, N. (1962)** O uslovima pojavljivanja snažnih karsnih vrela. Zbornik radova III kongresa geologa Jugoslavije, Budva, knjiga II, Titograd, s. 5 - 26.
68. **Ministry of Environment (British Columbia) (2004) Well Protection Toolkit Step 2** (http://www.env.gov.bc.ca/wsd/plan_protect_sustain/groundwater/wells/well_protection/pdfs/step2.pdf). 24 p.; (poslednji pristup 30/03/2016)
69. **Nejgebauer, V., Živković, B., Tanasijević, Đ., Miljković, N. (1971)** Pedološka karta Vojvodine R 1 : 50000, Institut za poljoprivredna istraživanja, Novi Sad.
70. **Nešić, S. (1957)** Geologija Beljanice i severnog Kučaja. Vesnik Zavoda za geološka i geofizička istraživanja N.R Srbije, knjiga XIII, Beograd, s. 47-70.
71. **Paloc, H. (1985)** Problèmes de protection de la qualité des eaux souterraines en terrains calcaires. In Matthess G., Foster S.S.D., Skinner A.C.: Theoretical Background, Hydrogeology and Practice of Groundwater Protection Zones. International contributions to hydrogeology; Vol. 6. Hannover
72. **Panday, S., Langevin, C.D., Niswonger, R.G., Ibaraki, M. and Hughes J.D. (2013)** MODFLOW-USG version 1: An unstructured grid version of MODFLOW for simulating groundwater flow and tightly coupled processes using a control volume finite-difference formulation: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A45, 66 p.
73. **Petković, K., Milojević, N. (1955)** *Arteški horizonti u Zaječaru i njihov značaj za snabdevanje grada pijaćom vodom*. Geološki anali Balkanskog poluostrva XXIII, Beograd.
74. **Petrović, J. (1986)** Neki primeri odstupanja hidrološkog od topografskog razvođa u Gornjoj Resavi. Srpska akademija nauka i umetnosti, Posebna izdanja

- knj. DLXVIII, Zbornik radova odbora za kras i speleologiju II, Beograd, s. 55-64.
75. **Pochon, A., Tripet, J-P., Kozel, R., Meylan, B., Sinreich, M., Zwahlen, F. (2008)** Groundwater protection in fractured media: a vulnerability-based approach for delineating protection zones in Switzerland Hydrogeology Journal (2008) 16: 1267-1281
76. **Polomčić, D. (2001)** Hidrodinamička istraživanja, otvaranje i upravljanje izvorima izdanskih voda u intergranularnoj proznoj sredini. Rudarsko-geološki fakultet. Beograd.
77. **Pronk, M., Goldscheider, N., Zopfi, J. and Zwahlen, F. (2009)** Percolation and Particle Transport in the Unsaturated Zone of a Karst Aquifer. Groundwater, v. 47, no. 3, p. 361-369
78. **Protić, D. (1995)** Sisevac. In: Mineralne i termalne vode Srbije. Geoinstitut, Posebna izdanja, knjiga 17, Beograd, s. 109-110.
79. **Pušić, M. (1990)** Veštačko prihranjivanje dubokih izvora u intergranularnoj poroznoj sredini. Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.
80. **Radojičić, S., Dobričić, D. (1969)** Glavni akviferi SAP Vojvodine. Vesnik Zavoda za geološka i geofizička istraživanja, Serija B, knj. IX, 203-247, Beograd.
81. **Radosavljević J., Živanović V., Rabrenović M., Jemcov I., Dragišić V., Pešić M. (2015)** Ocena ranjivosti podzemnih voda u karstnim terenima na primeru Zlatskih izvorišta, Zbornik apstrakata i vodič stručne ekskurzije. 8. Simpozijum o zaštiti karsta, 2015, Akademsko Speleološko-Alpinistički klub, 9
82. **Radovanović, S. (1897)** Podzemne vode – izvori, bunari, terme i mineralne vode. Srpska književna zadruga 42, Beograd, 1-152.
83. **Rajčević, D. (1983a)** Osnovna geološka karta SFRJ, list "Šabac" 1:100000. Savezni geološki zavod, 1-41, Beograd.
84. **Rajčević, D. (1983b)** Tumač za OGK SFRJ, list "Šabac" 1:100000. Savezni geološki zavod, 1-41, Beograd.
85. **Rašula, B., Vuković, M., Stošić, V. (1997)** Hidrogeološke karakteristike „Prve izvorišta“ u Sremu sa aspekta navodnjavanja. „100 godina hidrogeologije u Jugoslaviji“, Zbornik radova, 41-48, Beograd.

86. **Ravbar, N. (2007)** Vulnerability and risk mapping for the protection of karst waters in Slovenia - application to the catchment of the Podstenjšek springs. Dissertation. University of Nova Gorica Graduate School. Nova Gorica.
87. **Ravbar, N., Goldscheider, N. (2007)** Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia. *Acta carsologica* 36(3):397-411.
88. **Reimann, T. & Hill, M.E. (2009)** MODFLOW-CFP: A New Conduit Flow Process for MODFLOW–2005. *Groundwater*, v. 47, no. 3, p. 321-325.
89. **SAEFL (1998):** Practical Guide Groundwater Vulnerability Mapping in Karst Regions (EPIK), Report, 57 p. Bern.
90. **Schmoll, O., Howard, G., Chilton, J., Chorus, I. (Ed.) (2006)** Protecting Groundwater for Health, Managing the Quality of Drinking-water Sources. IWA Publishing, London, 678p.
91. **Shaap, M.G., Liej, F.J., van Genuchten, M.Th. (1999)** A bootstrap-neural network approach to predict soil hydraulic parameters. In: van Genuchten M.Th., Liej, F.J., Wu, L. (Eds.), *Characterization and Measurements of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media*. University of California at Riverside, Riverside, CA, USA, pp. 1237–1250.
92. **Skinner, A. Ch. (1985)** Groundwater protection in fissured rocks. In Matthes G., Foster S.S.D., Skinner A.C.: *Theoretical Background, Hydrogeology and Practice of Groundwater Protection Zones*. International contributions to hydrogeology; Vol. 6. Hannover.
93. **Sousa, M., Jones, J., Frind, E., Rudolph, D. (2013)** A simple method to assess unsaturated zone time lag in the travel time from ground surface to receptor. *Journal of Contaminant Hydrology*. Volume 144, Issue 1, Pages 138–151.
94. **Stevanovic, Z. (2012)** History of hydrogeology in Serbia. In: *Hystory of Hydrogeology* (eds. N.Howden and J. Mather), International Contribution to Hydrogeology (edition), CRC Press & Balkema, Boca Raton, London, 257-273.
95. **Stevanović, Z. (1991)** Hidrogeologija karsta karpato-balkanida istočne Srbije i mogućnosti vodosnabdevanja. Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, s. 1-245.

96. **Strobl, R. O., Robillard, P. D. (2005)** Review of EPA-Recommended U.S. and German Wellhead Protection Area Delineation Methods. *Journal of Environmental Hydrology* 13(3):1-19.
97. **Teutsch, G. & Sauter, M. (1991)** Groundwater modelling in karst terrains: Scale effects, data acquisition and field validation. In *Proceedings of the Third Conference on Hydrogeology, Ecology, Monitoring, and Management of Groundwater in Karst*, ed. J. Quinlan, 17-34. Nashville, Tennessee.
98. **Todd D.K. (1980)** *Groundwater Hydrology*. John Wiley & Sons, Chichester-New York-Brisbane-Toronto-Singapore, 1-535.
99. **US EPA (1983)** *Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas*. Office of Ground-Water Protection. U.S. Environmental Protection Agency.
100. **Veselinović, M., Antonijević, I., Lončarević, Č., Kalenić, M., Rajčević, D., Krstić, B., Banković, V., Rakić, B. (1967a)** *Osnovna geološka karta 1:100 000, List Zaječar*. Savezni geološki zavod, Beograd.
101. **Veselinović, M., Antonijević, I., Milošaković, R., Mičić, I., Krstić, B., Čičulić, M., Divljan, M., Maslarević, Lj. (1970)** *Osnovna geološka karta, Tumač za list Boljevac, K 38-8*, Savezni geološki zavod, Beograd, s. 1-62.
102. **Veselinović, M., Divljan, M., Đorđević, M., Kalenić, M., Milošaković, R., Rajčević, D., Popović, Rudolf, Lj. (1967b)** *Tumač za osnovnu geološku kartu 1:100 000, List Zaječar*. Savezni geološki zavod, Beograd.
103. **Veselinović, M., Antonijević, I., Krstić, B., Micić, I., Milosaković R., Rakić, B., Banković, V. (1968)** *Osnovna geološka karta, list Boljevac, K 34-8*, Fond Saveznog geološkog zavoda, Beograd.
104. **Vilimonović, J. (1997)** *Prilozi za istoriju hidrogeologije i ekologije u Srbiji. 100 godina hidrogeologije u Jugoslaviji*. Rudarsko-geološki fakultet. Beograd.
105. **Vilovski, S., Andrić, V., (1987)** Hidrogeološke odlike dela geološkog profila između tektonskih blokova Fruška Gora – Cer u Savskom rovu. *Zbornik referata IX jugoslovenskog simpozijuma o hidrogeologiji i inženjerskoj geologiji*, knj. 1, Hidrogeologija, 355-369, Priština.
106. **Vrba, J. and Zaporozec, A. (eds.) (1994)** *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*, International Contributions to Hydrogeology (IAH), 16: 131 p.; Hannover.

107. **Waegeningh, H.G. (1985)** Overview of the protection of groundwater quality. In Matthess G., Foster S.S.D., Skinner A.C.: Theoretical Background, Hydrogeology and Practice of Groundwater Protection Zones. International contributions to hydrogeology; Vol. 6. Hannover.
108. **Worthington, S.R.H. (2007)** Groundwater Residence Times In Unconfined Carbonate Aquifers. *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 69, no. 1, p. 94-102
109. **Worthington, S.R.H. (2011)** Management of Carbonate Aquifers. In Beynen P.E. van (ed) *Karst Management*. Springer
110. **Zaporozec, A. (2002)** Groundwater Contamination Inventory – Introduction. In: By the Project Working Group - Zaporozec A, Conrad, J.E, Johansson P.O, Nonner J.C, Romijn E, Weaver J.M.C, A Methodological Guide. IHP-VI, Series on Groundwater, No.2, UNESCO, 13-16.
111. **Zwahlen, F. (ed) (2004)** Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karstic) Aquifers. Final report COST action 620. European Commission, Directorate-General for Research, Brüssel, Luxemburg.
112. **Živanović, V. (2011)** Ocena ranjivosti podzemnih voda od zagađenja na primerima karsta Srbije, Magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 1-215.
113. **Živanović, V. (2015)** Delineation of karst groundwater protection zones. In. Z. Stevanovic (ed.), *Karst Aquifers – Characterization and Engineering*, Professional Practice in Earth Sciences, Springer International Publishing Switzerland 2015, ISBN: 978-3-319-12850-4, DOI 10.1007/978-3-319-12850-4_17.
114. **Žujović, J. (1931)** Snabdevanje sela vodom. Izvori i bunari. Srpska Kraljevska akademija. Poučna biblioteka 5, Beograd, 1-119.

Fondovska literatura

115. **Dragišić, V. (2008)** Projekat zona i pojaseva sanitarne zaštite izvorišta „Fišerov Salaš“. Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.
116. **Dragišić, V., Atanacković, N. (2015)** Elaborat o zonama sanitarne zaštite izvorišta podzemnih voda „Malo Laole“ (Opština Petrovac na Mlavi). Fond Rudarsko-geološkog fakulteta. Beograd.

117. **Dragišić, V., Krmpotić, M. (2006)** Elaborat o rezervama malomineralizovanih podzemnih voda iz izvorišta „Fišerov Salaš“ (Vodovod Ruma). Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.
118. **Jemcov, I., & Živanović V. (2014)** Elaborat o zonama sanitarne zaštite Zlotskih izvorišta (Opština Bor), Fond Departmana za hidrogeologiju, Rudarsko-geološkog fakulteta, Beograd.
119. **Krmpotić, M., Dragišić, V. (2006)** Elaborat o rezervama malomineralizovanih podzemnih voda iz izvorišta „Sava I“ u Jarku (Vodovod Ruma). Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.
120. **Martinović M. (2009)** Elaborat o rezervama podzemnih voda izvorišta „RM Stubica“ u Sisevcu. Fond Rudarsko-geološkog fakulteta. Beograd.
121. **Palavestrić, Lj. (1969/70)** Hidrogeološke odlike istočnog sliva Velike Morave (godišnji izveštaji za 1969 i 1970 godinu). Fond stručne dokumentacije Saveznog geološkog zavoda, Beograd.
122. **Polomčić, D. (2006)** Hidrodinamički model izvorišta „Fišerov Salaš“. U Elaboratu o rezervama malo mineralizovanih podzemnih voda iz izvorišta Fišerov Salaš“ (autori: V. Dragišić i M. Krmpotić). Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.
123. **Živanović, V., Atanacković, N. (2013)** Elaborat o rezervama podzemnih voda izvorišta „Beli Timok“ za potrebe vodosnabdevanja Zaječara. Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.

Zakonska regulativa

124. **European Union (1976)** Directive 76/160/EEC of the European Parliament and the Council of the 8 December 1975 concerning the quality of bathing water, Official Journal L 31/1, Luxembourg.
125. **European Union (1979)** Directive 79/409/EEC of the European Parliament and the Council of the 06 April 1979 on the conservation of wild birds, Official Journal L 103, Luxembourg.
126. **European Union (1991)** Directive 91/271/EEC of the European Parliament and the Council of the 21 May 1991 concerning urban waste water treatment, Official

- Journal L 135/40, Luxembourg.
127. **European Union (1991)** Directive 91/676/EEC of the European Parliament and the Council of the 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources, Official Journal L 375/1, Luxembourg.
 128. **European Union (1992)** Directive 92/43/EEC of the European Parliament and the Council of the 21 May 1992 on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora, Official Journal L 206/7, Luxembourg.
 129. **European Union (2000)** Directive 2000/60 EC of the European Parliament and the Council of the 23 October 2000 Establishing a framework for Community Action in the Field of Water Policy, Official Journal of the European Communities L 327/1, Luxembourg'
 130. **European Union (2007)** Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC). Guidance Document No. 16. Guidance on Groundwater in Drinking Water Protected Areas. Luxembourg.
 131. **Službeni list SFRJ 13/65** Osnovni zakon o vodama
 132. **Službeni glasnik SRS 17/67** Zakon o vodama
 133. **Službeni glasnik SRS 33/75** Zakon o vodama
 134. **Službeni glasnik RS 33/78** Pravilnik o načinu određivanja i održavanja zona i pojaseva sanitarne zaštite objekata za snabdevanje vodom za piće
 135. **Službeni glasnik SRS 49/89** Zakon o vodama
 136. **Službeni glasnik RS 46/91** Zakon o vodama
 137. **Službeni glasnik RS 92/2008** Pravilnik o načinu određivanja i održavanja zona sanitarne zaštite izvorišta vodosnabdevanje
 138. **Službeni glasnik RS 30/2010** Zakon o vodama

BIOGRAFIJA AUTORA

Vladimir J. Živanović rođen je 18.09.1978. godine u Štipu. Osnovnu školu završio je u Štipu, a u istom gradu završava gimnaziju, prirodno-matematički smer. Na Rudarsko-geološki fakultet se upisuje 1996. godine, da bi na istom fakultetu na smeru za Hidrogeologiju diplomirao 2002. godine sa ocenom 10 na diplomskom ispitu i prosečnom ocenom 9.63 u toku studiranja. Iste godine upisuje postdiplomske studije na smeru Iskorišćavanje i zaštita podzemnih voda.

Magistarsku tezu „Ocena ranjivosti podzemnih voda od zagađenja na primerima karsta Srbije“ (mentor: Prof. dr Veselin Dragišić) odbranio je juna 2011. godine na Rudarsko-geološkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Radnu karijeru započinje odmah nakon završetka osnovnih studija kao stručni saradnik na Katedri za Hidrogeologiju Rudarsko-geološkog fakulteta, a u nastavno zvanje asistent izabran je u maju 2015. godine

Za rad pod nazivom „Primena savremenih metoda i programa za zaštitu podzemnih voda Nacionalnog parka Tara“ dobitnik je nagrade Univerziteta u Beogradu za najbolji rad u grupi tehničkih fakulteta za školsku 2005/2006 godinu. Za Magistarski rad „Ocena ranjivosti podzemnih voda od zagađenja na primerima karsta Srbije“ dobitnik je nagrade fonda „Milan Miličević, inženjer geologije“ koji se dodeljuje za najbolji naučno-istraživački rad mladog naučnog radnika objavljen iz oblasti geologije 2011. godine.

Autor i koautor je 12 naučnih radova objavljenih u domaćim i stranim časopisima od čega su tri sa *SCI* liste, kao i preko 30 saopštenja sa međunarodnih skupova i skupova nacionalnog značaja. Koautor je jedne monografije, jednog univerzitetskog udžbenika i jednog pomoćnog udžbenika. Rukovodio je i učestvovao u izradi velikog broja studija, elaborata i projekata iz oblasti vodosnabdevanja, zaštite podzemnih voda, hidrogeologije ležišta mineralnih sirovina itd.

Član je Srpskog geološkog društva, Međunarodne asocijacije hidrogeologa IAH, Društva geoloških inženjera i tehničara Srbije DGEITS, Evropske unije geonauka EGU i Inženjerske komore Srbije.

NAUČNI RADOVI**Kategorija M13 - Rad u tematskom zborniku vodećeg međunarodnog značaja**

1. **Živanović V.** (2015) Delineation of karst groundwater protection zones. In. Z. Stevanović (ed.), Karst Aquifers – Characterization and Engineering, Professional Practice in Earth Sciences, Springer International Publishing Switzerland, ISBN: 978-3-319-12850-4, DOI 10.1007/978-3-319-12850-4_17.

Kategorija M14 – Rad u tematskom zborniku međunarodnog značaja

2. Benderev A., Stevanović Z., Mihaylova B., **Živanović V.**, Kostov K., Milanović S., Shanov S., Jemcov I. (2016) Transboundary Karst and Karst Aquifers in West Stara Planina Mts – Characteristics and Problems In. Stevanović Z., Krešić N., Kukurić N. (eds) Karst without Boundaries. IAH - Selected Papers on Hydrogeology 23. CRC Press/Balkema, ISBN: 978-1-138-02968-2, pp 71-86.
3. **Živanović V.**, Dragišić V., Jemcov I., Atanacković N. (2016) Hydraulic behaviour of a subthermal karst spring - Blederija spring, Eastern Serbia. In. Stevanović Z., Krešić N., Kukurić N. (eds) Karst without Boundaries. IAH - Selected Papers on Hydrogeology 23. CRC Press/Balkema, ISBN: 978-1-138-02968-2, pp 259-268.

Kategorija M21 - Rad u vrhunskom međunarodnom časopisu

4. **Atanacković, N.**, Dragišić, V., Stojković, J., Papić P. and **Živanović V.** (2013) Hydrochemical characteristics of mine waters from abandoned mining sites in Serbia and their impact on surface water quality, Environmental Science and Pollution Research, vol. 20, No 11, pp. 7615-7626, DOI: 10.1007/s11356-013-1959-4.
5. Petrović Pantić, T., Birke, M., Petrović, B., Nikolov, J., Dragišić, V., **Živanović, V.** (2015) Hydrogeochemistry of thermal groundwaters in the Serbian Crystalline core region, Journal of Geochemical Exploration, Vol. 159, 2015, Elsevier, 101-114, ISSN: 0375-6742; doi:10.1016/j.gexplo.2015.08.009.

Kategorija M23 - Rad u međunarodnom časopisu

6. Polomčić, D., Dragišić, V., **Živanović, V.** (2013) Hydrodynamic modeling of a complex karst-alluvial aquifer: case study of Prijedor Groundwater Source, Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina., 93-107, UDC:556.3:551.44(497.6), DOI: 10.3986/ac.v42i1.638, Acta Carsologica, 2013, Zalozba Z R C, 42, 1, 0583-6050.

Kategorija M24 – Rad u časopisu međunarodnog značaja verifikovanog posebnom odlukom

7. Dragišić, V., Petrović Pantić T., **Živanović, V.** (2015) Hydrogeothermal characteristics of groundwater from Ribarska Banja spa, central Serbia, Geološki anali Balkanskoga poluostrva, Department of Historical and Dinamical Geology and Department of Paleontology, Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade, ISSN 0350-0608, Vol. 76, 61-72, DOI: 10.2298/GABP1576061D.
8. Petrović, B., **Živanović, V.** (2015) Impact of river bank filtration on alluvial groundwater quality – a case study of the Velika Morava River in central Serbia, Geološki anali Balkanskoga poluostrva, Department of Historical and Dinamical Geology and Department of Paleontology, Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade, ISSN 0350-0608, Vol. 76, 85-91, DOI: 10.2298/GABP1576085P.

Kategorija M33 - Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u celini

9. Atanacković N., Dragišić V., **Živanović V.**, Stojković J., Ćuk M., Papić P. (2013) Arsenic in mine waters from abandoned base-metal and gold mining sites in Serbia, Proceedings of 5th Jubilee Balkan Mining Congress, 18-21. September 2013, Ohrid, Macedonia, Proceedings p. 581-585, ISBN 978-608-65530-2-9.
10. Dragišić V., Milentijević G., **Živanović V.**, Atanacković N., Nešković D. (2012) Rudničke vode napuštenih rudarskih radova i životna sredina u području Srbije; XIV srpski simpozijum o hidrogeologiji sa međunarodnim učešćem, Zlatibor, p 265-269; ISBN 978-86-7352-236-4.
11. Dragišić V., Špadijer S., **Živanović V.**, Krmpotić M. (2005) Methodology of hydrogeological researches of karst - the example of karst aquifer of Ozren and Devica in the north-east Serbia, Int. Conference & Field Seminar - Water Resources & Environmental Problems in Karst, CVIJIC, p.539-544, Beograd, 2005.
12. Dragišić V., Špadijer S., **Živanović V.**, Krmpotić M. (2007): The Problems of Water Supply in Holokarst terrains - The Example of Karst Area of the Town of Bileća, the Republic of Srpska, Proceedings of the XXXV Congress of International Association of Hydrogeologists, Lisbon, 2007.
13. Dragišić V., Špadijer S., **Živanović V.**, Stevanović Z. (2007): Methodology of hydrogeological research for the purpose of bottling of groundwater - an example of a groundwater source in karst, Proceedings of the XXXV Congress of International Association of Hydrogeologists, Lisbon, 2007.
14. Dragišić V., **Živanović V.**, Atanacković N., Jovanović D. (2013) Utilization of karst groundwater for the purpose of bottling – an example of „Euroaqua“ groundwater source in eastern Serbia, 3rd International Symposium on Natural Resources Management, 30-31 May 2013, Zaječar, Serbia, Proceedings p. 185-192, ISBN: 978-86-7747-486-7.

15. Jemcov I., **Živanović V.**, Čolić S., Milanović S., Trivić B. (2007): Vulnerability assessment and application of remote sensing - Groundwater resource analysis of National park "Tara", Proceedings of the XXXV Congress of International Association of Hydrogeologists, Lisbon, 2007.
16. Polomčić D., Dragišić V., **Živanović V.** (2005) Hydrodynamic model of the groundwater source for water supply of Prijedor town (Republic of Srpska), Int. Conference & Field Seminar - Water Resources & Environmental Problems in Karst, CVIJIĆ p. 365-370, Beograd, 2005.
17. **Živanović V.**, Bjelivuk Z., Jemcov I. (2006) Groundwater Vulnerability Assessment and Parameter Sensitivity Analysis - Application of EPIK Method in the National Park "Tara", Proceedings of 14. International Karstological School "Classical Karst", Postojna, 2006.
18. **Živanović V.**, Dragišić V., Atanacković N., (2012): Primena metoda za ocenu ranjivosti podzemnih voda u zaštiti vodnih resursa nacionalnih parkova i parkova prirode Srbije, XIV srpski simpozijum o hidrogeologiji sa međunarodnim učešćem, Zlatibor, p335-340; ISBN 978-86-7352-236-4.

Kategorija M51 – Rad u vodećem časopisu nacionalnog značaja

19. Marinković G., Papić P., Dragišić V., Stojković J., **Živanović, V.** (2013): Lithostratigraphic CO₂ substrata and the depth of carbonated mineral water systems in the lithosphere of Serbia, 550-557 Technics Technologies Education Management TTEM, 2013, DRUNPP, 8, 2, 1840-1503.

Kategorija M52 – Rad u časopisu nacionalnog značaja

20. **Živanović V.**, Dragišić V., Atanacković N. (2012) Primena DRASTIC metode pri oceni ranjivosti podzemnih voda na primerima nacionalnih parkova i parkova prirode Srbije, Vodoprivreda, 44, 258-260 p. 277-284, ISSN: 0350-0519.

Kategorija M53 – Rad u naučnom časopisu

21. Jemcov I., **Živanović V.**, Čolić S., Milanović S. (2008) Ocena ugroženosti podzemnih voda karstnog masiva Tara – podrška racionalnom upravljanju Nacionalnim parkom, Zbornik radova za kras i speleologiju, Knjiga IX., SANU, Beograd, p 65-80
22. **Živanović V.**, Dragišić V., Atanacković N., Ninković S., Magazinović S. (2015) Izrada karte rizika od zagađivanja podzemnih voda na primeru nacionalnog parka Đerdap, Zapisnici srpskog geološkog društva za 2015. godinu, str. 59-77. Srpsko Geološko društvo. ISSN 0372-9966.

Kategorija M63 - Saopštenje sa nacionalnog skupa štampano u celini

23. Atanacković N., Dragišić V., **Živanović V.**, Magazinović S, Ninković S. (2014) Rudničke vode napuštenih rudarskih radova na prostoru Karpato-balkanida istočne Srbije, Zbornik radova XVI Kongresa geologa Srbije, 22-25 Septembar 2014, Donji Milanovac, Srbija, p. 462-466, ISBN: 978-86-86053-14-5.
24. Atanacković N., Dragišić V., **Živanović V.**, Ninković S., Magazinović S. (2015) Regional Scale Screening of Groundwater Pollution Risk Induced by Historical Mining Activities in Serbia, Groundwater Vulnerability from Scientific concept to practical application. Ed. A. Witkowski, S. Jakovczyk-Karpierz, D. Grabala International Conference. Ustron Poland, 2015, Faculty of Earth Sciences, University of Silesia, Sosnowiec, Poland, 9, ISBN: 978-83-61644-47-7
25. Dragišić V., Atanacković N., **Živanović V.**, Milentijević G. (2012) Physicochemical Characteristics of Mine Waters at Abandoned Mining Sites in Serbia. Zbornik radova sa II kongresa geologa Makedonije, ured. Jovanovski M. and Boev B., Kruševo, Makedonija.
26. Dragišić V., Polomčić D., Prohaska S., **Živanović V.** (2005.): Hidrogeološke karakteristike i bilans lipovačkih karstnih vrela (Istočna Srbija), 14. Kongres geologa Srbije i Crne Gore, Novi Sad, 2005.
27. Dragišić V., Špadijer S., **Živanović V.**, Krmpotić M. (2007.): Hidrogeološke karakteristike termalnih karstnih vrela u lokalnosti Čedovo kod Sjenice, 6. simpozijum o zaštiti karsta, Beograd, 2007.
28. Dragišić V., Špadijer S., **Živanović V.**, Krmpotić M. (2007.): Režim podzemnih voda subtermalnih karstnih vrela – primer Milušinačkog vrela, 6. simpozijum o zaštiti karsta, Beograd, 2007.
29. Dragišić V., **Živanović V.** (2011) Primena EPIK metode za ocenu ranjivosti podzemnih voda južnog dela Stare Planine, 7. simpozijum o zaštiti karsta, Beograd, 2011.
30. Dragišić V., **Živanović V.**, Krmpotić M., Atanacković N., Tadić D., Nešković D., Magazinović S. (2012) Hidrogeotermalni resursi Vrnjačke Banje, III Kongres banja sa međunarodnim učešćem, Vrnjačka Banja, 2012, p 148-160
31. Krmpotić M., Nešković D., Tadić D., Mitrović V., **Živanović V.** (2014) Ocena ranjivosti i mere zaštite podzemnih voda sa izvorišta „Omarsko vrelo“ u okviru Nacionalnog parka „Tara“, Zbornik radova 43. konferencije o aktuelnim problemima korišćenja i zaštite voda, 3-5 Jun 2014, Tara, Srbija, p. 243-250, ISBN: 978-86-916753-1-8, UDK:556.388 (497.11-751.2)
32. Petrović B., **Živanović V.** (2014) Analiza promene kvaliteta podzemnih voda u procesu prihranjivanja aluvijalnog izvorišta „Morava-Brzan“, Zbornik radova XVI Kongresa geologa Srbije, 22-25 Septembar 2014, Donji Milanovac, Srbija, p. 400-405, ISBN: 978-86-86053-14-5.
33. Polomčić D., Dragišić V., **Živanović V.** (2005.): Hidrogeološki model šireg područja izvorišta podzemnih voda Mataruško polje-Tukovi, 14. Kongres geologa Srbije i Crne Gore, Novi Sad, 2005.

34. Rabrenović M, Jemcov J., **Živanović V.**, Dragišić V., Pešić M (2015) Ocena ranjivosti podzemnih voda Gornjanskog karsta, Zbornik apstrakata i vodič stručne ekscurzije. 8. Simpozijum o zaštiti karsta, 2015, Akademsko Speleološko-Alpinistički klub, 11
35. Radosavljević J., **Živanović V.**, Rabrenović M., Jemcov I., Dragišić V., Pešić M. (2015) Ocena ranjivosti podzemnih voda u karstnim terenima na primeru Zlotskih izvorišta, Zbornik apstrakata i vodič stručne ekscurzije. 8. Simpozijum o zaštiti karsta, 2015, Akademsko Speleološko-Alpinistički klub, 9
36. **Živanović V.**, Dragišić V, Atanacković N., Ninković S., Nešković D. (2014) Primena geografskog informacionog sistema u izradi karte rizika od zagađivanja podzemnih voda na primeru nacionalnog parka Đerdap, Zbornik radova XVI Kongresa geologa Srbije, 22-25 Septembar 2014, Donji Milanovac, Srbija, p. 320-325, ISBN: 978-86-86053-14-5
37. **Živanović V.**, Dragišić V., Jemcov I., Atanacković N. (2012) Comparative Analysis of Application of DRASTIC and PI Method in the Protection of National Park Tara Groundwaters. Zbornik radova sa II kongresa geologa Makedonije, ured. Jovanovski M. and Boev B., Kruševo, Makedonija
38. **Živanović V.**, Dragišić V., Krmpotić M., Tadić, D., Atanacković N. (2010): Hidrogeotermalni resursi Ribarske banje, II Kongres banja sa međunarodnim učešćem, Vrnjačka Banja, p 148-160
39. **Živanović V.**, Jemcov I., Dragišić V., Atanacković N., Magazinović S. (2015) Time dependent Vulnerability assessment model for karst groundwater protection, Groundwater Vulnerability from Scientific concept to practical application. Ed. A. Witkowski, S. Jakovczyk-Karpierz, D. Grabala International Conference. Ustron Poland, 2015, Faculty of Earth Sciences, University of Silesia, Sosnowiec, Poland, 78, ISBN: 978-83-61644-47-7

Prilog 1.

Izjava o autorstvu

Potpisani: **Vladimir J. Živanović**

Broj dosijea: **G-314**

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

Razvoj metodologije zaštite izvorišta podzemnih voda primenom karata ranjivosti

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis doktoranda

U Beogradu, 30.03.2016. god.



Prilog 2.

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora: **Vladimir J. Živanović**

Broj dosijea: **G-314**

Studijski program: **Hidrogeologija**

Naslov rada: **Razvoj metodologije zaštite izvorišta podzemnih voda primenom karata ranjivosti**

Mentor: **Prof. dr Igor Jemcov**

Potpisani: **Vladimir J. Živanović**

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao za objavljivanje na portalu **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

Potpis doktoranda

U Beogradu, 30.03.2016. god.



Prilog 3.

Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

Razvoj metodologije zaštite izvorišta podzemnih voda primenom karata ranjivosti

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo
2. Autorstvo - nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poledini lista).

Potpis doktoranda

U Beogradu, 30.03.2016. god.



1. Autorstvo - Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.

2. Autorstvo – nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.

3. Autorstvo - nekomercijalno – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.

4. Autorstvo - nekomercijalno – deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.

5. Autorstvo – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.

6. Autorstvo - deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.