

ANALIZA TRANSPORTA ZAGAĐENJA KOD ODREĐIVANJA ZONA SANITARNE ZAŠTITE IZVORIŠTA PODZEMNIH VODA U ALUVIJALNIM SREDINAMA

Milan DIMKIĆ¹⁾, Milenko PUŠIĆ²⁾, Dragan VIDOVIĆ¹⁾, Dušan ĐURIĆ¹⁾, Đulija BORELI – ZDRAVKOVIĆ¹⁾

¹⁾ Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd

²⁾ Rudarsko geološki fakultet, Beograd

REZIME

Zone sanitarne zaštite izvorišta podzemnih voda se postavljaju u cilju zaštite izvorišta. Ukoliko je izvorište smešteno unutar gradske infrastrukture i urbane zone (kao što je slučaj sa Beogradom), pooštava se sukob interesa grada i izvorišta. Prilikom određivanja zona sanitarne zaštite, od je značaja definisanje tzv. kritičnih materija, materija koje su reperne za koncepciju zaštite podzemnih voda izvorišta. Njihovo vreme zadržavanja i dužina pređenog puta do bunara izvorišta su osnova za definisanja zona zaštite. Rad daje najvažnije elemente zaštite izvorišta i primer hidrodinamičke analize transporta unetih materija u podzemne vode, da bi to postala praksa. Za nekoliko scenarija unosa materije, dobijeni su rezultati proračuna vremena putovanja i koncentracija u bunarima i odabranim pijezometrima. Dobijeni rezultati, pored toga što predstavljaju dobru tehničku osnovu za formiranje sistema monitoringa na izvorištu, pokazuju neophodnost ovakvog pristupa kod definisanja zona zaštite.

Ključne reči: podzemne vode, izvorište, zone zaštite, transport zagađenja

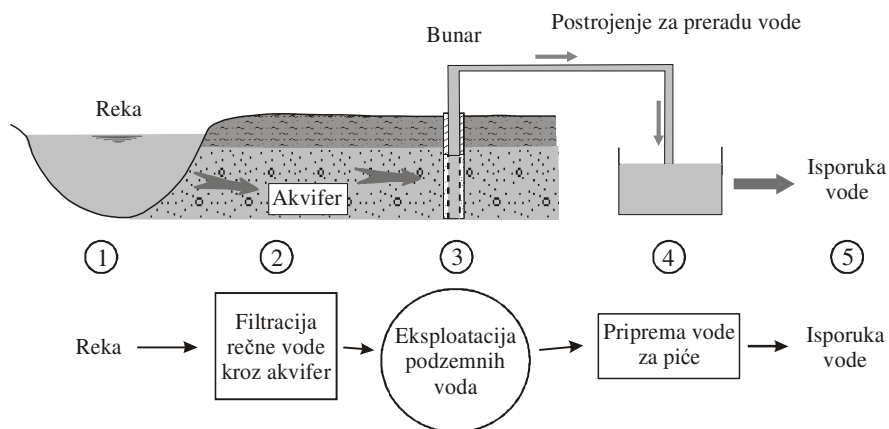
1. UVOD

Uobičajena je praksa da se podzemne vode iz aluvijalnih sredina koriste za vodosnabdevanje stanovništva. Prioritet korišćenja podzemnih voda, u uslovima kada se raspolože kvalitetnim izvorištima, definiše se kao strateško opredeljenje i u Prostornom planu Srbije [8], uz obavezu da se kvalitetna izvorišta zaštite od mogućnosti degradiranja raznim uticajima

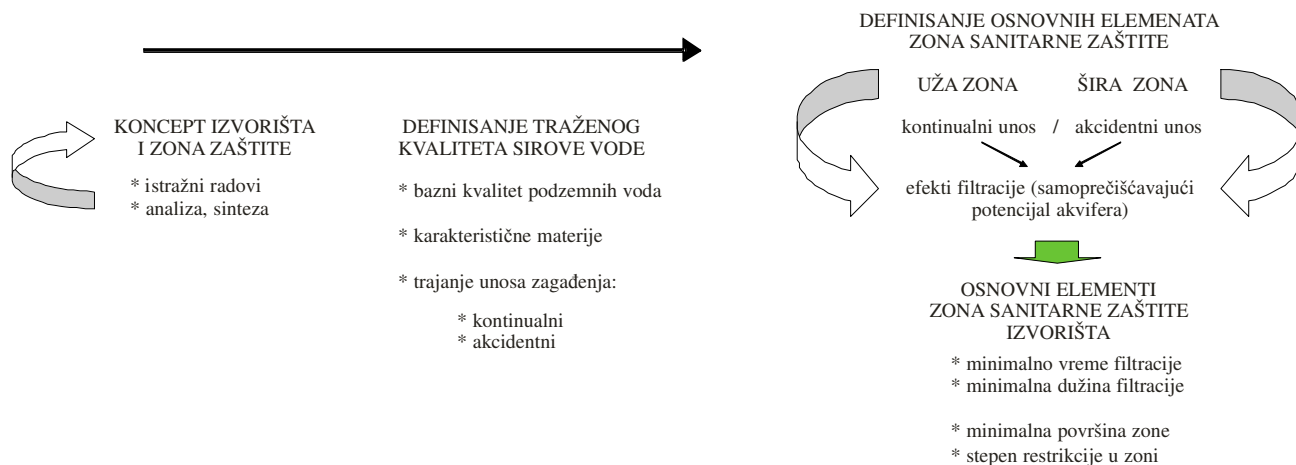
antropogenog porekla [14], [21]. Takva strateška opredeljenja su nametnula potrebu ozbiljnijih istraživanja više različitih aspekata izvorišta podzemnih voda. Jednu klasu istraživanja čine istraživanja hidrogeoloških parametara i njihovog uticaja na kapacitete zahvata raznih tipova [6], [19]. Razmatraju se i aspekti dinamizma kapaciteta izvorišta, posebno vrlo važni problemi starenja vodozahvatnih objekata [15]. U uslovima Srbije značajan deo izvorišta se nalazi i u karstnim sredinama, što nameće potrebu opsežnih i 'in situ' istraživanja [16].

U ovom radu se razmatra slučaj izvorišta kod koga je reka glavni resurs (izvor) voda koje se koriste (izvorište tipa „bank filtration“). Aluvijalni akviferi predstavljaju efikasni medijum podzemnog filtracionog toka, jer i zagađenu rečnu vodu tokom filtracije dovode do baznog kvaliteta (baseline quality), uz potrebu relativno jednostavnog nivoa prerade, pre dostave potrošačima, slika 1. Doticaj iz zaleđa kod ovakvih izvorišta je manjeg učešća u kapacitete bunara, što je od značaja za postavku zona sanitarne zaštite.

Brojne prednosti, posebno mala udaljenost od naselja, čini ovakva izvorišta pogodnim za korišćenje. Međutim, upravo pomenuta mala udaljenost često predstavlja ograničavajući faktor koegzistencije naselja i izvorišta. Sukob interesa se ispoljava, između ostalog, i kroz problem određivanja i održavanja zona sanitarne zaštite izvorišta. U vezi sa tim, javlja se potreba uvođenja u razmatranje dodatnih parametara i uslova, u odnosu na zakonske kriterijume: izbor karakterističnih materija (zagađivača) i određivanje minimalnog vremena, koje obezbeđuje preduzimanje odgovarajućih mera sanacije u slučaju akcidenta, slika 2.



Slika 1. Šematski prikaz proizvodne linije „bank-filtration“ izvorišta [5]



Slika 2. Određivanje osnovnih elemenata zona zaštite izvorišta [3], prilagođeno

Za odabrane karakteristične materije sprovodi se hidrodinamička analiza transporta filtracionim tokom, čiji rezultati treba da predstavljaju osnovu za konkretno definisanje veličine zone sanitarne zaštite izvorišta, kao i odgovarajućeg monitoringa podzemnih voda [13]. Ovako određene zone, zajedno sa monitoringom, daju osnovu za bezbedno očuvanje zadatog kvalitete kaptiranih podzemnih voda.

2. OSVRT NA ZAKONSKU REGULATIVU

Evolucija shvatanja i razvoja zakonske regulative zaštite izvorišta podzemnih voda u svetu i kod nas je sve više usmerena ka zadovoljenju koegzistencije izvorišta i okruženja. Nekadašnje shvatanje, da se zone

sanitarne zaštite izvorišta poklapaju sa granicama hidrološkog i hidrogeološkog sliva, pokazalo se neodrživim u brojnim slučajevima. Neprekidni razvoj urbanih celina ima za posledicu sučeljavanje interesa sa radom, pa i opstankom izvorišta. Danas su shvatanja o očuvanju izvorišta i kriterijumima za definisanje zona sanitarne zaštite u velikoj meri prilagođena savremenom nivou nauke i odgovarajućih struka, kao i tehničko tehnološkom razvoju.

Zone sanitarne zaštite izvorišta podzemnih voda se postavljaju u cilju zaštite „od namernog ili slučajnog zagađivanja i drugih uticaja koji mogu nepovoljno uticati na izdašnost izvorišta i prirodni sastav vode na izvorištu“ [25]. U delu Pravilnika „propisuje se način

određivanja i održavanja zona sanitarne zaštite područja na kom se nalazi izvorište koje se po količini i kvalitetu može koristiti, ili se koristi za javno snabdevanje vodom za piće“.

U zavisnosti od stepena zaštite, postavljaju se tri zone: neposredna (zona I), uža (zona II) i šira (zona III) zona. Za zone II i III se propisuje minimalni prostor „sa kog voda dotiče do vodozahvatnog objekta“, koji se definiše vremenom zadržavanja vode, ili dužinom puta u podzemnom toku do vodozahvatnog objekta (bunara). Za izvorišta u aluvijalnim sredinama, koja pripadaju „sredini međuzrnskog tipa“, propisana su minimalna vremena putovanja vode, u zavisnosti od toga da li je „podzemna voda pod pritiskom“ ili „sa slobodnim nivoom“: za užu zonu 50 m, odnosno 50 dana, a za širu zonu 500 m, odnosno 200 dana, respektivno.

Održavanje zona sanitarne zaštite izvorišta se realizuje kroz restriktivne mere izgradnje objekata i zabranu, ili ograničenje sprovođenja aktivnosti, u cilju sprečavanja „ugrožavanja zdravstvene ispravnosti vode na izvorištu“. Pravilnikom se nabroja šta se sve može zabraniti u okviru svake od zona zaštite, a pored ostalog, traže se i „rezultati modelskih ispitivanja kretanja podzemne vode u vodonosnoj sredini izvorišta“, kao i „predlog mera za uspostavljanje kontrolnog monitoringa voda“.

3. UTICAJI NA TRANSPORT MATERIJA FILTRACIONIM TOKOM

Metodologija i uslovi određivanja brzine kretanja podzemnih voda i vremena putovanja do bunara, osim pomenutih „modelskih ispitivanja“, nisu Pravilnikom definisane. Logično je da se analizirani akvifer u većini slučajeva posmatra kao homogena izotropna sredina, sa filtracionim karakteristikama, istim po celoj visini. Tada se proračuni strujanja filtracionog toka sprovode sa prosečnim brzinama strujnog polja. Otuda je moguća pojava većih razlika između rezultata proračuna i realnih dešavanja na terenu.

Upuštene (ili ispuštene) materije različito se ponašaju u podzemnim vodama, što, pored ostalog, zavisi od osobina ponašanja materije koja je dospela u podzemne vode, osobina vodonosne sredine i karakteristika podzemnog vodenog toka.

Unete materije mogu da ugrožavaju ljudsko zdravlje, ili samo da menjaju, ili pogoršavaju kvalitet zahvaćenih voda (ali da značajno ne ugrožavaju zdravlje čoveka). I jedan i drugi uticaj zavisi od

količine unete materije, odnosno postignute koncentracije u objektu korisnika. Rastvorljivost značajno utiče na proces transporta materija podzemnim vodama. Neke materije prodiru i kroz slojeve sedimenata koji se obično smatraju vodonepropusnim.

Materije se u akviferu nalaze kao čista faza i u obliku rastvora. Rastvorene materije se ponašaju kao traseri, ili se tokom filtracije transformišu (raspadaju), ili reaguju sa sredinom (npr. mehanički - sorpcija, hemijski - jonska izmena, itd.). Kao najznačajniji za transport materija, izdvojena su četiri procesa, koji se javljaju tokom filtracije, od kojih su jedan, ili više njih, dominantni. To su advekcija, disperzija, sorpcija i (bio)degradacija.

Od značaja su distribucija granulometrijskog, litološkog (petrološkog) i mineralnog sastava sedimenata vodonosne sredine u planu i profilu. Pojava partija (slojeva, proslojaka, sočiva) krupnozrnijeg materijala sa stabilnim mineralnim sastavom, ili nasuprot tome, sa sitnozrnim (prašinstim do glinovitim) zrnima i nestabilnim mineralima, mogu dosta da utiču na izlaznu koncentraciju filtracionog toka.

Povlatni slabopropusni sloj ima zaštitnu ulogu u pogledu zagađenja izdani. Pored slabih filtracionih svojstava, ovaj sloj ima izražene sorpcione karakteristike, tako da filtraciju materija usporava i više desetina puta u odnosu na filtracioni tok. Pojava glinovitih partija u akviferu (makar i kao tanke trake) doprinose zaštiti dubljih kaptiranih voda.

Hidrogeološki i hidraulički uslovi strujanja podzemnih voda, u kombinaciji sa režimom rada izvorišta i pojedinačnih bunara, odlučujući su za formiranje strujne slike (u prostoru) i karakter transporta materija, kao i bazni kvalitet podzemnih voda i ukupni prečišćavajući potencijal akvifera.

Treba naglasiti da je u našem Pravilniku, „za izdan u poroznoj sredini međuzrnskog tipa“ razmatran samo slučaj „kada je vodonosna sredina pokrivena povlatnim zaštitnim slojem koji umanjuje uticaj zagađivača sa površine terena“ i da se propisana vremena odnose samo na njega. Na osnovu analize Pravilnika, može se zaključiti da je uspostavljanje kriterijuma i definisanje veličina zona sanitarne zaštite izvorišta u dobroj meri prepušteno obrađivaču, pod uslovom da se ispune osnovni ciljevi, prethodno pomenuti. Iz tog osnovnog, ali ne samo tog razloga, definisanje zona sanitarne

zaštite izvorišta u konkretnom slučaju predstavlja kompleksan problem.

Prilikom analize i određivanja zona sanitarne zaštite u konkretnom slučaju, od velikog značaja je definisanje tzv. kritičnih materija, materija koje su reperne za koncepciju zaštite podzemnih voda izvorišta. Njihove značajne karakteristike su [20], [4]: mobilnost u poroznoj sredini, sorbljivost, degradabilnost, štetnost, mogućnost pojave u visokim koncentracijama, mogućnost akcidenta, itd. Ovo su opasne materije, čije je prisustvo u podzemnim vodama nepoželjno, ili nedozvoljeno. Uz pretpostavku da ipak budu unete u vode izvorišta neophodno je njihov ulazak u vodozahvatne objekte.

3.1 MOGUĆI SLUČAJEVI UNOSA

Realna opasnost postoji od strane neeventiranih korisnika prostora (istovari, diglje deponije, havarije i sl.), koji svojom delatnošću mogu da predstavljaju potencijalnu opasnost od unošenja neželjenih, štetnih i opasnih materija u podzemlje. Metalna i prerađivačka industrija, kao i objekti uslužne i komunalne privrede mogu da budu mesta unosa pomenutih materija u dužem vremenskom intervalu. U slučaju odsustva odgovarajućeg stručnog monitoringa podzemnih voda, ove pojave mogu dugo da postoje, a da ne budu otkrivene.

Način unosa može da bude kontinualan, povremen, ili jednokratno. Unos može da bude nameran, kada se obično sakriva, usled nemara (javašluka), ili slučajno (akcidentan). Unete materije mogu da budu unete kao čista faza, ili prethodno razblažene, u rastvoru, ili kombinovano.

Lokacije unosa mogu da budu kanalizacija (najčešće, kod manjih izvora u gradskim uslovima), podzemni i nadzemni rezervoari i skladišta, jame različitog porekla i namene, ili delovi površine terena (saobraćajni udesi, havarije).

Mesto unosa može da bude površina terena, nadzidanska zona, ili direktno izdan, s tim što u slučaju postojanja jednog ili više glinovitih proslojaka u akviferu treba razlikovati unos materije u kaptirani i nekaptirani deo izdanske zone. Sa gledišta bezbednosti, od najvećeg je značaja analiza mogućnosti, posledica i sanacije unosa materija u kaptirani vodonosni horizont.

Ponašanje unete materije je različito. Neke materije su teže od vode (na primer trihloretilen, materija koja se

koristi u hemijskim čistionicama odeće), kada se unesu u vodonosu sredinu, padaju na njeno (nepropusno) dno i koncentrišu se u depresijama (udubljenjima). Odatle se emituju u rastvor podzemnih voda i putuju zajedno sa filtracionim tokom. Ili, na primer, EDTA (poliamino karboksilna kiselina), koja ima široku primenu u industriji (tekstil, sapuni, deterdženti), poljoprivredi, naročito medicini (služi za odstranjivanje bakra i olova iz organizma, antioksidant, antikoagulant), kozmetici, itd., ima manji viskozitet od vode i prolazi i kroz poroznu sredinu koja se inače smatra vodonepropusnom. Većina ugljovodonika, kao lakši, ostaju na površini podzemnih voda u čistoj fazi, šire se u tankom sloju i odatle emituju u rastvor.

3.2 MERE KOJE SE PREDUZIMAJU U SLUČAJU AKCIDENTA

Rezultat unosa, transporta i zagađenja izdani obično se registruje tek pojavom zagađujuće materije u bunaru. U zavisnosti od vrste, načina i mesta unosa, procesa transformacije i reakcije sa sredinom i podzemnom vodom tokom puta filtracije, zatim vremena zadržavanja, postižu se različiti intenziteti, kao i oblici promene koncentracija unete materije. Ostvarene koncentracije u bunarima zavise i od učešća kontaminiranog dela filtracionog toka u ukupnom proticaju bunara.

Za preduzimanje tehničkih mera sanacije slučajeva zagađenja podzemnih voda, neophodno je poznavati moguće posledice. Za to treba imati pripremljene planove postupanja za različite moguće oblike unosa i vrste materija. Postojanje funkcionalnog monitoring sistema se podrazumeva.

Po utvrđivanju pojave unošenja i dijagnostike karakteristike ponašanja materija u podzemnim vodama, preduzimaju se mere sanacije, koje mogu (u datom slučaju moraju) da budu jako brze, a obično praćene mnogim detaljnijim postupcima. Uglavnom se ove mere generalno svode na dva postupka:

1. Iskop kontaminirane zemlje i odnošenje sa mesta kontaminacije. Iskopani materijal se odlaže na drugu lokaciju, gde se prepušta prirodnim procesima prečišćavanja, ili se dodatno tretira. Obično se ovim postupkom odstranjuje veći deo čiste faze unete materije.
2. Intervencije na lokaciji unosa, odnosno u oblasti prostiranja unete materije. Njihovi ciljevi se svode na sprečavanje, ili usporavanje filtracije podzemnih voda, smanjenje koncentracije razblaživanjem i potencirana, ili izazvana

transformacija unete materije do željenog oblika i koncentracije. Postupci mogu da budu različiti, pojedinačni i kombinovani. Neki od njih su:

- brza izradnja objekata (bunara, jama, itd.) i crpenje čiste faze,
- kombinovano injektiranje čiste vode i crpenje mešavine materije i vode,
- uduvavanje vazduha u cilju pospešivanja isparavanja (isparljivih frakcija) unete, materije. Može biti kombinovano sa istovremenim crpenjem.
- injektirani fluidi (voda, vazduh) mogu biti prethodno termički tretirani, u cilju povećanja isparljivosti materije u podzemnoj vodi,
- prethodni postupci mogu biti kombinovani sa istovremenim unošenjem, ili stimulacijom razvoja postojećih mikroorganizama, koji pospešuju razgradnju unetih materija.

Ukoliko je izvorište smešteno unutar gradske infrastrukture i urbane zone, posebno je izražena potreba da se za prostor zona zaštite izvrši detaljna analiza rizika usled postojanja zatečenih objekata. Ovi privredni i stambeni objekti i prateća infrastruktura se uglavnom ne mogu izmestiti i tako ni ukloniti potencijalne opasnosti od unosa neželjenih materija u podzemne vode. Ovu analizu rizika postojeća zakonska regulativa ne zahteva.

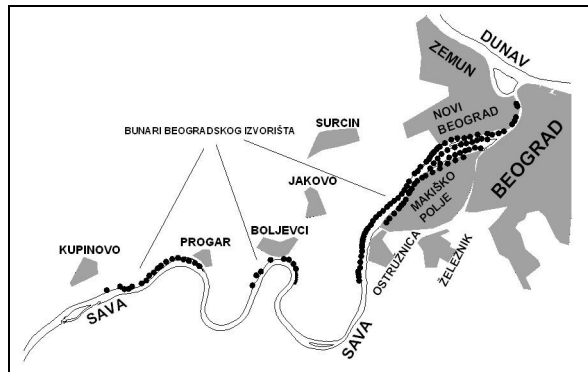
Izrada katastra potencijalnih lokacija unosa neželjenih materija (zagađivača) u podzemne vode i formiranje odgovarajućeg monitoring sisteme se nameću kao obavezne i preventivne mere. Obavezujuća je izrada procedura postupaka za različite slučajeve unošenja materija u podzemlje. Značaj dobrog monitoringa se ogleda pre svega u brzom i efikasnom detektovanju slučaja, dijagnostici karaktera i obimu unosa, a najviše u obezbeđenju vremenskog intervala, neophodnog za preduzimanje odgovarajućih mera sanacije.

4. BEOGRADSKO IZVORIŠTE PODZEMNIH VODA

4.1 HIDROGEOLOŠKI USLOVI

Glavinu bogradskog izvorišta podzemnih voda čine bunari sa horizontalnim drenovima, koji su postavljeni duž obala reke Save, od ušća reke Save u Dunav, pa uzvodno u dužini od oko 50 km (slika 3). Ukupno ima 99 bunara sa horizontalnim drenovima i 49 cevastih bunara, od kojih se 20 nalazi u Makiškom polju, a ostali na levoj obali Save. Bunari izvorišta kaptiraju aluvijalne sedimente, kvartarne (pleistocenske i

holocenske) starosti, koji su i glavni rezervoari podzemnih voda na području. Ispod njih se nalaze vodonepropusne starije peskovite laporovite gline i laporci. Voda u bunarima se većim delom formira od dotoka iz reke (reda veličine preko 80% proticaja bunara), a manjim delom potiče iz pravca zaleđa.



Slika 3. Beogradsko izvorište podzemnih voda

Vodnosna serija (akvifer), iz koje se bunarima eksploatiše podzemna voda za potrebe grada, sastoji se dominantno od šljunkova, peskovitih šljunkova, šljunkovitih peskova, peskova, alevrita i alevritskih gline. Oni se naizmenično smenjaju, od podinskih starijih sedimenata, ka površini terena. Debljina sedimenata akvifera je oko 25 m, a mestimično i do 30 m.

Distribucija granulometrijskog sastava po dubini vertikalnog profila sedimenata, pokazuje više ciklusa taloženja (generalno tri, ponegde četiri) [18]. Krupnoća zrna sedimenata, kao i vrednost koeficijenta filtracije raste sa dubinom, tako da najniži sedimenti (peskoviti šljunkovi i šljunkovi) imaju i najveću vodopropusnost.

U hidrogeološkom pogledu, akvifer beogradskog izvorišta se po dubini može generalno podeliti u dve vodonosne zone [7]:

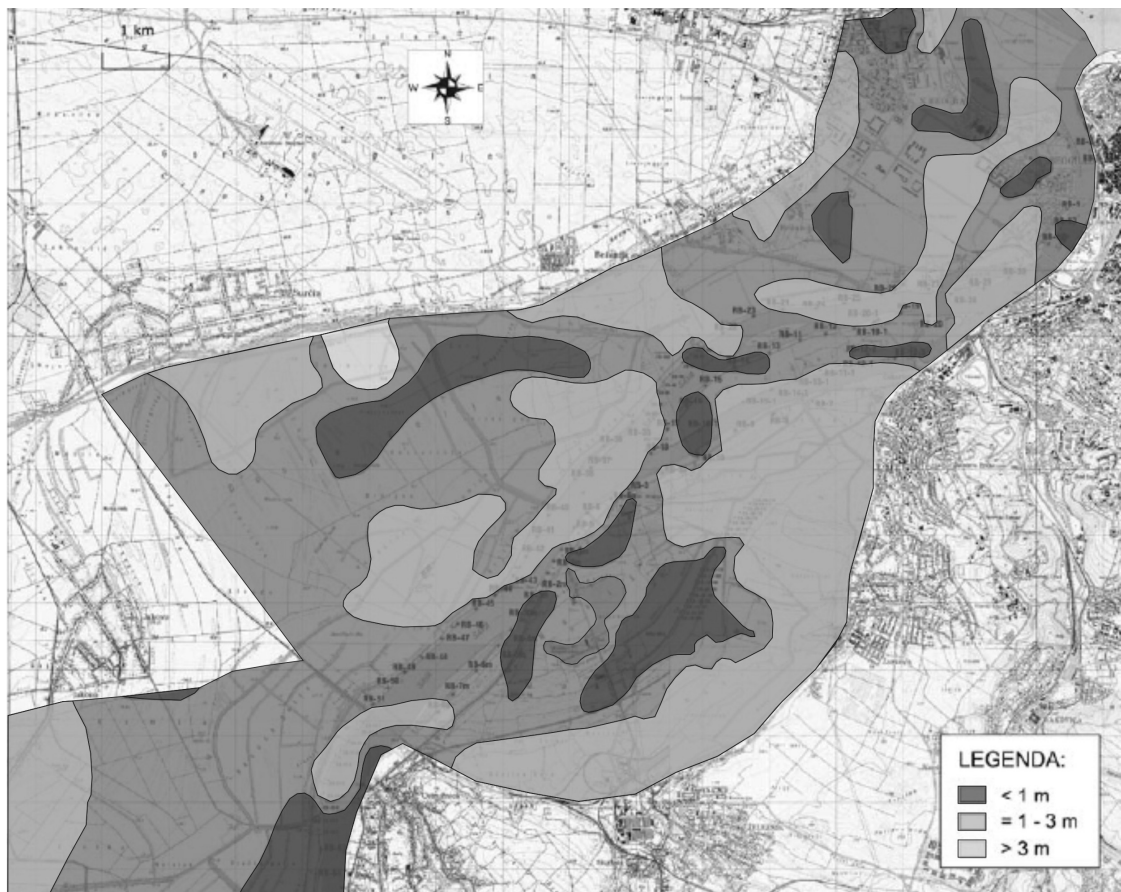
- donja zona, koju karakteriše materijal krupnog granulometrijskog sastava (šljunkoviti peskovi, ređe šljunkovi), koeficijenta filtracije reda veličine $1 \cdot 10^{-3}$ m/s, i
- gornja zona, sa tvorevinama sitnijeg granulometrijskog sastava (pretežno peskovi), sa vrednostima koeficijena filtracije između $1 \cdot 10^{-4}$ i $5 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Između njih se nalazi sloj prašinstih i glinovitih sedimenata, izdvojen kao slabopropusni međusloj, koji

se prostire na velikom delu izvorišta, sa koeficijentom filtracije reda $1 \cdot 10^{-7}$ m/s.

Sedimenti vodonosne serije su uglavnom pokriveni glinovitim, zaglinjenim, prašinstim i humusnim naslagama, čija se debljina nalazi u granicama između 3 i 5 m, a mestimično od 1 do 9 m, slika 4. Ove

povlatne naslage se odlikuju slabom vodopropusnošću, ali se ne mogu smatrati potpunim izolatorima (koeficijent filtracije je reda $1 \cdot 10^{-7}$ m/s). U zonama sa većom debljinom, čine dobru zaštitu izdani od zagađenja sa površine terena i otežavaju infiltraciju površinskih voda u podzemlje.



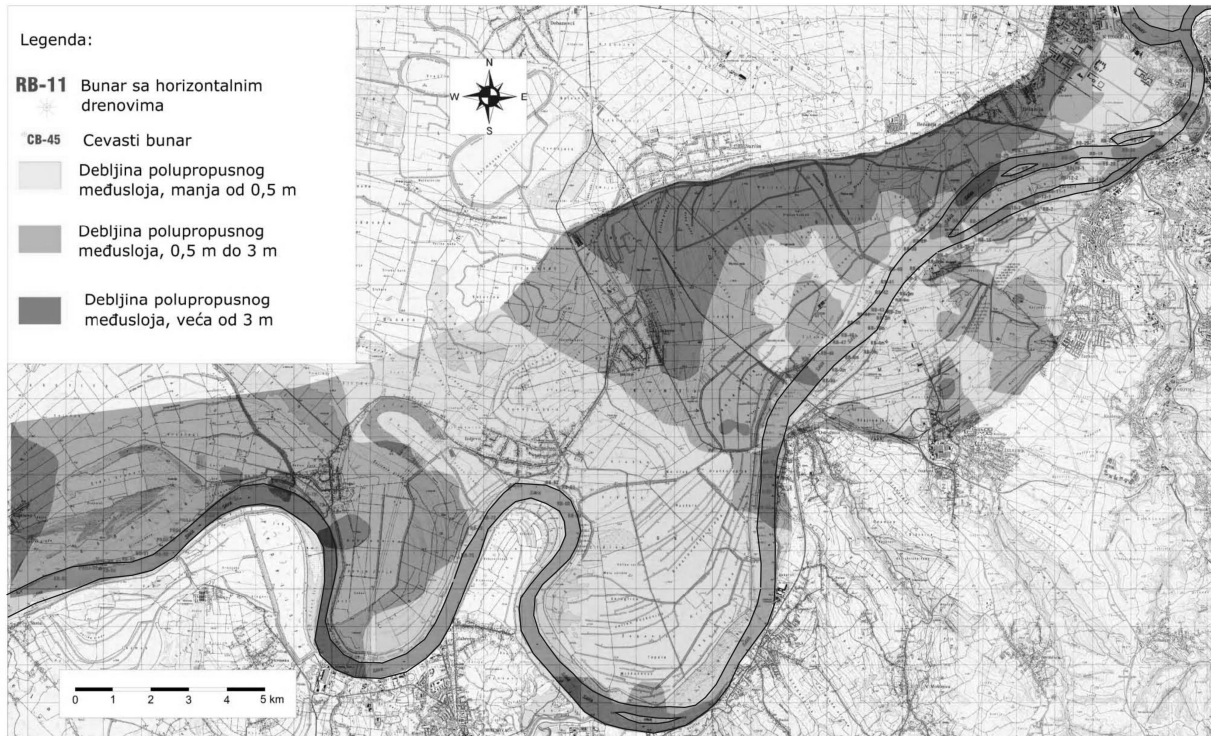
Slika 4. Debljina povlatnih sedimenata u zoni beogradskog izvorišta [2]

Hidrogeološki sklop terena na prostoru izvorišta beogradskog vodovoda je takav, da ga karakterišu pojave naglih promena hidrogeoloških karakteristika na relativno malim rastojanjima. Ovo zahteva da se sagledavanja karakteristika akvifera vrše, kako na regionalnom nivou (za pojedine sektore), tako i na mikrolokaciji svakog objekta (za svaki bunar) [2].

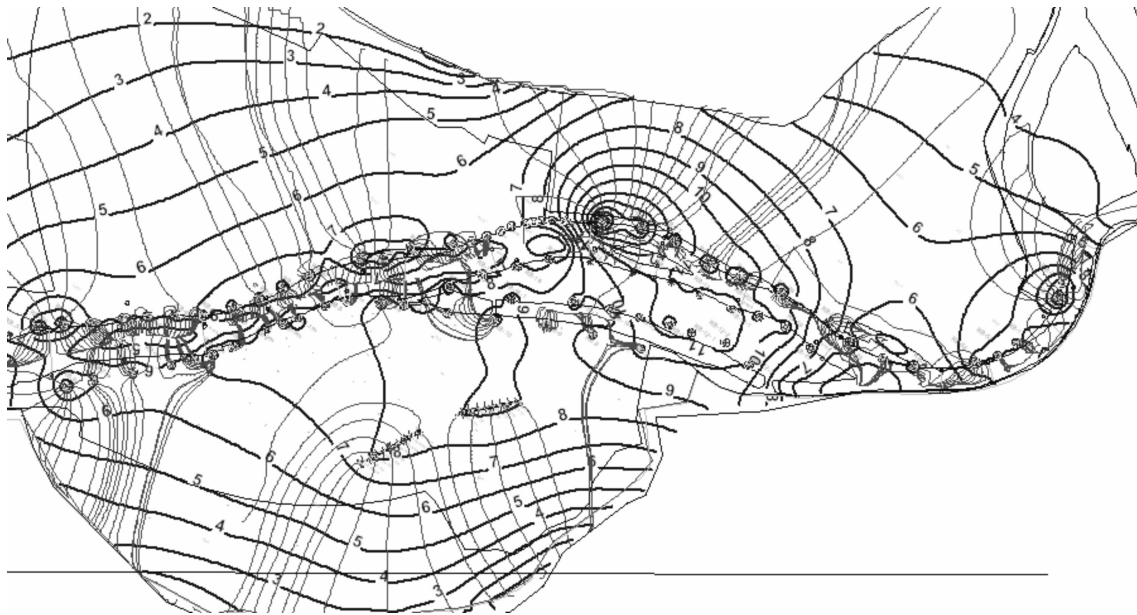
Zaštitnu ulogu od zagađenja podzemnih voda sa površine terena ima i slabopropusni međusloj, koji razdvaja gornju od donje vodonosne zone aluvijalnog akvifera. Njegova debljina je između nekoliko centimetara, do preko 10 m, slika 5. Nije kontinualan

na celom prostoru izvorišta, tako da je njegovo detaljno kvantifikovanje od velikog značaja za utvrđivanje stepena zaštićenosti.

Geometrijski i filtracioni odnosi glavnih slojeva akvifera beogradskog izvorišta obezbeđuju relativno dobru zaštitu od prodora tečnih i rastvorenih materija u bunare, što objašnjava trajno dobar kvalitet bunarskih voda, od početka rada izvorišta. Drenovi bunara su postavljeni u donjem delu aluvijalne serije sedimenata, ispod slabopropusnog međusloja. Glavno strujanje u horizontalnom pravcu se odvija u ovom vodonosnom sloju, dok je u gornjim partijama ono manje izraženo.



Slika 5. Rasprostranjenje i debljina slabopropusnog međusloja na beogradskom izvorištu [2]



Slika 6. Generalni pravci strujanja i dubine do nivoa podzemnih voda na beogradskom izvorištu (m) u malovodnom (letnjem) periodu

4.2 ANALIZA STRUJANJA PODZEMNIH VODA

Dugotrajni, višedecenijski rad sistema bunara sa horizontalnim drenovima je definisao režim strujanja i nivoa podzemnih voda u široj zoni izvorišta. Dubine do nivoa podzemnih voda na Novom Beogradu i Makiškom polju su reda veličine od 5 do 10 m, na Surčinskom polju od oko 3 do 7 m. U bližjoj okolini bunara dubine su lokalno i preko 10 m, slika 6.

Upoređujući ove podatke sa debljinom i prostiranjem povlatnog zaštitnog sloja, može se zaključiti da se nivo podzemnih voda na većem delu izvorišta nalazi ispod povlate gornje zone akvifera, odnosno nalazi se u okviru pretežno peskovitih sedimenata. Strujanje podzemnih voda je u ovoj zoni dominantno sa slobodnom vodenom površinom. Formiranje i ovazdušenje nadzidske zone, kao posledica dugotrajne eksploatacije podzemnih voda, uticalo je značajno na promenu oksičnosti sredine, koja je u prethodnom periodu (pre izgradnje bunara) bila dominantno anoksična. Veće prisustvo kiseonika u nadzidskoj i izdanskoj zoni ovog dela akvifera, intenzivira procese oksidacije i transformacije materija u vodi i same sredine.

Donji deo akvifera, u kome se nalaze drenovi i filtri bunara kroz koji se odvija intenzivna filtracija podzemnih voda, nalazi se u dominantno anoksičnim, prirodnim uslovima. Strujanje u ovoj zoni je dominantno pod pritiskom, izuzev u užoj zoni bunara, gde se pod uticajem depresionog levka eksploatacije, formira nivo podzemnih voda sa slobodnim nivoom.

Hidrodinamičkom modelskom analizom strujanja podzemnih voda dobijene su i brzine filtracije u donjoj (kaptiranoj) i gornjoj zoni akvifera. Na Novom Beogradu i Makiškom polju preovlađuju brzine filtracije između 0.5 do 2 m/dan. U neposrednoj zoni drenova bunara brzine su često preko 10 m/dan, ponekad dostižu i preko 20 m/dan. U gornjoj zoni akvifera su brzine filtracije manje za oko 2 do 3 puta.

Za ocenu uticaja dotoka rastvorenih materija u podzemnim vodama iz pravca zaleđa izvorišta u bunare, od važnosti je korektna kvantifikacija učešća ovih voda u ukupnom proticaju bunara. Na osnovu analize rezultata proračuna bilansa podzemnih voda na modelu, došlo se veličine doticaja vode iz zaleđa ka bunarima izvorišta, koja je reda veličine 10 % ukupnog proticaja bunara, nakon njihovog obnavljanja.

Dakle, karakteristični hidrogeološki uslovi beogradskog izvorišta su, pored specifičnosti vodozahvatnog sistema (bunari sa horizontalnim drenovima, pored reke Save), uslovi generalne uslove i karakter strujanja podzemnih voda. Pravci kretanja, vreme zadržavanja u filtracionom toku, kao i procentualno učešće podzemnih voda zaleđa u ukupnom proticaju bunara, čine jedan deo odgovora na pitanje zašto je dobar kvalitet kaptiranih voda. Drugi deo odgovora treba tražiti u filtracionim, disperzionim, sorpcionim i drugim karakteristikama porozne sredine, kao i u kvantifikaciji samoprečišćavajućeg potencijal akvifera.

5. REZULTATI PRORAČUNA

Konstatovanje neželjene materije u podzemnim vodama, pre ulaska u bunare je prvi, ali ne i dovoljan signal za potrebu aktiviranja zaštite izvorišta. Saznanje činjenice o prisustvu materije u vodi mora da bude takvog karaktera da omogućava adekvatnu reakciju. Drugim rečima, neophodno je da se obezbedi vreme za preduzimanje mera odbrane i zaštite izvorišta od zagađenja, pre nego što nastupi zagađenje bunarskih voda.

U nastavku se daju rezultati proračuna transporta materije filtracionim tokom podzemnih voda, koji daju generalnu predstavu o beogradskom izvorištu. Simulirani procesi su: disperzija, (bio)razgradnja i sorpcija. Advекcija (putovanje idealnog trasera, istovremeno sa filtracionim tokom) je ovde uključena u okviru pomenutih procesa.

Proračuni sa disperzijom daju rezultate na strani sigurnosti u pogledu brzine putovanja unete materije. Mmedutim, disperzija utiče na razblaženje, odnosno smanjenje koncentracije materije širenjem i razvlačenjem fronta napredovanja. Disperzivnost je parametar koji se određuje u svakom konkretnom slučaju, mada postoje brojni literaturni podaci i uobičajeni red veličine, koji se usvaja za proračune. Razgradnja materije je složen proces koji može da bude različite prirode, sa sličnim rezultatom kao i disperzija. Znatno utiče na smanjenje koncentracija materije tokom puta u filtracionom toku. Sorpcijom rastvorene materije u poroznoj sredini usporava se brzina njenog napredovanja i više desetina puta u odnosu na filtracioni tok. Sorpcija, u kombinaciji sa procesima razgradnje u znatnoj meri pospešuje prirodno prečišćavanje zagađenih podzemnih voda.

U razmatranom slučaju, izvršena je serija simulacija transporta materije unete u izdan, u blizini jednog bunara izvorišta. Dvodimenzionalni pravougaoni model predstavlja izdan pod pritiskom, debljine 7 m. Dimenzije modela su 1600 m x 800 m, slika 7.

Duž kraće granice modela je zadata reka sa nivoom na koti od 71 m i koeficijentom propusnosti rečnog dna od $\frac{K}{d} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ [12]. Na udaljenju od 100 m od reke

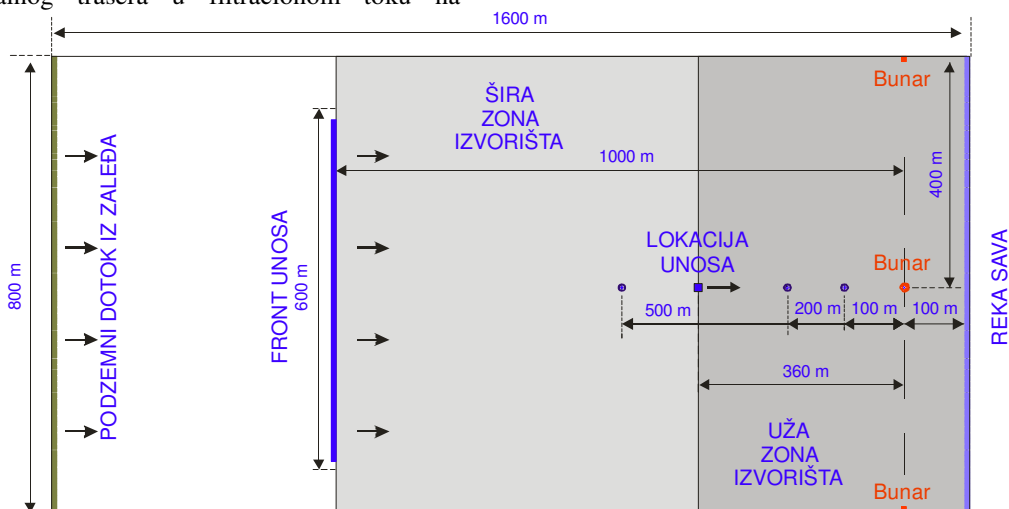
zadati su tri bunara na međusobnom rastojanju od 400 m, od toga su dva na granici modela. Kapacitet centralnog bunara je 80 l/s, a kapaciteti druga dva bunara su po 40 l/s (obzirom da su na granici modela). Na suprotnoj granici modela zadat je uniformni doticaj, koji predstavlja 10% od ukupnog proticaja bunara. Ostatak vode (90%) dolazi iz reke. Koeficijent filtracije sredine je $K = 6 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$, poroznost $n = 0.2$, koeficijent difuzije je $1 \cdot 10^{-9}$.

Udaljenja lokacije unosa materije od bunara su bila 360 i 1000 m, što odgovara vremenu zadržavanja čestice idealnog trasera u filtracionom toku na

beogradskom izvorištu, od oko 6 i 18 meseci. Ova udaljenja i vremena zadržavanja generalno odgovaraju veličinama predložene uže i šire zone sanitarne zaštite beogradskog izvorišta.

Karakter unosa je bio kontinualan ili paketni, različitog vremena trajanja. U prvom slučaju, na udaljenju od 360 m od bunara, vreme unosa je bilo 30 i 60 dana. Ovim je analiziran slučaj tačkastog unosa materije u izdan, manjeg intenziteta, što bi odgovaralo karakteru izvora pretežno uslužne delatnosti. U drugom slučaju je analiziran mogući uticaj frontalnog unosa materije u široj zoni izvorišta (skladišta, industrijske hale, itd.).

Usvajanjem modela se može uputiti opravdana primedba da znatno odstupa od realnih uslova na beogradskom izvorištu. Međutim, želja autora je bila da kroz analizu na uprošćenom modelu ovog izvorišta, prikaže generalnu šemu procesa određivanja osnovnih elemenata zona zaštite. U nastavku se daje interpretacija rezultata proračuna, vodeći ipak pri tome računa o njihovoj realnosti.



Slika 7. Skica 2D modela, kojim je simuliran transport materije ka bunaru izvorišta

5.1 UNOS MATERIJU U UŽOJ ZONI IZVORIŠTA

Slučaj trasera

Prikazuje se transport materije, koja se ponaša kao traser, u ovom slučaju može da bude trihloretilen (THE), koji se koristi u hemijskim čistionicama odeće. Materija je veoma opasna, kancerogena i može se koristiti samo u službene svrhe. Rastvorljivost ove

materije u vodi je reda 1gr/l. Hemijsko čišćenje se obavlja u mašinama, kapaciteta 10 do 25 l, a trajanje izlaganja odeće je 10 do 20 min. U postupku čišćenja odeće, obavlja se recirkulacija THE [10]. Postupak mašinskog hemijskog čišćenja je takav, da je mala verovatnoća neopaženog ispuštanja materije tokom procesa. Veća je mogućnost od curenja iz posuda u kojima se čuva, zbog neodgovarajućeg skladišnog prostora i nemara. U ovom primeru se pretpostavlja da je zbog nemara došlo do curenja THE iz posude u kojoj

se čuva i da se ova količina infiltrira u podzemne vode u okviru prostora koji odgovara jednoj ćeliji modela. Ćelija je kvadratna prizma, sa stranama od po 10 m i visinom (debljinom sloja) od 7 m.

Usvaja se intenzitet curenja od oko 17 l/dan. Pod pretpostavkom da se sva ova količina rastvori u vodi ćelije modela, dobija se koncentracija unosa od $C_0 = 1$ mg/l, što je daleko ispod teorijske rastvorljivosti THE u vodi, koja iznosi 1.1 g/l [22].

Lokacija unosa se nalazi u užoj zoni izvorišta, na 360 m udaljenja od bunara i predstavljena je jednom ćelijom mreže diskretizacije u vodonosnom sloju.

Unos THE se zadaje kao kontinualan, zatim u trajanju od 30 i 60 dana. Lokacije detektovanja, odnosno uzorkovanja podzemnih voda su u pijezometrima, udaljenim 100 m i 200 m od bunara i u samom bunaru. Kao kritične koncentracije THE u vodi usvojene su: zakonom dozvoljena koncentracija u vodi, MDK ($MDK_{THE} = 70 \mu\text{g/l} = 7 \cdot 10^{-2} \text{ mg/l}$ [17], [23] i granica detekcije u laboratorijskim uslovima, GD ($GD = 0.01 \mu\text{g/l} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ mg/l}$).

Zadatak je da se na osnovu rezultata proračuna utvrdi raspoloživo vreme od momenta unosa materije u podzemnu vodu, do prekoračenja MDK u bunaru.

Analizom prikazanih rezultata proračuna na slici 8, mogu se konstatovati sledeće činjenice:

- Od momenta unosa, materiju je moguće detektovati već posle 8 dana u pijezometru na 200 m od bunara, a u pijezometru na 100 m od bunara posle 18 dana. U samom bunaru, materiju je moguće detektovati posle oko 35 dana od momenta unosa.
- Za zadati unos se ni u jednom objektu ne dostiže vrednost MDK.
- Maksimalna koncentracija se, za slučaj kontinualnog unosa, u pijezometru na 100 m, od bunara, dostiže posle oko 250 dana ($C_{max} \sim 0.036 \text{ mg/l}$), a u bunaru posle oko 300 dana ($C_{max} \sim 0.0025 \text{ mg/l}$). Višestruko manja koncentracija u bunaru je posledica razblaženja usled disperzije toka, kao i udela toka iz reke u ukupnom proticaju bunara.

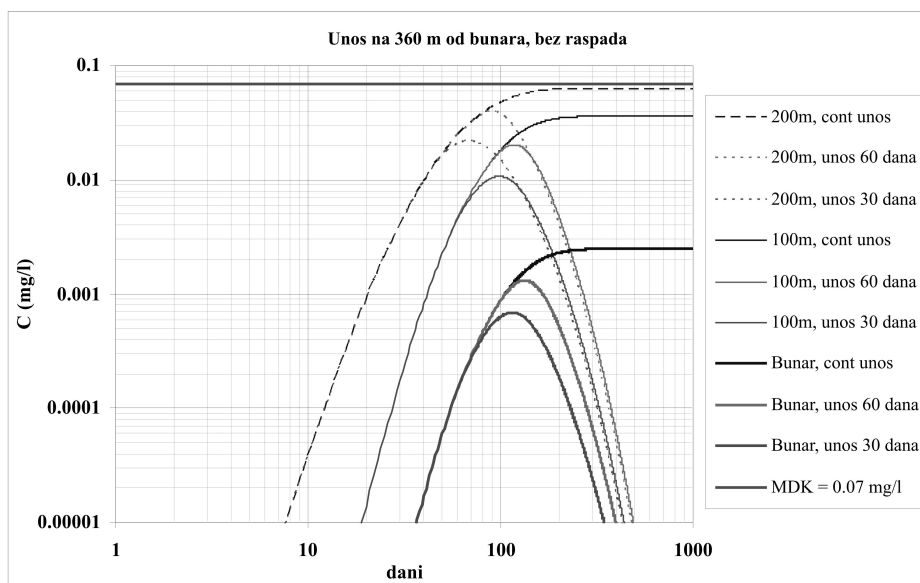
- Maksimalne koncentracije u slučaju paketnog unosa (30 i 60 dana) su srazmerno manje i dostižu:
 - za unos od 30 dana, u pijezometru na 100 m, $C_{max} \sim 0.01 \text{ mg/l}$ (posle 100 dana), u bunaru $C_{max} \sim 0.0006 \text{ mg/l}$ (posle 120 dana),
 - za unos od 60 dana, u pijezometru na 100 m, $C_{max} \sim 0.02 \text{ mg/l}$ (posle 120 dana), u bunaru $C_{max} \sim 0.001 \text{ mg/l}$ (posle 140 dana).

U datom prikazu je važno primetiti da je u pijezometru na 200 m od bunara moguće utvrditi prisustvo unete materije osam dana od njenog unosa, a u pijezometru na 100 m posle 18 do 20 dana. Do konstatovanja THE u bunaru prođe oko 36 dana od unosa.

Postavlja se pitanje da li bi pijezometar na većem udaljenju od bunara (a bliže lokaciji unosa materije) bio bezbedniji. Odgovor se sam po sebi nameće. Udaljenje pijezometra od bunara (odnosno njegova blizina mestu upuštanja materije u izdan) je od izuzetne važnosti za preduzimanje mera zaštite bunara od zagađenja, odnosno monitoring korisnika prostora.

U slučaju beogradskog izvorišta, lokacija pijezometra je uslovljena pre svega prisustvom urbanog dela grada i potencijalnih izvora zagađenja. Na Novom Beogradu su gradski objekti praktično u nožici nasipa, na svega stotinak metara od bunara izvorišta, tako da ova činjenica predstavlja ograničavajući faktor. Rešenje treba tražiti u preventivnom pristupu, zabrani postojanja bilo kakvog potencijalnog izvora zagađenja unutar definisane zone od bunara.

Takođe se postavlja važno, a ujedno i praktično, pitanje učestalosti sprovođenja monitoringa, odnosno vremenskog intervala uzorkovanja i izrada analiza. U analiziranom slučaju, nedeljno uzorkovanje daje vreme za intervenciju od oko 30 dana, uzorkovanje sa intervalom od mesec dana daje vreme za intervenciju od nedelju dana. Takođe, dodatno je pitanje kakva je intervencija moguća u datim vremenskim intervalima i koliko je efikasna. Možda je privremeno isključenje bunara prvi korak ka trajnijem rešavanju ovakvih slučajeva. U svakom slučaju, neophodno je i korisno sprovesti tehnoekonomsku analizu učestalosti uzorkovanja i analiza u zavisnosti od usvojenog koncepta zaštite bunara.



Slika 8: Rezultati proračuna transporta trasera (THE) na beogradskom izvorištu

Slučaj materije sa razgradnjom

U slučaju materije, koja je podložna razgradnji, izlazne koncentracije se smanjuju. U datom slučaju, dati su rezultati proračuna za dve varijante: vreme poluraspada unete materije od 6 i 2 meseca, sa ostalim ulaznim podacima kao u prethodnom slučaju (na lokaciji unosa udaljenoj 360 m od bunara, kontinualni i paketni (60 i 30 dana) unos materije). U svim slučajevima, koncentracije u bunaru ne prelaze veličinu od 3 $\mu\text{g/l}$.

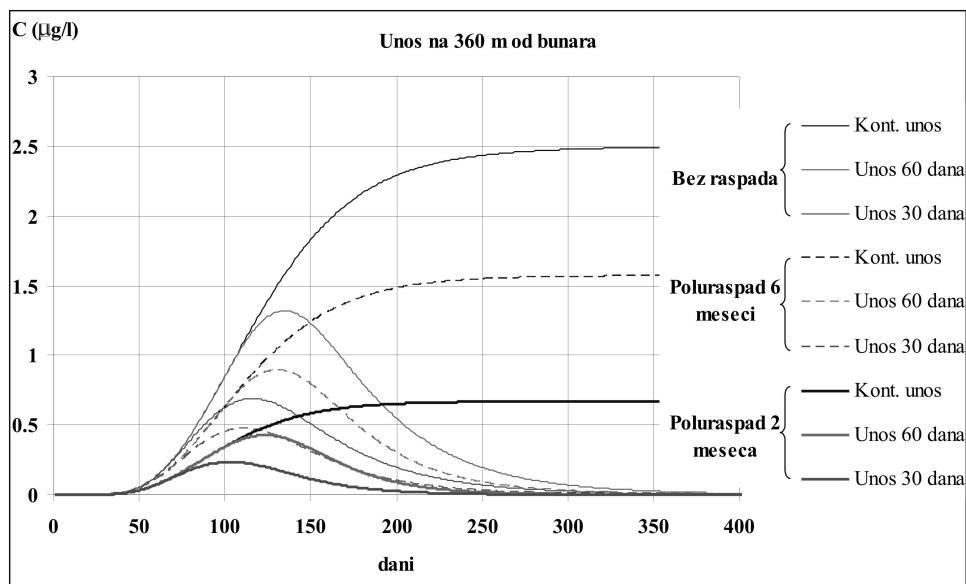
U slučaju kontinualnog unosa sa razgradnjom, dobijene su manje koncentracije u odnosu na slučaj bez razgradnje, u bunaru za oko 37% (vreme poluraspada 6 meseci) i 72% (vreme poluraspada 2 meseca), slika 9.

5.2 UNOS MATERIJU U ŠIROJ ZONI IZVORIŠTA – „FRONTALNI UNOS“

Urbani delovi postojeće zone sanitarne zaštite beogradskog izvorišta obuhvataju veći deo Novog Beograda i delove Makiškog polja i Ade Ciganlije. Naročito na Novom Beogradu se nalaze objekti infrastrukture usluga, kao što su benzinske stanice, automehaničarske i ostale radionice, skladišta privrednih subjekata, itd. Prisutna je stalna opasnost od akcidentnog i kontinualnog unošenja veće količine ugljovodonika (benzin, dizel, mineralna ulja) u podzemne vode. Iz ugla moguće kontaminacije

bunarskih voda na izvorištu, nameće se nekoliko činjenica, koje je neophodno razmotriti:

- Blaži kriterijumi ograničenja u široj zoni sanitarne zaštite izvorišta, automatski povećavaju rizik od mogućeg unosa nepoželjnih materija u podzemne vode. Pažnja na ovakve događaje je slabija i ne retko se i ne dovodi u vezu sa izvorištem.
- Sa druge strane, veće udaljenje od bunara u odnosu na lokacije unosa u užoj zoni izvorišta, koje za sobom povlači veće pređeni put i duže vreme zadržavanja u podzemlju, svakako predstavljaju određenu olakšavajuću okolnost. Procesi disperzije, sorpcije i degradacije više dolaze do izražaja. Front koncentracije je više razvučen i po prostoru i vremenski.
- Pozitivni ograničavajući faktor je i relativno mali procentualni udeo voda iz zaleđa u ukupnom proticaju bunara. U zavisnosti od dužine fronta unosa materije (koji je postavljen poprečno u odnosu na pravac toka podzemnih voda iz zaleđa), odgovarajuća količina ovih voda stiže do bunara. Ukoliko je dužina fronta kraća od „pripadajuće“ zone zaleđa koja gravitira prema bunaru, srazmerno je i manji uticaj na izlaznu koncentraciju unete materije (u bunaru).



Slika 9: Izlazna koncentracija u bunaru u slučaju unosa materije bez i sa razgradnjom, u užoj zoni izvorišta

U nastavku se daju neki rezultati proračuna, u okviru analize uticaja unosa materije u široj zoni sanitarne zaštite izvorišta za jedan bunar, za različite dužine fronta unosa. Osnovne pretpostavke su bile:

Pre zadavanja unosa izvršena je analiza učešća doticaja doticaja iz pravca zaleđa prema bunaru, na osnovu čega se došlo do zaključka da dužina linijskog fronta unosa materije od 50 m odgovara doticaju podzemnih voda u bunar od 1 l/s. Proporcionalno povećanje dužine fronta daje i odgovarajuće povećanje doticaja u bunar.

- Direktno unos materije u kaptiranu izdan izvorišta se odvija iz pretpostavljenog fabričkog pogona, hale, ili skladišta. Lokacija unosa ima linijski karakter i količina unosa ne utiče na strujnu sliku filtracionog toka.
- Za prikaz rezultata si odabrani proračuni transporta za front dužine 600 m.
- Analizirana je materija koja reprezentuje naftne derivate. Ovi ugljovodonici su širokog spektra fizičkih osobina [1], [9]. U tabeli 1 su date rastvorljivosti i gustine nekih frakcija ove grupe jedinjenja.

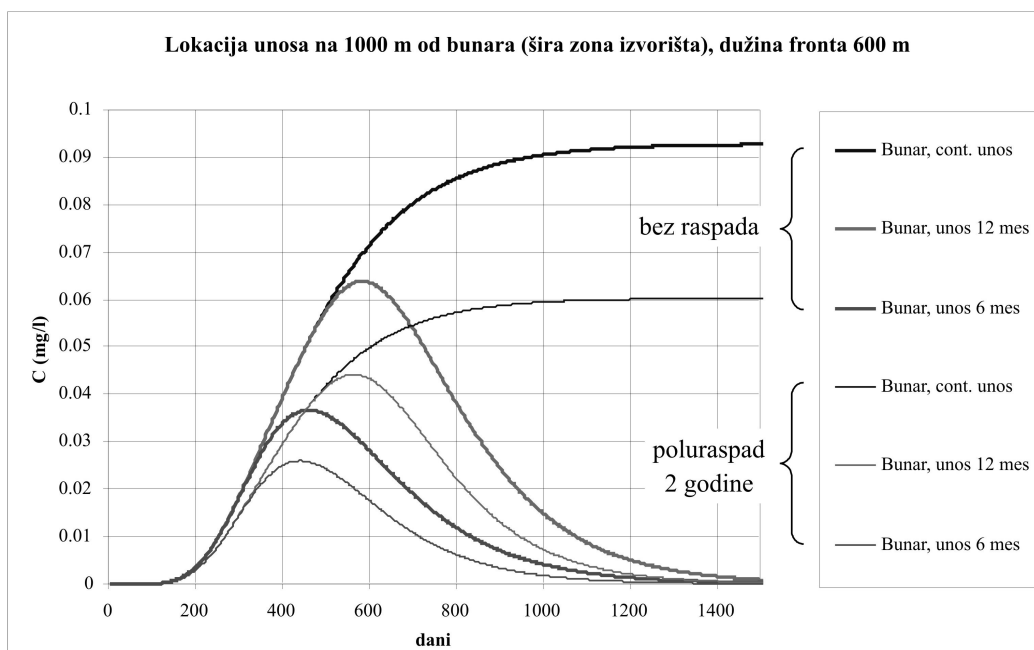
Tabela 1: Rastvorljivost na 20 °C, gustina, remedijaciona vrednost nekih ugljovodonika nafte [24], dopunjeno

Naziv	Rastvorljivost (mg/L)	Gustina (g/cm ³)	Remedijaciona vrednost (mg/l) [23]
1-Butanol	77000	0.81	5600
Napthalene	30	1.14	70
Benzo(a)pyrene	0.003	1.24	0.05
Benzo(a)anthracene	0.01	1.19	0.5
Benzene	1780	0.8786	30
Toluene	470	0.8669	1000
Ethylbenzene	152	0.8665	150
Grupa Xylene	130-198/nerastvoran [11]	0.86-0.88	70
Creosol	slabo [11]	1.092	200

- Analizirani su slučajevi transporta materije sa disperzijom i (bio)degradacijom. Vreme poluraspada je u proračunima ograničeno na 2 godine, što odgovara naftnim ugljovodonicima kao što je motorni benzin.
- Unos materije je sa koncentracijom $C_0 = 1 \text{ mg/l}$, što na frontu od 600 m, odgovara unosu od oko 1050 kg/dan. Ove vrednosti su procenjene kao

realno moguće u uslovima rada industrijskih postrojenja, skladišta, itd.

U slučaju unosa materije u široj zoni izvorišta, vreme postizanja merljivih koncentracija u bunarima se meri mesecima (u bunaru reda 8 – 10 meseci), što bi značilo da uz postojanje i odgovarajući rad službe monitoringa ima dovoljno vremena za organizovanje i realizaciju sanacije i zaštite izvorišta, slika 10.



Slika 10 Proračun koncentracija materije u bunaru, za slučajeve transporta bez i sa poluraspadom od 2 godine

U datom slučaju, front dužine 600 m obuhvata praktično sav dotok u bunar iz zaleđa, tako da izračunate koncentracije u bunaru predstavljaju ujedno i teorijski maksimalne koncentracije materije, koje kao rastvor dolaze iz pravca zaleđa. Ostvarene koncentracije u bunaru su rezultat razblaženja sa vodom iz pravca reke, iz čega se vidi značaj utvrđivanja procentualnog učešća dotoka iz pravca zaleđa u ukupnom proticaju bunara.

Proračuni filtacije sa sorpcijom pokazuju drastično usporenje fronta napredovanja materije u vodi. Prema literaturnim podacima ono je reda veličine 20 do 30 puta u odnosu na putovanje idealnog trasera.

6. ZAKLJUČCI

Zone sanitarne zaštite izvorišta podzemnih voda se postavljaju u cilju zaštite izvorišta. Ukoliko je izvorište smešteno unutar gradske infrastrukture i urbane zone, poostrava se sukob interesa grada i izvorišta.

Primer beogradskog izvorišta ukazuje na kompleksnost problema određivanja i održavanja zona sanitarne zaštite. Očigledno je da zakonom nije moguće predvideti sve moguće slučajeve koji se u prirodi dešavaju. Grad je odavno sišao na obale reke i sve više ugrožava prostor izvorišta. Ovaj proces se ne može zaustaviti.

Obuhvatajući urbane celine grada, sanitarne zone zaštite izvorišta nameću posebna pravila ponašanja u njima. Ovo je u potpunosti realno teško izvodljivo. Vodovodna, kanalizaciona i druga komunalna infrastruktura, uslužne i proizvodne delatnosti ne mogu se dekretom ukloniti sa teritorije izvorišta. Zbog toga je, pored neophodnih ograničenja korišćenja i ponašanja, neophodno uspostaviti sistem monitoringa izvorišta, sistem koji se oslanja na praćenje kvaliteta podzemnih voda.

Kao što je poznato, tokom transporta materija filtracionim tokom, odigravaju se komplikovani fizičko hemijski i mikrobiološki procesi. Oni čine da se unete materije brže, ili sporije kreću od izdanskog toka, uz veće, ili manje širenje fronta koncentracija. Sve više se pokazuje da, u datom slučaju, proračun advekcije (uobičajeni način određivanja vremena i dužine putovanja materije) bez uključenja pratećih procesa, nije na strani sigurnosti.

Dodatnu komplikaciju čini činjenica da svaki akvifer i svaka uneta materija imaju svoje osobenosti prilikom transporta podzemnih vodenim tokom. Zato je neophodno, doraditi zakonsku regulativu kojom bi se u Elaboratu o zonama sanitarne zaštite izvorišta uključile i analize transporta karakterističnih materija. Pri donošenju odluke o zonama zaštite izvorišta i merama njegove zaštite, neophodno je obaviti odgovarajuća istraživanja na terenu i laboratoriji. Cilj ovih istraživanja je da se dođe do karakterističnih materija koje bi mogle da ugroze izvorište i da se prouči njihovo ponašanje u podzemnim vodama.

Rezultati proračuna treba da ukažu na zone u kojima se zabranjuje prisustvo ovih materija, kao i zone u kojima se prisustvo ovih materija može dozvoliti uz odgovarajući monitoring.

Za preduzimanje tehničkih mera sanacije zagađenja podzemnih voda, neophodno je poznavati moguće posledice. Zbog toga treba imati pripremljene planove postupanja za različite moguće oblike unosa i vrste materija. Postojanje funkcionalnog monitoring sistema se podrazumeva.

Za užu zonu izvorišta svakako treba definisati ovo kritično vreme putovanja, interval vremena koji obezbeđuje pravovremenu intervenciju u slučaju akcidenta. Na osnovu kritičnog vremena za datu karakterističnu materiju, definišu se i zone sa odgovarajućim stepenom zaštite. Posledica ovog stava može da bude delimična ili potpuna zabrana određenih

aktivnosti u datoj zoni izvorišta, ali sa druge strane, povećava sigurnost njegovog rada. Ovakav pristup dodatno unapređuje postojeću zakonsku regulativu i omogućava fleksibilniju i tehnički opravdaniju zaštitu izvorišta.

Na osnovu rezultata hidrodinamičke analize transporta po ugledu kako je dato u ovom radu, moguće je racionalno postaviti zone sanitarne zaštite izvorišta, koje obezbeđuju njegovu stabilnu funkciju.

Zaključak je da se do stručno korektno zaštite izvorišta može doći kombinacijom kriterijuma, koji se tiču definisanja zona zaštite, korišćenja i ponašanja u okviru njih, monitoring sistema i planiranih mera prevencije i sanacije. U tom smislu, nekoliko linija osmatračkih objekata, pijezometara, pored pijezometara u neposrednoj blizini utvrđenih potencijalnih lokacija unosa neželjenih materija, čini okosnicu objekata sistema monitoringa. Zadaci monitoringa su da, pored redovnog praćenja situacije u zaštitnim zonama, obezbedi blagovremeno obaveštavanje o eventualnim akcidentima i tako omogući preduzimanje odgovarajućih mera zaštite i sanacije.

Dokumentacija monitoring sistema (projekat) se radi na osnovu rezultata studije analize transporta i takođe predstavlja poseban, ali sastavni deo elaborata o zaštitnim zonama izvorišta.

ZAHVALNOST

Publikovani rad je rezultat projekta TR37014 " Metodologija ocene, projektovanja i održavanja izvorista podzemnih voda u aluvijalnim sredinama u zavisnosti od stepena aerobnosti" koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnoloskog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] Bruce L., Miller T., Hockman B.: „Solubility Versus Equilibrium Saturation of Gasoline Compounds: A Method to Estimate Fuel/Water Partition Coefficient Using Solubility or Koc“, Amoco Corporation, Tulsa, Oklahoma, info.ngwa.org/gwol/pdf/910155295.PDF
- [2] Dimkić M. (2010) „Studija: Beogradsko izvorište podzemnih voda, stanje i pravci razvoja“, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd

- [3] Dimkić M., Brauch H.J., Kavanaugh M. (2008a) „Groundwater Management In Large River Basin“, IWA Publishing, ISBN: 1843391902
- [4] Dimkić M., Đurić D., Milovanović M. (2008b) „Odnos graničnih vrednosti parametara kvaliteta podzemne vode prema zaštićenim zonama za intergranularne akvifere“, časopis „Voda i sanitarna tehnika“, ISSN 0350-5049, vol. 38, no. 3/2008, Beograd, str. 19-36
- [5] Dimkić M., Đurić D., Milovanović M., Laušević M., Jevtić G., Petković A. (2011) „Natural Attenuation of Emerging Pharmaceuticals by Bank Filtration in Addressing Regional Groundwater Management Issues“, Journal of Serbian Water Pollution Control Society „Water Research and Management“, ISSN 2217-5237, Vol. 1, No. 1, p. 29-46, 2011.
- [6] Dimkić M., Pušić M., Majkić-Dursun B., Obradović V. (2011): Certain Implications of Oxidic Conditions in Alluvial Groundwater, Water Research and Management, Vol. 1, No. 2 (2011) pages 27-43
- [7] Dimkić M., Taušanović V., Pušić M., Boreli-Zdravković Đ., Đurić D., Slimak T., Petković A., Obradović V., Babić R. (2007), "Belgrade groundwater source condition and possible development directions", Water Practice & Technology, volume 2, issue 3, ISSN 1820-6530
- [8] Đorđević, B. (2008): Realizacija razvoja vodoprivredne infrastrukture u skladu sa strategijom iz Prostornog plana Srbije, Vodoprivreda, N^o 234-236, str. 215-226
- [9] Guard H., E., Laughlin J. G. , Laughlin R., B. (1983) „Characterization Of Gasolines, Diesel Fuels & Their Water Soluble Fractions“, Naval Biosciences Laboratory, Naval Supply Center, Oakland, CA 94625
- [10] <http://drugasansa.rs/wp-content/uploads/2011/05/Obuka-za-hemijsko-ciscenje-pranje-i-peglanje-tekstilnih-proizvoda.pdf>
- [11] <http://en.wikipedia.org>
- [12] JČI (2013) „Elaborat o zonama sanitarne zaštite izvorišta podzemnih i površinskih voda za vodosnabdevanje grada Beograda“, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd
- [13] Kulić F., Jeličić Z., Francuski Lj., Lendak I., Zarić S.(2007): Jedno rešenje sistema daljinskog nadzora i upravljanja vodovodnim sistemom upotrebom bežične komunikacije, Vodoprivreda, vol. 39, br. 5-6, str. 303-309
- [14] Lancaster C. D., Marc B. W. (2011): Fate and Transport of Metals and Particulates within the Roadside Environment – A Review, Water Research and Management, Vol. 1 No. 3 (2011) pages 37-46 ISSN 2217-5237
- [15] Majkić-Dursun, B., Popović Lj., Miolski D., Anđelković O. (2012): Uticaj opadanja nivoa podzemnih voda na procese starenja vodozahvata objekata, na primeru izvorišta Trnovče, Vodoprivreda, vol. 44, br. 4-6, str. 181-187
- [16] Milanović, S., Vasić Lj. (2011): Hidrogeološka osnova zaštite podzemnih voda u karstu na primeru Beljanice, Vodoprivreda, N^o 252-254, str.165-174
- [17] „Pravilnik o higijenskoj ispravnosti vode za piće“, Službeni list SRJ, br. 42/98 i 44/99.
- [18] Pušić M. (2005) „Utiskivanje drenova na bunarima RB-20, RB-16 i RB-5m na izvorištu beogradskog vodovodnog sistema, deo A: Podloge, Knjiga 2 - Hidrodinamička analiza, Izbor materijala i konstruktivnih karakteristika drenova bunara i analiza opravdanosti izrade novih drenova“, Rudarsko geološki fakultet, Beograd
- [19] Pušić, M., Dimkić M., Vidović D., Dotlić M., Oparušić I. (2012): Analiza uticaja nekih hidrogeoloških parametara na početni kapacitet bunara sa horizontalnim drenovima, Vodoprivreda, vol. 44, br. 4-6, str. 175-180
- [20] Radenković Z., Boreli-Zdravković Đ., Dimkić M. (2007) „Određivanje zaštitnih zona izvorišta podzemnih voda“, Voda i sanitarna tehnika, 2007, vol. 37, br. 4-5, str. 65-79
- [21] Toholj, N., Glavaš S., Jolović B (2012): Pitka voda u sistemu vodosnabdevanja stanovništva u Republici Srpskoj, Vodoprivreda, vol. 44, br. 4-6, str. 241-246

- [22] „Uredba o graničnim vrednostima zagađujućih materija u površinskim i podzemnim vodama i sedimentu i rokovima za za njihovo dostizanje“, Sl. glasnik RS, br. 50/2012
- [23] „Uredba o programu sistematskog praćenja kvaliteta zemljišta, indikatorima za ocenu rizika od degradacije zemljišta i metodologiji za izradu remedijacionih programa“, Sl. glasnik RS, br. 88/2010
- [24] Verschueren K. (1983) „Environmental Data on Organic Chemicals“, Wiley & Sons, Incorporated, John, ISBN-10: 0442288026 | ISBN-13: 9780442288020
- [25] Vlada Republike Srbije (2008) „Pravilnik o načinu određivanja i održavanja zona sanitarne zaštite izvorišta vodosnabdevanja“, Službeni glasnik RS, br. 92/2008

POLLUTION TRANSPORT ANALYSIS IN DEFINING THE SANITARY PROTECTION ZONES OF GROUNDWATER SOURCES IN ALLUVIAL AREAS

by

Milan DIMKIĆ¹⁾, Milenko PUŠIĆ²⁾, Dragan VIDOVIĆ¹⁾, Dušan ĐURIĆ¹⁾, Đulija BORELI – ZDRAVKOVIĆ¹⁾

¹⁾ The Jaroslav Černi Institute for the Development of Water Resources, Belgrade

²⁾ Faculty for Mining and Geology, Belgrade

Summary

Sanitary protection zones of groundwater sources are set to protect water sources. If the source is located within the city infrastructure and urban areas (as is the case with Belgrade), sharpens the conflict of interest and sources. Unfortunately, the current legislation does not define the methodology for determining the speed of groundwater travel times to wells. In determining the sanitary protection zone, the primary importance is to define the so-called critical materials, substances which are the benchmark for the concept of the protection of groundwater sources. Their retention time and the length of the path passed to the wells are the basis for defining the zone of protection. For example,

the Belgrade groundwater source hydrodynamic transport analysis was performed of substances entered into the groundwater. For the several scenarios for input materials, travel times and concentrations were obtained in selected wells and piezometers. The results represent a good technical basis for the establishment of a monitoring system at the source and show the necessity of this approach in defining the zone of protection

Key words: groundwater source, protection zones, transport pollution

Redigovano 22.11.2013.