



www.ror.tf.bor.ac.rs

Stručni rad

UDK 504.4:622.51

RUDNIČKE VODE IZ RUDNIKA RTB BOR – RESURS ZA DOBIJANJE BAKRA ILI ZAGAĐIVAČ ŽIVOTNE SREDINE

MINE WATERS FROM MINING & SMELTING BASIN BOR - A RESOURCE FOR THE RECOVERY OF COPPER OR POLLUTER OF THE ENVIRONMENT

Grozdanka D. Bogdanović^{1, #}, Milan Ž. Trumić¹, Velizar Stanković¹,
Dejan V. Antić¹, Maja S. Trumić¹, Zrinka Milanović²

¹Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, VJ 12, Bor, Srbija

²Rudnici bakra Bor, Kestenova 8, Bor, Srbija

Primljen: 1. novembar 2013.

Prihvaćen: 17. decembar 2013.

IZVOD – Višegodišnja eksploatacija i prerada rude bakra na području Bora dovela je do degradacije velikih površina zemljišta deponovanjem ogromnih količina rudarskog otpada i pojave rudničkih voda u njima. Rudničke vode nastaju usled prirodnih procesa luženja rudarskog otpada, a pojavljuju se u obliku procednih voda i prirodnih izvora.

U okviru aktivnih i napuštenih Rudnika bakra u Boru nastaju velike količine rudničkih voda, sličnih po sastavu, ali različitih koncentracija teških metala, različitih protoka i potencijala na bakru kao mogućem korisnom proizvodu, a sada višegodišnjem zagađivaču površinskih vodotokova. Postoje devet izvora rudničkih voda u RBB, sa potencijalom na bakru od 350 do 420 t/god. Samo se mali deo ovog bakra iskoristi (~17% Cu), dok se ostali deo nepovratno gubi zagađujući Kriveljsku reku, Timok i Dunav. Kolektiranjem pojedinih izvora rudničkih voda i njihovim tretmanom, uz moguću valorizaciju bakra, može da se eliminiše sadašnje zagađenje površinskih voda. Postojanje rudničkih voda će imati i znatno duži vek od rudarenja, pa je utoliko značajnije pristupiti rešavanju ovog, za RTB Bor značajnog problema. Proizvedeni bakar i voda bi učinili tretman voda ekonomski prihvatljivijim

Cljučne reči: rudničke vode, zaštita životne sredine, teški metali

ABSTRACT – Long-term exploitation and copper ore processing in Bor has led to degradation wide areas of land by depositing huge amounts of mining waste and the appearance of mine wastewaters in them. Mine waters are the result of spontaneous leaching process of mining waste and take the form of excess water collection and natural resources.

Within the active and abandoned copper mines in Bor, great quantity of mine waters has been produced, similar in composition, but different in concentration of heavy metals, with different flow and potential on copper as a possible useful product and now as a pollutant of surface water flows. There are nine sources of mine waters in Mining Basin Bor whose potential on copper varies between 350 and 420 tonnes per year. So far, only a small amount of copper from mine waters is being recovered (~17% Cu) while the remaining part is lost flowing into the Krivelj River, and

[#] Kontakt adresa autora: G.D. Bogdanović, Tehnički fakultet u Boru, Univerzitet u Beogradu, Vojske Jugoslavije 12, 19210 Bor, Srbija. E-mail: gbogdanovic@tf.bor.ac.rs

* Rezultati saopšteni u ovom radu su proistekli iz istraživanja na projektima OI 172031, TR 37001 i TR 33007 finansiranim od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

further to the Timok and Danube. By collecting the mine wastewaters from the individual sources and their treatment in order to extract copper may decrease or completely eliminate current surface waters contamination. The mine wastewaters is going to have a longer existence than mining activities, so it of the greatest importance to approach to solve this, for Mining Basin in Bor, significant problem. Produced copper and purified water could make the water treatment economically acceptable.

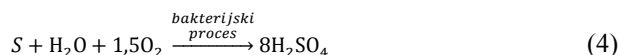
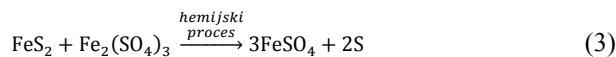
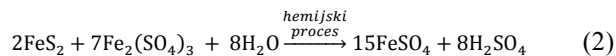
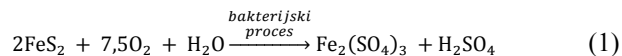
Key words: mine waters, environment, heavy metals

1. UVOD

Rudarstvo kao glavna industrijska grana u Boru tokom proteklih 100 godina, imalo je veliki uticaj na životnu sredinu samog grada ali i šireg regiona. Rudarska proizvodnja u Boru otpočela je 1903. godine podzemnom eksploatacijom. Površinski kop Bor otvoren je 1912. godine i eksploatisan je do 1986. godine. U opštini postoje još dva površinska kopa rude bakra – u Velikom Krivelju (otvoren 1979.) i Cerovu (otvoren 1990., a zatvoren 2002.god.). Ponovna eksploatacija rude na površinskom kopu Cerovo započinje u 2011.god. Grad Bor nalazi se u istočnoj Srbiji, udaljen 220 km od Beograda i 30-ak km od granice sa Bugarskom. Rudnik bakra Bor je lociran na severoistočnom obodu grada i to tako da površinski kop i staro borsko flotacijsko jalovište čine granicu urbane i industrijske zone.

Intenzivna eksploatacija i prerada rude bakra na području Bora i Majdanpeka dovela je do degradacije i zagađenja stotine hektara zemljišta usled odlaganja velike količine rudarskog otpada (rudnička raskrivka, jalovina i flotaciona jalovina) i pojave kiselih rudničkih voda. Procenjuje se da je u Boru i okolini u proteklom periodu do danas deponovano više od 780×10^6 tona čvrstih otpadnih materijala koji sadrže preko 1 140 000 t bakra [1]. Rudarske deponije, nastale odlaganjem industrijskog otpada u Boru i okolini, svojom velikom površinom, ogromnom količinom i heterogenim sastavom, bitno utiču na kvalitet životne sredine. Do zagađenja voda (površinskih i podzemnih) dolazi usled prirodnog izluženja minerala prisutnih u rudničkim deponijama.

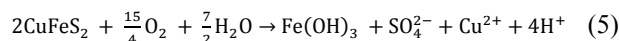
Pirit je najzastupljeniji sulfidni mineral u polimetaličnim sulfidnim rudnim ležištima i u rudarskim deponijama. Oksidacija pirita i sulfidnih minerala bakra u vodenoj sredini nastaje usled dva istovremena mehanizma rastvaranja, tj. hemijskog i biohemijskog mehanizma koji uključuje mikroorganizme. Oksidacija pirita se može opisati sledećim ukupnim stehiometrijskim reakcijama [2]:



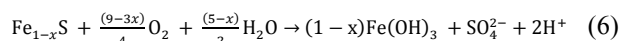
Navedene reakcije opisuju nastanak i regeneraciju sumporne kiseline u rudničkim deponijama. Brzina oksidacije minerala i stvaranje H^+ jona zavisi od koncentracije kiseonika, temperature, veličine čestica, vrsta sulfidnih minerala, pH rastvora, Eh rastvora, sadržaja metala u sulfidima, prisustva izvesnih bakterija itd. Pored pirita i drugi sulfidni minerali doprinose nastanku kiseline i smanjenju pH rudničkih voda. Uobičajeni sulfidni minerali koji generišu kiselinu kad se oksiduju u prisustvu kiseonika ili gvožđe (III) jona su halkopirit, kovelin, enargit, svalerit, galenit, markazit, pirotin i dr. Za vreme rastvaranja halkopirita sa gvožđe(III)-sulfatom na reagujućoj površini se izdvaja elementarni sumpor, međutim, ako su prisutne bakterije, *Thiobacillus thiooxidans*, sumpor oksidiše do sulfata (reakcija 4) [3].

Reakcije luženja halkopirita i pirotina u prisustvu kiseonika kao oksidansa, koje doprinose stvaranju sumporne kiseline, su prikazane sledećim jednačinama [4,5]:

Halkopirit



Pirotin



Spontana oksidacija drugih sulfidnih minerala koji su prisutni u rudničkom otpadu, po istom ili sličnom mehanizmu opisanom jednačinama 5 i 6, je odgovorna za oslobađanje mnogih toksičnih metala u rastvor, kao što su: Zn, Cd, Pb, Ni, As, Mn i drugi. Nastali rastvori se karakterišu niskom pH vrednošću (obično manjoj od 5) i visokom koncentracijom sulfata i jona metala, a u literaturi se najčešće sreću pod nazivom kisele rudničke vode ili acid mine drainage (AMD).

Kisele rudničke vode se javljaju pri sledećim uslovima:

- prisustvo dovoljne količine vode i vazduha infiltriranih unutar otpadnog materijala omogućava hemijske i biohemijske reakcije;
- otpadni materijal sa dovoljnim sadržajem sulfida reaguje sa nastalom kiselinom u procesu oksidacije sulfida i stvara lužne rastvore, brže nego što dolazi do procesa neutralizacije kiseline sa alkalnim mineralima prisutnim u materijalu;
- prisustvo površinskih voda koje prodiru u zemlju i transportuju rudničke vode u okolinu.

Prestankom rudarskih aktivnosti ne prestaje i problem zagađivanja, naprotiv, on može trajati stolicima i nakon zatvaranja rudnika. Problem kod napuštenih rudnika nakon podzemne ili površinske eksploatacije, nastaje posle određenog vremena nakon prestanka rada i ispušavanja vode iz rudnika. Rudničke vode čiji je nivo ispušavanjem bio veštački smanjivan, počinju dostizati svoj prvobitni, prirodni nivo. Voda tada plavi rudnike i ističe kroz horizontalna okna u rečne doline i reke. Površinsko oticanje nastalih voda sa lokaliteta rudnika takođe negativno utiče na životnu sredinu. Negativan uticaj nastalih rudničkih voda na okolinu ogleda se u dugoročnoj kontaminaciji zemljišta sa kojim rudničke vode dolaze u dodir i akumuliranju jona teških metala u njemu; u ulivanju rudničkih voda u površinske vode; u mešanju rudničkih voda sa podzemnim vodama i njihovom zagađenju, itd. Rudničke vode mogu da sadrže u znatnoj količini rastvorene jone teških metala, pa pored zagađenja dolazi i do značajnih gubitka vrednih metala [6,7,8].

Rudničke vode predstavljaju jednu od najozbiljnijih pretnji vodenom svetu i okolini, ali se na žalost retko tako i tretiraju. Praksa u jugoistočnoj Evropi pokazuje da se pažnja uglavnom posvećivala otpadnim vodama koje nastaju u tehnološkom procesu odvajanja mineralne sirovine i otpadnim vodama iz jalovišta. Svest o toksičnosti ovih voda postoji, ali praksa i literatura pokazuju da se neutralizacija ovih voda uglavnom primenjivala s aspekta sigurnosti radnika u rudnicima.

Aktivni i napušteni rudnici, unutar DOO Rudnici bakra Bor (u daljem tekstu RBB), koje posluje u okviru Rudarsko topioničarskog basena Bor - Grupe (u daljem tekstu RTB) sličnog kvalitativnog sastava, ali različitih koncentracija teških metala koje nose sa sobom, različitog protoka i samim tim potencijala na bakru kao mogućem korisnom proizvodu, a sada permanentnom zagađivaču površinskih vodotokova.

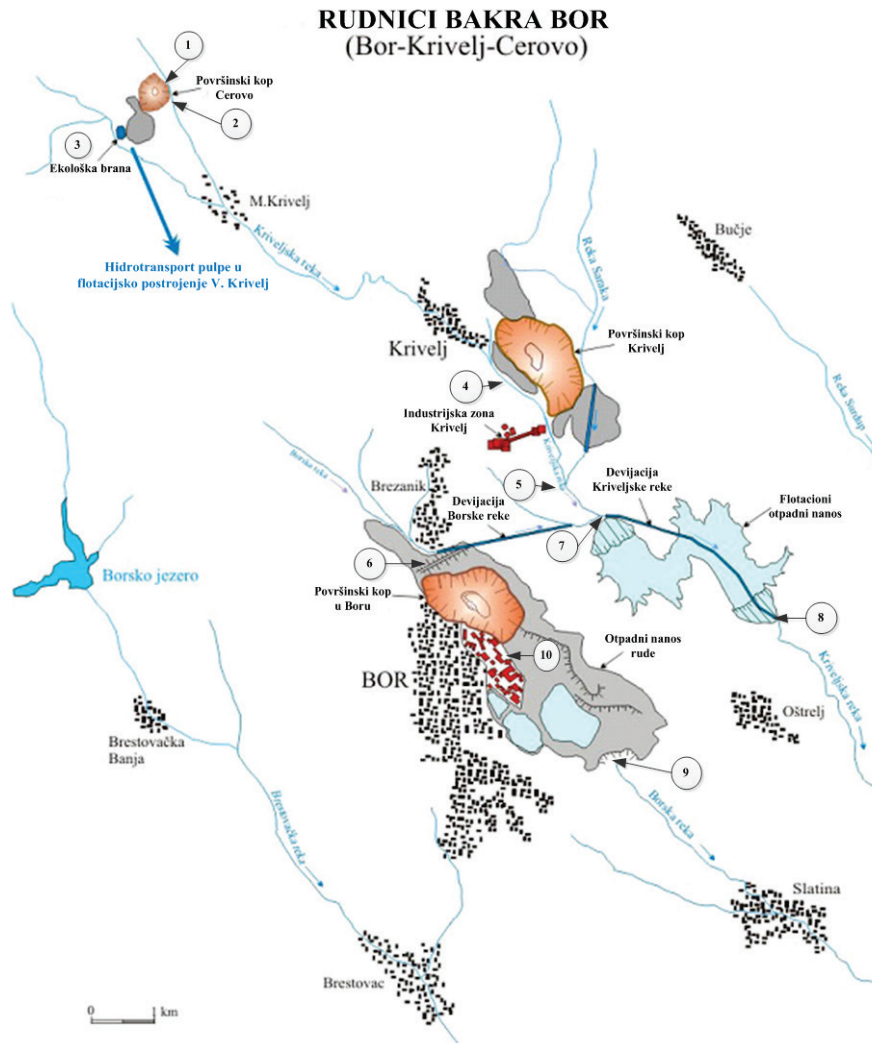
U radu je prikazan potencijal i kvalitet pojedinih rudničkih voda, njihov sadašnji uticaj na Kriveljsku reku kao i mogućnost i efekat njihovog prečišćavanja.

2. IDENTIFIKACIJA POJEDINIH IZVORA RUDNIČKIH VODA UNUTAR RUDNIKA BAKRA BOR

Unutar Rudnika bakra Bor postoji više vrsta vodotokova, koji u sebi sadrže manju ili veću količinu jona teških metala gvožđa, bakra, cinka i rastvorne soli. Rudničke vode nastaju:

1. u procesu rudarenja (površinska i podzemna eksploatacija ruda bakra):
 1. Površinski kop Cerovo
 2. Površinski kop Veliki Krivelj
 3. Jama Bor
2. u procesu flotacijske koncentracije ruda bakra:
 1. Flotacija Veliki Krivelj;
 2. Flotacija Bor
3. u napuštenim rudnicima bakra:
 1. Površinski kop Bor

Na slici 1 je prikazana karta sliva Kriveljske i Borske reke, njihov položaj u odnosu na grad Bor i označeni izvori rudničkih voda unutar RBB. Na potezu od Cerova preko Bora centralni vodotok čini Kriveljska reka koja nastaje od Cerovo reke i reke Valja Mare, teče pravcem od severozapada prema jugoistoku, protiče kroz selo Veliki Krivelj, pored rudnika sa istim imenom i pored Bora prolazi sa severoistočne strane. U delu doline Kriveljske reke formirano je odlagalište flotacijske jalovine rudnika Veliki Krivelj, zbog čega je ona ispod njega sprovedena kroz tunel i kolektor. Skoro paralelno toku Kriveljske reke, istim pravcem i smerom, tekla je i Borska reka sa svojim slivnim područjem, ali je zbog razvoja površinskog kopa rudnika Bor ona takođe delimično izmeštena izgradnjom tunela i sprovedena u Kriveljsku reku. Danas, kao posledica rudarenja u Boru, Borska reka je praktično prekinuta, pa ima dva odvojena toka - do Bora ide svojim koritom, a onda se skreće i uliva u Kriveljsku reku. Deo njenog prirodnog korita, u dužini od više kilometara, ne postoji s obzirom da je na toj lokaciji razvijen površinski kop rudnika bakra Bor i formirano je flotacijsko jalovište za potrebe flotacije bakra u Boru. Nizvodno od Bora Borska reka ponovo egzistira u svom prirodnom koritu, ali nju danas čine otpadne vode iz metalurških pogona RTB-a, otpadne gradske vode i vode dva potoka, Borskog i Savića potoka. Ovi potoci se ispod grada provode takođe kolektorima [9].



Slika 1. Sliv Kriveljske i Borske reke sa lokacijama nastajanja otpadnih voda:

- 1- Slivne vode odlagališta - Cerovo reka I;
- 2- Slivne vode odlagališta - Cerovo reka II;
- 3- Cerovo Ekološka brana;
- 4- Otpadna voda sa dna otvorenog kopa Veliki Krivelj;
- 5- Oticanje sa deponije raskrivke rudnika Veliki Krivelj u vototok Saraka;
- 6- Otpadne vode iz podzemnog rudnika Jama;
- 7- Provirne vode sa brane "1A" flotacijskog jalovišta Veliki Krivelj;
- 8- Provirne vode sa brane "3A" flotacijskog jalovišta Veliki Krivelj;
- 9 - Otpadne vode iz jezera Robule;
- 10 - Otpadne vode iz otvorenog kopa Bor i vode iz kompleksa topionice i vode iz kompleksa topionice i rafinacije

Rudničke vode sa lokaliteta Cerovo, iz rudnika Veliki Krivelj i delom iz Jame Bor ulivaju se u Kriveljsku reku, dok se deo rudničkih voda sa Jame Bor nakon delimičnog prečišćavanja odvodi u Borsku reku. Ove reke, obe veoma zagađene jonima metala, suspendovanim česticama i sumpornom kiselinom se spajaju kod mesta Zagrađe i obrazuju Belu reku, koja se uliva u Timok kod sela Vražognac severno od Zaječara. Od mesta ulivanja Borske reke, Timok je zagađen teškim metalima, nekima čak znatno iznad MDK. Kako je u donjem toku Timok delom i međugranična reka, to je problem zagađenja ove reke postao međunarodni.

U Rudniku bakra Bor se redovno vrši hemijska i fizičko-hemijska analiza površinskih voda i rudničkih voda nastalih izluživanjem odlagališta raskrivki i jalovine na površinskim kopovima Cerovo i Veliki Krivelj, provirnih voda brana flotacijskog jalovišta Veliki Krivelj i jamskih voda. Analize se rade kvartalno (godišnje) u Zavodu za javno zdravlje Zaječar. Na osnovu dostupnih podataka o zapreminama i protocima pojedinih izvora rudničkih voda, sadržaja bakra kao glavne komponente u njima, izvršen je proračun mase bakra koja se nepovratno gubi zagađujući Kriveljsku reku, odnosno Timok i konačno Dunav [10]. Dobijeni rezultati su prikazani u Tabeli 1.

Tabela 1. Rudničke vode iz RBB, izdašnost tih izvora, sadržaj i masa bakra u njima [9,10]

Poreklo	V, m ³	Q, m ³ /god	C _{Cu²⁺} , mg/dm ³	G _{Cu} , t/god	Napomena
Cerovo, kop	550 000		130 – 150	70 – 80*	Ispumpava se u Ekološku branu
Cerovo-Ekološka brana		100 000	130 – 150	13 -15*	Ide u pogon Cementacija- Jama
Slivne vode odlagališta - Cerova Reka I		3 000	1500	4,5	U Cerovu reku
Slivne vode odlagališta - Cerova Reka II		2 875	1200	3,5	U Cerovu reku
Provirne vode sa brane "1A" flotacijskog jalovišta Veliki Krivelj		71 000	38,6	2,75	U Kriveljsku reku
Provirne vode sa brane "3A" flotacijskog jalovišta Veliki Krivelj		Ne meri se	53	< 50***	U Kriveljsku reku
Saraka potok		Ne meri se	6,15	> 70***	U Kriveljsku reku
Kop V. Krivelj		1 380 000	53	73	U Kriveljsku reku
Jama**		≈ 2 300 000		≈ 200	Iskorišćenje Cu ~34%
Sumarno:		≈ 3 877 000		Σ≈ 400*	Srednje iskorišć. Cu ~17%

* Podaci su uzeti kao aritmetička sredina u zbiru, na osnovu kvartalnih analiza;

**Deo voda iz Jame Bor se koristi u pogonu Aero-Aqua Inženjering (oko 240 000 m³ u 2011., što iznosi oko 40 t cementnog bakra), delom u Cementaciji na Jami (oko 450 000 m³, što iznosi oko 29 t cementnog bakra), a deo se odvodi preko Borske u Kriveljsku reku i zajedno sa bakrom iz Velikog Krivelja, nepovratno se gubi;

***Za provirne vode brane 3A i vode Saraka potoka nema podataka o protoku, pa njihov potencijal nije mogao da se sagleda, već samo da se grubo proceni

Na slici 1 su prikazani izvori rudničkih voda iz Rudnika bakra Bor i njihov uticaj na Cerovo reku, Kriveljsku reku i Borsku reku.



a) Cerovo –Ekološka brana



b) Rudničke vode otvorenog kopa Cerovo

Slika 1. Rudničke vode Rudnika bakra Bor



c) Slivne vode odlagališta-Cerovo Reka II



d) Cerovo reka



e) Saraka potok



f) Kriveljska reka



g) Spajanje devijacije Borske reke i Kriveljske reke



h) Kriveljska reka - izlaz iz kolektora



i) Jezero Robule



j) Spajanje Kriveljske i Borske reke

Slika 1. Rudničke vode Rudnika bakra Bor (nastavak)

2.1. Rudnik Cerovo

Rudnik bakra Cerovo se nalazi na oko 15 km severozapadno od Bora, u rudnom polju Mali Krivelj. Danas se eksploatacija rude bakra vrši na površinskom kopu Cerovo-Cementacija 1, koji je ponovo reaktiviran 2011.godine. Na ovom lokalitetu otkrivena su i druga rudna tela (Cerovo-Cementacija 2, 3 i 4, ležište Drenova i Cerovo-Primarno), koja su takođe interesantna sa stanovišta eksploatacije bakra.

Površinski kop Cerovo-Cementacija 1 se nalazi između dva vodotoka: Cerovo reke na istoku i Valja Mare na jugozapadu, koja se spajaju i obrazuju Kriveljsku reku, na oko 2 km jugoistočno od rudnika, kod sela Mali Krivelj. Na kopu Cerovo postoji samo jedan izvor rudničkih voda – voda u samom kopu (slika 2b) zapremine oko 550 000 m³ koja sadrži oko 70 – 80 t

bakra. Voda je prirodno kisela (pH ~ 3,5), a pored bakra sadrži i znatnu koncentraciju jona cinka (oko 30 g/m³) i nikla iznad MDK. Rudničke vode koja se akumuliraju na dnu kopa se ispumpavaju prema bazenu za akumulaciju vode, tkz. ekološkom bazenu, da bi se izbeglo podizanje nivoa vode i oticanje ovih voda u reku Valja Mare, što bi za posledicu imalo kontaminaciju ove reke. Vode iz Ekološke brane se odvođe u Pogon cementacije na Jami – Bor. Za sliv Cerove reke nije urađena ekološka zaštita od gravitirajućih voda. Na spoljnoj strani kopa, gde je odložena jalovina, postoje dva izvora rudničkih voda (Cerova reka I i II, slika 2c) iz kojih sa Cerova otiče oko 7–8 t/god bakra u Cerovsku reku. Rezultati merenja fizičko-hemijskih parametara Cerovo reke, reke Valja Mare i Kriveljske reke prikazani su tabelama 2 i 3.

Tabela 2. Fizičko-hemijske karakteristike otpadnih voda površinskog kopa Cerovo i Cerovo reke [10]

Merno mesto	Vreme uzorkovanja	pH	Cu ²⁺ mg/dm ³	Zn ²⁺ mg/dm ³	Ni ²⁺ mg/dm ³	As mg/dm ³	Fe mg/dm ³	BPK mg/dm ³ O ₂	HPK mg/dm ³ O ₂
1.	9.09.2009.	7,60	0,262	<0,049	< 0,050	0,001	0,986	2,6	2,35
	25.03.2010.	8,21	0,037	< 0,049	< 0,005	0,001	0,795	0,5	1,82
2.	9.09.2009.	3,67	1197,500	66,150	1,560	0,004	15,216	/	7,78
	25.03.2010	4,02	514,600	21,000	0,576	< 0,001	4,411	/	14,89
3.	9.09.2009.	3,65	1269,600	39,920	0,575	0,001	0,042	/	4,90
	25.03.2010	3,89	1928,000	61,150	0,600	< 0,001	2,470	/	12,16
4.	9.09.2009.	6,54	8, 783	0,366	< 0,005	0,002	1,201	1,1	1,28
	25.03.2010	7,01	10, 410	0,463	< 0,005	< 0,001	0,416	2,5	1,98
MDK	/	6-9	0,100	1,000	0,100	0,05	1,000	< 7	< 20

1 - Cerovo reka pre površinskog kopa Cerovo; 2 - Slivne vode odlagališta jalovine (Cerovo reka I); 3 - Slivne vode odlagališta jalovine (Cerovo reka II); 4 - Cerovo reka posle uliva voda Površinskog kopa Cerovo

Tabela 3. Fizičko-hemijske karakteristike reke Valja Mare i Kriveljske reke [10]

Merno mesto	Vreme uzorkovanja	pH	Cu ²⁺ mg/dm ³	Zn ²⁺ mg/dm ³	Ni ²⁺ mg/dm ³	As mg/dm ³	Fe mg/dm ³	BPK mg/dm ³ O ₂	HPK mg/dm ³ O ₂
5	9.09.2009.	7,24	0,046	< 0,049	< 0,005	0,004	0,270	2,4	2,05
	25.03.2010.	7,24	0,228	< 0,049	< 0,005	0,002	0,333	3,4	2,81
6	25.03.2010	4,22	338,200	16,740	0,220	0,001	2,043	3,2	16,11
7	9.09.2009.	7,58	0,338	< 0,049	< 0,005	0,003	0,158	2,5	1,50
	25.03.2010	6,77	2,788	0,126	< 0,005	0,002	0,635	3,3	2,20
8	9.09.2009.	7,69	0,190	< 0,049	< 0,005	0,002	0,174	1,2	1,58
	25.03.2010	7,07	0,470	< 0,049	< 0,005	0,002	0,430	2,20	2,20
MDK	/	6-9	0,100	1,000	0,100	0,050	1,000	< 7	< 20

5 - Reka Valja Mare pre ekološke akumulacije; 6 - Otpadne vode „ekološke akumulacije“; 7 - Reka Valja Mare posle ekološke akumulacije; 8 - Kriveljska reka posle spajanja reka Valja Mare i Cerovo reke

Na Površinskom kopu Cerovo su odložene značajne količine rude iz dosadašnje eksploatacije. U prvoj fazi rada rudnika od 1992. do 2002. godine, ukupna količina odložene raskrivke iznosila je oko $23 \cdot 10^6$ t, sa sadržajem bakra oko 0,2%. Smatra se da je oko 50% od toga bio oksidni, odnosno karbonatni – lako lužljiv bakar. Deo ovog bakra je tokom vremena već izlužen i sa rudničkim vodama nepovratno izgubljen, a ostatak će se i dalje spontano izluživati. Nastali rastvori tj., rudničke vode će i dalje negativno uticati na površinske vode.

U procesu eksploatacija rude na Površinskom kopu Cerovo nastaju nove količine jalovine i odlagališta, iz kojih će se i dalje spontano izluživati određene količine bakra i gubiti sa rudničkim vodama. Ukoliko bi se na odlagalištu jalovine formiralo lužno polje, uz korišćenje postojećih rudničkih voda za pripremu rastvora za luženje, mogao bi se očekivati povećani sadržaj bakra u njima. Dobijeni bakronosni rastvori bili bi značajan izvor za valorizaciju bakra.

Rešavanje problema rudničkih voda kopa Cerovo, uz iskorišćenja bakra iz njih, je vrlo značajno i sa aspekta tretmana voda koje bi nastajale sa novootvorenim rudnicima (Cerovo – Cementacija 2; Cerovo – Cementacija 3; i dr.).

2.2. Rudnik Veliki Krivelj

Na rudniku Veliki Krivelj glavni izvori rudničkih voda su vode koje nastaju unutar samog kopa, Saraka potok i provirne vode sa brane 1A i 2A flotacijskog jalovišta Veliki Krivelj. Ovi izvori rudničkih voda su različiti po sastavu i zapreminskom protoku i svi direktno utiču na zagađenje Kriveljske reke.

Rudničke vode koje nastaju unutar samog kopa čine atmosferske i drenažne voda koje se sakupljaju na dnu površinskog kopa Veliki Krivelj i permanentno

ispumpavaju direktno u Kriveljsku reku, bez ikakvog prethodnog tretiranja. Radi se o velikim protocima ove vode, koje se mere sa par stotina m^3/h . Sadržaj bakra veoma varira sa vremenom, od nekoliko mg/dm^3 do nekoliko desetina pa i preko stotinu mg/dm^3 . Sadržaj suspendovanih čestica je oko 200–300 mg/dm^3 , a pH vrednost vode je u granicama 3–5. Zbog svog sastava i količina koje se ispumpavaju sa kopa, ove vode imaju velikog uticaja na zagađivanje Kriveljske reke.

Saraka potok je površinska voda, na čiji je kvalitet veliki uticaj imao površinski kop Veliki Krivelj. Sadržaj bakra se kreće u granicama od 6 do 220 mg/dm^3 , suspendovane čestice 120 – 380 mg/dm^3 , dok je pH od 3,9 do 7. Nema podataka o merenju protoka Saraka potoka, pa njihov potencijal nije mogao da se sagleda, već samo da se grubo proceni. Može se pretpostaviti, na osnovu podataka o kvalitetu ove vode iz zadnjih deset godina, da količina bakra nije manja nego što se izbacuje sa vodama Kopa (veća je od 70 t/god).

Provirne vode sa brane 1A i 2A flotacijskog jalovišta Veliki Krivelj nastale su perkolacijom vode kroz brane, sa formiranjem izvora pri dnu. Količina vode nastale na brani 1A se prati i nije velika (71 000 m^3/god). Koncentracija bakra je 400 puta veća od MDK (oko 40 mg/dm^3 , $pH < 5$). Ukupna količina bakra u ovim vodama je manja od 3 t/god. Na brani 3A nastaju veće količine provirnih voda, koje sadrže i višu koncentraciju jona bakra ($\geq 53 mg/dm^3$), a merenjem protoka ove vode istovremeno sa uzimanjem uzoraka za hemijsku analizu, odredila bi se ukupna količina bakra koja se nepovratno gubi sa ovim vodama.

Kvalitet vode Kriveljske reke posle uliva svih otpadnih voda flotacije i površinskog kopa, koji se odnosi na sadržaj jona metala za period od 8 godina, prikazan je u tabeli 4.

Tabela 4. Kvalitet vode Kriveljske reke za period od 2006 – 2013 [10]

Godina ispitivanja	Fe, mg/dm^3	Cu, mg/dm^3	Cd, mg/dm^3	Zn, mg/dm^3	Ni, mg/dm^3	Susp. materije na $105^{\circ}C$, mg/dm^3	pH
2006	2,81	0,376	/	1,487	/	184,00	6
2007	0,20	0,611	/	0,170	0,015	203,75	6,12
2008	1,89	0,810	/	0,360	/	182,50	5,88
2009	24,45	15,700	0,008	0,566	0,037	172,40	5,62
2010	455,40	168,140	0,033	13,040	0,250	250,33	5,78
2011	0,23	2,340	0,035	0,690	0,040	276,75	5,80
2012	18,19	6,620	0,016	0,410	0,041	460,90	7,22
2013	43,85	9,960	0,014	0,420	0,050	236,30	6,36
MDK	1,00	0,100	0,010	1,000	0,100	80	6-9

Iz tabele 4 se može uočiti visok stepen zagađenosti Kriveljske reke teškim metalima kao posledice rudarskih radova u toj oblasti. Može se uočiti njena višegodišnja zagađenost jonima bakra i gvožđa. U poslednje nekoliko godine zagađenost reke jonima metala je izrazito visoka (u 2010-toj godini, za više od tri reda veličine veća od MDK), verovatno kao posledica uliva dela voda iz procesa flotacijske koncentracije u Kriveljsku reku. Pored bakra i gvožđa, povećana je zagađenost i kadmijumom i cinkom. Primetna je i povećana kiselost vode Kriveljske reke kao i značajna koncentracija suspendovanih čestica koje reci daju karakterističnu žutu boju (slika 2h).

Površinski kop Veliki Krivelj će biti i ubuduće značajan proizvođač rude bakra, što znači da će nastajati nove količine rudničkog otpada, a i iz njih će i dalje oticati sa rudničkim vodama velika količina bakra.

Da li treba ove vode, ovakve kakve jesu, i dalje ispuštati u Kriveljsku reku? Prečišćavanjem rudničkih voda smanjila bi se bitno zagađenost Kriveljske reke, valorizovao bi se velikim delom bakar iz rudničkih voda koji je sada glavni zagađivač u njima. Dobila bi se prečišćena voda koja bi mogla da se reciklira u proces rudarenja/flotiranja, što je vrlo značajno, jer će problem upravljanja i snabdevanja vodom (pa i industrijskom) biti sve izraženiji.

2.3 Rudnik Bor

U rudniku Bakra Bor je površinska eksploatacija rude bakra trajala do 1986. godine, a podzemni rudnik u Boru, poznat po nazivu „Jama“, kontinuirano radi od 1902. godine. U okviru Rudnika bakra Bor, postoji vise izvora otpadnih voda, različitih po sastavu i količinama, a za površinska oticanja sa raskrivki rudničke jalovine i voda koja se drenira iz brana flotacijskog jalovišta, ne postoji sistematska kontrola sastava i protoka ovih voda. Voda od drenaže i atmosferskih padavina iz otvorenog kopa Bor se akumulira na dnu kopa i infiltrira u podzemni rudnik Jama, gde se meša sa otpadnim vodama unutar jame. Odatle se voda pumpa i odvodi do akumulacionog bazena za otpadne vode na servisnom oknu Jame. Vode koje otiču po površini raskrivki koje se nalaze jugoistočno od otvorenog kopa Bor se sakupljaju u jezeru Robule, a prethodne analize ovih voda [11] pokazuju da se otpadne vode iz jezera Robule karakterišu vrlo malom vrednošću pH i visokim koncentracijama rastvorenih teških metala (bakar, gvožđe i cink). Može se pretpostaviti da je sastav ovih voda sličan kao i ranijih godina, pri čemu se ne vrši

prethodno prečišćavanje ovih voda, a oticanjem, određene količine vode dospevaju u Borsku reku. S druge strane brda, severoistočno od Robulskog jezera se sada nalazi drugo malo jezero - Oštreljsko jezero. O tom jezeru ne postoje raspoložive informacije (kvalitet vode, dovod i odvod vode, i pravac eventualnog oticanja, itd.)

2.3.1. Jama Bor

Pojedina izvorišta, koja se pojavljuju u rudniku sa jamskim eksploatacijom u Boru, kolektiraju se u samoj jami, da bi se odatle ispumpavale na površini u količini od oko 2 200 000 m³/god. Sama izvorišta u jami nazivaju se “plave vode” i “bele vode” zavisno od toga da li sadrže ili ne sadrže jone bakra. Imajući u vidu količinu ovih voda i činjenicu da sadrže značajnu koncentraciju bakra, deo ovih voda (oko 10%) se tretira u postrojenju Aero-Aqua Inženjering, uz visoko iskorišćenje na bakru ($\geq 90\%$), a deo (oko 20%) se odvodi u Postrojenje za cementaciju. Iskorišćenje na bakru, s obzirom na primenjenu tehnologiju cementacije je manje od 50%. Gotovo 2/3 voda iz Jame ide sada direktno na Flotacijsko jalovište rudnika Veliki Krivelj. Na osnovu ovoga se može zaključiti da se rudničke vode iz Jame nedovoljno i neadekvatno tretiraju, a da se nepoznatu količinu bakra sada nepovratno gubi [10, 11].

3. ŠTA SA RUDNIČKIM VODAMA RBB?

Jasno je da ovakvo, višedecenijsko, stanje nije održivo, zbog sve jačih pritisaka, kako zakonske regulative, tako i međunarodne zajednice, za smanjenjem prekograničnog zagađenja Dunava, Timoka i podzemnih voda teškim metalima i sumpornom kiselinom. Sa jačanjem svesti o zaštiti okoline, ali i pojačanoj potrebi za vodom i racionalnom gazdovanju njome, pritisci će se pojačavati, praćeni odgovarajućim sankcijama. Na drugoj strani, danas se nude napredne tehnologije za prečišćavanje industrijskih i rudničkih voda [12-15], koje su u stanju da nivo polutanata u njima redukuju do koncentracija koje bi omogućilo njihovo ispuštanje u neki vodotok, ili da se, kao tehnička voda, ponovo vrata negde u proces dobijanja bakra. To su različiti membranski i jonoizmenjivački postupci, sve više zastupljeni u svetu, u kombinaciji sa nekim klasičnim tehnologijama. Svi oni imaju svoju primenljivost, svoje domete u prečišćavanju i svoju cenu, a kolika bi ona bila zavisilo bi od strategije prečišćavanja rudničkih voda.

ZAKLJUČAK

Rudničke vode iz Rudnika RTB Bor koje sa sobom nose znatne količine bakra predstavljaju značajan izvor za dobijanje bakra. U prethodnom periodu nedovoljno pažnje i sredstva je posvećeno prečišćavanju rudničkih voda, što je uticalo na zagađenja životne sredine, posebno na pogoršanje kvaliteta površinskih vodotokova. Prečišćavanjem rudničkih voda smanjila bi se bitno zagađenost Kriveljske reke kao i njenih pritoka - Cerove reke i Saraka potoka, a šire i Dunavskog sliva što doprinosi i ispunjavanju naših međunarodnih obaveza. Valorizovao bi se velikim delom bakar iz rudničkih voda koji je, sada glavni zagadivač u njima, a prečišćena rudnička voda bi mogla da se reciklira u proces, što bi uticalo na održivo upravljanje vodenim resursima.

U RTB Bor se već realizuje projekat proširenja površinskog kopa Rudnika bakra Cerovo, a rudarenja na površinskom kopu Veliki Krivelj će se nastaviti još dugi niz godina. Postoji strategija eksploatacije novih rudnih ležišta u oblasti Cerova, pa je neophodno konačno pristupiti i rešavanju problema rudničkih voda iz ovih rudnika, što znači da treba uraditi strategiju upravljanja ovim vodama, njihovo prečišćavanje i smanjenje gubitaka na bakru, a samim tim i smanjenje zagađenja Kriveljske reke.

LITERATURA

- Trumić, M. Ž.; Bogdanović, G. D.; Trumić, M. S.; Antić, D.V. Mining Waste Management – The Case Study of Bor. Proceedings of the International Conference 2013 “Sustainable Landfills and Waste Management”, Novi Sad, Serbia 2013, pp. 26-38.
- Antonijević, M. M.; Dimitrijević, M. D.; Stevanović, Z.O.; Šerbula, S.M.; Bogdanović, G.D. Investigation of the possibility of copper recovery from the flotation tailings by acid leaching. *Journal of Hazardous Materials* **2008**, *158*, 23–34.
- Bogdanović, G.D.; Antonijević, M.M. *Ponašanje i oksidacija haklopirita u vodenj sredini*. Tehnički fakultet u Boru, Bor 2011.
- Valente, T. M.; Gomes, L. C. Occurrence, properties and pollution potential of environmental minerals in acid mine drainage. *Science of the Total Environment* **2009**, *407*, 1135 – 1152.
- Dimitrijević, M. D. Kisele rudničke vode. *Bakar* **2012**, *37 (1)*, 33-44.
- Bogdanovic, G.; Antonijevic, M.; Milanovic, Z.; Šerbula, S.; Milić, S. Analiza stanja rudničkih voda Rudnika bakra Bor, II Simpozijum "Reciklažne tehnologije i održivi razvoj", Soko Banja, Srbija 2007, pp. 269-275.
- Bode, A.; Zoga, P.; Xhulaj, D.; Xhulaj, S. Mining residues around lake Ohrid. *Journal of Mining and Metallurgy* **2010**, *46 A(1)*, 23 – 31.
- Bogdanović, G.; Trumić, M.; Trumić, M.; Antić, D.V. Upravljanje otpadom iz rudarstva- nastanak i mogućnost prerade. *Reciklaža i održivi razvoj* **2011**, *4 (1)*, 37-43.
- Stanković, V.; Žikić, M.; Bogdanović, G.; Milanović, Z.; Marjanović, T. Rudničke vode iz Rudnika RTB Bor –potencijal za dobijanje bakra ili zagađivač površinskih voda, Zbornik radova, III Simpozijum sa međunarodnim učešćem Rudarstvo, Zlatibor 2012, pp. 339-337.
- Podaci o analizi voda; Arhiv RTB Bor.
- ERM, Fideco d.o.o. i CSA Group LTD, “Procena štete u životnoj sredini nastale od nekadašnjih radova RTB Bor”, Beograd, 2005
- Stanković, V.; Božić, D.; Gorgievski, M.; Bogdanović, G. Heavy metal ions adsorption from mine waters by sawdust. *Chemical Industry and Chemical Engineering* **2009**, *15 (4)*, 237–249.
- Miličević, S.; Daković, A.; Milošević, V.; Kragović, M.; Matijašević, S. Sorpcija bakra na prirodnom i modifikovanom zeolitu. *Reciklaža i održivi razvoj* **2009**, *2 (1)*, 19-25.
- Vidojković, V.; Branković, A.; Boljanac, T.; Martinović, S.; Vlahović, M. Valorizacija bakra iz jamskih i drugih otpadnih voda cementacijom na aluminijumu. *Reciklaža i održivi razvoj* **2008**, *1 (1)*, 28-34.
- Csefalvay, E.; Pauer, V.; Mizsey, P. Recovery of copper from process waters by nanofiltration and reverse osmosis. *Desalination* **2009**, *240*, 132-142.