

# Gospodarenje otpadnim muljem

---

**Plantak, Igor**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:768117>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-07**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



# Gospodarenje otpadnim muljem

---

**Plantak, Igor**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:768117>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2020-11-09**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering](#)



Sveučilište u Zagrebu

Geotehnički fakultet

IGOR PLANTAK

GOSPODARENJE OTPADNIM MULJEM

ZAVRŠNI RAD

Varaždin, 2016.

Sveučilište u Zagrebu

Geotehnički fakultet

IGOR PLANTAK

GOSPODARENJE OTPADNIM MULJEM

ZAVRŠNI RAD

Kandidat:

Igor Plantak

Mentor:

doc. dr. sc. Boris Kavur

Varaždin, 2016.



Sveučilište u Zagrebu  
Geotehnički fakultet



## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: IGOR PLANTAK

Matični broj: 2521 - 2014./2015.

### NASLOV ZAVRŠNOG RADA:

GOSPODARENJE OTPADNIM MULJEM

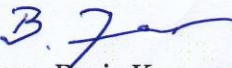
- Rad treba sadržati:
1. Uvod
  2. Podvodni mulj
  3. Mulj s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV)
  4. Zaključak
  5. Popis literature

Pristupnik je dužan predati mentoru jedan uvezen primjerak završnog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade završnog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 15.06.2016.

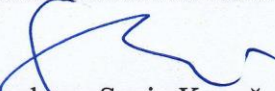
Rok predaje: 02.09.2016.

Mentor:

  
Doc.dr.sc. Boris Kavur



Predsjednica Odbora za nastavu:

  
Doc.dr.sc. Sanja Kovač

## **IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI**

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom **GOSPODARENJE OTPADNIM MULJEM** rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **doc.dr.sc Borisa Kavura**.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te na nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije korišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 02.09.2016.

Igor Plantak



## **Sažetak**

**Ime i prezime: Igor Plantak**

**Naslov rada: Gospodarenje otpadnim muljem**

Otpadni mulj i njegovo zbrinjavanje sve je aktualnija tema današnjice. Količine i načini zbrinjavanja muljeva razlikuju se od zemlje do zemlje, no metode su pretežito jednake. Kako bi se mulj mogao zbrinuti što prihvatljivije za okoliš, potrebno ga je najprije obraditi i dovesti u što inertnije stanje, a zatim odrediti njegovu daljnju uporabu.

U uvodnom dijelu rada obrađena je problematika i načini nastajanja otpadnog mulja općenito, dok je u daljnjem dijelu rada objašnjena problematika podvodnog mulja, primarno određivanjem njegovih osnovnih značajki. Zatim su detaljnije opisani geotehnički i ekološki aspekti jaružanja, mogućnosti solidifikacije podvodnog mulja, metode ekološki prihvatljivog odlaganja zagađenog mulja te mogućnosti uporabe jaružanog materijala.

Okosnicu drugog dijela rada čini mulj s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) te su opisani postupci i stupnjevi pročišćavanja otpadnih voda, vrste pročišćavanja te vrste mulja koje njima nastaju. Poblize su objašnjene fizikalne, kemijske i mikrobiološke značajke otpadnog mulja te osnovni postupci u njegovom tretiranju. Nakon obrade mulja, slijedi njegovo konačno zbrinjavanje kompostiranjem, spaljivanjem, pretvorbom u bioplin te korištenjem u betonskoj industriji. Na kraju rada opisano je stanje u Republici Hrvatskoj, izveden zaključak i predložen daljnji smjer razmišljanja o ovoj temi.

**Ključne riječi:** jaružanje, otpadni mulj, obrada mulja, odlaganje mulja, mulj s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda

## Sadržaj

<b>1. Uvod</b> .....	1
<b>2. Podvodni mulj</b> .....	3
<b>2.1. Značajke podvodnog mulja</b> .....	4
<b>2.2. Uklanjanje podvodnog mulja jaružanjem</b> .....	6
<b>2.3. Solidifikacija mulja</b> .....	8
<b>2.4. Odlaganje zagađenog mulja</b> .....	10
<b>2.5. Mogućnosti uporabe jaružanog materijala</b> .....	13
<b>3. Mulj s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV)</b> .....	14
<b>3.1. Postupci obrade otpadne vode</b> .....	14
<b>3.2. Sastav i značajke mulja s UPOV-a</b> .....	16
3.2.1. Fizikalne značajke mulja .....	17
3.2.2. Kemijske značajke mulja .....	18
3.2.3. Mikrobiološke značajke mulja.....	19
Tablica 2. Srednje vrijednosti sastava i svojstava mulja različita podrijetla [11].....	19
<b>3.3. Procesi obrade mulja s UPOV-a</b> .....	20
3.3.1. Kondicioniranje mulja.....	21
3.3.2. Zgušnjavanje mulja .....	22
3.3.3. Stabilizacija mulja .....	24
<b>3.4. Mogućnosti zbrinjavanja i uporabe mulja s UPOV-a</b> .....	27
3.4.1. Kompostiranje .....	27
3.4.2. Proizvodnja bioplina iz otpadnog mulja.....	28
3.4.3. Termička obrada mulja .....	29
<b>3.5. Stanje s muljem UPOV-a u RH</b> .....	31
<b>4. Zaključak</b> .....	33
<b>5. Popis literature</b> .....	35



## 1. Uvod

Velike količine otpadnih muljeva nastaju kao nusproizvodi različitih industrija. U rudarskoj industriji tako nastaju otpadni muljevi pri procesima oplemenjivanja ruda kao npr. tijekom pridobivanja fosfata, olova, cinka, bakra, zlata, glinice (iz boksita) za proizvodnju aluminijske i dr. Takvi muljevi često sadrže povećane koncentracije teških metala kao i kemijskih supstanci koje se koriste u procesima oplemenjivanja te se zbog toga ne mogu nekontrolirano ispuštati u okoliš [1]. Osim toga muljevi nastaju i u različitim prerađivačkim industrijama kao npr. kod proizvodnje papira te često sadrže i veće količine organske materije. Velike količine mulja bogatog organskom materijom u zadnje vrijeme nastaju pri ekološkim zahvatima u procesima pročišćavanja otpadnih voda.

Mulj nastaje i prirodnim procesom erozije tla pod djelovanjem tekućih voda. Erodirani materijal biva nošen tekućicama i zatim se taloži pri ušćima rijeka kao novi sediment. Akumuliranje sedimenta u lukama, plovnim putevima i kanalima nije prihvatljivo jer se navedeni objekti trebaju održavati operativnim (plovnim). Osim toga, podvodni mulj koji je istaložen tijekom zadnjih nekoliko decenija najčešće sadrži toksične supstance u značajnim koncentracijama i predstavlja veliki ekološki problem[2]. Zagađenje istaloženog mulja je posljedica dugotrajnog onečišćavanja tla i površinskih voda u industrijskim zonama razvijenih zemalja kao i onečišćavanja poljoprivrednih površina pretjeranim korištenjem herbicida i pesticida. Zbog navedenih razloga podvodni mulj se najčešće fizički uklanja s dna posebnom tehnikom tzv. jaružanja. Zagađeni mulj treba odložiti na ekološki prihvatljiv način ili tretirati tako da se toksične supstance fizički izoliraju i/ili kemijski izmijene tako da više ne predstavljaju opasnost za okoliš i zdravlje ljudi. U situacijama kada mulj ne sadrži povećane koncentracije onečišćenja moguće ga je direktno uporabiti (bez tretmana) kao koristan materijal za nasipavanja terena, gradnju i sl. [1].

Razvoj naselja i povećanje standarda stanovništva teži većoj potrošnji vode, no istovremeno uzrokuje zagađenje čovjekove okoline, a time i porast količine otpadnih voda i mulja koji nastaje njihovim pročišćavanjem na uređajima za pročišćavanje. Onečišćenje voda nastaje unošenjem, ispuštanjem ili odlaganjem

raznih tvari, toplinske energije te drugih uzročnika onečišćenja, u količini kojom se mijenjaju svojstva vode u odnosu na njihovu ekološku funkciju i namjensku uporabu. Površinske vode su u interakciji sa podzemnim vodama koje su najveći izvor pitke vode za čovjeka. Narušena kakvoća površinske vode i sve veća potrošnja čiste podzemne vode ugrožavaju prirodne procese samopročišćavanja, pa je zbog toga nužan proces pročišćavanja otpadnih voda [3].

U postupcima pročišćavanja otpadnih voda kao nusprodukt pojavljuje se mulj. Zbrinjavanje ovog mulja predstavlja poseban problem zbog sadržaja teških metala i drugih štetnih materija te velike količine biorazgradivog materijala. Upravo, zbog značajnog udjela organske materije u ovom mulju, njegovo odlaganje na deponije komunalnog otpada nije prihvatljivo, a nakon 31.12.2016. više neće biti dozvoljeno premda je to trenutno uobičajena praksa u Hrvatskoj [4]. Zemlje EU su zadnjih 15-ak godina posvetile posebnu pažnju zbrinjavanju muljeva sa uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV). Sastav, uvjeti za korištenje i način odlaganja muljeva iz komunalnih otpadnih voda su regulirani zakonodavstvom zemalja EU.

Cilj ovog rada je opisati problematiku gospodarenja otpadnim muljevima. U prvom dijelu opisati će se geotehnički i ekološki aspekti jaružanja, mogućnosti solidifikacije podvodnog mulja, način ekološki prihvatljivog odlaganja zagađenog mulja te mogućnosti korisne uporabe jaružanog materijala. U drugom dijelu opisati će se postupci obrade otpadne vode i nastalog mulja te mogućnosti zbrinjavanja ili uporabe mulja s UPOV-a.

## 2. Podvodni mulj

Razvojem novih tehnika i metoda okolišne geotehnike, ponovna upotreba jaružanog mulja s dna rijeka, jezera i mora dobiva na snazi, pogotovo u priobalnim zemljama poput Nizozemske, SAD-a i Francuske. Jaružani materijal u svijetu se prepoznaje kao važan, relativno jeftin i održiv prirodan resurs. Kao i mulj s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda, onečišćeni podvodni mulj s dna vodotoka, također zahtijeva detaljnu obradu prije uporabe ili odlaganja u okoliš.

Problematika zbrinjavanja otpadnog mulja javlja se pri operacijama uklanjanja sedimenta (podvodnog mulja) u rijekama i jezerima te kod izvođenja specijalnih geotehničkih radova na temeljenju tj. izvedbi pilota i dijafragmi.

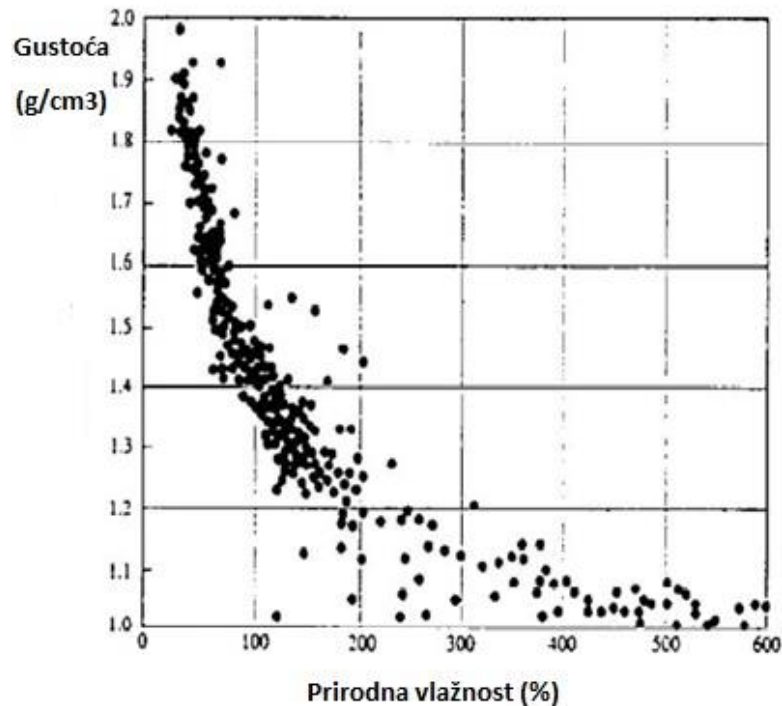
Sedamdesetih godina prošlog stoljeća razvijene zemlje svijeta dogovorile su se o prekidu odlaganja toksičnih supstanci u mora i oceane potpisivanjem dviju konvencija: Londonske Konvencije i Konvencije iz Osla i Pariza. Ove konvencije se primarno odnose na regulaciju odlaganja otrovnih kemikalija u oceane, ali obuhvaćaju i problematiku zagađenog podvodnog mulja.

U SAD-u se svake godine izvuče oko 500 milijuna m<sup>3</sup> podvodnog mulja, a najbolji primjer su Velika jezera iz kojih se godišnje izvuče oko 5 milijuna m<sup>3</sup> mulja za nesmetano funkcioniranje kanala i luka u komercijalne, vojne i rekreacijske svrhe te kroz različite ekološke, remedijacijske projekte. Oko jedne polovice ukupnog mulja iz Velikih jezera je karakterizirano kao problematičan, zagađeni mulj i zahtijeva zbrinjavanje u izoliranim odlagališnim prostorima kako takav mulj ne bi imao utjecaj na kvalitetu vode i lokalne organizme.

U europskim zemljama količine podvodnog mulja su značajno manje od onih u SAD-u i koncentrirane su u glavnim lukama poput Rotterdama, Hamburga, Antwerp, Portsmoutha i Marseillesa.

## 2.1. Značajke podvodnog mulja

Jedna od glavnih značajki podvodnih muljeva je visoki sadržaj vode, naročito u rijekama, jezerima i morima. Takav mulj može sadržavati visoke gravimetrijske vrijednosti vlažnosti u rasponu od 200 do 250 % što utječe i na njegovu gustoću (slika 1).



Slika 1. Odnos vlažnosti i gustoće podvodnog mulja [2]

Što je veći sadržaj vode u mulju, to mulj ima manju gustoću. Jedna od učinkovitijih metoda za smanjivanje volumena mulja može biti dehidracija pri čemu se mulju dodaju razni organski i anorganski flokulanti za zgušnjavanje [2]. Podvodni muljevi često imaju i relativno visok udio organske materije koji se u prosjeku kreće od 5 do 15 % [2].

Uz visok sadržaj vode bitna značajka podvodnog mulja je granulometrijski sastav čvrstih čestica koji ima utjecaj na mehanička svojstva mulja (posmična čvrstoća i stišljivost) kao i interakciju između sedimenta i onečišćivala. Granulometrijski sastav podvodnog mulja tipično odgovara frakcijama praha i gline [2].

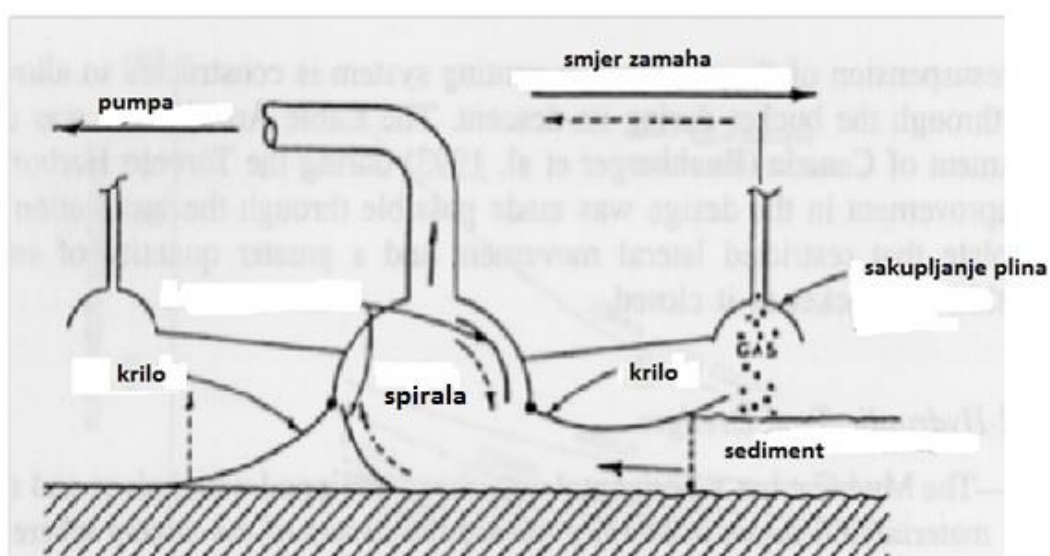
Mehanička svojstva mulja je potrebno poznavati prilikom razmatranja mogućnosti sprječavanja širenja onečišćenja iz zagađenog mulja njegovim prekrivanjem npr. slojem pijeska. Za potrebe određivanja mehaničkih svojstava mekanih podvodnih muljeva razvijene su posebne laboratorijske i terenske penetracijske metode ispitivanja. Ako je sediment onečišćen, onečišćivala (npr. teški metali) će se koncentrirati u sitnoj frakciji, a najčešće u gornjem sloju mulja [2].

Ispuštanjem kanalizacijske vode u područja u kojima ima nataloženog podvodnog mulja, može doći do onečišćenja bakterijama i virusima što može uzrokovati razne bolesti konzumacijom školjaka ili plivanjem [2].

## 2.2. Uklanjanje podvodnog mulja jaružanjem

Do sada je u svijetu razvijeno više tipova jaružala, od čisto mehaničkih, hidrauličkih, pneumatskih do kombiniranih sustava, koja su namijenjena za uklanjanje podvodnih muljeva pri različitim uvjetima i kapacitetima jaružanja. Sustavi su dizajnirani tako da se smanji izlijevanje mulja tijekom jaružanja kao i zamućenje vode odnosno resuspenzija onečišćenog mulja[2].

Na slici 2 prikazan je kombinirani tip mehaničko-hidrauličkog jaružala razvijenog u Japanu, tzv. „Cleanup system“.



Slika 2. Primjer kombiniranog tipa jaružala, tzv. „Cleanup system“ [2]

„Cleanup system“ je razvijen za uklanjanje jače zagađenog sedimenta. Konstrukcija jaružala osigurava minimalnu resuspenziju čvrstih čestica tla i zagađivala u okolnoj vodi tijekom jaružanja. Glava stroja se sastoji od spirale zaklopljene krilcima dok se jaružalo pomiče naprijed-nazad tijekom uklanjanja sedimenta. Spirala uklanja i usmjerava sediment prema potopljenoj usisnoj centrifugalnoj pumpi. Ovaj tip jaružala je uspješno i ekstenzivno korišten u Japanu za iskop mekanog mulja i pijeska zagađenih živom, kadmijem, uljima i organskom materijom [2].

U operacijama uklanjanja zagađenog podvodnog mulja najvažnije je osigurati sljedeće [2]:

- spriječiti sekundarno zagađivanje vode i tla tijekom jaružanja zbog resuspenzije mulja i zagađivala u okolnoj vodi;

- održati što niži udio vode u uklonjenom mulju (manji volumen mulja).

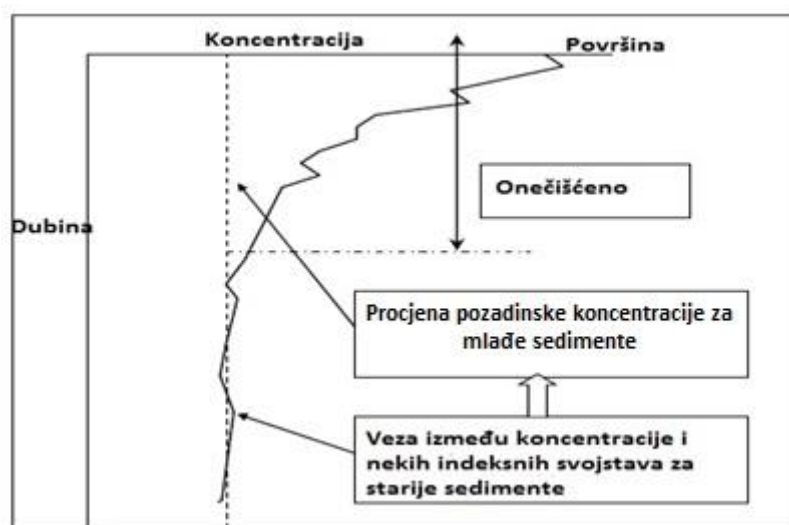
Više o tehnikama jaružanja i različitim tipovima jaružala može se naći u referencama [5] i [6].

Prije operacija jaružanja potrebno je odrediti dubinu i stupanj onečišćenja mulja kao u primjeru prikazanom na slici 3. U slučaju onečišćenja teškim metalima moguće je ustanoviti vezu između tzv. pozadinske ili prirodne koncentracije nekog teškog metala i svojstava tla kao što su veličina zrna i Atterbergove granice [2]. Ako je pozadinska koncentracija teškog metala procijenjena na temelju ranijih istraživanja i poznatih indeksnih svojstava tla, stupanj onečišćenja ( $P_d$ ) se može procijeniti slijedećom jednadžbom [7]:

$$P_d = (C_i - B_g) / B_g \quad (1)$$

gdje je  $C_i$  koncentracija teškog metala u sedimentu, a  $B_g$  pozadinska koncentracija.

Profili koncentracije onečišćenja (slika 3) u japanskim zaljevima pokazuju da je debljina onečišćenog sedimenta obično ograničena na 1 m odnosno prosječno oko 0,5 m [2].



Slika 3. Profil koncentracije teškog metala u sedimentu [2]

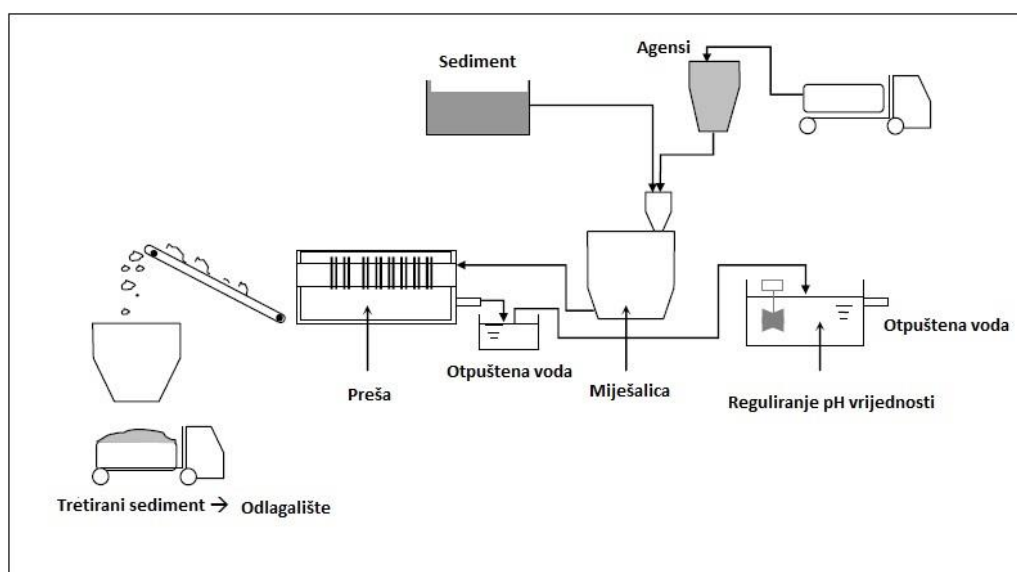
## 2.3. Solidifikacija mulja

U cilju racionalnog korištenja odlagališnog prostora koji je namijenjen za odlaganje mulja korisno je reducirati volumen mulja (smanjenje udjela vode) postupkom prethodne obrade. Isto tako, u slučaju korištenja jaružanog onečišćenog materijala neophodno je reducirati štetni potencijal prisutnih onečišćivala. Uporaba jaružanog materijala tako uglavnom ovisi o njegovim geotehničkim značajkama i stupnju onečišćenja [2]. Čisti jaružani sedimenti kao što su pijesak i glina mogu se direktno koristiti kao materijali za gradnju.

Metodom solidifikacije mulja moguće je reducirati njegov volumen, a isto tako i fizički imobilizirati i/ili kemijski promijeniti prisutna onečišćivala [2], [8].

Na slici 4. prikazan je postupak solidifikacije mulja. Sustav solidifikacije mulja sastoji se od miješalice, preše za istiskanje vode iz mulja te pH regulatora. U provedenoj studiji [8] korišteno je nekoliko različitih kemijskih dodataka za solidifikaciju mulja i to: vapno, Portland cement, sintetička smola „UKC-K“, polialuminijev klorid (PAC) i prirodni polimer „L-fresh“.

U prvoj fazi solidifikacije mulj se miješa pomoću lopatica u periodu od 10 minuta. Sljedeća faza obuhvaća ekstrakciju vode iz mulja i smanjenje volumena u preši pod pritiskom od 600 do 630 kPa. Tretirani materijal se odvozi na odlagalište ili reciklira.



Slika 4. Postupak solidifikacije mulja [2]



U tablici 1. prikazani su rezultati ispitivanja tretiranog mulja. Rezultati studije analizirani su u pogledu efikasnosti redukcije vlažnosti mulja, postignute tlačne čvrstoće tretiranog mulja i kvalitete izdvojene vode.

Nakon 40 minuta, najmanji udio vode (37,8 %) sadržavao je mulj tretiran sa polialuminijevim kloridom, a najveći tretiran sa „L-fresh“ polimerom. Pokusom tlačne čvrstoće ustanovljeno je da dodatkom smole „UKC-K“ materijal ima najveću tlačnu čvrstoću (1,4 MPa), a nešto manju dodatkom vapna i Portland cementa. pH vode bio je niži ili viši od pH sedimenta, ovisno o dodanom agensu. Vapno, cement i smola povisili su pH, a PAC i „L-fresh“ polimer snizili pa je trebalo neutralizirati i podesiti pH vode na 7,2 do 7,7 prije ispusta. Vrijednosti ukupno suspendiranih čestica (SS) i otopljenog kisika (DO) zadovoljile su standarde za ispuštanje vode u okoliš, dok su vrijednosti biokemijske potrošnje kisika (BPK) bile visoke i vodu je bilo potrebno još jednom tretirati.

Tablica 1. Rezultati solidifikacije mulja [2]

Agensi → Svojstva ↓	Bez agensa	Vapno	Portland cement	Sintetička smola „UKC-K“	PAC	Polimer „L-fresh“
Količina agensa (%)	-	3	3	3	0,75	0,1
<b>Tretirani materijal</b>						
Sadržaj vode (%)	82	45	44,8	48,1	37,8	77
Tlačna čvrstoća (kPa)	-	400	450	1420	-	-
pH	6,3	11,2	11,8	11,4	7,14	7,2
Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	1,39	1,73	1,7	1,73	1,81	1,54
<b>Procjedna voda</b>						
Neutralizirani pH	7,2	7,3	7,7	7,3	5,4	7,3
SS (mg/L)	5	6,3	6	6,3	5,6	6,3
DO (mg/L)	8,5	6,3	7,5	6,3	5,6	6,3
BPK (mg/L)	15,7	16,7	16,2	16,4	16,2	16,4

## 2.4. Odlaganje zagađenog mulja

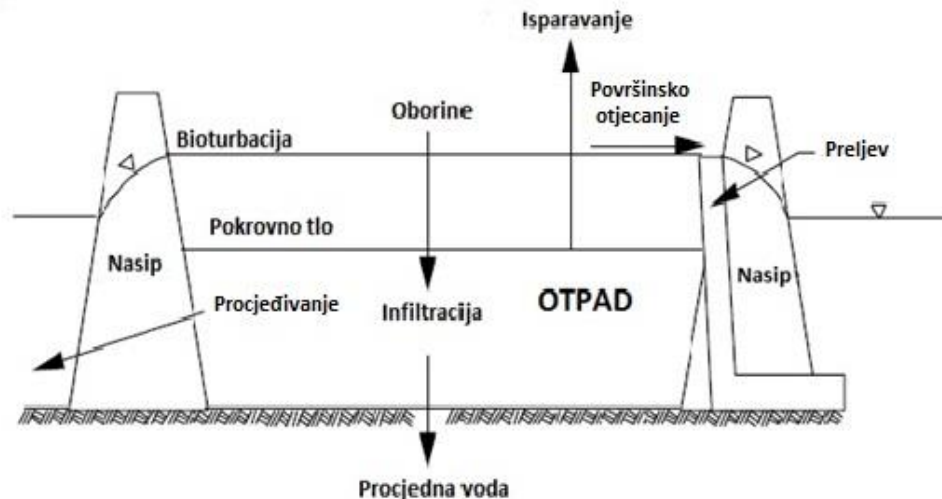
Zbrinjavanje zagađenih muljeva, bilo industrijskih ili podvodnih, najčešće se provodi odlaganjem u izolirane odlagališne prostore (IOP) kako bi se spriječilo emisije toksičnih tvari u okoliš [1]. IOP predstavlja bazen ili lagunu koja je formirana gradnjom obodnog nasipa. Nažalost, vrlo su česte pojave ozbiljnih ekoloških incidenata pa i katastrofa po okoliš koji su posljedica nekontroliranog oslobađanja deponiranog, tekućeg mulja zbog popuštanja ili rušenja obodnog nasipa. Takve pojave najčešće se dešavaju zbog propusta u gradnji nasipa, nedovoljno poznatih geotehničkih značajki temeljnog tla ili zbog nedovoljnog održavanja i nadzora IOP-a u eksploataciji [1].

Primarni cilj u procesu odlaganja je što prije reducirati udio vode odnosno volumen mulja kako bi se racionalno koristio odlagališni prostor [1]. Čvrste čestice mulja odloženog u IOP prvo prolaze proces taloženja, a zatim proces konsolidacije. Kada je udio sitne frakcije ( $< 63 \mu\text{m}$ ) u mulju visok, procesi taloženja i konsolidacije su vrlo spori.

Geotehnički zadatak je s jedne strane osigurati ekološki prihvatljivo i sigurno odlaganje mulja, a s druge racionalizirati veličinu IOP-a što se može postići ubrzanjem procesa taloženja i konsolidacije [1].

U pogledu projektnih i izvedbenih zahtjeva za IOP koji je namijenjen za odlaganje zagađenog mulja, IOP treba biti smješten na lokaciji koja osigurava prirodne uvjete za odlaganje i izolaciju mulja ili mora biti opremljen odgovarajućim inženjerskim barijernim sustavom koji je projektiran i ugrađen da bi se spriječilo širenje onečišćenja izvan granica IOP-a.

Na slici 5 prikazane su moguće rute širenja onečišćenja u okoliš iz IOP-a.



Slika 5. Rute širenja onečišćenja u okoliš iz IOP-a [2]

Materijali inženjerskog barijernog sustava IOP-a trebaju:

- imati dovoljnu čvrstoću i debljinu kako bi se izbjegao slom zbog gradijenta opterećenja u IOP-u.
- biti kemijski kompatibilni s komponentama otpadnog mulja odnosno njegovim migrirajućim komponentama.
- biti zaštićeni od klimatskih utjecaja, utjecaja pri ugradnji, te naprezanja koja se javljaju u uvjetima eksploatacije IOP-a (slijeganja, tlačna i vlačna naprezanja, uzgon).

Monitoring i nadzor IOP-a:

- za vrijeme gradnje obodnog nasipa i ugradnje barijernog sustava sve komponente moraju biti nadzirane i kontrolirane kako bi se spriječila oštećenja i nepravilnosti pri ugradnji.
- za vrijeme eksploatacije IOP-a redoviti nadzorni pregledi se moraju vršiti na tjednoj bazi, a izvanredno (odmah) nakon velikih oborina ili potresa radi pravovremenog otkrivanja oštećenja nasipa i/ili barijernog sustava te pravovremenog poduzimanja mjera sanacije.
- stalno je potrebno pratiti količine mulja koji se upušta u IOP, količine izdvojene vode na površini lagune (nakon taloženja), količine procijednih tekućina kroz barijerni sustav u drenažni sloj, količine padalina, vremenske uvjete itd.

- u slučaju curenja iz obodnog nasipa, lokalnog slijeganja tijela nasipa, nagle promjene razine tekućine u laguni, IOP mora odmah biti stavljen izvan eksploatacije i mora postojati plan s unaprijed spremnim akcijskim mjerama koje se odmah poduzimaju za izbjegavanje katastrofičnog izljeva mulja u okoliš.

## 2.5. Mogućnosti uporabe jaružanog materijala

Jaružani materijal je prepoznat kao značajan, jeftin i održiv prirodni resurs koji se danas koristi u sljedeće svrhe [2]:

- nasipanje površine terena
- proizvodnju cigle
- očvršli i stabilizirani materijali za prekrivanje i zaštitu, parkirališta, nogostupa
- prerađeni materijal za golf terene, parkove
- kao agregat za beton i asfalt
- gradnju brtvenih barijera.

Tretirani jaružani materijali se isto tako mogu uporabiti u rješavanju različitih ekoloških problema. Neki primjeri takvih projekata su: injektiranje jaružanog materijala s vezivom i aditivima u napuštene rudnike radi sprječavanja izljeva kiselih rudničkih voda u podzemne vode, prekrivanje onečišćenog tla u industrijskim zonama radi sprječavanja infiltracije oborinskih voda i širenja onečišćenja u podzemlje, proizvodnja materijala za kontrolu i sprječavanje erozije obala itd. [2].

### 3. Mulj s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV)

U postupcima pročišćavanja otpadnih voda kao nusprodukt pojavljuje se mulj. UPOV-i koji imaju prethodno taloženje proizvode sirovi ili primarni mulj, a oni koji imaju biološki stupanj proizvode i biološke muljeve. Neki UPOV-i rabe kemikalije koje ubrzavaju ili poboljšavaju učinkovitost neke tehnološke operacije. Te se kemikalije dodaju u otpadnu vodu i muljeve i njihov najveći dio završava u muljevima povećavajući im ukupnu masu, volumen i kakvoću [9].

#### 3.1. Postupci obrade otpadne vode

Pod otpadnim vodama podrazumijevamo komunalne, tehnološke, rashladne, procjedne i oborinske onečišćene vode, te ostale otpadne vode.

Otpadne vode se mogu obrađivati u četiri stupnja:

- **Prethodni stupanj pročišćavanja** je predobrada otpadnih voda u skladu sa zahtjevima za njihovo ispuštanje u sustav javne odvodnje.
- **Prvi stupanj (I) pročišćavanja** je obrada komunalnih otpadnih voda fizikalnim i/ili kemijskim postupkom koji obuhvaća taloženje suspendiranih tvari ili druge postupke u kojima se biokemijska potrošnja kisika (BPK) ulaznih otpadnih voda smanjuje za najmanje 20% prije ispuštanja, a ukupne suspendirane tvari ulaznih otpadnih voda za najmanje 50%.
- **Drugi stupanj (II) pročišćavanja** je obrada komunalnih otpadnih voda postupkom koji općenito obuhvaća biološku obradu sa sekundarnim taloženjem i/ili druge postupke kojima se postižu zahtjevi iz Pravilnika o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda [9].
- **Treći stupanj (III) pročišćavanja** je stroža obrada komunalnih otpadnih voda postupkom kojim se uz drugi stupanj pročišćavanja

postizu zahtjevi za i/ili fosfor i/ili dušik Pravilnika, i/ili mikrobiološke pokazatelje i/ili druge onečišćujuće tvari u cilju zaštite osjetljivih područja, odnosno postizanja ciljeva kakvoće voda prijemnika[10].

Za pročišćavanje otpadnih voda postoji nekoliko tehnika koje ovise o vrsti onečišćenja, a u njih ubrajamo mehaničko, kemijsko i biološko pročišćavanje.

Mehaničko pročišćavanje obuhvaća fizikalne procese koji čiste vodu od čvrstih suspenzija koje se lako talože ili plivaju na površini. To su najčešće nečistoće mineralnog porijekla (šljunak i pijesak) i ulja. Ovim se procesom također biološka potrošnja kisika (BPK) reducira za četvrtinu.

Biološko pročišćavanje obuhvaća biološke postupke u kojima se djelovanjem mikroorganizama uklanjaju otopljeni organski sastojci i anorganski sastojci, te suspendirane čestice preostale nakon primarne obrade (mehaničko pročišćavanje). Ovisno o podrijetlu otpadne vode, za uklanjanje otopljenih sastojaka primjenjuju se biološki aerobni i anaerobni postupci temeljeni na različitom odnosu mikroorganizama prema otopljenom kisiku. Mikroorganizmi koji se koriste pri pročišćavanju se svrstavaju u grupe, ovisno o potrebnom kisiku, pa tako imamo obvezne aerobe, fakultativne anaerobe, anaerobe i obvezne anaerobe (aerotolerantni anaerobi i mikroaerofili). Ovisno o mikroorganizmima koji se koriste postoje razni biološki postupci uklanjanja sastojaka iz otpadne vode, a to su biooksidacija, nitrifikacija, denitrifikacija, postupci uklanjanja fosfata i anaerobna obrada nastalog mulja. Najčešći uređaji koji se koriste prilikom biološke obrade su lagune i aeracijski bazeni[3].

Ako su u efluentu nakon sekundarnog pročišćavanja prisutni deterdženti, pesticidi, anorganske soli i slične dispergirane tvari potrebno je primijeniti i tercijarno ili fizikalno-kemijsko pročišćavanje. Ovo pročišćavanje se upotrebljava kao završna obrada voda kako bi se zadovoljili zakonski propisi o ispuštanju otpadnih voda u javnu kanalizaciju ili prirodni prijemnik (recipijent).

### 3.2. Sastav i značajke mulja s UPOV-a

Učinkovitost obrade mulja koji se može izdvojiti u postupku pročišćavanja direktno utječe na učinak rada uređaja za pročišćavanje otpadnih voda. Mulj se mora obrađivati po mogućnosti bez štetnih utjecaja na okoliš. Prije obrade potrebno je odrediti količinu, sastav i osnovna fizikalna i kemijska svojstva sirovog mulja [3].

Količina mulja koji nastaje pročišćavanjem gradskih otpadnih voda ovisi o značajkama (kakvoći) otpadne vode koja se pročišćava, ali i o samom postupku pročišćavanja. Ukoliko se za obradu otpadne vode koristi više složenijih postupaka, količine mulja su mnogo veće i kreću se u rasponu od 40 do 60 grama suhe tvari/ES/dan [3].

Volumen svježeg mulja uvijek je manji od volumena vode koja se pročišćava. Najvažnije je smanjiti volumen mulja, odnosno izdvojiti što veću količinu vode iz mulja. Sastav i svojstva mulja ovise o vrsti otpadnih voda, no najčešće se radi o gradskim otpadnim vodama, pa tako razlikujemo primarni, biološki i terciarni mulj, te kombinacije muljeva [4].

Količina mulja ovisi o kakvoći vode koja se pročišćava, ali i o postupku pročišćavanja. Što je postupak pročišćavanja potpuniji to su i količine mulja veće.

Tijekom obrade gradske otpadne vode nastaje:

1. Primarni mulj koji se izdvaja nakon I. stupnja pročišćavanja iz primarnog ili prethodnog taložnika. Primarni mulj sadrži anorganske tvari (pijesak, glinu, karbonate i kovinske okside), organske lako razgradive tvari (bjelančevine, masti, ugljikohidrati), organske teško razgradive tvari (različita vlakna i guma) te mikroorganizme poput bakterija, virusa i gljivica.
2. Biološki mulj se izdvaja iz biološkog reaktora procesima aerobne ili anaerobne razgradnje otopljenih organskih tvari. Takav mulj sadrži uglavnom živu masu bakterija i njihove ostatke, a količina ovisi o vrsti uređaja i postupku pročišćavanja otpadne vode, starosti mulja, unosu zraka i dr.



3. Tercijarni mulj se izdvaja nakon III. stupnja pročišćavanja, a sadrži ostatke reakcija dodanih kemikalija s otpadnom vodom i njezinim sadržajem, adsorbente i alge, što ovisi o postupku koji se primjenjuje [3].

Značajke mulja o kojima će ovisiti izbor sustava za njegovu obradu možemo podijeliti na fizikalne, kemijske i biološke. Na slici 6 prikazan je sirovi mulj na uređaju za pročišćavanje otpadne vode grada Zagreba.



Slika 6. Sirovi mulj na uređaju za pročišćavanje otpadne vode grada Zagreba [3]

### 3.2.1. Fizikalne značajke mulja

Ukupna voda koju sadrži mulj može biti:

- a) slobodna – lako se uklanja taloženjem čvrstih čestica
- b) vezana (kapilarno ili adhezijski) – uklanja se teže cijedenjem pod tlakom
- c) intermolekularna (adsorbirana) – može se ukloniti jedino termičkim procesima.

**Taloživost** ovisi o načinu vezanja vode u mulju i upućuje na mogućnost da se mulj odvoji taloženjem čvrstih čestica pod utjecajem gravitacije ili mehaničkim miješanjem.

**Stišljivost (dehidratizacija)** služi pri izboru načina uklanjanja vezane vode, a najčešće se koriste filtri pod tlakom i centrifuge.

**Granulometrijski sastav** mulja ovisi o vrsti mulja, a promjer čvrstih čestica iznosi od 0,001 mm do 5,0 mm [3].

**Vlaga** ovisi o temperaturi i obrnuto je proporcionalna koncentraciji suhih tvari.

**Gustoća** sirovog mulja, budući da se u njemu nalazi visoki sadržaj vode, iznosi oko 1000 kg/m<sup>3</sup>. Ako se smanji sadržaj vode, povećava se volumna masa zbog sadržaja mineralnih sastojaka koji imaju veću gustoću pa se dobivaju sljedeće vrijednosti gustoće mulja [3]:

- 90 % vode → 1030 kg/m<sup>3</sup>
- 75 % vode → 1100 kg/m<sup>3</sup>
- 50 – 55 % vode → 1200 kg/m<sup>3</sup>

**Toplinska vrijednost** važna je pri obradi mulja spaljivanjem i iznosi [3]:

- za ukupnu suhu tvar cca. 16 747 kJ/kg
- za organsku suhu tvar cca. 21 771 kJ/kg

### 3.2.2. Kemijske značajke mulja

**Vrijednost pH** svježeg mulja iznosi oko 7.0 pa možemo reći da je mulj gotovo neutralan. Tijekom raspadanja mulja pH vrijednost pada jer nastaje kiselo vrenje.

**Količina suhe mase (SM)** je ukupna količina organskih i anorganskih tvari nakon sušenja pri temperaturi od 105 °C te se obično prikazuje u postotku mase ili u g/L.

**Količina anorganskih (mineralnih) tvari** dobiva se žarenjem pri temperaturi od 550 °C. Ostatak nakon žarenja izražava se u postotku ukupne suhe tvari, a predstavlja ostatak ili približno ostatak anorganske tvari. Razlika između mase suhe tvari i ostatka nakon žarenja čini masu organske tvari [3].

### 3.2.3. Mikrobiološke značajke mulja

Sirovi mulj može sadržavati patogene mikroorganizme, jaja crva i druge parazite kao i saprofitne organizme.

Tablica 2. Srednje vrijednosti sastava i svojstava mulja različita podrijetla [11]

SOJSTVA	MJERNA JEDINICA	PRIMARNI MULJ	BIOLOŠKI MULJ	SREDNJE ISTRULJENI MULJ	DOBRO ISTRULJENI MULJ	AEROBNO STABILIZIRANI MULJ
KONCENTRACIJA SUHE TVARI	% mase	3,0-5,0	0,5-1,5	6,0-10	6,0-10	2-5 nakon zgušnjavanja
Ph		5,5-7,0	6,0-7,0	oko 7,0	oko 7,5	6,5-7,0
ORGANSKI UDIO	% mase	65-75	65-75	55-60	40-45	50-60
SPECIFIČNI OTPOR CIJEDENJU	s <sup>2</sup> /g	1011	1010	oko 10 <sup>10</sup>	oko 10 <sup>5,5</sup>	oko 10 <sup>9</sup>
KALORIJSKA VRIJEDNOST	kJ/kg	14 564-16 747	14 654-16 747	11 304-13 860	6 280-8 374	7 536-9 630

U tablici 2. prikazane su srednje vrijednosti svojstava i sastava mulja različita podrijetla. Može se zaključiti da primarni i biološki mulj imaju skoro duplo veću kalorijsku vrijednost od dobro istruljenog mulja koji ima nizak sadržaj vlage. Srednje i dobro istruljen mulj ima mnogostruko veću koncentraciju suhe tvari jer ne sadrži toliko vlage koliko sadrži primarni i biološki mulj.

### 3.3. Procesi obrade mulja s UPOV-a

Mulj koji nastaje pročišćavanjem otpadnih voda nema uvijek iste karakteristike te mogućnost ponovne upotrebe uvelike ovisi o njegovu kemijskom i fizikalnom sastavu te procesima pročišćavanja otpadne vode. Zbog toga se mulj uvijek mora najprije ispitati, a tek onda se određuje tehnološki postupak obrade [9].

Procesi obrade mulja su različiti i mogu se kombinirati na razne načine, što ovisi o veličini uređaja i načinu iskorištavanja mulja. U prvom redu se želi ukloniti što više vode iz mulja kako bi mu se smanjio volumen, a to se postiže odvajanjem vode, zgušnjavanjem i sušenjem [12].

U tablici 3. Prikazani su najčešći pokusi za određivanje svojstava mulja za određeni postupak njegove obrade, a sami postupci obrade biti će objašnjeni u nastavku ovoga rada.

Tablica 3. Procesi i načini određivanja značajki mulja [13]

<b>POSTUPAK</b>	<b>ODREĐIVANJE ZNAČAJKI MULJA</b>
<b>OBRADA MULJA</b>	pokusi: koagulacije, flokulacije, smrzavanja, termičke obrade bez tlaka i pod tlakom
<b>SEDIMENTACIJA, ZGUŠNJAVANJE I FLOTACIJA MULJA</b>	određivanje svojstava suspenzije, pokus sedimentovalentnosti, tlačno flokulacijski pokus
<b>UKLANJANJE VODE IZ MULJA</b>	određivanje spec. otpora filtracije, određivanje vremena kapilarne inhibicije, filtracijski pokus
<b>SUŠENJE MULJA</b>	pokus nije izrađen
<b>STABILIZACIJA MULJA</b>	pokusi aerobne i anaerobne stabilizacije
<b>ODLAGANJE MULJA</b>	propusnost, zasićenje vodom
<b>SPALJIVANJE MULJA</b>	određivanje: obujma pepela, ogrjevne topline i kalorične vrijednosti, gorivosti

### 3.3.1. Kondicioniranje mulja

Kondicioniranje mulja je pripremni postupak koji se koristi za zgušnjavanje čvrste tvari i odvajanje vode. Daljnji procesi obrade mulja diktiraju načine na koje se on kondicionira.

Kemijsko kondicioniranje ovisi o pH vrijednosti mulja pa se u tom procesu koriste različite kemikalije koje se dodaju mulju ovisno o njegovoj starosti, razrijeđenosti i starosti kemijskog sredstva, miješanju i vremenu kontakta (od 5 – 20 minuta). Nakon što se mulj kondicionira kemijskim spojevima, primjenjuju se sljedeće mehaničke operacije da bi se izdvojila voda [3]:

- centrifugiranje uz dodatak kationskog polielektrolita, a količine se određuju u laboratoriju prema svojstvima mulja
- vakuumska filtracija uz dodatak vapna u koncentraciji od 5 – 10 kg vapna po m<sup>3</sup> mulja i željezova sulfata ili klorida u koncentraciji od 2 – 4 kg soli po m<sup>3</sup> mulja
- filterne preše uz primjenu navedenih kemikalija u koncentracijama od 10 – 12 kg odnosno od 3 – 5 kg po m<sup>3</sup> mulja.

U tablici 4 navode se podaci o kemijskim spojevima i njihovim količinama pri kondicioniranju mulja.

Tablica 4. Kemijsko kondicioniranje mulja [11]

KEMIJSKI SPOJ	FORMULA	OBLIK	MASENA KONCENTRACIJA [kg/m <sup>3</sup> ]
VAPNO	Ca(OH) <sub>2</sub>	prah	8 - 12
ŽELJEZOV KLORID	FeCl <sub>3</sub> x 6H <sub>2</sub> O	otopina 42 °C	3 - 5
ŽELJEZOV SULFAT	FeSO <sub>4</sub> x 7H <sub>2</sub> O	kristal	5 - 10
ALUMINIJEV SULFAT	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> x 13 H <sub>2</sub> O	prah	6 - 8
SINTETIČKI FLOKULANT	-	prah ili otopina	0,1 - 0,2

Uz mehaničke operacije kondicioniranja koriste se i toplinske operacije kondicioniranja mulja koje obuhvaćaju [3]:

- kondicioniranje mulja zagrijavanjem do temperature 180 °C do 200 °C pod tlakom od 12 do 15 bara u vremenu od 30 do 45 minuta. Najpoznatiji postupak kondicioniranja zagrijavanjem je Porteus koji se primjenjuje za kondicioniranje primarnog i sekundarnog mulja, bilo u svježem ili istruljenom stanju.
- kondicioniranje mulja zamrzavanjem i topljenjem što rezultira odvajanjem vode iz primarnog i istruljelog mulja. Proces je skup i nije gospodarski isplativ, ali se u kontinentalnim područjima može iskoristiti djelovanje mraza na poljima za sušenje mulja i u lagunama za mulj.
- kondicioniranje dodavanjem inertnih tvari (najčešće pepela) koje mijenjaju koloidnu strukturu mulja i smanjuju njegovu kalorijsku vrijednost.

### 3.3.2. Zgušnjavanje mulja

Zgušnjavanje mulja predstavlja najjednostavniji fizikalni proces uklanjanja vode iz mulja. Smanjenje obujma vode izražava se jednadžbom (2):

$$Q_i = Q_u \frac{C_u}{C_i} \quad (2)$$

gdje su:

$Q_i$  i  $Q_u$  – količina mulja nakon i prije zgušnjavanja [ $m^3$ ]

$C_i$  i  $C_u$  – koncentracija suhe tvari nakon i prije zgušnjavanja [ $m^3$ ]

Postupak se provodi gravitacijski, a procesi su taloženje ili isplivavanje. Objekti mogu biti otvoreni ili pokriveni, kao na uređaju za pročišćavanje u Zagrebu (slika 2).



Slika 7. Pokriveni gravitacijski zgušnjivač mulja na uređaju za pročišćavanje u Zagrebu [3]

Gravitacijsko zgušnjavanje sirovog mulja se provodi u taložniku-zgušnjivaču koji je sličan prethodnom ili naknadnom taložniku, ali ima manji promjer i veću dubinu te veći pad dna. U tablici 5. prikazani su učinci koji se postižu gravitacijskim taloženjem mulja.

Tablica 5. Koncentracije suhe tvari postignute gravitacijskim taloženjem [11]

<b>VRSTA MULJA</b>	<b>PRIJE ZGUŠNJAVANJA [%]</b>	<b>NAKON ZGUŠNJAVANJA [%]</b>
PRIMARNI	2-7	5-12
BIOLOŠKI	1-2	2-4
MJEŠOVITI	2-5	4-9

Proces zgušnjavanja isplivavanjem se primjenjuje onda kada pročišćavanjem nastaje mulj male gustoće pa se čestice mulja mogu vezati na mjehuriće zraka koji ih podižu na površinu s koje se kasnije uklanjaju. Takvo zgušnjavanje se primjenjuje na aktivnom mulju. Sitni mjehurići potpomažu zgušnjavanje pod povećanim tlakom u povratnoj vodi koja je odvojena od mulja, kao i isplivavanje pod atmosferskim tlakom (slika 8).



Slika 8. Dinamičko zgušnjavanje mulja na uređaju za pročišćavanje u Zagrebu [3]

### 3.3.3. Stabilizacija mulja

Stabilizacijom mulja se smanjuje i sprečava daljnja razgradnja, postiže bolje izdvajanje vode iz mulja, smanjuje broj patogenih mikroorganizama i uklanja neugodan miris. Na uređajima za pročišćavanje otpadnih voda najrašireniji su biološki aerobni i anaerobni procesi stabilizacije mulja, a moguća su i kemijska i toplinska stabilizacija.

Biološka aerobna stabilizacija je postupak razgradnje mulja organskog podrijetla koji se može odvijati istodobno sa biološkim pročišćavanjem vode ili izdvojeno, kao što se odvija na uređaju za pročišćavanje u Varaždinu (slika 9).





Slika 9. Aerobna stabilizacija mulja na uređaju za pročišćavanje u Varaždinu [3]

Proces aerobne stabilizacije izvodi se uz pomoć aerobnih mikroorganizama koji, kada se doda dovoljna količina kisika, oksidiraju razgradivu organsku tvar te nastaju ugljikov dioksid, voda, nitrati, sulfati i fosfati.

Biološka anaerobna stabilizacija (digestija, truljenje) je najrašireniji proces obrade mulja koji se izvodi u anaerobnim digestorima, koji se nalaze i na uređaju za pročišćavanje u Zagrebu (slika 10).



Slika 10. Tornjevi anaerobne obrade mulja na uređaju za pročišćavanje u Zagrebu [14]

Anaerobno truljenje teče bez prisutnosti zraka u dvjema fazama. Prva faza je kiselinsko vrenje gdje se djelovanjem mikroorganizama kompleksne organske tvari razgrađuju u niže organske spojeve poput organskih kiselina, alkohola i drugih spojeva. Druga faza je metanska i uključuje razgradnju u metan, ugljični dioksid, vodu i amonijak pod djelovanjem bakterija metanskog vrenja. Specifičnost druge faze je u osjetljivosti na promjene temperature, pH vrijednost i prisutnost otrovnih tvari.

S obzirom da je postupak osjetljiv na promjene uvjeta, proces se treba odvijati u zatvorenim objektima, tzv. trulištima ili digestorima. Trulišta trebaju biti izvedena na način da se u njima može održavati željena temperatura i da rade pod niskim opterećenjem.

Da bi se mulj stabilizirao kemijskim putem, potrebno mu je dodati vapno zbog povećanja pH vrijednosti (do 12 i više), što prouzrokuje ugibanje mikroorganizama, zaustavljanje biološke razgradnje i širenje neugodnih mirisa. Takva kemijska stabilizacija se provodi na uređaju za pročišćavanje u Zagrebu (slika 11).



Slika 11. Stabilizacija vapnom na uređaju za pročišćavanje u Zagrebu [3]

Stabilizacija mulja vapnom nije trajna jer se smanjivanjem pH vrijednosti ponovno razvijaju mikroorganizmi u nerazgrađenoj organskoj tvari u mulju. Zbog toga se kao sredstvo stabilizacije može koristiti klor, no njegova upotreba mora biti pod stalnim nadzorom jer u prisutnosti amonijaka može doći do pojave većih koncentracija kloramina koji su otrovni za čovjeka [3].

### **3.4. Mogućnosti zbrinjavanja i uporabe mulja s UPOV-a**

Nakon zgušnjavanja i stabilizacije mulj još uvijek sadrži velike količine vode pa se koriste različite cjediljke, filtri i centrifuge kojima se uklanja voda iz mulja. Nakon toga slijedi toplinska obrada mulja koja je posljednji postupak prerade mulja prije konačnog ispuštanja i korištenja u raznim oblicima u gospodarstvu, industriji i poljoprivredi.

#### **3.4.1. Kompostiranje**

Kompostiranje je postupak koji se primjenjuje kada želimo kompost kao krajnji produkt upotrebljavati u poljoprivredi. Postupak kompostiranja može biti aeroban ili anaeroban, a najčešće se odvija na otvorenom prostoru, no postoje i mehanički postupci u zatvorenom prostoru. Za taj proces potrebni su kisik, voda, hranjive tvari (dušik, fosfor, ugljik...) i mikroorganizmi koji obavljaju razgradnju organske tvari. Da bi se kompost dobiven iz mulja mogao koristiti, mulj ne smije biti iz obrade industrijskih otpadnih voda jer mogu sadržavati teške metale [3].

Nakon kompostiranja, mulj se suši i melje, te se pakira uz mogućnost dodavanja fosfora i kalija. Takav produkt se koristi za poboljšavanje strukture tla, no ne smije se koristiti u svim područjima poljoprivrede. Zabranjuje se primjena u vinogradima, voćnjacima i hmeljarnicima; na povrtnarskim površinama namijenjenim za uzgoj jagodičastog voća i ljekovitog bilja; na pjeskovitom tlu pH vrijednosti ispod 5; na tlu zasićenom vodom, pokrivenom snijegom i na smrznutom poljoprivrednom tlu [9].



Slika 12. Kompost dobiven od otpadnog mulja [15]

#### 3.4.2. Proizvodnja bioplina iz otpadnog mulja

U zadnjih nekoliko godina razvio se još jedan način iskorištavanja otpadnog mulja s ciljem dobivanja bioplina. Bioplin je gorivo koje se dobiva anaerobnom razgradnjom ili fermentacijom organskih tvari, uključujući kanalizacijski mulj ili bilo koji drugi biorazgradivi otpad. Sastoji se uglavnom od metana i ugljikovog dioksida. Dobiva se preradom mulja u četiri stupnja. U prvom stupnju-hidrolizi, u vodi netopljivi organski spojevi se pretvaraju u organske spojeve koji su topljivi u vodi pomoću staničnih enzima.

Drugi stupanj je stupanj zakiseljavanja u kojem acidofilne bakterije razlažu topljive molekule na vodik, ugljikov dioksid, alifatske kiseline i alkohole, te male količine metilnih amina, amonijaka i sumporovodika.

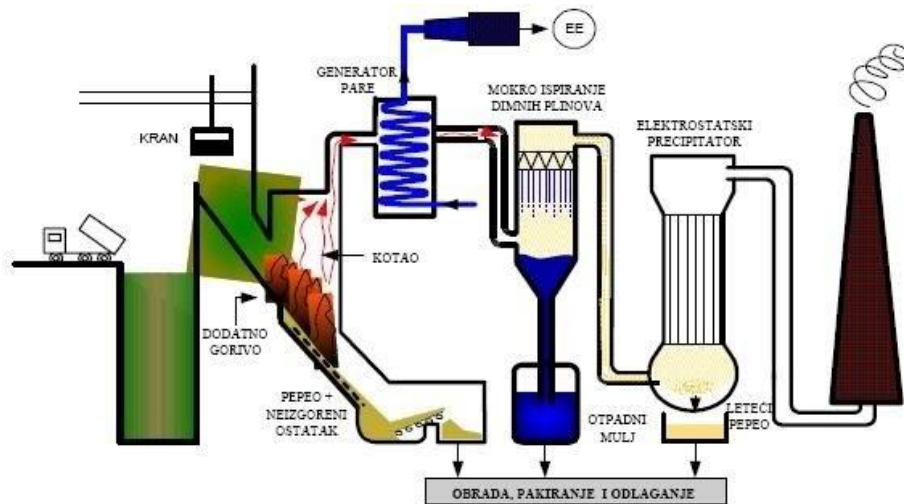
U trećoj fazi se dobivene kiseline i alkoholi rastavljaju na vodik i ugljikov dioksid. Četvrta, anaerobna faza, jest faza bakterije prevode octenu kiselinu i spojeve klora, zajedno s vodikom, u oblik bioplina (metan i ugljikov dioksid) [16].



Slika 13. Spremnici za bioplin u postrojenju za obradu otpadnih voda grada Zagreba [14]

#### 3.4.3. Termička obrada mulja

Pod termičkom obradom podrazumijevamo spaljivanje mulja. Spaljivanje je proces izgaranja svih organskih tvari u mulju uz isparivanje ukupne vode na temperaturama od 600 do 800 °C. Prednost termičke obrade mulja, u usporedbi s odlaganjem i iskorištenjem je u termičkom uništenju kritične organske tvari i zagađivala, a nedostatak jest to što se uništava i tvar za gnojenje. U procesu spaljivanja značajan dio teških metala isparava te oni prelaze u dimne plinove i potrebno ih je zbrinuti. Oni se mogu uhvatiti kondenzacijom (hlađenjem) na filtarskom pepelu, kao i pomoću mokrih, suhih ili polusuhih sustava za pročišćavanje dimnog plina. Konačni proizvod spaljivanja mulja je anorganska tvar (pepeo) [17] [18].



Slika 14. Pojednostavljeni prikaz spaljivanja otpadnog mulja [19]

U Europi je prisutan trend povećanja količina stabiliziranog mulja s UPOV-a koji se u završnim fazama termički obrađuje tako da sadrži do 95 % suhe tvari. Takav mulj se zatim stavlja u peći gdje se odvija spaljivanje i nastaje fino graduirani pepeo, tzv. ISSA (engl. incinerated sewage sludge ash) koji se može koristiti kao dodatak u građevinskoj industriji (cementni mort, beton, opeka), ali i za ostale namjene (poboljšanje svojstava tla, u cestogradnji i dr.).

Pepeo koji se generira spaljivanjem mulja odvaja se od ispušnih plinova kroz različite filtre te se spaljivanjem odvija i termičko uništavanje organskih i anorganskih zagađivala.

Iz dosadašnje svjetske prakse proizlazi više rješenja recikliranja mulja i pepela u građevinarstvu, među kojima se ističe [4]:

- Korištenje ISSA u proizvodnji sinteriranih materijala
- Korištenje ISSA u proizvodnji laganog agregata
- Korištenje mulja/ISSA pri izgradnji prometnica
- Korištenje mulja/ISSA u funkciji poboljšanja tla
- Korištenje ISSA u betonskoj industriji

### 3.5. Stanje s muljem UPOV-a u RH

Može se reći da do danas u Hrvatskoj još nije cjelovito riješeno pitanje problema zbrinjavanja mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda. U Hrvatskoj se mulj još uvijek najviše odlaže na odlagalištima krutog otpada. U dosadašnjoj praksi UPOV-a struka je bila koncentrirana na efluent i njegovo zadovoljavanje propisanih kriterija bez većih razmišljanja o mulju, gdje će se odložiti, kakva obilježja bi trebao imati i kakva je ekonomska bilanca njegovog konačnog zbrinjavanja [20].

Sadašnje stanje pokazuje da troškovi obrade i konačnog odlaganja mulja čine i do 50 % ukupnih troškova rada uređaja [21].

Ukupne količine nastalog mulja u Hrvatskoj za godinu 2024. procijenjene su na 107.000 t suhe tvari godišnje. Neznatan rast na iznos od 125.000 t godišnje očekuje se prema 2051. godini. Procjene nastanka mulja u budućnosti bazirane su na godini 2024., uz pretpostavku ispunjenja zahtjeva Direktive o pročišćavanju komunalnih otpadnih voda (91/271/EEZ) po kojoj bi sve aglomeracije veće od 2.000 ES trebale imati operativne uređaje za pročišćavanje otpadnih voda odgovarajućeg stupnja [22].

Postoji potreba da se projektima novih UPOV-a obuhvati zbrinjavanje mulja na lokalnoj i regionalnoj razini, uz zadovoljenje zakonskih odredbi i propisa, uzimajući u obzir ishodišta poput energetske vrijednosti mulja, kemijskog sastava, mogućnosti centralizirane obrade te raspoloživost za upotrebu na poljoprivrednim zemljištima [9].

Najveći dio mulja se u Republici Hrvatskoj zbrinjava odlaganjem uglavnom na mjestu nastanka jer odlaganje mulja na odlagališta otpada nije u skladu s Direktivom o odlagalištima [23].

Otpadni mulj iz UPOV-a nakon obrade sadrži visoku koncentraciju organskih tvari pa postoje uvjeti za korištenje kao gnojiva.

Zbrinjavanje mulja moguće je na sljedeće načine:

- Korištenje u poljoprivredne svrhe ako postoje raspoloživi prostori. Odlaganje mulja na poljoprivredne površine regulirano je Direktivom o otpadnom mulju i uvedeno u nacionalno zakonodavstvo Republike Hrvatske Pravilnikom o gospodarenju muljem iz UPOV-a kada se mulj koristi u poljoprivredi (NN 38/08), ali uz ograničenja vezano za sadržaj teških metala. U EU je korištenje mulja na poljoprivrednim površinama u opadanju. Korištenje mulja u poljoprivredne svrhe u Republici Hrvatskoj nije prihvatljiva opcija.
- Korištenje na ne-poljoprivrednom zemljištu poput proizvodnje biljaka koje će se koristiti kao energenti, moguća je opcija ukoliko postoji raspoloživo zemljište i ukoliko postoji tržište za proizvodnju biomase. U Republici Hrvatskoj korištenje goriva iz biomase je tek u začetima. U šumama krškog područja tlo se ne može koristiti za uporabu mulja.
- Mulj se može koristiti za revitalizaciju pokrovnog sloja na odlagalištima otpada.
- Mulj koji nastaje kao nusprodukt biološkog procesa obrade otpadnih voda, može se obraditi do konačnog produkta koji je inertan za okoliš i tada ga je moguće iskoristiti kao sirovinu u građevinarstvu [20].



#### 4. Zaključak

Povodni je mulj moguće ponovno koristiti kao relativno jeftin i obnovljiv prirodni resurs. Nakon određivanja njegovih osnovnih značajki, mulj se izvlači s dna vodotoka pomoću pažljivo i strogo kontroliranih tehnika i sustava jaružanja. Prije korištenja prirodnih resursa dobivenih ovim postupcima, moguće je provesti solidifikaciju kako bi se smanjio volumen mulja, ali i fizički imobilizirala i/ili kemijski promijenila prisutna onečišćivala koja u ovom tipu mulja predstavljaju najveći problem za njegovo korištenje.

Budući da podvodni mulj najčešće sadrži toksične supstance u visokim koncentracijama i predstavlja veliki ekološki problem, ništa manje nije bitno niti njegovo odlaganje, odnosno zbrinjavanje u izolirane odlagališne prostore (IOP). Kako bi se spriječile česte ekološke katastrofe, potrebno je uložiti više geotehničkog znanja, ali i novčanih resursa za izvedbu projekata izgradnje IOP-a. Jaružani se materijal koristi prilikom nasipanja površine terena, proizvodnje cigle, ali i u rješavanju različitih ekoloških problema. Ulaganjem u kvalitetne bazene i lagune te osiguravanjem primjerenog obodnog nasipa, povećala bi se kvaliteta IOP-a te smanjilo nekontrolirano onečišćenje okoliša.

Uz podvodni mulj, otpadni mulj nastaje i kao nusprodukt obrade otpadne vode, te zahtijeva posebnu tehnologiju obrade i stabilizacije. Kako bi se mulj nastao pročišćavanjem otpadnih voda mogao dalje koristiti, potrebno ga je prethodno ispitati, odrediti mu fizikalne, kemijske i mikrobiološke značajke, a tek zatim odrediti primjereni proces njegove obrade. Nakon kondicioniranja, zgušnjavanja i stabilizacije, slijedi konačno izdvajanje vode (sušenje) te eventualno toplinska obrada mulja koja predstavlja posljednju stepenicu u procesu obrade otpadnog mulja.

Mogućnosti korištenja mulja s UPOV-a šire su nego one kod korištenja podvodnog mulja. Kompostiranjem možemo dobiti gnojivo koje sadrži fosfor i kalij za upotrebu u poljoprivredi. U betonskoj industriji se koristi pepeo (ISSA) nastao termičkom obradom otpadnog mulja. Spaljivanjem otpadnog mulja spaljuje se i tvar za gnojenje pa se na taj način gubi vrijedan resurs za iskorištavanje u poljoprivredi. Jedan od suvremenijih načina iskorištavanja otpadnog mulja je

proizvodnja bioplina – goriva koje se dobiva anaerobnom razgradnjom ili fermentacijom organskih tvari iz otpadnog mulja.

Stanje s muljem UPOV-a u Republici Hrvatskoj nije obećavajuće jer su se dosad zanemarivala osnovna pitanja vezana uz gospodarenje muljem. Neprimjerena odlagališta te pogrešna raspodjela troškova i neusklađenost zakonskih odredbi na različitim razinama samo su neka od pitanja koja moraju biti riješena.

## 5. Popis literature

- [1] Kavur, B. Materijali za kolegij Geotehničko-ekološki zahvati. Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet u Varaždinu, ak. god. 2015/16.
- [2] Kamon, M. Underwater Geoenvironmental Issues. Ch. 4 in TC5 Report: Environmental Geotechnics. Edited by International Technical Committee No. 5 of the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). September 2005.
- [3] Tušar B. Pročišćavanje otpadnih voda. Zagreb: Kigen d.o.o./Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu; 2009. str. 273-315.
- [4] Vouk D, Nakić D, Štirmer N, Serdar M. Korištenje mulja s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda u betonskoj industriji. Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet. Zagreb. 2015. str. 1-39.
- [5] Herbich J.B. Handbook of Dredging Engineering, McGraw-Hill.1992.
- [6] Herbich J.B. Removal of contaminated sediments: Equipment and Recent Field Studies. Dredging, Remediation, and Containment of Contaminated Sediments. ASTM.1995. STP1293. pp. 77-111.
- [7] Fukue M, Nakamura T, Kato T, Yamasaki S. Degree of pollution for marine sediments. Engineering Geology. 1999. 53. pp. 131-137.
- [8] Yamasaki S, Yasui S, Fukue M. Development of solidification technique for dredged sediments. Dredging, Remediation, and Containment of Contaminated Sediments. ASTM. 1995. STP1293. pp. 136-144.
- [9] Vouk D, Malus D, Tedeschi S. Muljevi s komunalnih uređaja za pročišćavanje otpadnih voda. Građevinar. 2011. 63, str. 341-349.
- [10]Pravilnik o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda. Narodne novine.2013. Broj 80. [28.07.2013]
- [11] Milojević M. Teorijske i praktične osnove obrade, korištenja i odstranjivanja mulja. MAG. 1978. 25
- [12] Tušar B. Ispuštanje i pročišćavanje otpadne vode sa zakonskom regulativom. Zagreb: Croatia knjiga; 2011.

- [13] Marton J, Tolgyessy J. Ziskavanje, uprava, čišćenje a ochrana vod. Alfa. Bratislava. 1991.
- [14] Od otpadnih voda do bioplina. Dostupno na: <http://www.energetika-net.com/specijali/posjetili-smo/od-otpadnih-voda-do-bioplina-18941>. Datum pristupa: 31.07.2016.
- [15] Dragan Šolaja. Od otpadnog mulja kvalitetan kompost. Dostupno na: <http://www.blic.rs/vesti/vojvodina/od-otpadnog-mulja-kvalitetan-kompost/9yb0hm7>. Datum pristupa: 01.08.2016.
- [16] Schröder R, Wolf T, Scharte G, Joormann D. Centralni uređaj za pročišćavanje otpadnih voda grada Zagreba. Građevinar. 2001. 53, str. 228
- [17] O'Reimann D. Gospodarenje vodama: Spaljivanje otpadnog mulja: problemi i rješenja (1.dio). Gospodarstvo i okoliš. 2008. 16/90, str. 69-70
- [18] O'Reimann D. Gospodarenje vodama: Spaljivanje otpadnog mulja: problemi i rješenja (2.dio). Gospodarstvo i okoliš. 2008. 16/91, str. 211-215
- [19] Kapelj S. Materijali za kolegij Sanitarni problemi okoliša. Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet u Varaždinu, ak. god. 2014/15.
- [20] Ćosić-Flajsig G. Hrvatsko zakonodavstvo gospodarenja muljem sa komunalnih uređaja. 5. Hrvatska konferencija o vodama. Opatija. 2011.
- [21] Direktiva o odvodnji i pročišćavanju otpadnih voda. Vijeće europskih zajednica. 1991. Broj 271. [21.05.1991.]
- [22] Strateška studija o utjecaju prijedloga plana gospodarenja otpadom RH 2015. – 2021. na okoliš. Zagreb. 2015. str. 51-54.
- [23] Pravilnik o načinima i uvjetima odlaganja otpada, kategorijama i uvjetima rada za odlagališta otpada. Narodne novine. 2015. Broj 114.

## **Popis slika**

Slika 1. Odnos vlažnosti i gustoće podvodnog mulja

Slika 2. Primjer kombiniranog tipa jaružala, tzv. „Cleanup system“

Slika 3. Profil koncentracije teškog metala u sedimentu

Slika 4. Postupak solidifikacije mulja

Slika 5. Rute širenja onečišćenja u okoliš iz IOP-a

Slika 6. Sirovi mulj na uređaju za pročišćavanje otpadne vode grada Zagreba

Slika 7. Pokriveni gravitacijski zgušnjivač mulja na uređaju za pročišćavanje u Zagrebu

Slika 8. Dinamičko zgušnjavanje mulja na uređaju za pročišćavanje u Zagrebu

Slika 9. Aerobna stabilizacija mulja na uređaju za pročišćavanje u Varaždinu

Slika 10. Tornjevi anaerobne obrade mulja na uređaju za pročišćavanje u Zagrebu

Slika 11. Stabilizacija vapnom na uređaju za pročišćavanje u Zagrebu

Slika 12. Kompost dobiven od otpadnog mulja

Slika 13. Spremnici za bioplin u postrojenju za obradu otpadnih voda grada Zagreba

Slika 14. Pojednostavljeni prikaz spaljivanja otpadnog mulja

## **Popis tablica**

Tablica 1. Rezultati solidifikacije mulja

Tablica 2. Srednje vrijednosti sastava i svojstava mulja različita podrijetla

Tablica 3. Proces i načini određivanja značajki mulja

Tablica 4. Kemijsko kondicioniranje mulja

Tablica 5. Koncentracije suhe tvari postignute gravitacijskim taloženjem

## **Popis kratica**

BPK – biokemijska potrošnja kisika

ES – ekvivalent stanovnika

ISSA – incinerated sewage sludge ash ( pepeo od spaljivanja kanalizacionog mulja)

SS – ukupno suspendirane čestice

DO – otopljeni kisik