

# Procena uticaja rudničkih drenažnih i komunalnih otpadnih voda na kvalitet površinskih voda u Boru i okolini

Vojka R. Gardić<sup>1</sup>, Jelena V. Petrović<sup>1</sup>, Lidija V. Đurđevac-Ignjatović<sup>1</sup>, Srđan R. Kolaković<sup>2</sup>, Svetlana R. Vujović<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Bor, Srbija

<sup>2</sup>Fakultet tehničkih nauka, Departman za građevinarstvo, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija

## Izvod

Rudarstvo i proizvodnja bakra u Boru, tokom proteklih sto godina, imalo je ogroman uticaj na životnu okolinu. Otpadne vode koje se generišu u pogonima RTB Bor zagađuju Borsku i Kriveljsku reku koje predstavljaju otvoreni kolektor za otpadnu vodu. Posle uliva Borske reke u Kriveljsku reku nastaje Bela reka koja se dalje uliva u reku Timok, odnosno reku Dunav. Za period istraživanja od 17. oktobra 2012. god. do 17. januara 2013. sprovedena je analiza rudničkih, drenažnih i komunalnih otpadnih voda. Za potrebe istraživanja i procenu negativnog uticaja otpadnih voda na površinske vode na terenu je sprovedeno merenje protoka, temperature, pH vrednosti, oksido/reducionog potencijala i koncentracije rastvornog kiseonika u uzorcima vode. Takođe, određen je i sadržaja Cu, Fe<sup>2+</sup>, ukupnog Fe (T-Fe), As, Mn, Si, Ni i Al.

**Ključne reči:** rudarstvo, otpadne vode, površinske vode, hemijske karakteristike.

Dostupno na Internetu sa adrese časopisa: <http://www.ache.org.rs/HI/>

Bor je smešten u dolini Borske reke na nadmorskoj visini od 360 m. Bor i okolina su poznati po najvećim nalazištima bakra u Srbiji i svrstana su među najveća u Evropi [1]. Borski rudnik sa otvorenim kopom se nalazi na severnoj granici Bora. Dubok je oko 300 m, a širok preko 1 km na najširem delu. Rudarske aktivnosti se ne upražnjavaju i kop se sada koristi kao skladište jalovine koja se doprema od rudnika Veliki Krivelj zajedno sa šljakom iz topionice. Iskop otvorenog kopa rudnika Veliki Krivelj započeo je 1979, a proizvodnja je u njemu počela 1982. godine. Od tada je iskopano oko 150 miliona tona rude. Proizvodnja se nastavlja stopom od oko 4,8 miliona tona godišnje [2]. Na području Bora, u zoni delovanja Rudarsko topioničarskog basena (RTB), degradirano je preko 29.000 ha zemljišta pod šumama i oranicama. Površina degradiranog zemljišta, od ukupnog poljoprivrednog zemljišta u borskoj opštini, iznosi preko 60% [3]. Površinske i podzemne vode u blizini bazena sa jalovinom se mogu kontaminirati teškim metalima kao što su olovo, cink, bakar i arsen, koji su već nađeni u zemljištu i biljkama u borskom regionu [4]. Otpadne vode koje se generišu u pogonima RTB Bor zagađuju Borsku i Kriveljsku reku, koja se dalje uliva u reku Timok, odnosno reku Dunav. Ova zagađenja su najčešće predstavljena niskom pH vrednošću, povećanim sadržajem jona teških metala, suspendovanim česticama i finim česticama flotacijske jalovine koja je

Preписка: S. Vujović, Departman za građevinarstvo, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6, 21 000 Novi Sad, Srbija.

E-pošta: vujovics@uns.ac.rs

Rad primljen: 28. januar, 2013

Rad prihvaćen: 7. april, 2014

STRUČNI RAD

UDK 622.34(497.11Bor)628.3:504.5

Hem. Ind. 69 (2) 165–174 (2015)

doi: 10.2298/HEMIND140128031G

deponovana u dolinama navedenih reka na površini od preko 2000 hektara [5]. Tokom višedecenijske eksploatacije rude sa površinskog kopa Bor na različitim lokalitetima („Visoki planir“ – nazvan i Oštreljski planir, „Severni planir“, rudnička deponija rudnog tela „H“ (RTH)) odlagale su se raskrivka i jalovina. Najveća količina jalovine, oko 150 miliona tona, odložena je na Visokim planirima. Procenjen je sadržaj bakra od 0,15%, od čega 20% može da se predstavi kao bakar u obliku oksidnih minerala, dok su od sulfidnih minerala prisutni halkozin, kovelin i neznatan sadržaj halkopirita. Cilj ovog rada da se na osnovu hemijskih karakteristika rudničkih drenažnih i komunalnih otpadnih voda u Boru i okolini, proceni uticaj na kvalitet površinskih voda, čiji je kvalitet takođe analiziran. U radu su prikazani rezultati dobijeni za period istraživanja od 17. oktobra 2012. do 17. januara 2013. godine.

## UTICAJ RUDARSKIH AKTIVNOSTI NA ŽIVOTNU SREDINU

Prema rezultatima istraživanja iz 1989. godine, procenjeno je da je oko 19,300 km potoka i reka, kao i 72,000 ha jezera i rezervoara širom sveta bilo ozbiljno ugroženo otpadnim vodama poreklom iz rudnika [7]. Kisele drenažne vode, proceđivanje iz jalovišta ili direktno odlaganje jalovine u vodotokove može uzrokovati zagađenje površinskih i podzemnih voda [8]. Uticaj kiselih drenažnih voda na vodotokove može ozbiljno narušiti kvalitet vode. Ozbiljnost i stepen degradacije vodotoka u zavisnosti je od različitog broja faktora kao što su: učestalost, zapremina i hemijske karakteristike rudničkih drenažnih voda. Takođe, značajan

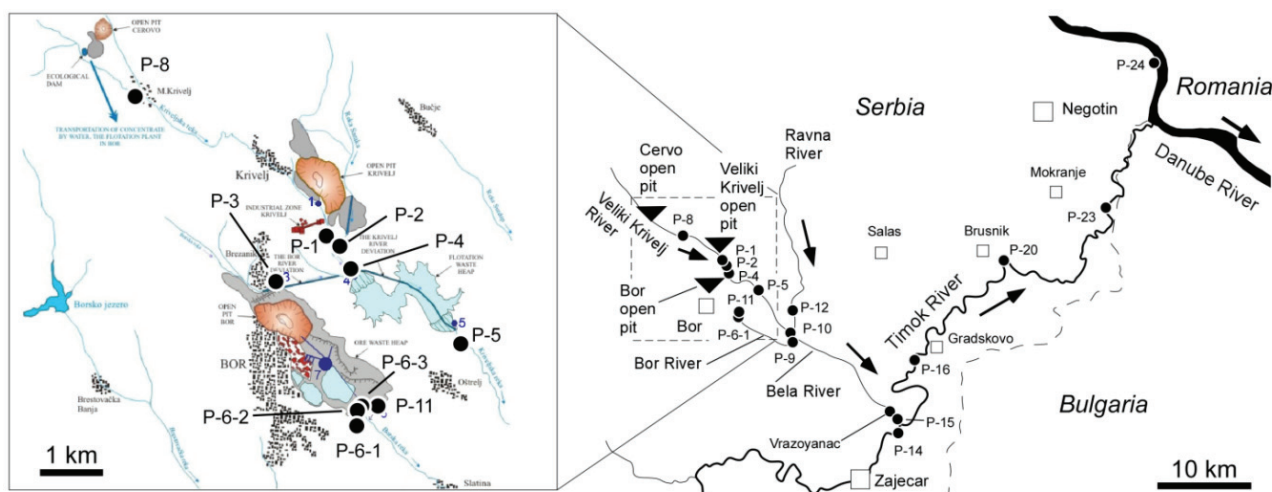
faktor je i puferski kapacitet recipijenta kao i udaljenost recipijenta od izvora zagađenja [9]. Uticaj zagađenja kiselih rudničkih voda na životnu sredinu je kompleksan. Osnovni efekti su: toksičnost metala; proces taloženja, kiselost i salinizacija [10]. Kisele rudničke vode su osnovna pokretačka sila odgovorna za zagađenje teškim metalima. Kisele rudničke vode utiču na oslobađanje metala iz mineralnih ruda u životnu sredinu čineći ih dostupnim za akvatične organizame. Teški metali se iz akvatičnog ekosistema ne mogu ukloniti procesima samoprečišćavanja, već se akumuliraju u sedimentu gde mogu ući u lanac ishrane biomagnifikacijom. Stoga, sediment predstavlja značajan izvor teških metala [11]. Vrednost pH je značajan parametar kvaliteta voda. Za većinu akvatičnih organizama optimalna pH vrednost se kreće od 7,2–8,7. Kako visoke vrednosti pH utiču na rastvorljivost teških metala, a samim tim i na njihovu toksičnost, postoji opasnost od oslobađanja metalnih jona (npr. aluminijuma) iz kompleksa sa drugim katjonima. pH vrednost vode određuje rastvorljivost i biološku raspoloživost hemijskih konstituenata azota. Ukoliko su vrednosti pH niske u vodi su prisutni amonijum jon ( $\text{NH}_4^+$ ) i hidronijum jon ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ). Amonijum jon nije toksičan za žive organizme. Međutim, opasnost za živi svet postoji u slučaju većih vrednosti pH (iznad 9) kada je dominantan  $\text{NH}_3$  kao toksična komponenta [12,13].

### Oblast istraživanja

Istraživanjem su obuhvaćeni sledeći izvori zagađenja: otpadne rudničke drenažne vode koje potiču iz aktivnih rudnika (borska jama, polje 1 jalovišta Veliki Krivelj, flotacijsko jalovište RTH u Boru, metalurške vode), kao i drenažne vode iz flotacijskih jalovišta koja nisu više u funkciji (polje 2 flotacijskog jalovišta Veliki Krivelj, drenažne vode iz starog Borskog flotacijskog jalovišta), stara neaktivna odlagališta kopovske ras-

krivke (Saraka odlagalište, Visoki planiri – jalovina iz starog Borskog kopa, odlagalište kopovske raskrivke iz kopa RTH) i gradske – komunalne otpadne vode, koje se bez prečišćavanja ispuštaju direktno u vodotok Borske reke. Navedene otpadne vode direktno zagađuju Borsku i Kriveljsku reku, koje nakon spajanja kod mosta nizvodno od sela Slatina formiraju Belu reku. Uzorkovanje otpadnih i rečnih voda sprovedeno je na sledećim lokacijama: rudničke drenažne vode iz borskog rudnika i jalovine, otpadne vode iz topionice i gradske-komunalne otpadne vode koje su uzorkovane u neposrednoj blizini borskog rudnika. Takođe, za potrebe istraživanja uzeti su uzorci rečnih voda. Uzorkovanje i ispitivanje je sprovedeno na ukupno 17 lokacija. Lokacije uzorkovanja prikazane na slici 1 i date su sledećim oznakama:

- P-1** Kriveljska reka sa drenažnom vodom sa površinskog kopa Veliki Krivelj;
- P-2** Saraka potok;
- P-3** Otpadne vode iz Jame Bor;
- P-4** Kriveljska reka pre kriveljskog jalovišta;
- P-5** Kriveljska reka nakon kriveljskog jalovišta;
- P-6-1** Metalurške otpadne vode;
- P-6-2** Komunalne otpadne vode;
- P-6-3** Drenažne vode sa raskrivke (jalovine) u području RTH jalovišta;
- P-8** Cerova reka južno od površinskog kopa Cerovo;
- P-9** Borska reka;
- P-10** Kriveljska reka;
- P-11** Jezero Robule;
- P-12** Ravna reka;
- P-13** Bela reka posle spajanja Borske, Kriveljske i Ravne reke;
- P-14** Reka Timok pre uliva Bele reke;
- P-15** Bela reka pre uliva u reku Timok;
- P-16** Reka Timok posle uliva Bele reke, most na Timoku, lokacija Čokonjar.



Slika 1. Lokacije uzorkovanja voda u regionu Bora i Zaječara.

Figure 1. Map of the sampling locations in the area of the cities of Bor and Zaječar.

## EKSPERIMENTALNI DEO

### Aanalitičke procedure uzoraka vode

Određivanje protoka, temperature, pH vrednosti, oksido/redukcionog potencijala (ORP) i koncentracije rastvornog kiseonika (DO) u uzorcima vode, za potrebe ovog istraživanja sprovedeno je na terenu. Određivanje sadržaja Cu, Fe<sup>2+</sup>, ukupnog Fe (T-Fe), Mn, Si, Ni i Al u uzorcima sprovedeno je primenom kolorimetra (HACH Company, DR-890) u skladu sa Direktivom EU (Council Directive 79/869/EEC) [14]. Sadržaj Fe<sup>3+</sup> je dobijen računom iz razlike koncentracije ukupnog sadržaja Fe i koncentracije Fe<sup>2+</sup>. Sadržaj ukupnog arsena meren je na terenu upotrebom seta za određivanje arsena (LaMotte Company – Total As Kit).

## REZULTATI I DISKUSIJA

### Karakteristike rudničkih drenažnih, komunalnih otpadnih i rečnih voda u okolini borskog rudnika

Za potrebe istraživanja sprovedenog na terenu vršeno je: određivanje protoka, temperature, pH vrednosti, oksido/redukcionog potencijala (ORP) i koncentracije rastvornog kiseonika (DO). Dijagram zavisnosti pH vrednosti od protoka za drenažne rudničke vode, otpadne vode i rečne vode u borskoj oblasti prikazan je na slici 2.

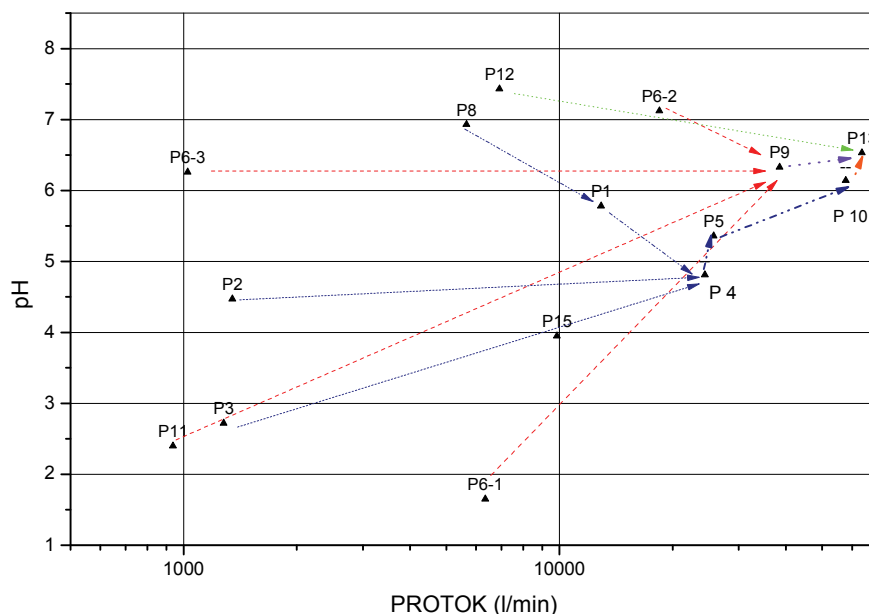
Vode iz jezera Robule i drenažne jamske vode (P-3), vode na ulazu u kolektor kriveljskog jalovišta (P-4) i metalurške otpadne vode (P-6-1) su kiselog karaktera, sa pH vrednostima nižim od zakonom propisanih vrednosti, prema Pravilniku o opasnim materijama u vodama (Sl. glasnik SRS, br. 31/82) [15]. Vode uzorkovane na

tačkama P-11, P-3, P-4 i P-6-1 imaju pH vrednosti niže od zakonom propisanih u svakom izveštajnom periodu.

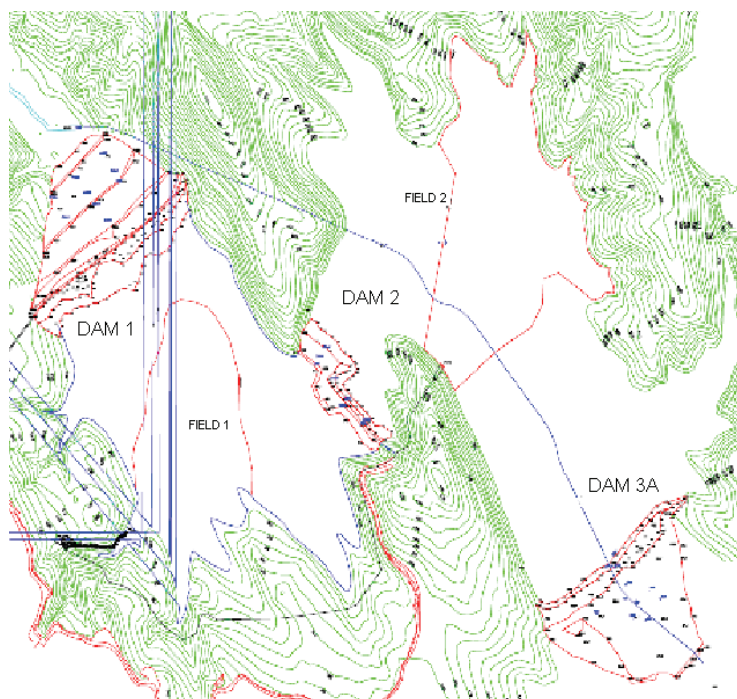
Vode na ulazu u kriveljski kolektor ispod brane 1A flotacijskog jalovišta (Slika 3) Veliki Krivelj (P-1) nastaju spajanjem Saraka potoka (P-2), Kriveljske Reke (P-10), jamskih otpadnih voda (P-3) i manjim udelom drenažnih voda brane 1A, te se može zaključiti da jamske otpadne vode imaju najveći uticaj na kiselost vode na mernoj tački P-4, nakon čega slede vode Saraka potoka (P-2). Na izlazu iz kriveljskog kolektora (P-5) dolazi do manjeg povećanja protoka, kao rezultat uliva drenažne vode brane 3A jalovišta Veliki Krivelj, dok pH vrednost ostaje gotovo nepromenjena. Drenažne vode brane 3A su najčešće neutralnog ili blago kiselog karaktera (imaju pH vrednost oko 7), ali zbog malog protoka u odnosu na protok Kriveljske reke, njihov uticaj na povećanje pH vrednosti u Kriveljskoj reci je zanemarljiv.

Metalurške otpadne vode su uz očekivanu nisku pH vrednost, imale i visoki sadržaj bakra i veliki protok. Za period ispitivanja, vode iz Saraka potoka (P-2) i otpadne rudničke vode iz jame Bor (P-3) pokazale su kisel karakter, gde je izmerena vrednost pH od 4,47, odnosno 2,72. Za period istraživanja metalurške otpadne vode imale su najznačajniji uticaj na životnu sredinu i na rečni sistem Borska reka i Bela reka. Vrednost pH od 1,65 i koncentracija bakra od 156 mg/l potvrđuju navedene činjenice i predstavljaju maksimalno izmerene vrednosti za ceo period ispitivanja ovih voda.

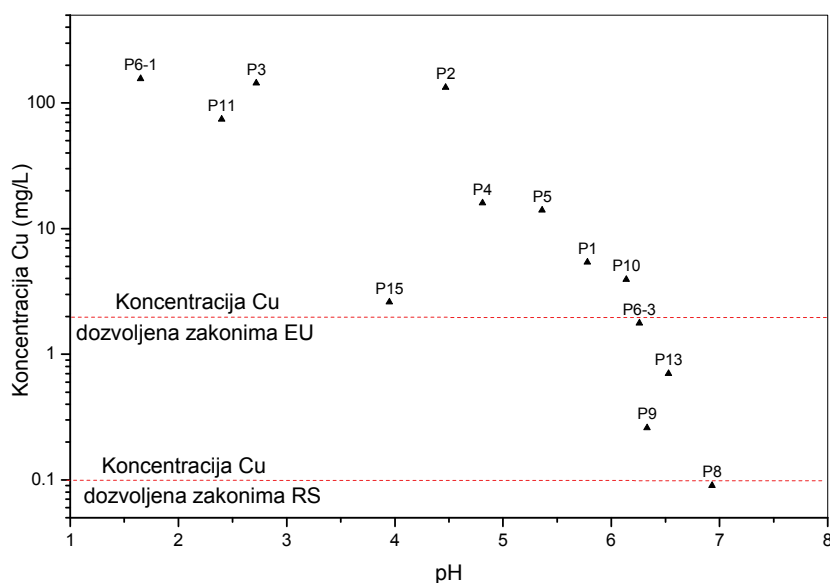
Dijagram zavisnosti pH vrednosti i sadržaja bakra u rudničkim drenažnim vodama, otpadnim vodama i rečnim vodama borske oblasti prikazan je na slici 4. Sadržaj bakra u drenažnim vodama iz jame i otpadnim vodama u borskoj oblasti kreće se od BDL (eng. *below detection*



Slika 2. Dijagram zavisnosti pH vrednosti od protoka za drenažne rudničke, otpadne i rečne vode u borskoj oblasti.  
Figure 2. Diagram of the pH versus flow of mine drainage water, wastewater and river water in the area of the city of Bor.



Slika 3. Situaciona karta starog flotacijskog jalovišta.  
Figure 3. Layout map of the old flotation tailings.



Slika 4. Dijagram zavisnosti pH vrednosti i sadržaja bakra u rudničkim drenažnim vodama, otpadnim vodama i rečnim vodama borske oblasti.

Figure 4. Diagram of the pH versus copper concentration of mine drainage water, wastewater and river water in the area of the city of Bor.

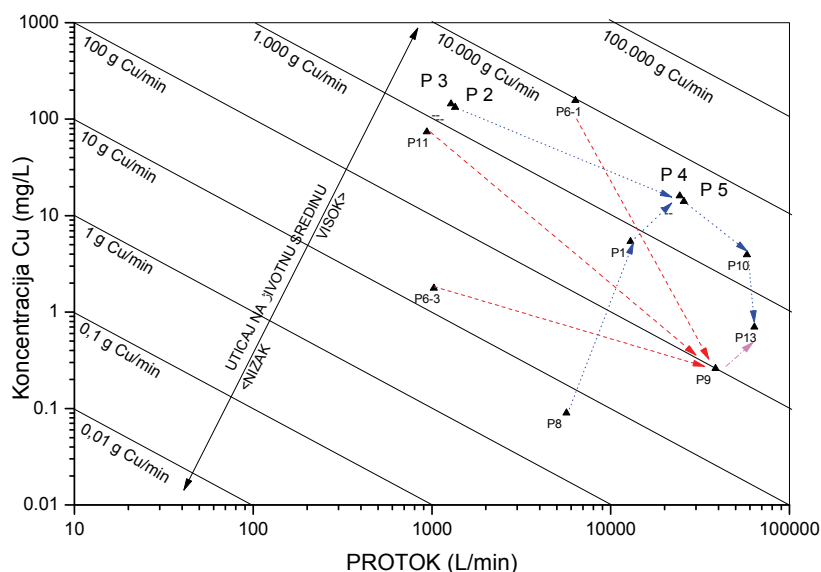
limit) – ispod granice detekcije kolorimetra (P-6-2) do 156 mg/l (P-6-1).

Koncentracija bakra u rečnoj vodi u borskoj oblasti, za izveštajni period kretala se od BDL (P-12, P-14 i P-16) do 16 mg/l (P-4).

Dijagram zavisnosti koncentracije bakra i protoka u rudničkim drenažnim vodama, otpadnim vodama i

površinskim rečnim vodama borske oblasti prikazan je na slici 5.

Vode sa velikim protokom i visokom koncentracijom bakra su otpadne metalurške vode (P-6-1) i jamske otpadne vode (P-3). Visoka koncentracija bakra je izmerena i u vodama Saraka potoka, tačka P-2 (133 mg/l), ali je protok ovih voda mali, čime se direktno umanjuje i negativan uticaj ovih voda na okolinu. Takođe, kao što



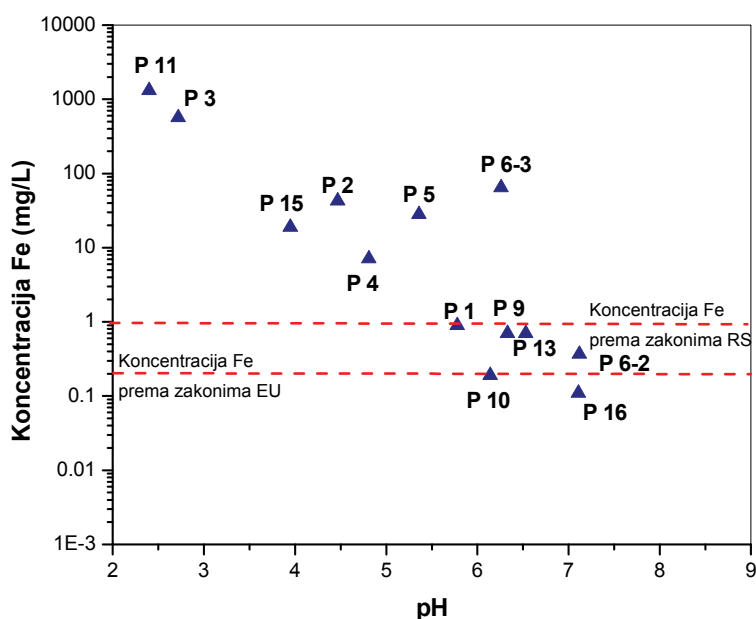
Slika 5. Dijagram zavisnosti koncentracije bakra i protoka u rudničkim drenažnim vodama, otpadnim vodama i površinskim rečnim vodama borske oblasti.

Figure 5. Diagram of the copper concentration versus flow of mine drainage water, wastewater and river water in the area of the city of Bor.

je prikazano na slici 4, jasno se uočava da samo vode uzorkovane u tačkama P-8, P-6-2, P-12, P-14 i P-16 sadrže bakar u koncentracijama ispod maksimalno dozvoljenih prema Pravilniku o opasnim materijama u vodama (Sl. glasnik SRS, br. 31/82) [15]. Ukoliko se sadržaj bakra u vodama uporedi sa EU zakonodavstvom (Direktiva 2006/11/EC; Direktiva 75/440/EEC) [16,17], pored navedenih, dozvoljene koncentracije bakra imaju i vode uzorkovane u tačkama P-6-3, P-9 i P-13.

Dijagram zavisnosti koncentracije ukupnog sadržaja gvožđa i pH vrednosti u rudničkim drenažnim vodama, otpadnim vodama i rečnim vodama u borskoj oblasti prikazan je na slici 6.

Sadržaj ukupnog gvožđa u zavisnosti od pH vrednosti u drenažnim rudničkim vodama i ostalim otpadnim vodama koje su u direktnoj vezi sa rudarskim aktivnostima, kreću se u opsegu od BDL do 1320 mg/l. Otpadne vode sa najvećom koncentracijom gvožđa su



Slika 6. Dijagram zavisnosti koncentracije ukupnog gvožđa i pH vrednosti u rudničkim drenažnim vodama, otpadnim vodama i rečnim vodama u borskoj oblasti.

Figure 6. Diagram of of the total iron concentration versus pH of mine drainage water, wastewater and river water in the area of the city of Bor.

sledeće: vode iz jezera Robule sa 1320 ppm, rudničke otpadne vode iz jame Bor sa 570 ppm, i metalurške vode sa 300 ppm. Rudničke otpadne vode iz jame Bor i metalurške vode izdvavaju se po povećanim koncentracijama jona gvožđa, slično kao kada je u pitanju koncentracija bakra. Vode iz jezera Robule, iako sadrže daleko više ukupnog gvožđa nego prethodne dve navedene vode, zbog veoma malog protoka ima manji štetni uticaj na životnu sredinu od navedenih otpadnih voda, koje nastaju kao nus-proizvod tekuće proizvodnje bakra u RTB Bor.

Dijagram zavisnosti koncentracije ukupnog gvožđa i protoka u rudničkim drenažnim vodama, otpadnim vodama i rečnim vodama u borskoj oblasti prikazan je na slici 7.

U površinskim vodama reka, sadržaj ukupnog gvožđa u borskoj oblasti kreće se u opsegu od BDL do 28 mg/L (tačka P-5). Vode sa velikim protokom i velikim sadržajem gvožđa su otpadne metalurške vode (P-6-1). Drenažne rudničke vode iz Robule jezera (P-11) imaju mali protok, ali je sadržaj ukupnog gvožđa iznad maksimalno dozvoljene koncentracije, prema Pravilniku o opasnim materijama u vodama (Sl. glasnik SRS, br. 31/82) [15]. Vode uzorkovane u tačkama P-10 i P-16 imaju dozvoljene koncentracije gvožđa, prema zakonodavstvu EU (Direktiva 2006/11/EC; Direktiva 75/440/EEC) [16,17]. U tačkama P-1, P-6-2, P-9 i P-13, sadržaj gvožđa je u skladu sa Pravilnikom o opasnim materijama u vodama (Sl. glasnik SRS, br. 31/82) [14].

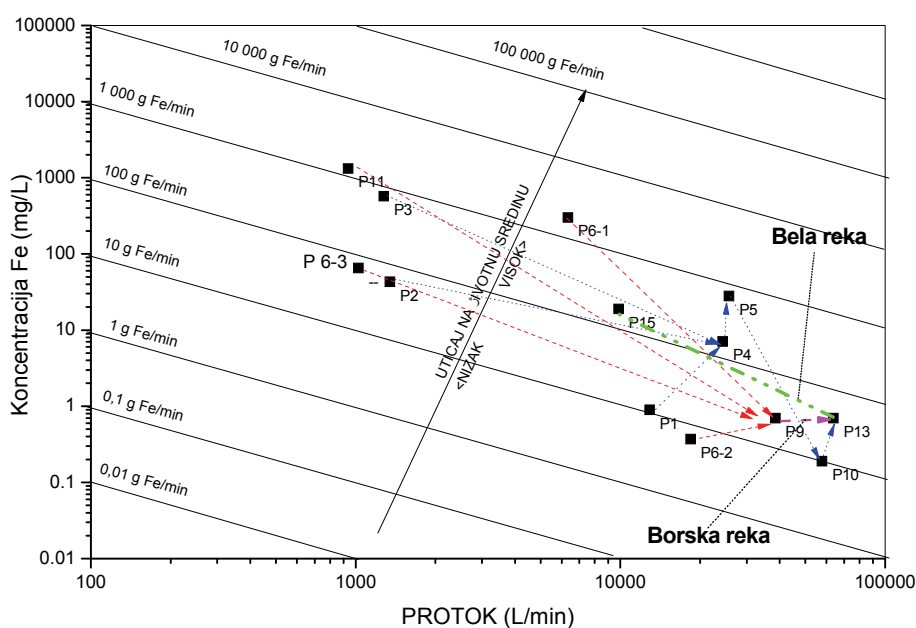
Određivanje sadržaja ukupnog arsena izvršeno je na svih 16 uzoraka vode. Dijagram zavisnosti koncentracije

As od pH vrednosti u rudničkim drenažnim vodama, otpadnim vodama i rečnim vodama u borskoj oblasti prikazan je na slici 8.

Povišen sadržaj As je uočen u metalurškim otpadnim vodama (P-6-1) i otpadnim vodama jame Bor (P-3). Sadržaj arsena u otpadnim metalurškim vodama je 8,5 ppm, a u jamskim otpadnim vodama je 0,030 ppm. Izmerene koncentracije arsena u tački P-6-1 ima tendenciju rasta, u poređenju sa vrednostima izmerenim u prethodnim izveštajnim periodima. Arsen nije detektovan u vodama koje su uzorkovane niže od tačke P-6-1, što je sa jedne strane direktan uticaj faktora razblaženja od oko 6 puta, posmatrajući protoke u tačkama P-6-1 i P-9, dok sa druge strane predstavlja i uticaj sedimentacije arsena na dnu rečnog korita. Ovaj uticaj je potvrđen analizom sedimenata i zemljišta u borskoj oblasti u prethodnom periodu istraživanja [6]. Prema Pravilniku o opasnim materijama u vodama (Sl. glasnik SRS, br. 31/82) [14] izmerena koncentracija arsena od 8,5 ppm je 170 puta veća od maksimalno dozvoljene koncentracije arsena u vodama. Takođe, izmerena koncentracija arsena je 850 puta veća od maksimalno dozvoljene koncentracije arsena u vodama prema zakonodavstvu EU (Direktiva 2006/11/EC; Direktiva 75/440/EEC) [16,17].

#### Karakterizacija rečnih voda koje sadrže drenažne rudničke vode i otpadne vode iz oblasti borskog rudnika

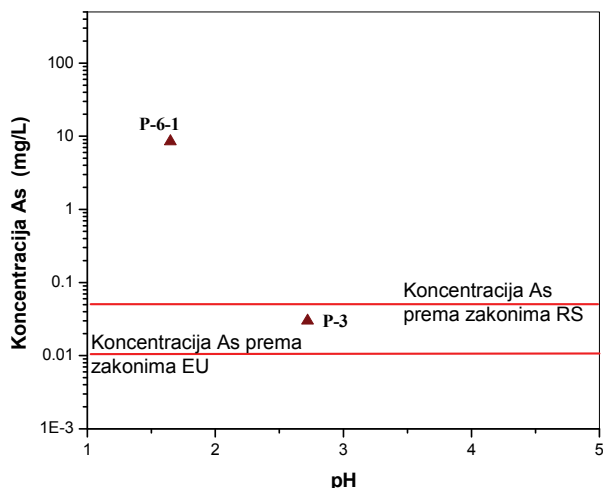
Vrednosti za pH u rečnim vodama koje nisu pod uticajem rudničkih drenažnih voda i otpadnih voda iz borske oblasti je oko 7–8. U tački uzorkovanja P-8, koja



Slika 7. Dijagram zavisnosti koncentracije ukupnog gvožđa i protoka u rudničkim drenažnim vodama, otpadnim vodama i rečnim vodama u borskoj oblasti.

Figure 7. Diagram of the total iron concentration versus flow of mine drainage water, wastewater and river water in the area of the city of Bor.

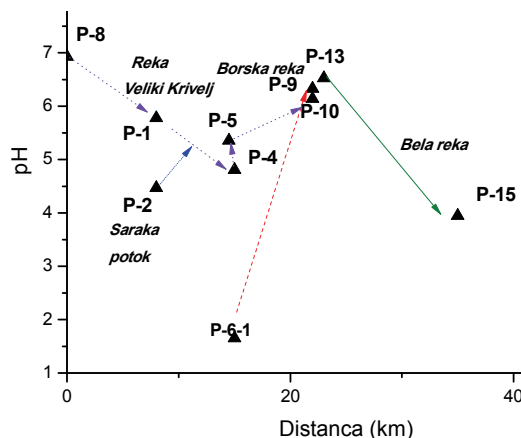




Slika 8. Dijagram zavisnosti koncentracije As od pH vrednosti u rudničkim drenažnim vodama, otpadnim vodama i rečnim vodama u borskoj oblasti.

Figure 8. Diagram of the Arsenic concentration versus pH of mine drainage water, wastewater and river water in the area of the city of Bor.

je prelazna merna tačka između površinskog kopa Cerovo i površinskog kopa Veliki Krivelj na Kriveljskoj reci, izmerena je vrednost pH od 6,93. Takođe, tačka uzorkovanja P-12, nije pod uticajem rudničkih drenažnih voda i otpadnih voda iz borske oblasti u kojoj je određena vrednost pH od 7,43 – Ravna reka. Voda iz Borske reke ima slabo kiseli karakter i pH vrednost od 6,33 (P-9). Otpadne metalurške vode imaju jak kiseli karakter, sa najnižom do sada izmerenom pH vrednošću od 1,65 i protokom od 6345,70 l/min i veliki uticaj na kvalitet vode u Borskoj reci. Voda iz Bele reke, na mestu uzorkovanja P-13 (gornji tok) ima pH vrednost 6,53, ali u mernoj tački P-15 (donji tok) je kiseli i ima vrednost pH od 3,95, što je uticaj dejstva nagomilane flotacijske jalovine u dolinama ovih reka. Kriveljska reka nakon spajanja sa Saraka potokom i drenažnim rudničkim vodama postaje kiseli. Vrednost pH se neznatno povećava na izlazu iz kolektora ispod jalovišta usled spajanja sa drenažnim vodama brane 3A flotacijskog jalovišta. Ovako kisela voda u Kriveljskoj reci veoma štetno utiče na već oštećeni kolektor ispod flotacijskog jalovišta Veliki Krivelj, dodatno ga razarajući, kako betonsku oplatu tako i samu armaturu, koju kisela voda rastvara, pa je na nekim mestima veoma oštećena ili je skoro i nema. Usled spajanja sa rečicama koje se ulivaju u nju, Kriveljska reka na mestu spajanja sa Borskom rekom ima pH vrednost od 6,14. Niska pH vrednost negativno utiče kako na okolno zemljište tako i na poljoprivredne kulture. Stoga, ova voda nije pogodna za zalivanje poljoprivrednih kultura u dolinama kroz koje prolazi. Dijagram promene pH vrednosti u zavisnosti od distance od borskog rudnika prikazan je na slici 9.



Slika 9. Dijagram promene pH vrednosti u zavisnosti od distance od borskog rudnika.

Figure 9. Diagram of pH values depending on the distance from the Bor mine.

Dijagram promene u koncentraciji bakra u rečnim vodama u borskoj oblasti u zavisnosti od distance od borskog rudnika do Timoka prikazan je na slici 10.

Sadržaj bakra u rečnoj vodi u tački uzorkovanja P-4, P-5 i P-10, duž Kriveljske reke pokazuje varijacije u opsegu od 3,93 do 16 mg/L. Sadržaj bakra u rečnoj vodi na mestu uzorkovanja P-9, Borska reka bio je 0,26 mg/l, što je manje nego u prošlim izveštajnim periodima, dok je protok reke imao tendenciju povećanja. Sadržaj bakra u rečnoj vodi na mestu uzorkovanja Bela reka (P-13) je 0,7 mg/l (uzvodno: nakon spajanja Kriveljske i Borske reke), dok je na tački uzorkovanja P-15 bila 2,6 mg/l (nizvodno: pre ulivanja Bele reke u Timok). Na slici 11 prikazana je promena koncentracije bakra u zavisnosti od pH vrednosti.

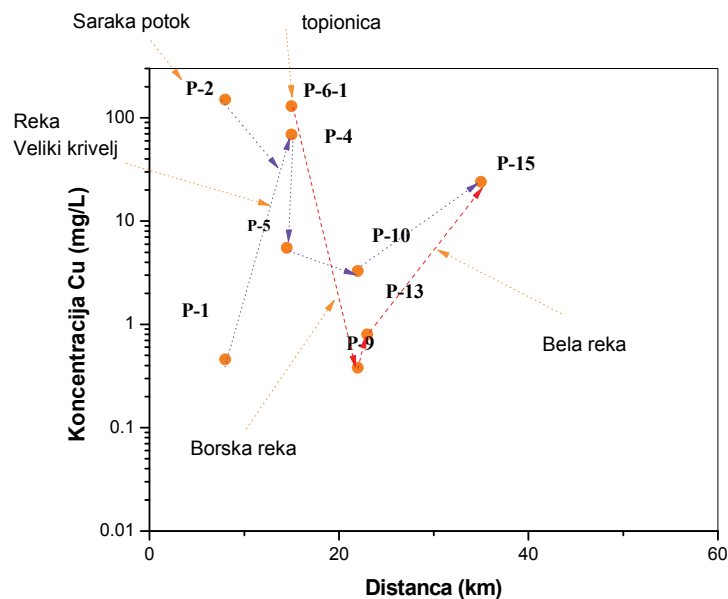
Kada su u pitanju drugi štetni metali, vode najzagađenije jonima nikla su metalurške vode sa 24,4 ppm i rudničkim drenažnim vodama iz borskog rudnika-Jama Bor sa 0,80 ppm.

Povećan sadržaj mangana se nalazi u vodama Saraka potoka sa 24,5 ppm, rudničkim otpadnim vodama iz borskog podzemnog rudnika – jama Bor sa 15,0 ppm, metalurškim vodama sa 14,1 ppm i jezera Robule sa 4,74 ppm [6].

## ZAKLJUČAK

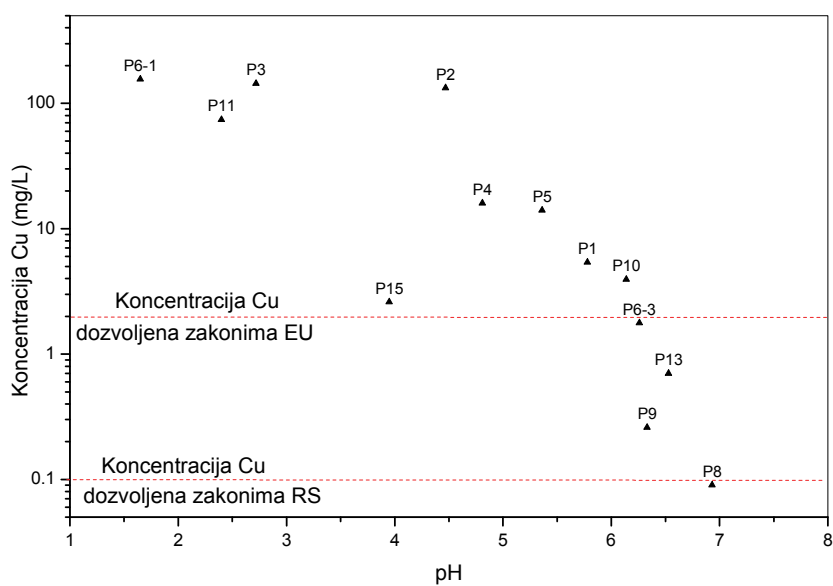
Negativan uticaj rudarske aktivnosti na životnu sredinu je evidentan. Drenažne vode aktivnih rudnika, drenažne vode flotacijskih jalovišta koja više nisu u funkciji, stara neaktivna odlagališta kopovske raskrivke i neprečišćene otpadne vode direktno zagađuju Borsku i Krivaljsku reku, koje nakon spajanja kod mosta nizvodno od sela Slatina formiraju Belu reku.

Kriveljska reka nakon spajanja sa Saraka potokom i drenažnim rudničkim vodama postaje kiseli. Vrednost pH se neznatno povećava na izlazu iz kolektora ispod



Slika 10. Dijagram promene u koncentraciji bakra u rečnim vodama u borskoj oblasti u zavisnosti od distance od borskog rudnika do Timoka.

Figure 10. Diagram of Copper concentration depending on the distance of Bor mine from the Timok river.



Slika 11. Dijagram zavisnosti koncentracije bakra od pH vrednosti.

Figure 11. Diagram of Copper concentrations versus pH values.

jalovišta usled spajanja sa drenažnim vodama brane 3A flotacijskog jalovišta. Ovako kisela voda u Kriveljskoj reci veoma štetno utiče na već oštećeni kolektor ispod flotacijskog jalovišta Veliki Krivelj, dodatno ga razarajući, kako betonsku oplatu tako i samu armaturu, koju kisela voda rastvara, pa je na nekim mestima veoma oštećena ili je skoro i nema. Niska pH vrednost negativno utiče kako na okolno zemljište tako i na poljoprivredne kulture.

Dve najštetnije i najkiselije vode su vode koje aktivni rudnik (jama Bor) i TIR (metalurške vode) ispuštaju u

Borsku i Kriveljsku reku bez prečišćavanja, što je u suprotnosti sa svim važećim zakonskim regulativama u našoj zemlji. Sprečavanjem njihovog daljeg ispuštanja i prečišćavanjem ovih jako kiselih i zagađenih voda znatno bi se poboljšao kvalitet voda u samim rekama, za veoma kratko vreme.

Sadržaj bakra u otpadnim vodama i rekama je u direktnoj vezi sa kiselim karakterom samih otpadnih voda. Najzagađeniji tokovi otpadnih voda bakrom su: metalurške vode sa 156 ppm, rudničke otpadne vode iz jamskog rudnika sa 144 ppm, Saraka potok sa 133 ppm



i vode jezera Robule sa 74 ppm. Kao i kada je u pitanju pH vrednost otpadnih voda i u ovom slučaju se po zagađenosti izdvajaju otpadne vode iz aktivnih preduzeća i rudnika RTB Bor.

Sadržaj ukupnog gvožđa u drenažnim rudničkim vodama i ostalim otpadnim vodama koje su u direktnoj vezi sa rudarskim aktivnostima, kreću se u opsegu od BDL (P-8, P-12) do 1320 ppm za jezero Robule (P-11).

Određivanje sadržaja ukupnog arsena izvršeno je na svih 16 uzoraka voda, a povišeni sadržaj je uočen u metalurškim otpadnim vodama (P-6-1) i rudničkim otpadnim vodama iz borskog rudnika – jama Bor (P-3). Dobijene vrednosti za As su najveće od kad se krenulo sa ispitivanjem kvaliteta otpadnih voda.

### Zahvalnica

Ovaj rad je urađen okviru projekta „Management of mining waste-tailing dump in the Bor region“ podržanog od strane Japanskog društva za promociju nauke, Japanske internacionalne agencije za saradnju i Ministarstva za zaštitu životne sredine, rudarstva i prostornog planiranja Republike Srbije.

### LITERATURA

- [1] S. Šerbula, Kvalite vazduha u Boru i okolni, XVII Naučno stručni skup Ekološka istina 09, br. 17, 2009, str. 9–16.
- [2] Analiza stanja životne sredine od šteta nastalih kao posledica prethodnog rada RTB Bor – Finalni izveštaj: Environmental resources management, The privatization agency of Serbia (RTB BOR EA), 2006, [http://www.digitalnizavicaj.com/pdf/texts/170/Analiza\\_stanja\\_zivotne\\_sredine\\_Borpdf.pdf](http://www.digitalnizavicaj.com/pdf/texts/170/Analiza_stanja_zivotne_sredine_Borpdf.pdf)
- [3] M. Bugarin, Radojka Jonović, Ljiljana Avramović, Tretman industrijskih otpadnih voda iz procesa proizvodnje bakra u RTB Bor, Rudarski radovi **4** (2012) 1–8.
- [4] J. Sokolović, R. Stanojlović, S. Barbulović, Z.S. Marković, Z. Štirbanović, Analiza stanja zagađenosti životne sredine u RTB-u Boru, XV naučno-stručni skup Ekološka istina, 2007, Kniga radova, str. 174–180.
- [5] Lj. Obradović, M. Bugarin, V. Marinković, Uticaj rudničkih objekata RTB Bor na zagađenje okolnih površinskih vodotokova, Rudarski radovi **4** (2012) 185–196.
- [6] Project for Management of mining waste tailing dump at the region Bor, Duration: August 2011 – August 2013.
- [7] D.B. Johnson, K.B. Hallberg, Acid mine drainage remediation options: a review, Sci. Total Environ. **338** (2005) 3–14.
- [8] A.J. Gunson, B. Klein, M. Veiga, S. Dunbar, Reducing mine water requirements, J. Clean. Prod. **21** (2012) 71–82.
- [9] A.O. Fadiran, C.L. Dlamini, J.M. Thwala, Environmental Assessment of Acid Mine Drainage Pollution on Surface Water Bodies around Ngwenya Mine, Swaziland, J. Environ. Prot. **5** (2014) 164–173.
- [10] N.F. Gray, Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem, Environ. Geol. **30** (1997) 62–71.
- [11] C.L. Dlamini, A.O. Fadiran, J.M. Thwala, A Study of Environmental Assessment of Acid Mine Drainage in Ngwenya, Swaziland, J. Environ. Prot. **4** (2013) 20–26.
- [12] B. Dalmacija, I. Ivančev-Tumbas, Analiza vode-kontrola kvaliteta, tumačenje rezultata, Prirodno matematički fakultet, Novi Sad, 2004.
- [13] V. Gvozdić, J. Brana, D. Puntarić, D. Vidosavljević, D. Roland, Changes in the Lower Drava River Water Quality Parameters Over 24 Years, Arh. Hig. Rada Toksikol. **62** (2011) 325–323.
- [14] Council DIRECTIVE 79/869/EEC of 09 October 1979 concerning the method of measurement and frequencies of sampling and analysis surface water intended for the abstraction of drinking water in Member States.
- [15] Pravilnik o opasnim materijama u vodama („Sl. Glasnik SRS“, br. 31/82).
- [16] Directive 2006/11/EC of the European Parliament and of the Council of 15 February 2006 on pollution caused by certain dangerous substances discharged into the aquatic environment of the Community.
- [17] Council Directive 75/440/EEC of 16 June 1975 concerning the quality required of surface water intended for the abstraction of drinking water in Member States.

## SUMMARY

### IMPACT ASSESSMENT OF MINE DRAINAGE WATER AND MUNICIPAL WASTEWATER ON THE SURFACE WATER NEAR THE CITY OF BOR

Vojka R. Gardić<sup>1</sup>, Jelena V. Petrović<sup>1</sup>, Lidija V. Đurđevac-Ignjatović<sup>1</sup>, Srđan R. Kolaković<sup>2</sup>, Svetlana R. Vujović<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Mining and Metallurgy Institute Bor, Bor, Serbia*

<sup>2</sup>*Faculty of Technical Sciences, Department of Civil Engineering, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia*

(Professional paper)

Mining and copper production in Bor, in the past hundred years, had a huge impact on the environment of town, but also in a wide region. In the area of Bor, in the zone of Mining and Smelting Company (RTB) activity, over 29,000 ha of land under forests and fields is degraded. The area of degraded agricultural land in the Bor municipality is over 60% of total agricultural land. Wastewater, generated in the sites of RTB Bor, pollutes the Bor River and Krivelj River, which further flow into the Timok River and Danube River. These pollutions are often presented by low pH value, increased content of heavy metal ions, suspended particles and fine particles of flotation tailings, which are deposited in the valleys of these rivers on the area of over 2000 hectares. During the decades of exploitation of ore from the open pit Bor at different locations ("Visoki Planir" – also called "Oštreljski planir", "Severni planir" dump of ore body "H" (RTH)) gangue and tailings were delayed. The largest amount of tailings, about 150 million tons, was postponed on location Visoki planir. The effect of the mining waste and the impact of the whole process of processing copper ore to the final products on the environment, was conducted during the 4<sup>th</sup> study period of the project "*Management of mining waste-tailing dump in the Bor region*", supported by the Japan Society for the Promotion Science and the Japan international cooperation Agency and the Ministry of environment, Mining and Spatial planning of the Republic of Serbia. Influence of season on the level of pollutants in soil and water, the impact on water quality in the river Timok and the River Danube, was conducted during first three periods of project. This paper presents the results of the third study period. The third period of research, which was conducted over a period of 17.10.2012 to 17.01.2013, included a review of pollution sources and define their impact on the environment. The study included the following sources of pollution: mining waste and drainage water originating from the active mine (Bor pit, field 1 Krivelj large tailings, flotation tailings in Bor RTH, metallurgical water), as well as the drainage water from the flotation tailings, which are no longer in operation (field 2 flotation tailings Great Krivelj, drainage water from the old Bor flotation tailings), the old inactive landfill mine gangue (Saraka landfill, Veliki planir – tailings from the old Bor mine, landfill mine gangue from mine RTH) and the city – urban waste water, which are discharged without treatment directly into the watercourse Bor River. wastewater directly pollutes Bor River and Krivalj River.

*Keywords:* Mining • Wastewater • Surface water • Chemical characterization