

# Utjecaj crvenog mulja i drugih ostataka iz proizvodnje aluminija na okoliš

---

**Bezic, Dolores**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:350703>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-29**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET**  
**BIOLOŠKI ODSJEK**

**UTJECAJ CRVENOG MULJA I DRUGIH OSTATAKA IZ**  
**PROIZVODNJE ALUMINIJA NA OKOLIŠ**  
**ENVIRONMENTAL IMPACT OF THE RED MUD AND OTHER**  
**RESIDUES FROM THE ALUMINA PRODUCTION**  
**SEMINARSKI RAD**

Dolores Bezik

Preddiplomski studij Znanosti o okolišu

(Undergraduate Study of Environmental Sciences)

Mentorica: doc. dr. sc. Kristina Pikelj

Zagreb, 2019.

*Iskreno se zahvaljujem svojoj mentorici doc. dr. sc. Kristini Pičelj na pokazanom strpljenju, pruženoj pomoći, svim smjernicama, svakoj lijepoj riječi i što mi je omogućila prevesti moju ideju u djelo.*

*Hvala mojoj obitelji na bezuvjetnoj podršci.*

*Hvala od srca mojem zaručniku Domagoju Gabriću što je uvijek bio uz mene na svakom koraku.*

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. ŠTO JE CRVENI MULJ I ZAŠTO NASTAJE? .....	1
3. UTJECAJ CRVENOG MULJA I LUŽINE NA OKOLIŠ .....	6
4. MAĐARSKA – AJKA, 2010. godine .....	7
4.1 Povijest tvornice Ajka .....	7
4.2 Karakteristike područja tvornice Ajka i Kolontára .....	7
4.3 Ekološka katastrofa 4.10.2010.godine .....	7
4.4 Sanacija .....	10
5. HRVATSKA – JADRAL – prije i danas.....	12
5.1 Povijest tvornice Jadral .....	12
5.2 Karakteristike područja tvornice Jadral i Obrovca.....	16
5.3 Analiza crvenog mulja iz Obrovca i njegova upotreba .....	17
5.4 Utjecaj crvenog mulja na rijeku Zrmanju i okoliš.....	20
5.5 Sanacija tvornice Jadral.....	25
6. ZAKLJUČAK.....	29
7. LITERATURA .....	31
8. SAŽETAK .....	33
9. SUMMARY.....	33

## 1. UVOD

Sa sve većim razvojem industrije, ali i tehnologije, u 19. i 20. stoljeću, javila se potreba za raznim metalima čija je dostupnost počela utjecati na gospodarstvo država, pa tako metalne rude postaju vrlo važna sirovina. Vrlo cijenjeni metali su oni koji se koriste kao građevni tehnički materijal poput aluminijska, bakra, željeza (čelika), titanija i drugih. S takvom potražnjom, u drugoj polovici 19. stoljeća i cijelom 20. stoljeću, počele su se otvarati brojne tvornice koje se bave preradom metalne rude. Međutim, kako bi dobili čiste tehničke metale, često su potrebni razni procesi prerade rude koji kao nusprodukt ponekad imaju tvari koje su toksične za okoliš. Tako preradom boksita za dobivanje aluminijska kao nusprodukt nastaju velike količine crvenog mulja, otpadne lužine, ali i velike koncentracije teških metala koji predstavljaju potencijalnu opasnost za okoliš i živa bića. Ovi se nusprodukti tretiraju kao otpad i odlažu u bazene pored tvornica manje ili više uspješno, često bez dovoljno svijesti o potencijalnim opasnostima takvog odlaganja. Crveni je mulj tvar visoke lužnatosti koja predstavlja opasnost za područje koje se nalazi oko njegovog mjesta skladištenja, ali i za podzemne vode čime direktno ugrožava vodene tokove, biotu, a na kraju i čovjeka. Ova tvar, poprilično opasna, ako se ne skladišti na odgovarajući način, može imati veliku ulogu u zaštiti okoliša što će biti prikazano u ovom seminarskom radu.

## 2. ŠTO JE CRVENI MULJ I ZAŠTO NASTAJE?

Aluminij (Al) je 3. najzastupljeniji element u Zemljinoj kori, nakon kisika i silicija, te se u prirodi ne javlja u čistom stanju, već je vezan s drugim metalima u aluminijske spojeve (URL1, URL2). Zbog toga, proizvodnja aluminijska nije jednostavan proces i zahtijeva velike količine električne energije (URL1). Aluminijski spojevi koji se najčešće koriste za izdvajanje aluminijska su boksiti, zbog njihovog velikog udjela aluminijskog (III) oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (najmanje 50%) i malog udjela silicijevog (IV) oksida ( $\text{SiO}_2$ ) (3-10%) (URL3). Ovo je bitno zato što veliki udio bilo kojih silicijevih spojeva uzrokuje značajan gubitak aluminijska i natrijske lužine tijekom postupka izdvajanja (URL3), što nije ekonomski isplativo. Aluminij ima jako dobra mehanička, kemijska i električna svojstva (URL2). Zbog toga ima široku primjenu u zrakoplovstvu, autoindustriji, elektrotehnici, kemijskoj industriji, građevinarstvu, kućanstvu, prehrambenoj industriji, aluminotermiji, a čak služi u gradnji dalekovoda, sastojak je boja, eksploziva i raketnog goriva (URL2).

Boksit (franc. *bauxite*) je dobio ime prema nalazištu Les Baux-de-Provence u Francuskoj i to je smjesa minerala bogatih aluminijem (gibsit –  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , bemit –  $\text{AlO}(\text{OH})$ , dijaspor -  $\text{HAlO}_2$ ), a od primjesa su najzastupljeniji  $\text{SiO}_2$  i željezov (III) oksid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (URL3, URL4). Primarno korišten za dobivanje aluminija (>90%), boksit je sirovina i u proizvodnji abraziva, cementa, kemijskih i vatrostalnih proizvoda (URL4).

S obzirom na nastanak, razlikuju se lateritni i krški boksiti (Cvetko Tešović, 2019). Lateritni ili silikatni boksiti vezani su uz eruptivne i metamorfne stijene, dok se krški boksiti nalaze i nastaju na okršenim sedimentnim stijenama (Cvetko Tešović, 2019). U Hrvatskoj, ishodišni materijal za postanak boksita potječe iz različitih izvora: u trijasu je boksit produkt trošenja srednjotrijaskih lapora i piroklastita; u gornjoj juri boksit nastaje od netopljivog ostatka karbonatnih stijena i/ili eolskog materijala; u paleogenu boksit nastaje od netopljivog ostatka karbonatnih stijena i eolskog materijala terigenog i vulkanskog podrijetla, dok u neogenu (miocen) boksit nastaje od eolskog materijala vulkanskog i terigenog podrijetla kao i pretaloživanjem paleogenskih boksita (Cvetko Tešović, 2019). Boksite općenito nalazimo na regresivno-transgresivnim kontaktima starijih karbonatnih stijena i naslaga iznad njih (Cvetko Tešović, 2019).

Na području Hrvatske boksit se otkopavao već od početka 16. stoljeća u dolini Mirne, a kao aluminijeva ruda od 1914. godine (URL4). Ležišta boksita u Hrvatskoj razlikuju se po starosti (gornji trijas – neogen) i nalaze se u priobalnom području od Istre do Imotskog (URL4). Iako se u Lici nalaze velika nalazišta boksita na vapnencima trijasko starosti uz manje pojave na Kordunu, ona se ne koriste jer su bogata kaolinitom (Cvetko Tešović, 2019, URL4), mineralom glina koji ima visok udio  $\text{SiO}_2$  (>40%) zbog čega se ne isplati izdvajati aluminij. Hrvatska je postala siromašna ležištima kvalitetnog boksita – u Istri je do danas otkopano 11,5 milijuna tona boksita na gornjojurskim (zapadna Istra) i gornjokrednim vapnencima (Istra, sjevernojadranski otoci i središnja Dalmacija) čija su ležišta nastala zapunjavanjem vrtača (Cvetko Tešović, 2019, URL4). Uz to, na području Obrovca, Drniša, Sinja i Imotskog, do danas je otkopano 16 milijuna tona boksita miocenske starosti (URL4) te su time gotovo pa iscrpljene sve moguće zalihe.

Proizvodnja aluminija sastoji se od 3 faze: 1. je faza iskopavanje boksita bogatih aluminijem iz tla; 2. je prerada boksita u aluminijev oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) i glinicu; i 3. je faza izdvajanje čistog aluminija iz glinice postupkom elektrolize (URL1). Kako bi se boksit preradio u glinicu, potrebno ga je očistiti od spomenutih primjesa. Za ove se potrebe primjenjuje više različitih postupaka od kojih je najčešći i najpoznatiji mokri postupak po Bayeru otkriven 1889. godine (URL3) koji se koristi u otprilike 90% tvornica aluminija u svijetu (URL1).

Postupak je vrlo efikasan i rezultira velikim količinama čistog aluminijskog oksida, ali pogodan je samo za boksite visoke kvalitete ( $>50\%$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  i vrlo mali udio silicija) (URL1). Mokri postupak po Bayeru podrazumijeva reakciju boksita i koncentrirane natrijeve lužine ( $\text{NaOH}$ ) pri visokim temperaturama ( $160\text{-}170^\circ\text{C}$ ) i visokom tlaku ( $5\text{-}7\text{ atm}$ ) kroz  $6\text{-}8$  sati (URL1, URL3). Jednom kada se temperatura spusti, dolazi do kristalizacije aluminijskog hidroksida i do taloženja ostalih elemenata na dno spremnika u obliku netopljivog otpada, poznatog kao „crveni mulj“ koji se potom uklanja (URL1, URL3). Kristalizirani se aluminijski hidroksid potom uklanja iz preostale otopine filtracijom, ispiru se s vodom i suši pod visokom temperaturom kako bi se uklonila voda čime nastaje glinica ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (URL1). Dalje se, postupkom elektrolize u elektrolitičkim kupkama s grafitnim elektrodama, iz nastale glinice na anodi oslobađa ugljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ), a na katodi izlučuje aluminij koji pada na dno kupke (URL3). Problem je ovog postupka što nastaju velike količine boksitnog otpada (crveni mulj i otpadna lužina) visoke lužnatosti što predstavlja ozbiljnu prijetnju za okoliš. Po toni proizvedene glinice ovim postupkom nastaje oko  $1,35$  tona crvenog mulja (Oreščanin i sur., 2017). Crveni je mulj gusta masa crveno-smeđe boje čiji je izgled prikazan na **Slici 1.** i to je zapravo agregat željezovih oksida (hematita) od kojih potječe crvena boja (Obhodaš i sur., 2012), ali i kvarca, natrijevih alumosilikata, kalcijevog karbonata/aluminata, titanijevog dioksida i natrijevog hidroksida ( $\text{pH } 10\text{-}12$ ) (Mayes i sur., 2011). Ovakav sastav i visok  $\text{pH}$  čine crveni mulj relativno toksičnim i rizičnim za okoliš (Burai i sur., 2011).



**Slika 1.** Izgled crvenog mulja. Izvor: URL5.

U Hrvatskoj, prema Pravilniku o katalogu otpada kojeg je izdalo Ministarstvo zaštite okoliša i prirode, izdanje: NN 90/2015, crveni mulj i otpadna lužina imaju oznaku V što znači da sadrže opasne tvari i mogu imati opasna svojstva u određenim uvjetima (URL5a).

Procijenjeno je da se godišnje u svijetu proizvede oko 120 milijuna tona takvog boksitnog otpada (Kinnarinen i sur., 2015). Čest način odlaganja ovog visoko lužnatog otpada je njegovo ispuštanje u spremnike u kojima se polako suši s vremenom (Burai i sur., 2011). Ovakvi su spremnici tj. bazeni izgrađeni u pomalo izoliranom području i odlikuju se čvrstoćom i nepropusnošću kako ne bi došlo do izlivanja i potencijalnog zagađenja podzemnih voda (URL1). Ovakva se područja mogu vratiti u originalno stanje jednom kad budu gotovo do vrha ispunjena otpadom, jer tada dolazi do zatrpavanja pijeskom, pepelom ili zemljom i do sadnje određenih biljaka (URL1) no, ovaj proces sekundarne sukcesije može potrajati godinama.

Sanacija crvenog mulja podrazumijeva uklanjanje teških metala koje organizmi mogu unijeti u organizam, dok se otpadna lužina sanira neutralizacijom s klorovodičnom kiselinom do  $\text{pH} = 8$  i potom se također uklanjaju teški metali postupkom koagulacije/flokulacije no, za to su potrebne velike količine kiseline, koagulanata i ostalih pomoćnih tvari što je dosta skupo (Oreščanin i sur., 2001). Tako bi za sanaciju otpada iz tvornice Jadral u Obrovcu o kojoj će biti riječi, troškovi za dva bazena iznosili oko 450 milijuna kuna, a rezultat takve sanacije bilo bi 30 000 tona otpadnog mulja koji bi zbog velikog udjela teških metala bio klasificiran kao tehnološki opasan otpad, a koji uvjetuje poseban postupak sanacije (Samokovlija Dragičević, 2004), čime se konačni trošak znatno povećava.

Jedan od prijedloga sanacije otpadne lužine je korištenje *Spiruline* spp. - cijanobakterije koja živi u jezerima s visokim  $\text{pH}$  (10-10,3) i kojoj su potrebne velike koncentracije karbonata i bikarbonata (Obhodaš i sur., 2012). Međutim, za ovakav je proces, na samo 2 hektara zahvaćenog područja, trošak uzgoja *Spiruline* oko 33 000\$, uz laboratorijsku opremu vrijednosti 24 000\$ i godišnji trošak izvedbe od 140 000\$ (Obhodaš i sur., 2012) što baš i nije izvedivo svakoj državi.

Kao suprotnost skupim načinima sanacije, postoji jedan jednostavan, ekonomski isplativ postupak koji kao krajnji postignut cilj ima smanjenje toksičnosti za okoliš. Suradnica instituta *Ruđer Bošković*, dr. sc. Višnja Oreščanin, dipl.biol., godinama je istraživala crveni mulj i njegovu moguću primjenu i došla do zaključka da crveni mulj i otpadna lužina zajedno mogu poslužiti kao sirovina za proizvodnju želatinoznog koagulanta (Samokovlija Dragičević, 2004). On se dalje može upotrebljavati kao sredstvo za pročišćavanje otpadnih voda iz raznih industrija i prališta brodova, postupkom koagulacije/flokulacije (Samokovlija Dragičević, 2004). Ova odlična ideja iskorištavanja otpada poput crvenog mulja potaknula je neke ljude u Australiji da naprave industrijski uređaj za pročišćavanje otpadnih voda koji kao koagulant upotrebljava aktivirani crveni mulj (Samokovlija Dragičević, 2004).



Istraživanjem iz 2002. godine pokazano je da se crveni mulj, u svom originalnom obliku, može uspješno koristiti za uklanjanje teških metala, radionuklida, organskih i anorganskih tvari iz vodenih otopina (Oreščanin i sur., 2002). Uz to, ako se crveni mulj tretira s razrijeđenom sumpornom kiselinom, on postaje aktivan crveni mulj i kao takav se može neutralizirati s vlastitom otpadnom lužinom (Oreščanin i sur., 2001) i iz nje apsorbirati teške metale (Oreščanin i sur., 2002). Nakon uklanjanja lužine na prethodno opisan način, preostali crveni mulj postaje želatinozan i kao takav može biti korišten za apsorpciju teških metala iz otpadnih voda iz prališta brodova. Otpadne vode imaju visok udio željezovih, aluminijevih i manganovih oksida, ali i minerala glina, karbonata i silicijevog dioksida koji dozvoljavaju fizičku sorpciju metala zbog vlastitih posebnih svojstava i nabijenosti molekula (Oreščanin i sur., 2002). Nakon tretmana crvenim muljem, otpadne vode više nisu opasne za okoliš i mogu biti direktno u nj ispuštene (Oreščanin i sur., 2002). Na prikazan bi se način potpuno sanirala otpadna lužina i crveni mulj bez ikakvih dodatnih troškova te bi otpad iz jedne industrije bio uspješno iskorišten za sanaciju otpada iz drugih industrija (Samokovlija Dragičević, 2004).

Crveni mulj, zahvaljujući svom polimineralnom sastavu, može ukloniti elemente u kationskom (Cu, Zn, Pb, Ni) i anionskom (V (V), Cr (VI), Se (IV), As (III), As (V)) stanju u jednom koraku uz malu varijaciju pH vrijednosti (Oreščanin i sur., 2001). Za usporedbu, u tu svrhu često korištene aluminijeve i željezove soli uzrokuju značajan pad pH vrijednosti zbog hidrolize  $Fe^{3+}$  i  $Al^{3+}$  iona i zbog toga uspješan proces uklanjanja teških metala ne može biti izveden bez dodataka lužina i pufera što kao posljedicu ima otpadni mulj čiji je volumen 20x veći nego onaj prilikom korištenja crvenog mulja (Oreščanin i sur., 2001). Dakle, crveni mulj ima ulogu jeftinog apsorbena koji neiskorišten godinama stoji u bazenima u velikim količinama i time nadmašuje skupe komercijalne apsorbera koji se prethodno moraju proizvesti i za čije su uspješno djelovanje potrebne brojne pomoćne tvari.

Uz navedenu ulogu, postoje neki slučajevi gdje je crveni mulj korišten kao „čuvar zemlje“ jer sprječava gubitak nutrijenata iz pjeskovitih tla i smanjuje dostupnost teških metala (zbog toga korišten i prilikom kompostiranja) (Kutle i sur., 2003). Crveni se mulj, osim kao pročišćivač, može iskoristiti kao vrijedna sekundarna sirovina za dobivanje titana, vanadija, cirkonija, galija i elemenata rijetkih zemalja (REE - itrija, skandija, lantanida), ali i kao jeftini katalizator umjesto skupih komercijalnih i kao sirovina u proizvodnji cementa, pigmenata, plastike i keramike (Kutle i sur., 2003, Obhodaš i sur., 2012, Samokovlija Dragičević, 2004).

### 3. UTJECAJ CRVENOG MULJA I LUŽINE NA OKOLIŠ

S obzirom na potencijalnu opasnost za okoliš, vrlo je bitno uzeti u obzir sve okolišne faktore prilikom planiranja mjesta izgradnje tvornice prerade metalne rude, kao i njezinih otpadnih bazena. Naime, ako se radi o krškom terenu, gdje je teren propustan i porozan, bilo kakvim izlivanjem crveni mulj ili lužina mogu vrlo lako i brzo doći do okolnih rijeka, koje predstavljaju izvor pitke vode za to područje i uzrokovati zagađenje.

Otpadna lužina ima visoku pH vrijednost (9-13) i visoku koncentraciju elemenata poput arsena (As), vanadija (V), kroma (Cr), bakra (Cu), kobalta (Co) i selenija (Se) koje čak do 30x premašuju granične vrijednosti propisane za otpadne vode koje se smiju ispuštati u prirodni prijamnik (Mayes i sur., 2011, Samokovlija Dragičević, 2004). Zbog ovih razloga, otpadna lužina predstavlja izvor velike toksičnosti za cijeli vodeni ekosustav (Mayes i sur., 2011) i treba joj posvetiti više pažnje. Iako i crveni mulj može izazvati velike štete, ako se, npr. odjednom izlije iz spremnika zbog puknuća zida kao što se dogodilo u Kolontáru u Mađarskoj, 2010. godine (Obhođaš i sur., 2012).

Dodatni element osim reljefa koji može stvarati probleme je vjetar. Ako se tvornica izgradi u području gdje često puše jak i silovit vjetar, kapljice lužine i čestice crvenog mulja mogu isto tako vrlo lako doći do okolnih rijeka i uzrokovati zagađenje. Idealan primjer ovakvog dvostrukog efekta reljefa i klimatskih uvjeta je tvornica glinice Jadral u Obrovcu. U neposrednoj blizini ove tvornice nalazi se rijeka Zrmanja čiji krški estuarij predstavlja životno područje i mjesto parenja velikog broja vodenih vrsta (Fiket i sur., 2018a). U estuarijima dolazi do miješanja slane i slatke vode kao i do nakupljanja riječnog materijala koji ponekad sa sobom nosi i različite zagađivače i onečišćivače koji su produkt antropogenih aktivnosti (Fiket i sur., 2018a). Dovoljna je kombinacija osjetljivog karaktera rijeke i negativnog utjecaja tvornice, s čijeg područja otpadni materijal dospijeva u rijeku, da bi došlo do remećenja prirodne ravnoteže koja se teško može ponovno uspostaviti. Bilo kakve značajne promjene u kvaliteti vode mogu imati veliki utjecaj na cijeli ekosustav, jer može doći do pomora živih bića i zagađenja pitke vode, čime je direktno ugrožen čovjek.

Osim opasnosti za vodene tokove i živa bića, lužina i crveni mulj svojim sastavom utječu na okolno bilje i tlo, pa tako vegetacija postaje oskudna i okolno područje poprima izgled surovog, ogoljenog, crvenog, nenastanljivog prostora.

## 4. MAĐARSKA – AJKA, 2010. godine

### 4.1 Povijest tvornice Ajka

Ajka je grad na zapadu Mađarske koji spada u Veszprém županiju i smješten je zapadno od jezera Balaton (URL6). Ajka je bila selo u kojem su se stanovnici bavili poljoprivredom sve do druge polovice 19. stoljeća kad se, otvorenjem rudnika lignita, selo počelo mijenjati u industrijsko naselje (URL6). Daljnji razvoj naselja uvjetuje otvaranje termoelektrane 1910. godine, a još je veći poticaj predstavljalo otvaranje rudnika boksita i tvornice aluminija Ajka 30-ih godina 20. stoljeća (URL6), što je dovelo do dolaska novih stanovnika u potrazi za poslom čime Ajka sve više raste. Tvornica Ajka bila je pod vlasništvom privatne tvrtke MAL Mađarski aluminij od 1995. do kobnog listopada 2010. godine, nakon čega je direktor uhićen, tvrtka je uzeta u državno vlasništvo, prestala s radom i rasprodana je većina njene imovine (URL9).

Tvornica aluminija Ajka tijekom godina rada nakupila je preko 30 milijuna m<sup>3</sup> crvenog mulja zbog čega je izgrađeno 10 spremnika između grada Ajka i sela Kolontár, a zidovi spremnika su ojačani mješavinom troske i pepela iz obližnje termoelektrane (Burai i sur., 2011).

### 4.2 Karakteristike područja tvornice Ajka i Kolontára

Mađarska ima umjerenu klimu s vrućim ljetima, relativno malom vlažnošću i čestim pljuskovima te hladnim, snježnim zimama (URL7). Najveći dio Mađarske pokrivaju ravnice što se ponekad naziva „Karpatski bazen“, a cijelu zemlju na skoro dva jednaka područja dijeli rijeka Dunav (URL8). Druge veće rijeke su Drava i Tisa, a na zapadu se nalazi veliko jezero Balaton (URL8). Tvornica Ajka smještena je u brdovitom Bakonyu (URL6), dok su spremnici crvenog mulja izgrađeni na relativno ravnom terenu (Burai i sur., 2011).

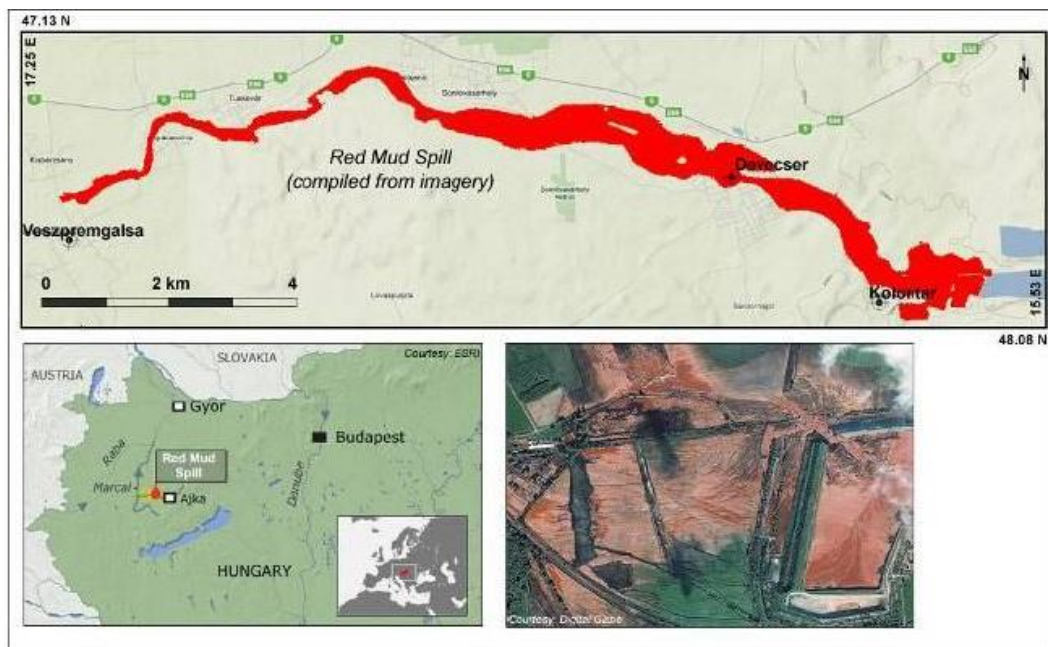
### 4.3 Ekološka katastrofa 4.10.2010.godine

U Mađarskoj se dogodilo jedno od najvećih izlivanja tvorničkog otpada u Europi (Burai i sur., 2011). Naime, uslijed poprilično kišnog ljeta kako u Mađarskoj tako i u ostatku Europe, 4. listopada 2010. godine došlo je do puknuća zaštitnog zida spremnika broj 10 što je vidljivo na **Slici 2.**, jer se u potpunosti ispunio mješavinom vode i crvenog mulja. Ovim se događajem izlilo gotovo milijun m<sup>3</sup> crvenog mulja u valu dubine 1-2 metra čime je poplavljeno obližnje selo Kolontár kao i grad Devecser (URL10).



Slika 2. Puknuće zaštitnog zida spremnika 10 (označeno crvenom elipsom). Prilagođeno prema URL4.

Ovako velika količina mulja posebnog viskoziteta, visoke lužnatosti ( $\text{pH} > 12$ ), kompliciranog toka i brzog širenja što je prikazano na Slici 3. dovela je do ekološke katastrofe te je bila nužna brza reakcija znanstvenika i stručnjaka kako bi se procijenila šteta i započela sanacija (Burai i sur., 2011).



Slika 3. Lokacija i širenje poplave crvenog mulja. Izvor: Burai i sur., 2011.

Mađarska je akademija za znanost vodila procjenu i istraživanje ove ekološke katastrofe te je početni cilj bio utvrditi prostorne granice izlivanja crvenog mulja, kao i sve moguće efekte zagađenja na okoliš (Burai i sur., 2011). Za ove su potrebe korištena daljinska istraživanja u obliku spektroskopskih, hiperspektralnih i infracrvenih snimanja (Burai i sur., 2011) te je procijenjeno da je zahvaćeno područje veličine oko 4000 hektara (URL10). Digitalnim su slikama visoke rezolucije zabilježeni primarni efekti ove katastrofe, pukotine zida spremnika 10 uočene su vizualno, a vlažna su područja utvrđena pomoću infracrvenog snimanja (Burai i sur., 2011). Sve su snimke uzete i obrađene u roku jednog dana, što je iznimno važno za brzu procjenu i početak sanacije. Ovo je izlivanje stiglo i do Dunava i to nakon 3 dana, 7. listopada 2010. godine (URL10).

Analizom izlivenog crvenog mulja zabilježene su povišene koncentracije elemenata u tragovima (As, Cr, V), ali su oni slabo topljivi i zbog svoje su visoke sorpcije uglavnom vezani u sedimentu za titanijeve/manganove/željezove (Ti/Mn/Fe) okside i hidrokside, čime imaju ograničenu toksičnost, potencijalnu pokretljivost u okolišu i nisu biodostupni (Mayes i sur., 2011, Obhodaš i sur., 2012, URL10). Zbog ovakvog je načina vezanja teških metala, crveni mulj ponekad korišten u zagađenim tlima u svijetu kako bi se smanjio unos teških metala u biljke (Obhodaš i sur., 2012).

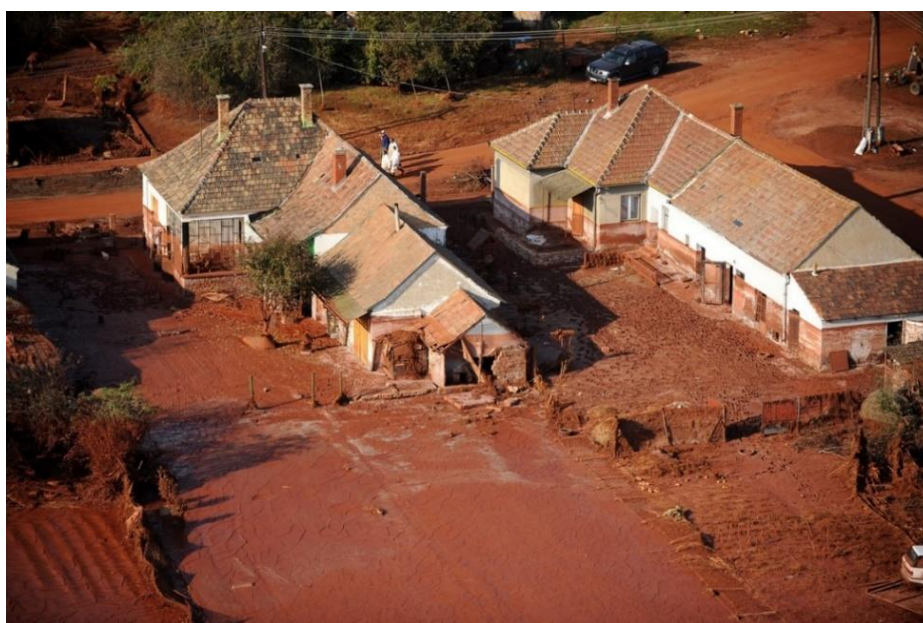
Iako su ovakve koncentracije čak do 7x veće nego u nezagađenom tlu, Mađarska je akademija za znanost izjavila da ipak ne predstavljaju opasnost za okoliš (URL10) zbog opisanih razloga. Najveća je šteta zapravo posljedica visoke pH vrijednosti jer je izazvala teške kemijske opekline ljudi i životinja, kao i pomor živih bića u zagađenom tlu i rijekama (URL10). No, vremenom je došlo do razrjeđivanja i pojačane karbonizacije natrijeve lužine s ugljikovim dioksidom iz zraka, čime se smanjila pH vrijednost crvenog mulja prisutnog u okolišu (URL10).

Spektroskopskim je snimanjem ustanovljeno da crveni mulj apsorbira u plavom i zelenom spektru (480-570 nm), a najveća je refleksija u crvenom spektru (650-720 nm). Zahvaljujući tome, bilo je moguće izračunati indeks sloja crvenog mulja (RMLI) pomoću hiperspektralnih vrpca (549nm, 682 nm) i poznatog spektra korištenjem jednadžbe (1). Indeks sloja zapravo označava dubinu sloja koja je u ovom slučaju bila 0-20 cm (Burai i sur., 2011), te je poznata dubina oteklog crvenog mulja vrlo važna za proces sanacije.

$$RMLI = (RED_{682nm} - GREEN_{549nm}) / (RED_{682nm} + GREEN_{549nm}) \quad (1)$$

Problem je ovih daljinskih istraživanja ponegdje lažno pozitivan rezultat, jer je kratkotrajna vegetacija ometala signal snimanja, no ovo je riješeno korištenjem slika čime su se mogla razlikovati područja poplivena crvenim muljem i ona koja to nisu (Burai i sur., 2011). Ovaj je postupak znatno olakšao potrebnu neutralizaciju i čišćenje.

Ova je ekološka katastrofa dovela do izlivanja oko 1 000 000 m<sup>3</sup> lužnatog crvenog mulja čiji je val poplavio ulice sela Kolontár, a u Devecseru je pomicao aute i kombije (URL10). Poginulo je 10, a ozlijeđeno oko 150 ljudi uz zabilježene velike štete. **Slika 4.** prikazuje neke od razmjera katastrofe u selu Kolontár zahvaćenom poplavom.



**Slika 4.** Kolontár selo, 12.10.2010., 8 dana nakon poplave crvenim muljem. Izvor: URL11.

#### 4.4 Sanacija

Uz procjenu zahvaćenog područja, bilo je vrlo bitno utvrditi i dubinu sloja crvenog mulja (Burai i sur., 2011) za proces sanacije. Ubrzo nakon izlivanja, javio se strah od zagađenja vodenih tokova, jer rijeka Torna protječe zagađenim područjem i dalje se povezuje s rijekom Marcal, Rábom i Dunavom (URL10). Zbog ovog su razloga, interventni radnici dodavali tone gipsa u Tornu kako bi se vezao crveni mulj čime bi se zaustavio njegov tok nizvodno (URL10). Uz to je dodavana i kiselina te je pH vrijednost smanjena s početnih 13 na ispod 10 (Burai i sur., 2011). S obzirom na volumen oteklog crvenog mulja koji je stigao do rijeka, veličinu čestica crvenog mulja koja je  $<10\mu\text{m}$  i relativno malenog gradijenta rijeka (0,93 m/km) može se zaključiti da će postupno doći do razrjeđenja i raspršenja preostalog zagađivača u sedimentu (Mayes i sur., 2011).

Dan nakon nesreće, Ministarstvo zaštite okoliša naredilo je prestanak rada tvornice Ajka i obnovu zaštitnog zida, no predsjednik je MAL-a izjavio da će tvornica dalje raditi nakon par dana stanke (URL10). Prvotno je procijenjeno da će sanacija trajati godinu dana i koštati više desetaka milijuna dolara (URL10). Direktor tvrtke MAL kao i 14 drugih zaposlenika bivaju uhićeni 11. listopada 2010. godine za nemarnost, kršenje zakona o odlaganju i zagađenje okoliša, no oslobođeni su svih optužnica u siječnju 2016. godine (URL10). Nova je brana sagrađena do 12. listopada 2010. godine čime su zadržane preostale količine crvenog mulja (URL10). Na **Slici 5.** prikazano je stanje ovog područja u različitim vremenskim razdobljima pomoću satelitskih snimaka te možemo uočiti da je ovaj spremnik crvenog mulja zatvoren i obrastao, ali se i dalje vidi utjecaj katastrofe na okoliš u obliku ogoljelog i crvenkastog terena čak 8 godina poslije.



**Slika 5.** Satelitske snimke područja tvornice Ajka - 4 mjeseca prije, 3 dana poslije i 8 godina nakon nesreće.  
Izvor: Google Earth Pro.

Sadržaj ovih otpadnih spremnika, tj. bazena, istovjetan je onom iz tvornice Jadral kraj Obrovca u Hrvatskoj. Razlika je u tome što su bazeni kraj Obrovca građeni s debelim betonskim dnom kojeg čak niti ratno razdoblje nije moglo uništiti i razina bazena je 8 metara ispod površine tla (URL12).

Oko 40 milijuna tona crvenog mulja godišnje bude proizvedeno i skladišteno u svijetu primarno sušenjem, kao i u Ajci, što predstavlja značajan rizik za okoliš i ljude. Znanje, multidisciplinarni pristup i način sanacije stečeni tijekom Kolontár slučaja kao i brza reakcija trebaju biti primjer ljudima u svijetu kako se nositi s nastalom ekološkom katastrofom koju uzrokuje izlivanje crvenog mulja (Burai i sur., 2011).

## 5. HRVATSKA – JADRAL – prije i danas

### 5.1 Povijest tvornice Jadral

Ima i Hrvatska svoju Ajku, ali na sreću, njena je uspavana i ima malen, ali ipak značajan utjecaj na okoliš. Kraj Obrovca, grada u sjevernoj Dalmaciji na obalama rijeke Zrmanje, 1970. je godine, za vrijeme socijalističke Jugoslavije, uz veliko slavlje i vatromet izgrađen veliki kompleks tvornice glinice Jadral (URL12, URL13). No, ova je investicija na kraju bila jedna od najvećih gospodarskih promašaja u Jugoslaviji i zasigurno najveći ekološki promašaj u Hrvatskoj (URL12). Zbog ležišta boksita u okolici koji se iskopavao u malim količinama još od 1960-ih godina, ovaj je prostor imao potencijalnu vrijednost (URL12, URL14). Taj su potencijal pokušali iskoristiti politički motivirani nadležni ljudi te su s tadašnjom Istočnom Njemačkom potpisali ugovor kojim su se obvezali proizvoditi aluminij u Jadralu i Tvornici lakih metala u Šibeniku i otpremati ga u Njemačku, koja je za te usluge unaprijed platila čak 30 milijuna američkih dolara (URL12, URL14).

Ovaj se obrovački kraj nalazi u krškom prostoru Bukovice, gdje nedostaje većih poljoprivrednih područja te se stanovništvo stoljećima primarno bavilo stočarstvom (URL13). No, taj se interes postupno smanjio 1970-ih zbog izgradnje tvornice Jadral, čime je porastao broj stanovnika koji su došli u potrazi za poslom, pa je tako 1961. godine u ovom području živjelo 553 stanovnika, 1971. 1187 stanovnika, a 1981. 1457 stanovnika (URL12, URL15). Ovaj se broj znatno smanjio nakon Domovinskog rata. Danas se većina populacije ovog područja primarno bavi turizmom, uslužnim djelatnostima i proizvodnjom, a samo se 4% bavi poljoprivredom, šumarstvom i ribolovom (Fiket i sur., 2018a).

Možda je izgradnja Jadrala zapravo bila više politička odluka nego ekonomska kako bi se zaposlilo stanovništvo ovog siromašnog kraja, a naposljetku je došlo čak i do porasta broja stanovnika (URL14). Postoje i sumnje da su tadašnji ljudi na vlasti namjerno lažirali izvještaje o količini rude i isplativosti kako bi ipak došlo do izgradnje Jadrala (URL14).

Uz sve ove moguće razloge i sumnje, tvornica je izgrađena na velikom platou podno Velebita površine 5 hektara i počela je s radom 1978. godine (Samokovlija Dragičević, 2004, Fiket i sur., 2016). Tvornica Jadral bila je podijeljena u 3 tehnološke cjeline: energana, crveni i bijeli blok, te je na **Slikama 6. i 7.** prikazan nekadašnji izgled cijelog postrojenja tvornice Jadral s poznatim dimnjakom, simbolom propale investicije koji je srušen 2008. godine, (Samokovlija Dragičević, 2004) kao i izgled ovog područja danas.





**Slika 6.** Cijelo postrojenje tvornice Jadral s poznatim dimnjakom (označen narančastom elipsom). Izvor: URL14.



**Slika 7.** Ruševine i pustoš kompleksa Jadral (narančastom elipsom označen nekadašnji smještaj dimnjaka), 24.8.2019.

Uz tvorničko postrojenje s južne strane državne ceste D54 (Maslenica – Zaton Obrovački), izgrađena su i dva bazena za crveni mulj i otpadnu lužinu sa sjeverne strane ceste D54 i to veći i manji, međusobno odvojeni branom od 3m koji su vidljivi na **Slici 8.** (URL14). Veći bazen je volumena  $1,58 \times 10^6 \text{ m}^3$  čije su  $2/3$  ispunjene crvenim muljem prekrivenog lužinom, a  $1/3$  čini osušeni crveni mulj (Oreščanin i sur., 2001). Manji bazen koji je ispunjen gotovo samo s otpadnom lužinom, ima volumen  $0,75 \times 10^6 \text{ m}^3$  (Oreščanin i sur., 2001).



**Slika 8.** Bazeni s crvenim muljem (smjer širenja čestica označen crvenim strelicama) i otpadnom lužinom tvornice Jadral (označena crnom elipsom) u blizini rijeke Zrmanje (označena plavom elipsom). Prilagođeno prema URL3.

Ovi su bazeni izgrađeni u poroznom krškom kraju. Glavni hidrološki element ovog područja je rijeka Zrmanja koja protječe kroz krški okoliš i predstavlja glavni izvor pitke vode cijelog drenažnog područja (Fiket i sur., 2018b). Na **Slici 8.** također se može uočiti neposredna blizina rijeke Zrmanje otpadnim bazenima i tvornici Jadral kao i „crveni trag ili put“ koji se proteže od bazena prema rijeci što neupitno dokazuje prijenos čestica crvenog mulja vjetrom sjevernog ili sjeveroistočnog smjera.

Ova je investicija neslavno okončala 1981. godine zbog manjka resursa uslijed (namjerno?) pogrešnih procjena o količini rude boksita, neprofitabilne proizvodnje, kao i zbog lošeg upravljanja rada, jer je tvornica stvarala puno veće troškove u odnosu na dobit (Fiket i sur., 2018b, URL14). Cijeli je prostor bivše tvornice, pa tako i spomenuti bazeni, nakon prestanka rada služio za odlaganje različitog otpada (URL14) što je vidljivo na **Slici 9.**, te je zaostalo puno neiskorištenog materijala, poput ostataka bijelog praha natrijeve lužine i mazuta (Kutle i sur., 2003). Mazut je pohranjen u dva spremnika, ali se na šahtovima cjevovoda mogu uočiti tragovi izlivanja u dužini od 150 metara te je upitno koliko je mazuta na ovaj način oteklo u rijeku Zrmanju (Samokovlija Dragičević, 2004).



**Slika 9.** Različit otpad (stare gume, madraci..) na području tvornice Jadral, 24.8.2019.

Što se tiče otpada, crvenog je mulja obogaćenog metalima ostalo oko 850 000 m<sup>3</sup> dok je otpadne lužine ostalo oko 650 000 m<sup>3</sup> (Fiket i sur., 2018b, Kutle i sur., 2003). Vrijednost pH varira ovisno o mjestu: osušeni dio bazena ima pH 8,2 – 8,5 jer su alkalije (natrijevi/kalijevi (Na/K) hidroksidi koji povećavaju pH vrijednost) vremenom isprani kišom, dok je u crvenom mulju, koji je prekriven lužinom, pH vrijednost 9-10 (Oreščanin i sur., 2001). Proveden je mali opseg remedijacije otpada od ukupno potrebnog (Fiket i sur., 2016).

Cijelo je postrojenje tvornice Jadral, nakon prestanka rada 1981. godine, bilo meta brojnih krađa opreme poput uparivača, rezervoara, autoklava, gromobrana, ali i tehničkog materijala kao što su bakar i željezne oplata, dok su gotovo sva stakla na zgradama, kojih je bilo preko tisuću, porazbijana što je vidljivo na **Slici 10**. (Samokovlija Dragičević, 2004, URL14). Jednim je provedenim istraživanjem ustanovljeno da je za vrijeme Domovinskog rata, kad je skoro pola hrvatskog teritorija uključujući i obrovački kraj bilo pod okupacijom od 1991. do 1995. godine, nestalo ili uništeno jako puno gromobrana i ostalih uređaja ioniziranog radijacijskog zračenja korištenih u industriji i medicini, što je dovelo do direktnog zračenja uništenih uređaja na ljude u okolnim naseljima i na njihovim radnim mjestima (Subašić i Schaller, 1997). Tako je iz tvornice Jadral koja je bila okupirana 5 godina, ukradeno 24 izvora cezija (Cs – 137) koji su korišteni za Geigerove brojače i koji nisu nikad pronađeni (Subašić i Schaller, 1997). Vjeruje se da su iskorišteni u tvornicama aluminijske u Srbiji (Subašić i Schaller, 1997). Dobra je vijest da nije zabilježena nikakva kontaminacija u ovom području što se tiče takvih radijacijskih uređaja (Subašić i Schaller, 1997).



**Slika 10.** Ostaci jedne zgrade s razbijenim staklima, 24.8.2019.

## 5.2 Karakteristike područja tvornice Jadral i Obrovca

Ovo područje ima umjereno vruću, vlažnu klimu s vrućim ljetima i općenito jakim vjetrom (burom) (Fiket i sur., 2018b). Prometno je loše povezano s ostalim dijelovima zemlje te vladaju poprilično nepogodni uvjeti što se tiče klime, terena, sastava tla i hidrologije (Fiket i sur., 2018b). Zbog ovih je razloga, demografski i ekonomski razvoj obrovačkog kraja znatno ograničen i otežan (Fiket i sur., 2018b), ali se ipak djelomično dogodio za vrijeme trogodišnjeg rada tvornice Jadral.

Što se tiče geološke strukture, obrovački je prostor izgrađen od karbonata mezozojske starosti (jurski i kredni vapnenci, dolomiti i karbonatne breče) prekrivenih karbonatima i klastitima paleogenske starosti (eocenski vapnenci, dolomiti, klastiti i lapori kao i oligocenski konglomerati, vapnenci i lapori) (Fiket i sur., 2016, Fiket i sur., 2018b, Fiket i sur., 2018c). Ovo područje karakteriziraju i brojna paleocenska i eocenska nalazišta boksita pronađenih na bazi klastičnih sedimenata gornjotrijaske starosti (Fiket i sur., 2018b). Najčešće je tlo crvenica, rezidualno crveno tlo formirano na vapnenačkom supstratu u uvjetima mediteranske klime, uz ostala pjeskovita tla i tla s visokim udjelom vapnenaca (Fiket i sur., 2016, Fiket i sur., 2018b).

Iako je ovo područje slabo naseljeno, zamjetan je utjecaj antropogenih aktivnosti poput hidroelektrane Velebit, u gornjem toku rijeke Zrmanje, kao i zatvorene tvornice Jadral, koja se nalazi na desnoj obali kanjona rijeke, oko 8 km uzvodno od ušća Zrmanje u Novigradsko more (Fiket i sur., 2018a). Tvorničko postrojenje Jadral danas više nije ograđeno, dok su otpadni bazeni djelomično ograđeni, te je ovaj poprilično opasan prostor u potpunosti dostupan djeci, pastirima (Samokovlija Dragičević, 2004) i životinjama, najčešće ovcama koje su vidljive na **Slici 11.** i čije glasanje odzvanja ovim jezivim, opustošenim tvorničkim područjem. U blizini bazena crvenog mulja i lužine, raslinje je uništeno i škrto (Samokovlija Dragičević, 2004) te se vidi značajna razlika u boji tla.



**Slika 11.** Stado ovaca (označeno bijelom elipsom) luta pustošem Jadrala, 24.8.2019.

### 5.3 Analiza crvenog mulja iz Obrovca i njegova upotreba

Istraživanjem iz 2002. godine, rentgenskom difrakcijom određene su glavne komponente crvenog mulja iz Obrovca i to su hematit, kankrinit, gipsit i getit, a pH je 10,2 (Oreščanin i sur., 2002). Istraživanjem iz 2017. godine određen je elementarni sastav crvenog mulja iz Obrovca prikazan na **Slici 12.** te je ustanovljeno da crveni mulj sadrži visok udio željeza (Fe), silicija (Si), kalcija (Ca) i titana (Ti) zaostalih nakon reakcije boksita s vrućom 30%-tnom natrijevom lužinom (Oreščanin i sur., 2017). Prisutnost Al razlog je neizdvajanja tijekom ekstrakcije, a prisutnost natrija je zaostatak natrijeve lužine u crvenom mulju (Oreščanin i sur., 2017). Ovim je istraživanjem utvrđeno da su teški metali u crvenom mulju čvrsto vezani u strukturi Fe/Mn oksida i hidroksida te se zbog toga ne izlužuju u okoliš, o čemu je već bilo riječi, čime nisu toksični ni za bakterijske ni za ljudske stanice (Oreščanin i sur., 2017).

Element	Jedinica	Koncentracija
Na	(%)	2,41
Mg	(%)	2,11
Al	(%)	9,13
Si	(%)	10,14
K	(%)	0,61
Ca	(%)	12,04
Ti	(%)	3,71
V	(mg kg <sup>-1</sup> )	215
Cr	(mg kg <sup>-1</sup> )	279
Mn	(mg kg <sup>-1</sup> )	4240
Fe	(%)	21,07
Ni	(mg kg <sup>-1</sup> )	13
Cu	(mg kg <sup>-1</sup> )	18
Zn	(mg kg <sup>-1</sup> )	65
As	(mg kg <sup>-1</sup> )	50
Rb	(mg kg <sup>-1</sup> )	4
Sr	(mg kg <sup>-1</sup> )	71
Y	(mg kg <sup>-1</sup> )	187
Zr	(mg kg <sup>-1</sup> )	1770
Pb	(mg kg <sup>-1</sup> )	21

**Slika 12.** Kemijski sastav crvenog mulja iz Obrovca. Izvor: Oreščanin i sur., 2017.

Crveni mulj ima visoku pH vrijednost zbog Na/K karbonata i hidrogenkarbonata koji nastaju reakcijom Na/K hidroksida s ugljikovim dioksidom iz zraka (Oreščanin i sur., 2017). Ove karakteristike uvjetuju visok neutralizacijski potencijal crvenog mulja, dok visok udio željeza i aluminija rezultira dobrim adsorpcijskim/koagulacijskim svojstvima (Oreščanin i sur., 2017). Aktiviranje crvenog mulja razrijeđenom kiselinom dovodi do uklanjanja teških metala vezanih za minerale, čime se poboljšava kapacitet sorpcije crvenog mulja (Oreščanin i sur., 2002). Daljnje poboljšanje sorpcijskog kapaciteta, kao i povećanje poroznosti crvenog mulja postiže se dodatkom lužine čime dolazi do koagulacije čestica crvenog mulja (Oreščanin i sur., 2002).

Zbog ovakvih je svojstava, crveni mulj korišten u jednom istraživanju 2017. godine za obradu kiselog efluenta nastalog postupkom eksploatacije i prerade bakrene rude u Borskim rudnicima (Oreščanin i sur., 2017). Nastali je otpadni mulj dalje korišten za pročišćavanje otpadnih voda iz prališta brodova (Oreščanin i sur., 2017). Naime, rudnička otpadna voda ima nisku pH vrijednost (3,21) i visoku koncentraciju sulfata, Fe, Mn, Cu i cinka (Zn), dok otpadna voda iz prališta brodova ima visoku koncentraciju Cu, Zn i jako je opterećena bojama protiv obraštaja (Oreščanin i sur., 2017). Rezultati ovog eksperimenta bili su ohrabrujući.

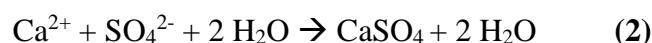
Naime, zbog već spomenutog visokog neutralizacijskog potencijala i sorpcijskog kapaciteta crvenog mulja, miješanje crvenog mulja i rudničke otpadne vode u posebnim omjerima dovodi do neutralizacije obje tvari i do uklanjanja teških metala iz rudničke otpadne vode čak ispod graničnih vrijednosti (Oreščanin i sur., 2017). No, treba paziti na količinu organske tvari u otpadnim vodama, jer ona značajno smanjuje mogućnost sorpcije teških metala na crveni mulj (Oreščanin i sur., 2017). Tako je, pri optimalnim uvjetima (pH = 8, kontaktno vrijeme = 15 minuta), ovim eksperimentom uklonjeno više od 99,9% Cr, Mn, Fe, Cu i Zn kao i 65,5% sulfata iz rudničke otpadne vode (Oreščanin i sur., 2017). Dalje je utvrđeno da se s preostalim otpadnim muljem može izvršiti čak pet ciklusa pročišćavanja otpadnih voda iz prališta brodova s učinkovitošću uklanjanja teških metala preko 99% (Oreščanin i sur., 2017).

Na **Slici 13.** prikazane su ukupne koncentracije elemenata u originalnom crvenom mulju, u crvenom mulju nakon tretmana kiselinom, u crvenom mulju neutraliziranom lužinom i u crvenom mulju nakon 6 ciklusa sorpcije teških metala iz otpadnih voda iz prališta brodova (Oreščanin i sur., 2017).

Element	1	2	3	4	5
V	735	829	484	495	1.04
Cr	389	511	276	355	3.97
Mn	7946	10630	5770	5835	2.44
Fe	231 000	322 350	168 000	175 000	0.29
Ni	23.9	34.1	31.1	54.6	0.2
Cu	53.4	67.4	55.6	1929	4.26
Zn	214.8	235.3	209.6	7460	10.9
As	169.8	160.8	249.8	270	0.56
Pb	28.4	32.7	26.9	1997	5.35

**Slika 13.** Koncentracije elemenata u mg/kg u: 1 – originalnom crvenom mulju; 2 - crvenom mulju nakon djelomičnog otapanja u H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (30% wt.); 3 – crvenom mulju nakon neutralizacije; 4 – crvenom mulju nakon 6 ciklusa sorpcije teških metala; 5 – otpadnim vodama. Izvor: Oreščanin i sur., 2002.

Tretman kiselinom doveo je do nestanka alkalija i karbonata i do obogaćenja teškim metalima (Fe, Mn) kao i drugim teškim metalima (V, Cr) koji su vezani za njih (Oreščanin i sur., 2002) što je vidljivo na **Slici 13.** usporedbom stupca 1 i 2. U neutraliziranom uzorku crvenog mulja, količine Fe, Mn i teških metala poput Cr i V su manje, što je vidljivo na **Slici 13.** usporedbom stupca 2 i 3, zbog otapanja koje se događa formiranjem gipsa, prikazano reakcijom (2) (Oreščanin i sur., 2002).



I dalje povišene količine Cu, Zn i olova (Pb) u otpadnom mulju nakon 6 ciklusa koagulacije/flokulacije posljedica su visoke koncentracije tih metala u otpadnim vodama (Oreščanin i sur., 2002). Ovakvim je postupkom neutralizacije otpadnih voda crvenim muljem utvrđeno da se u svim ciklusima koncentracija gotovo svih elemenata kao i zamućenost značajno smanjila, čak ispod dopuštenih vrijednosti (Oreščanin i sur., 2002). Time je dokazano da se crveni mulj može uspješno koristiti za tretman uklanjanja teških metala ovakvih tipova otpadnih voda (Oreščanin i sur., 2002). Iz ovakvih je rezultata moguće izračunati masu metala koji su vezani za 1 gram (g) crvenog mulja po jednadžbi (3), gdje je  $C_{ad}$  koncentracija metala vezanog na crveni mulj,  $C_i$  je početna, a  $C_f$  je konačna koncentracija metala u otopini dok je  $V$  volumen otopine, a  $m$  je masa apsorbera (crvenog mulja) (Oreščanin i sur., 2002).

$$C_{ad} = [(C_i - C_f) \times V] / m \quad (3)$$

Ovim postupkom, 1g aktiviranog crvenog mulja može apsorbirati 99,347 mg Cu, 95,002 mg Zn i 98.695 mg Pb, čime se može zaključiti da se bakar najbolje veže na crveni mulj i njegovo uklanjanje iz otopine je skoro 100% - tno (Oreščanin i sur., 2002). Vrijednost pH ima značajan utjecaj na sorpciju metala na crveni mulj, jer se sorpcija smanjuje pri određenim vrijednostima. Tako porast pH vrijednosti iznad 4 najviše smanjuje sorpciju Zn, potom, u manjoj mjeri Pb dok je najmanji učinak zabilježen za sorpciju Cu (Oreščanin i sur., 2002).

#### 5.4 Utjecaj crvenog mulja na rijeku Zrmanju i okoliš

Zbog već spomenutog jakog vjetra (bure), čestice crvenog mulja i kapljice otpadne lužine vrlo se lako raspršuju vjetrom preko cijelog okolnog područja čime mijenjaju geokemiju sedimenta i rijeke (Fiket i sur., 2018b), čime mogu izazvati zagađenje zaliha pitke vode. Dodatni rizik zagađenja pitke vode predstavljaju i moguće pukotine u bazenima čime može doći do procjeđivanja otpadnog materijala kroz porozno podzemlje karbonatnog terena čak do rijeke Zrmanje (Oreščanin i sur., 2001), što bi izazvalo ekološku katastrofu. Uz to što ovi bazeni predstavljaju opasnost za rijeku Zrmanju, oni čine i okolno područje jako ružnim zbog crvene boje i dodatno oskudne vegetacije čime nanose štetu turizmu ovog područja (Kutle i sur., 2003).

Zbog već spomenute blizine tvornice Jadral rijeci Zrmanji, često su se provodila istraživanja kako bi se ustanovio utjecaj prirodnih i ljudskih faktora na njen sastav sedimenta. Zrmanja je kalcijsko-bikarbonatna krška rijeka koja ima veliku prozirnost (6, 7 m) i veliku zasićenost kisikom (98,8%) (Fiket i sur., 2018b).

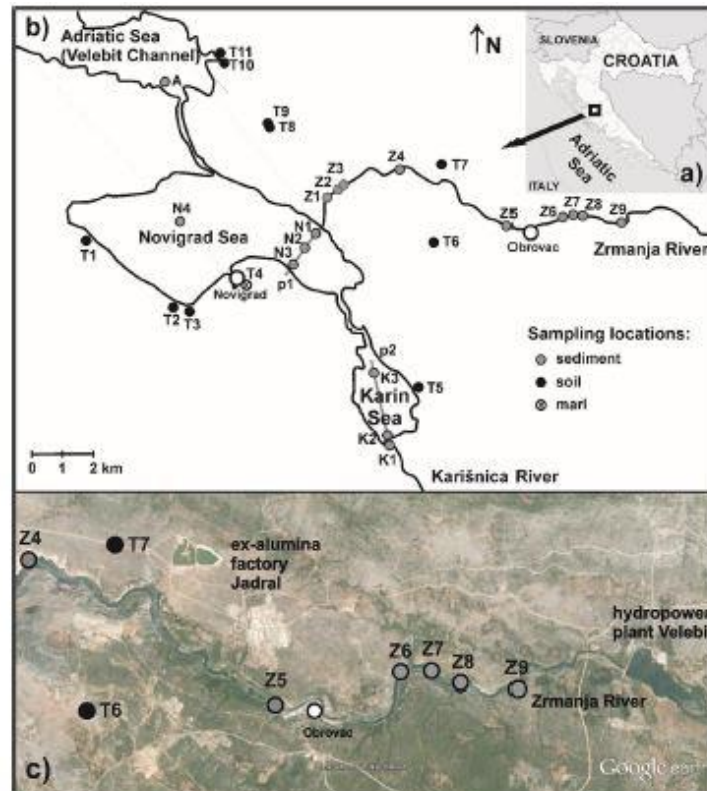


Uz to, ima poluzatvoren, vrlo uvučen estuarij smješten u krškom kraju istočne jadranske obale, oko 20 kilometara od Zadra (Fiket i sur., 2018b). Ovaj estuarij ulazi u dva „bazena“: Karinsko more i Novigradsko more koje je velebitskim kanalom povezano s Jadranskim morem, 12 kilometara udaljenim od Obrovca (Fiket i sur., 2018b). Rijeka Zrmanja ima najveći utjecaj na cijelo područje Novigradskog mora, dok na Karinsko more najveći utjecaj ima rijeka Karišnica (Fiket i sur., 2018b, Fiket i sur., 2018c). Estuarij rijeke Zrmanje ima ustaljenu stratifikaciju gotovo cijele godine i ograničeno miješanje morske vode, koja ulazi u donjem toku rijeke, sa slatkom vodom (Fiket i sur., 2018a). Uz sve navedeno, Zrmanja je stanište i mrijestilište brojnih populacija riba, fitoplanktona, ali i endemičnih organizama (Fiket i sur., 2018b).

Ovaj je sustav izrazito osjetljiv zbog poluzatvorenosti estuarija, ograničene cirkulacije, krškog reljefa kao i endemičnih organizama (Fiket i sur., 2018c). Kombinacija prirodnih procesa i antropogenog utjecaja u krškom kraju ponekad može prouzročiti iznenadne, nepredvidljive, velike i opasne posljedice kako za okoliš tako i za društvo (Fiket i sur., 2018c). Zbog svih ovih razloga, rijeka Zrmanja je, unutar Strategije i akcijskog plana za zaštitu biološke i krajobrazne raznolikosti u Republici Hrvatskoj, proglašena zaštićenim područjem (Fiket i sur., 2018b).

Istraživanjem iz 2016. godine uzeti su uzorci sedimenta i tla s 28 lokacija te su provedene detaljne analize (Fiket i sur., 2016). Pratila se koncentracija elemenata u tragovima, jer oni imaju bitnu ulogu u različitim biogeokemijskim procesima, stoga općenito vrijedi da koncentracije ovih elemenata primarno ovise o okolnoj geološkoj i litološkoj pozadini (Fiket i sur., 2016).

No, nažalost, brojnim ljudskim aktivnostima okoliš je često opterećen elementima u tragovima (Fiket i sur., 2016). Jednom kad antropogeni unos tih elemenata nadmaši prirodne vrijednosti, dolazi do deformacija prirodnih procesa što često rezultira pretjeranom akumulacijom ovih elemenata u bioti i time neposredno i u čovjeku (Fiket i sur., 2016). Svi uzorci s 28 lokacija analizirani su za koncentracije 20 elemenata (Ag, Al, As, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Ni, Pb, Rb, Sb, Sn, Sr, Ti i Y) s tim da se imalo na umu da su neki elementi prirodnog porijekla (Al, Fe) dok su drugi antropogenog (As, Ni, Pb) (Fiket i sur., 2016). Na **Slici 14.** prikazana je lokacija tvornice Jadral, područje rijeke Zrmanje, njihova međusobna blizina kao i blizina Karinskog, Novigradskog, Jadranskog mora i lokacije uzimanja uzoraka.



**Slika 14.** Geografski odnos tvornice Jadral, Zrmanje, Jadranskog i Novigradskog mora. Izvor: Fiket i sur., 2016.

U sedimentu rijeke Zrmanje, najveće koncentracije promatranih elemenata zabilježene su na lokacijama najbližima bivšoj tvornici glinice Jadral (Z4 i Z5 na **Slici 14.**) dok su najmanje koncentracije zabilježene na lokaciji Z9 (Fiket i sur., 2016). Također, na lokaciji T7, gdje je uzet uzorak boksitnog tla u blizini tvornice, koncentracije određenih elemenata (Be, Ag, Co, Cu, Mn, Pb, Sn, Ti, In i Zn) bile su 2-10x veće nego na ostalim lokacijama dok su neki elementi (As, Bi, Cd, Cr, Fe, Ni, Sb, V) čak pronađeni u koncentracijama 10-28x većim nego drugdje (slična situacija je i kod T8 i T9, ali u manjim omjerima) (Fiket i sur., 2016).

Zbog ratnog razdoblja kojim je pogođeno područje Obrovca objašnjiv je porast elemenata poput žive, antimona i bakra u sedimentu, jer su oni dio streljiva (Fiket i sur., 2016). Na lokacijama Z3 i Z4, u površinskom dijelu tla, zabilježene su povišene koncentracije itrija što nije čudno, jer crveni mulj sadrži u prosjeku oko 900 ppm elemenata poput itrija i ostalih REE, a što je čak do 10x više nego njihova koncentracija u boksitima (Fiket i sur., 2018b). Na Z3 je manja koncentracija nego na Z4, ali do ovakvih koncentracija dolazi zbog puhanja vjetra (bure) iz sjeveroistočnog smjera, češće sjevernog i time se dokazuje transport čestica vjetrom iz tvornice Jadral (Fiket i sur., 2016). Iako je sediment rijeke Zrmanje ipak primarno kontroliran prirodnim faktorima – sastavom stijena, hidrološkim uvjetima i izolacijom, utjecaj tvornice Jadral nije zanemariv što je vidljivo u prisutnosti REE i stoga ga treba uzeti u obzir (uz utjecaj hidroelektrane Velebit) (Fiket i sur., 2016, Fiket i sur., 2018b).

Sediment se općenito smatra krajnjim odlagalištem za brojne elemente (Fiket i sur., 2018c). No, ako dođe do promjena okolišnih uvjeta (redoks-potencijal, pH vrijednost, salinitet, količina kisika) onda se pojedini elementi mogu osloboditi iz sedimenta i vratiti u vodeni sustav čime on postaje izvor elemenata u tragovima (Fiket i sur., 2018c). Zbog uvučenog i poluzatvorenog karaktera estuarija rijeke Zrmanje, što se posljedično očituje u ograničenoj cirkulaciji, postoji mogućnost periodične anoksije u sedimentu te ju treba imati na umu u svrhu očuvanja pitke vode i zdravog ekosustava (Fiket i sur., 2018b). Istraživanjem iz 2018. godine ustanovljeno je da rijeka Zrmanja trenutno predstavlja mjesto odlaganja metala, ali, ako dođe do povećanja organske tvari (povećana bakterijska razgradnja) ili do hidroloških promjena, promijenit će se uloga ove rijeke te će ona postati izvor metala (Fiket i sur., 2018c). Kao primjer, situacija pomanjkanja kisika, koji je glavni oksidans u razgradnji organske tvari, uz dodatnu izolaciju i smanjenje dotoka svježje vode, stvorit će povoljne uvjete za difuziju elemenata iz sedimenta natrag u vodeni stupac (Fiket i sur., 2018b, Fiket i sur., 2018c). Dakle, u anoksičnim uvjetima dolazi do „trošenja“ drugih prisutnih elemenata iz sedimenta.

Tako će se, formiranjem manganovih i željezovih oksida i hidroksida, brojni metali (As, Cu, Ni, Zn, Co, Mo, Pb, In, V) vezati na takve spojeve i koprecipitirati zajedno s njima (Fiket i sur., 2018c). Sljedeća reakcija redukcije mangana ( $Mn^{4+}$  u  $Mn^{2+}$ ) i željeza ( $Fe^{3+}$  u  $Fe^{2+}$ ) dovest će do oslobađanja tih metala u okoliš, tj. vodeni stupac (Fiket i sur., 2018c). Ovime će se povećati njihova koncentracija van dopuštenih te će predstavljati opasnost za živa bića za razliku od prirodnih uvjeta, kad su u inertnom stanju u sedimentu.

Postoji i direktna povezanost nekih elemenata (Cs, Li, Mo, Rb, Sr, U i Fe) sa salinitetom, pa je tako njihovo ponašanje u Zrmanji konzervativno (Fiket i sur., 2018a). Cijela Zrmanja ima salinitet 2‰ pa su u njoj male koncentracije navedenih elemenata, no pomicanjem nizvodno, u donji tok, tj. Velebitski kanal, salinitet raste na 38‰, što uzrokuje naglo povećanje koncentracije nekih elemenata (Fiket i sur., 2018a). Ovakvi rezultati odgovaraju i za rijeku Krku, koja je nekad čak bila spojena sa Zrmanjom (Fiket i sur., 2018a, Fiket i sur., 2018b), a o njihovoj povezanosti u prilog govori i pronalazak dvije endemične podvrste vodozemaca u obje rijeke (*F. dalmatinus* i *F. dalmatinus krkensis*) (Fiket i sur., 2018b).

Istraživanjem iz 2018. godine, uspoređene su vrijednosti pojedinih elemenata rijeke Zrmanje, Plitvičkih jezera, Bajkalskog jezera, svjetskih rijeka i podzemnih voda, te je utvrđeno da su za većinu elemenata vrijednosti u rijeci Zrmanji 2-25x manje nego prosječne vrijednosti za svjetske rijeke, a gotovo jednake ostalim lokacijama što je vidljivo na **Slici 15**. (Fiket i sur., 2018a).

Jedinu iznimku predstavljaju Al, Fe, litij (Li) i stroncij (Sr) jer su zastupljeni u većoj koncentraciji, što je vjerojatno posljedica geološke podloge s pojavom boksitnih ležišta, kao i dominacija crvenice jer su oboje bogati s Al, Fe, Li i Sr (Fiket i sur., 2018a). Uz to, 3x veća koncentracija litija nego u svjetskim rijekama posljedica je i njegovog konzervativnog ponašanja u morskoj vodi i njegove povezanosti s mineralima glina u sedimentu (Fiket i sur., 2018c).

Element	Zrmanja River	World rivers <sup>[31]</sup>	Plitvice Lakes <sup>[32]</sup>	Baikal Lake <sup>[33]</sup>	Ground-water <sup>[34]</sup>
Al	1.28	32	0.731	0.52	–
As	0.203	0.62	0.110	0.41	0.20
Ba	14.5	23	4.59	10.3	5.2
Co	0.011	0.148	0.006	0.034	0.11
Cr	0.217	0.7	0.115	0.048	–
Cs	0.010	0.011	–	–	0.003
Cu	0.063	1.48	0.107	0.87	0.19
Fe	8.23	66	0.988	–	–
Li	5.65	1.84	0.068	1.93	0.94
Mn	0.168	34	0.186	0.14	–
Mo	0.528	0.420	0.301	1.28	0.16
Ni	0.054	0.810	0.196	0.57	–
Rb	4.02	1.63	–	0.47	0.31
Sr	320	60	39.2	104	197
U	0.442	0.372	0.556	0.50	0.37
V	0.616	0.71	0.873	0.44	–

– not measured.

**Slika 15.** Usporedba koncentracija elemenata rijeke Zrmanje, svjetskih rijeka, Plitvičkih jezera, Bajkalskog jezera i podzemnih voda. Izvor: Fiket i sur., 2018a.

Iz svega navedenog može se zaključiti da, iako je zabilježen utjecaj tvornice Jadral na rijeku Zrmanju u prisutnosti elemenata kojima tamo nije mjesto, u rijeci vlada ravnoteža, jer su elementi vezani u sedimentu i nalaze se u „utišanom“ stanju. Problem bi mogao nastati ako dođe do promjena okolišnih uvjeta (redoks-potencijal, pH vrijednost, salinitet, zasićenost kisikom) čime bi se ti elementi mogli osloboditi iz sedimenta i zagaditi vodu (Fiket i sur., 2018c). Također je utvrđeno da je voda rijeke Zrmanje relativno siromašna teškim metalima te njezine koncentracije odgovaraju koncentracijama u Krki kao i u svjetskim rijekama, što je odlika nezagađenih vodenih tokova (Fiket i sur., 2018c).

Sva ova opsežna istraživanja upućuju na veliku potrebu za multidisciplinarnim pristupom prilikom determinacije antropogenih pritisaka na okoliš, kojih je, nažalost, sve više (Fiket i sur., 2018b). Ovi se pritisci očituju u sve većoj izgradnji brojnih cesta i autocesta, otpuštanju otpadnih voda, prevelikom izgradnjom na obalama kao i ponekim propalim pokušajima industrije (Fiket i sur., 2018b) i većinom se nalaze u već osjetljivom okolišu ili u blizini posebnih i vrijednih ekosustava. Sve ovo predstavlja realnu prijetnju koja može utjecati na biogeokemijsku ravnotežu okoliša u budućnosti te se multidisciplinarnim pristupom dolazi do pravovremenog otkrivanja prevelikog pritiska kao i do odgovarajuće reakcije sprječavanja devastacije okoliša, vodenih tokova i posljedično ugrožavanja kvalitete ljudskog života (Fiket i sur., 2018b).

## 5.5 Sanacija tvornice Jadral

Prema procjeni tvrtke Teb Ekon d.o.o iz Zagreba, u travnju 2003. godine izrađen je elaborat o stanju imovine Jadrالا. Od cjelokupne početne opreme, nakon brojnih krađa i uništavanja, ostalo je samo 18% toga - natrijeva lužina, onečišćeni aluminijev hidrat, mazut, neki strojni dijelovi, limovi, strojno ulje i drugo (Samokovlija Dragičević, 2004).

Zbog potencijalne opasnosti zaostalog otpada tvornice Jadral za okoliš i ljude i sve češćih protesta i zahtjeva stanovništva Obrovca, Ministarstvo zaštite okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva 2004. godine objavilo je plan da se što prije sruše i uklone ostaci tvornice Jadral kao i ostalih osam crnih točaka u okolišu (tvornica ferolegura u Dugom Ratu, tvornica azbestnih betonskih proizvoda Salonit u Solinu, dimnjaci i teren oko koksare u Bakru i u TEF-u u Šibeniku, jama Sovljak kraj Rijeke, odlagalište šljake u Kaštelanskom zaljevu, odlagalište fosfat-gipsa u Kutini, zauljeni muljevi u Botovu) (Samokovlija Dragičević, 2004). Znalo se da će ovaj posao biti dug, velik i skup i da će se obrovačka sanacija sastojati od dva dijela: 1. je rušenje preostalih objekata u krugu tvornice, a 2. je sanacija dva bazena s otpadnom lužinom i crvenim muljem (Samokovlija Dragičević, 2004).

Gradsko je poglavarstvo grada Obrovca s tvrtkom Perko iz Varaždina dogovorilo posao rušenja i razgradnje tvornice Jadral u vrijednosti od 250 000 kuna (Samokovlija Dragičević, 2004). Ovaj su iznos podijelili Obrovac i Jasenice te su zajedno razmatrali što bi moglo zamijeniti Jadral – ideje su bile plinska elektrana, vjetroelektrana ili gospodarska zona (Samokovlija Dragičević, 2004), ali ništa od toga nije naknadno izgrađeno. Ministarstvo je provelo stručnu studiju o rušenju i uklanjanju tvornice Jadral te su krajem 2004. godine radnici tvrtke Perko počeli s poslom (Samokovlija Dragičević, 2004).

Preostali aluminijev hidrat (više od 5000 tona) odvozio se u tvornicu glinice u Zvorniku i tvornicu cementa u Koromačnom u Istri (Samokovlija Dragičević, 2004). Grad Obrovac zatražio je da neke zgrade u tvorničkom krugu ostanu netaknute jer su po procjenama još uvijek u dobrom stanju i mogu biti adaptirane za neke druge namjene (Samokovlija Dragičević, 2004). No, to se nikad nije dogodilo te su one danas u ruševnom stanju što je vidljivo na **Slici 16**.



**Slika 16.** Ruševno stanje jedne od preostalih zgrada tvornice Jadral, 24.8.2019.

Na natječaju za sanaciju bazena crvenog mulja i otpadne lužine, Fond za zaštitu okoliša i energetska učinkovitost kao najpovoljniju izabrao je ponudu tvrtke Sirovina odlagalište d.o.o. u iznosu od 80,6 milijuna kuna (URL14), iako postoje podaci o tome da su Nijemci ponudili cijenu od 56 milijuna kuna za sanaciju, od čega je 35 milijuna kuna bilo namijenjeno za uređaj koji bi i nakon saniranja ostao Obrovcu za pročišćavanje otpadnih voda (URL16), no oni nisu bili izabrani. Čak se i američki koncern za proizvodnju aluminijskih opeka s Djevičanskih otoka zanimao za mogućnost korištenja crvenog mulja iz Obrovca u namjeri izdvajanja teških metala iz njega, potom stabilizacije i korištenja mulja za proizvodnju opeke (URL14). No, oni su odustali zbog prevelikih troškova neutralizacije mulja (URL14). Isto tako u obzir nije ni uzeto već prikazano jeftino i efikasno rješenje u kojem se i crveni mulj i otpadna lužina zajedno mogu sanirati u obliku želatinoznog koagulanta koji dalje ima ulogu pročišćivača otpadnih voda u drugim industrijama.

Tvrtka Sirovina odlagalište d.o.o. sanaciju otpadnih bazena provela je na više načina tijekom pet godina od kojih je prvi korak bio zaštitni zid oko bazena kako bura više ne bi raznosila lužinu i čestice crvenog mulja, a dodatno je zaštićen i 100 metara širok kameni nasip (URL17).

Potom su crveni mulj u velikom bazenu podijelili na pola, sve okružili i prekrili kamenim nabačajem, za što je utrošeno oko milijun m<sup>3</sup> kamena i građevinskog otpada dovezenog sa šireg zadarskog područja (URL17), a **Slika 17.** prikazuje stanje bazena godinu dana nakon prestanka radova.



**Slika 17.** Satelitski snimak bazena s crvenim muljem i lužinom, 21.10.2012. Izvor: Google karte.

Sanacija je trajala do 2011. godine kada je zaustavljena, jer su otkrivene malverzacije u Fondu i Sirovini odlagalištu d.o.o. (URL14) te ovaj projekt, po jedinim pronađenim podacima, do danas još nije dovršen. Na kraju se ukupni trošak popeo na vrtoglavih 240 milijuna kuna (URL16). U malom je bazenu ostalo oko 35 000 m<sup>3</sup> crvenog mulja koji je prekriven slojem nepropusne gline i kamenjem debljine 2 metra, a u velikom je bazenu crveni mulj ostao prekriven kamenjem (URL12). Otpadna se lužina uklanjala postupkom isparavanja te je na kraju ostalo oko 300 000 m<sup>3</sup> (URL12). Danas se u neposrednoj blizini otpadnih bazena nalazi nedavno izgrađen vjetroпарк Jasenice 1 vidljiv na **Slici 18.**, te je ovaj prostor ponovno dobio na važnosti.

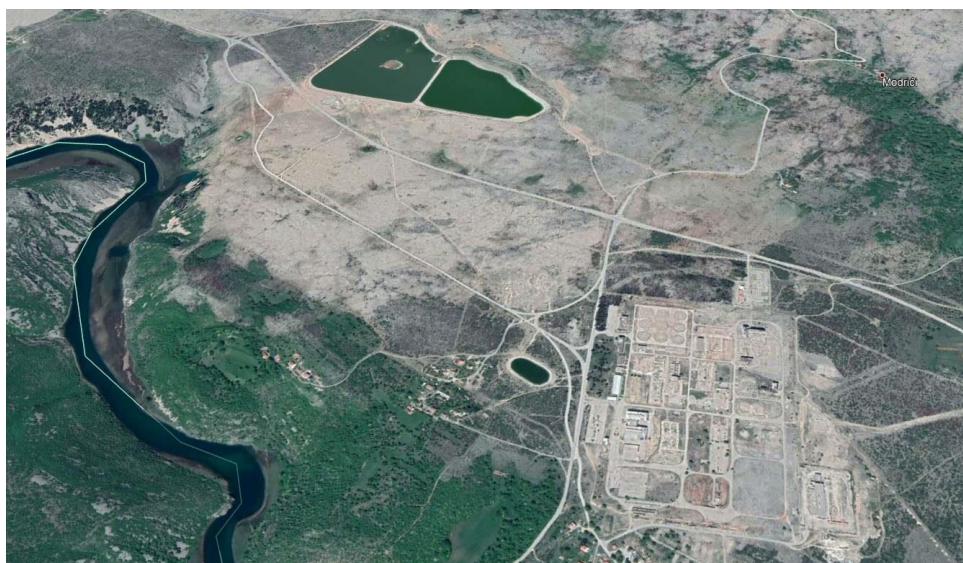


**Slika 18.** Otpadni bazeni danas (žutom strelicom označena brana između njih) uz vjetroпарк Jasenice 1 podno Velebita, 24.8.2019.

Iako je sanacija propala, ipak je donijela neke koristi. Srušena je većina zgrada kompleksa Jadral, smanjila se količina crvene prašine u okolišu, raslinje u okolnom kamenjaru ponovno se zazelenilo i pH vrijednost lužine je znatno smanjena, ali taj otpad i dalje tamo postoji i tim prostorom vlada pustoš što je vidljivo na **Slikama 19., 20. i 21.**, kao da je vrijeme u potpunosti stalo.



**Slika 19.** Jedina preostala zgrada crvenog bloka kompleksa Jadral, 24.8.2019.



**Slika 20.** Satelitski snimak područja bivše tvornice Jadral u Obrovcu, 8.8.2019. Izvor: Google karte.



**Slika 21.** Pustoš i ruševine tvornice Jadral, 24.8.2019.



## 6. ZAKLJUČAK

U ovom je seminarskom radu prikazano kako jedna tvar, koju percipiramo kao otpad, može imati itekako važnu ulogu u očuvanju okoliša. Naime, crveni je mulj otpad koji nastaje Bayerovim postupkom prerade boksitne rude u aluminij i ako se ne skladišti na odgovarajući način s obzirom na okolišne faktore poput vjetera i poroznog krša, može značajno mijenjati geokemiju sedimenta rijeke i okolnog područja kao što je bio slučaj s tvornicom Jadral u Hrvatskoj. Također, ako se ne pridaje dovoljno pažnje prilikom izgradnje spremnika za boksitni otpad i njegova kasnijeg održavanja, može doći do izlivanja crvenog mulja, što će izazvati ekološku katastrofu kao što je bio slučaj s tvornicom Ajka u Mađarskoj, 2010. godine. Crveni mulj obogaćen teškim metalima i otpadna lužina visoke lužnatosti i dalje će nastajati u svijetu procesom proizvodnje aluminijske i to u velikim godišnjim količinama i stoga ih ne treba tretirati kao otpad, nego upotrebljavati u korisnije svrhe. U protivnom, dolazit će do prekomjernog nagomilavanja u spremnicima, vremenskog utjecaja i raspršivanja na okolni prostor. Te dvije tvari, koje same po sebi predstavljaju opasnost za okoliš, djelujući zajedno mogu biti neutralizirane i mogu stvoriti želatinozni koagulant koji se dalje može koristiti za pročišćavanje raznih otpadnih voda, čime se značajno smanjuje njihov štetan utjecaj na okoliš.

Bitno je skrenuti pažnju na važnost očuvanja krša i krških rijeka, jer je on jako osjetljiv sustav sa značajnom bioraznolikošću i brojnim endemskim organizmima te zato antropogeni utjecaj treba biti minimalan i koliko je moguće čim manjeg štetnog učinka, jer će ponekad posljedice biti nemjerljive i bit će jako teško vratiti narušenu prirodnu ravnotežu. Što se tiče tvornice Jadral, sreća u nesreći je to da, iako je došlo do odnošenja čestica crvenog mulja i otpadne lužine u Zrmanju, nije se zagađila pitka voda niti je zabilježen utjecaj na živa bića, jer je taj materijal zarobljen u sedimentu. Problem može jedino nastati ako se promijene uvjeti u okolišu poput zasićenosti kisikom, pH vrijednost, redoks-potencijal ili salinitet, čime bi se teški metali podrijetlom iz crvenog mulja mogli osloboditi iz sedimenta u vodeni stupac i time zagađiti vodene tokove. Vrlo je važno provoditi stalan nadzor rijeka, jer ako se takve promjene uoče dovoljno rano, moguće je na vrijeme djelovati i spriječiti teške posljedice.

Multidisciplinarnim je pristupom, brzim odgovorom i istraživanjem, izlivanje crvenog mulja u Mađarskoj, 2010. godine, nakon kratkog vremena stavljeno pod kontrolu i sanirano čime su se spriječile dugotrajne posljedice na okoliš i ovaj slučaj treba biti primjer dobre prakse kad je u pitanju brzina reakcije.

Naravno, treba imati na umu različitost podloga u kojima se dogodi onečišćenje crvenim muljem, jer se neće uvijek moći na isti način pristupiti sanaciji, npr. u kršu je sanacija znatno otežana, jer je teren propustan i porozan te se onečišćenje jako brzo širi i gotovo je nezaustavljivo dopiranje do pitkih vodenih tokova. Nasuprot tome, u područjima gdje prevladava glinena podloga ili neka druga slabo propusna, čišćenje je znatno olakšano jer ostaje na površini i ne prodire u podzemlje. Bilo kako bilo, uvijek treba sagledati sve moguće faktore kao i načine širenja onečišćenja i sva potencijalna rješenja kako bi se što prije krenulo sa sanacijom.

Sanacija Obrovca provedena je na krivi način i dosta kasno, ali na sreću, bez većih posljedica na okoliš. Ova je propala tvornica primjer ljudske nemarnosti i političke motiviranosti, jer bazeni nisu otpočetak kontrolirani niti su svi okolišni faktori uzeti u obzir. Sanacija je započeta tek 35 godina nakon prestanka rada i nije u potpunosti dovršena, što se odrazilo i na okolni prostor.

Uvijek treba misliti na budućnost i svim svojim postupcima maksimalno smanjiti potencijalni utjecaj na okoliš i time ga očuvati. Nikada ne treba prepustiti stvari vremenu i biti nemaran za okoliš već treba istraživati, ispitivati i pronalaziti načine kako bi se nešto izgradilo u skladu s okolišem, popravilo, saniralo ili poslužilo boljoj svrsi. Najbolji primjer za to su sva provedena istraživanja koja su godinama trajala vezano za crveni mulj, čime je otkriven njegov sastav, utjecaj na vodene tokove i biotu, kao i njegova upotreba u dobre svrhe. Otkriven je okolišu prihvatljiv, ekonomski isplativ i društveno koristan postupak iskorištavanja otpada iz proizvodnje aluminija u svrhu pročišćavanja toksičnih tvari, poput otpadnih voda, koje predstavljaju prijetnju za okoliš. Sada je bitno uočiti veliku važnost tog postupka i početi ga upotrebljavati.

## 7. LITERATURA

- Burai P., Smailbegović A., Lénárt C., Berke J., Milics G., Tomor T., Bíró T., 2011. Preliminary analysis of red mud spill based on aerial imagery. *AGD Landscape & Environment* **5** (1), 47-57.
- Cvetko Tešović B., Geologija i rudarstvo, Rudarska geologija, Geologija mineralnih sirovina. Primijenjena geologija. Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet - Geološki odsjek. Zagreb, 2019.
- Fiket Ž., Mikac N., Kniewald G., 2016. Sedimentary records of the Zrmanja River estuary, eastern Adriatic coast – natural vs. anthropogenic impacts. *J. Soils Sediments* (2017), **17**, 1905-1916.
- Fiket Ž., Ivanić M., Furdek Turk M., Mikac N., Kniewald G., 2018a. Distribution of Trace Elements in Waters of the Zrmanja River Estuary (Eastern Adriatic Coast, Croatia). *Croat. Chem. Acta* (2018), **91** (1), 29-41.
- Fiket Ž., Kniewald G., 2018b. The Zrmanja River Estuary (Adriatic Coast, Croatia) – the Need for Interdisciplinary Approach to Protection of Coastal Areas. *Pomorski zbornik* (2018) **55**, 9-32.
- Fiket Ž., Fiket T., Ivanić M., Mikac N., Kniewald G., 2018c. Pore water geochemistry and diagenesis of estuary sediments – an example of the Zrmanja River estuary (Adriatic coast, Croatia). *Journal of Soils and Sediments* (2019), **19**, 2048-2060.
- Kinnarinen T., Holliday L., Häkkinen A., 2015. On the recovery of caustic and alumina from bauxite residues by leaching. *Bauxite Residue Valorisation and Best Practices*, Leuven
- Kutle A., Nađ K., Obhodaš J., Oreščanin V., Valković V., 2003. Assessment of environmental condition in the waste disposal site of an ex-alumina plant near Obrovac, Croatia. *X-Ray Spectrom*, 2004., **33**, 39-45.
- Mayes M. W., Jarvis P. A., Burke T. I., Walton M., Feigl V., Klebercz O., Gruiz K., 2011. Dispersal and Attenuation of Trace Contaminants Downstream of the Ajka Bauxite Residue (Red Mud) Depository Failure, Hungary. *Environ. Sci. Technol.*, **45**, 5147-5155.
- Obhodaš J., Sudac D., Matjačić L., Valković V., 2012. Red mud characterization using atomic and nuclear analytical techniques. *IEEE Transactions on nuclear science*, Vol. **59**, No. 4
- Oreščanin V., Nađ K., Valković V., Mikulić N., Meštović O., 2001. Red mud and waste base: raw materials for coagulant production. *Journal of Trace and Microprobe Techniques*, **19:3**, 419-428.
- Oreščanin V., Tibljaš D., Valković V., 2002. A study of coagulant production from red mud and its use for heavy metals removal. *J. Trace and Microprobe Techniques*, **20** (2), 233-245.
- Oreščanin V., Kollar R., Nađ K., 2017. Obrada kiselih rudničkih efluenta i otpadnih voda iz prališta brodova primjenom crvenog mulja. *Hrvatske vode*, **25** (2017), **102**, 215-224.
- Samokovlija Dragičević J., 2004. Uklanjanje bivše tvornice glinice Jadral u Obrovcu. *Građevinar*, **56** (2004) 10, 645-648.
- Subašić D., Schaller A., 1997. Emergency response activities and collecting damaged radiation devices from a war affected area in Croatia. *APO – Hazardous Waste Management Agency, Comissao Nacional de Energia Nuclear*.

web izvori:

URL1: [https://www.aluminiumleader.com/production/how\\_aluminium\\_is\\_produced/](https://www.aluminiumleader.com/production/how_aluminium_is_produced/)

URL2: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=2044>

URL3: <http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/al/spojevi.html#SPOJEVI>

URL4: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=8503>

URL5: <https://www.vijesti.me/vijesti/ekonomija/vrhovni-sud-na-strani-kap-a-i-drzave>

URL5a: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015\\_08\\_90\\_1757.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015_08_90_1757.html)

URL6: <https://sh.wikipedia.org/wiki/Ajka>

URL7: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hungary#Geography>

URL8: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Ma%C4%91arska#Reljef\\_i\\_klima](https://hr.wikipedia.org/wiki/Ma%C4%91arska#Reljef_i_klima)

URL9: [https://en.wikipedia.org/wiki/MAL\\_Hungarian\\_Aluminium](https://en.wikipedia.org/wiki/MAL_Hungarian_Aluminium)

URL10: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ajka\\_alumina\\_plant\\_accident](https://en.wikipedia.org/wiki/Ajka_alumina_plant_accident)

URL11: <https://www.theatlantic.com/photo/2011/09/a-flood-of-red-sludge-one-year-later/100158/>

URL12: <https://www.slobodnadalmacija.hr/dalmacija/zadar/clanak/id/114476/luzina-i-crveni-mulj-vise-ne-prijete-zrmanji>

URL13: <https://sh.wikipedia.org/wiki/Obrovac>

URL14: <https://zadarski.slobodnadalmacija.hr/4-kantuna/clanak/id/542486/kako-je-tvornica-glinice-jadral-umjesto-uspjeha-donijela-propast-obrovcu-tamo-niti-jedan-projekt-vise-nije-uspio-cak-i-sanacija-bazena-s-luzinom>

URL15: [https://bs.wikipedia.org/wiki/Obrovac\\_\(Hrvatska\)](https://bs.wikipedia.org/wiki/Obrovac_(Hrvatska))

URL16: <https://www.zadarskilist.hr/clanci/30112010/kako-je-sanirana-tvornica-glinice>

URL17: <https://www.slobodnadalmacija.hr/dalmacija/zadar/clanak/id/114476/luzina-i-crveni-mulj-vise-ne-prijete-zrmanji>

## 8. SAŽETAK

Ovaj seminarski rad prikazuje glavne značajke crvenog mulja i drugih ostataka iz proizvodnje aluminija te njihov utjecaj na okoliš. Crveni mulj i otpadna lužina su dvije tvari koje godišnje nastaju u velikim količinama i predstavljaju prijetnju za okoliš ako dođe do curenja ili širenja čestica i kapljica na okolno područje i u rijeke, te se zbog toga moraju odlagati na siguran način. Krške rijeke su jako osjetljiv ekosustav i treba biti oprezan s izgradnjom bilo kakvih tvornica u njihovoj blizini jer može vrlo lako doći do zagađenja čime se uništava pitka voda i direktno se utječe na život čovjeka i organizama. Opisan je način nadziranja i sanacije ekološke katastrofe izlivanja mulja 2010. godine iz tvornice aluminija Ajka u Mađarskoj te je prikazana važnost brzog odgovora na nastalu situaciju. Također je opisana i sanacija ovog otpada iz tvornice glinice Jadral kod Obrovca u Hrvatskoj koja je trajala oko 5 godina, nije dovršena i koštala je previše, iako su postojali i drugi mogući načini sanacije boksitnog otpada. Crveni mulj je tvar koja može učiniti štetu okolišu, ali, ako je njome rukovano na pravilan način, može biti jako korisna u očuvanju okoliša. Izuzetno je važno razvijati multidisciplinarni pristup u zaštiti okoliša, provoditi česte kontrole i brzo reagirati ako se dogodi neka nesreća ili je potrebna sanacija.

## 9. SUMMARY

This seminar paper presents the main features of red mud and other residues from alumina production and their environmental impact. Red mud and the related waste base are two substances that are produced annually in large amounts and pose a threat to the environment if leakage or the spread of particles and droplets occur in the surrounding area and into rivers and therefore, they have to be safely disposed. The karst rivers are a very sensitive ecosystem and people should be careful with the construction of any factories in their vicinity as it can very easily cause pollution, which destroys resources of drinkable water and directly affects the lives of humans and organisms. The method of monitoring and remediation of the ecological catastrophe spill in 2010 in case of the Ajka alumina plant in Hungary is described and as well as the importance of a rapid response after this spill. The process of remediation of waste from the Jadral alumina plant near Obrovac in Croatia is also described. It lasted about 5 years, it was not completed until now with too high recovery costs, although there were other possible ways of remediation for the bauxite waste. Red mud is a substance that can do harm to the environment, but if properly handled, it can be very useful in protecting the environment. It is extremely important to develop a multidisciplinary approach in environmental protection, to carry out frequent controls and to respond quickly in case of an accident and if the remediation is necessary.