

Usporedba rada UPOV-a SBR i MBR tehnologijom

Klarić, Johan

Graduate thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:225533>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-14**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Johan Klarić

USPOREDBA RADA UPOV-a SBR I MBR TEHNOLOGIJOM

Diplomski rad

Rijeka, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Specijalistički diplomski stručni studij
Graditeljstvo u priobalju i komunalni sustavi
Osnove kondicioniranja pitkih i pročišćavanja otpadnih voda**

**Johan Klarić
JMBAG: 2427003009**

USPOREDBA RADA UPOV-a SBR I MBR TEHNOLOGIJOM

Diplomski rad

Rijeka, kolovoz 2023.

IZJAVA

Diplomski rad izradio sam samostalno, u suradnji s mentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.



Johan Klarić

U Rijeci, 30.08.2023.

Zahvala

Zahvaljujem mojim dobrim kolegama i još boljim prijateljima Darku i Borisu koji su zaslužni da sam se nakon mnogo godina odvažio i krenuo na ovaj studij. Njihova podrška i prijateljstvo potaknuli su me onda kada je to bilo najpotrebnije.

Velika hvala mojim radnim kolegicama Nataši, Mariji i Roberti koje su bile uz mene i bodrile me prije svakog kolokvija i ispita. Nataši najveća hvala na svim odgovorima na moja nebrojena pitanja koja sam postavio kako bi uspješno realizirao ovaj rad.

Hvala mentoru doc. dr. sc. Elvisu Žicu, dipl.ing.građ. na cjelokupnoj podršci tijekom izrade diplomskog rada, njegovim stručnim i iskustvenim savjetima te otvorenosti u komunikaciji.

Ovaj rad ne bi mogao realizirati bez dokumentacije i podataka koji su mi uručili kolege iz Siffiana i Bolzana. Zato velika hvala Dariu Gallottiniu iz tvrtke Kubota membrane Europe Ltd na iskazanom trudu i suradnji prilikom odlaska u Siffiano, gosp. Danielu Viglu iz općine Ritten kao i kompletnom osoblju UPOV-a Siffiano. Osim što su mi svojom suradnjom omogućili realizaciju ovog rada doprinijeli su i stjecanju iskustva u poslu koji radim.

Kao i mnogim drugim odlukama u životu, podrška obitelji i prijatelja često je presudna kako bi postigli željeni cilj. Hvala im što su bili uz mene čitavo vrijeme mog studiranja.

I na kraju, posvetio bi ovaj rad mom sinu Eriku. Sada kada sam ja na kraju svog školovanja on upravo započinje sa svojim i neka mu je sa srećom.

Sažetak

Pročišćavanje otpadnih voda neizostavni je dio i završni segment cjelokupnog sustava javne odvodnje, a SBR i MBR tehnologije pročišćavanja jedne su od najzastupljenijih u toj djelatnosti. U ovom diplomskom radu izvršena je analiza rada dviju različitih tehnologija instaliranih na UPOV-u Delnice u Republici Hrvatskoj (SBR) i UPOV-u Siffiano u Republici Italiji (MBR). Na izgrađenim UPOV-ima koji su u radu duži niz godina izvršena je analiza i ocjena rada svake od tehnologija, a prema zadanim kriterijima koji se inače primjenjuju kod varijantnih rješenja odabira optimalne tehnologije. Cilj istraživanja bio je realan prikaz, analiza i ocjena cjelokupnog tehnološkog procesa s prikazom investicijskih i operativnih troškova dobivenih od upravitelja. U opisnom dijelu proces pročišćavanja podijeljen je na mehanički predtretman, biološko pročišćavanje i obradu viška mulja. Sama analiza obuhvaća parametar vrijednosti investicije, operativnog troška, prostorne komponente, složenosti kontrole i procesa te efekta pročišćavanja koji se različito vrednuju i dovode do krajnjeg rezultata. Sagledavajući kompletnu analizu zaključeno je da se radi o jednakovrijednim tehnologijama te da ne bi bilo realno dati prednost jednoj u odnosu na drugu. U zaključku je obrađena i teoretska mogućnost zamijene tehnologija te s time povezanim implikacijama na rezultat rada i troškove pojedinog UPOV-a. Rad također sadrži i kraću analizu usporedbe ovih dviju tehnologija na UPOV-u La Center u SAD-u.

Ključne riječi: Uređaj za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV), SBR (*eng. Sequencing Batch Reactor*), MBR (*eng. Membrane Bioreactor*), Delnice, Siffiano, mehanički predtretman, biološko pročišćavanje, obrada viška mulja, troškovi, usporedba.

Abstract

Wastewater treatment is an indispensable part and the final segment of the entire public drainage system and SBR and MBR treatment technologies are one of the most common in this industry. In this thesis, an analysis of the operation of two different technologies installed at the WWTP Delnice in the Republic of Croatia (SBR) and the WWTP Siffiano in the Republic of Italy (MBR) was performed. On the constructed WWTP that have been in operation for several years, an analysis and assessment of the operation of each of the technologies was carried out, according to the given criteria that are normally applied to variant solutions for selecting the optimal technology. The goal of the research was a realistic presentation, analysis and evaluation of the entire technological process with a presentation of investment and operating costs obtained from the manager. In the descriptive part, the purification process is divided into mechanical pretreatment, biological purification and treatment of excess sludge. The analysis itself includes the parameter of investment value, operating cost, spatial component, control and process complexity and the purification effect, which are evaluated differently and lead to the final result. Looking at the complete analysis, it was concluded that these are equivalent technologies and that it would not be realistic to give preference to one over the other. In the conclusion, the theoretical possibility of replacing technologies and related implications on the result of work and the costs of individual WWTP is also discussed. The paper also contains a shorter analysis of the comparison of these two technologies at WWTP La Center in the USA.

Keywords: Waste water treatment plant (WWTP), SBR (Sequencing Batch Reactor), MBR (Membrane Bioreactor), Delnice, Siffiano, mechanical pretreatment, biological treatment, treatment of excess sludge, costs, comparison.

SADRŽAJ

1. UVOD	11
2. OPIS SBR TEHNOLOGIJE PROČIŠĆAVANJA OTPADNIH VODA	13
3. OPIS MBR TEHNOLOGIJE PROČIŠĆAVANJA OTPADNIH VODA.....	16
4. KARAKTERISTIKE RAZMATRANIH UPOV-a.....	21
4.1. Uređaj za pročišćavanje otpadnih voda Delnice	21
4.2. Uređaj za pročišćavanje otpadnih voda Siffiano	24
5. USPOREDBA TEHNOLOGIJA KROZ RAD RAZMATRANIH UPOV-a.....	27
5.1. Kriterij analize.....	27
5.2. Mehanički predtretman	31
5.2.1.UPOV Delnice.....	31
5.2.2.UPOV Siffiano	34
5.3. Biološko pročišćavanje	38
5.3.1.UPOV Delnice.....	39
5.3.2.UPOV Siffiano	43
5.4. Obrada viška biološkog mulja	49
5.4.1.UPOV Delnice.....	50
5.4.2.UPOV Siffiano	53
5.5. Rezultati rada razmatranih UPOV-a	55
5.5.1.UPOV Delnice.....	55
5.5.2.UPOV Siffiano	57
5.6. Ocjena tehnologija pročišćavanja i usporedba	58
5.6.1.Trošak investicije	58
5.6.2.Operativni trošak	59
5.6.3.Prostorna komponenta	61
5.6.4.Složenost kontrole i procesa.....	63
5.6.5.Efekt pročišćavanja otpadne vode.....	67
5.6.6.Izračun konačne ocjene usporedbe tehnologija	68
6. PRIMJER USPOREDBE TEHNOLOGIJA PROVEDEN U SAD-u	69
7. ZAKLJUČAK.....	72
8. LITERATURA I IZVORI	75

POPIS TABLICA

Tablica 1: Udio parametara u vrijednosti izračuna konačne ocijene (izradio autor)

Tablica 2: Način bodovanja za parametar troškova investicije (izradio autor)

Tablica 3: Način bodovanja za parametar operativnih troškova (izradio autor)

Tablica 4: Način bodovanja za parametar prostorne komponente (izradio autor)

Tablica 5: Način bodovanja za parametar složenosti kontrole i procesa (izradio autor)

Tablica 6: Način bodovanja za parametar efekta pročišćavanja otpadnih voda (izradio autor)

Tablica 7: Operativni troškovi mehaničkog predtretmana UPOV-a Delnice (izradio autor)

Tablica 8: Operativni troškovi mehaničkog pročišćavanja UPOV-a Siffiano (izradio autor)

Tablica 9: Dimenzije SBR reaktora (izradio autor)

Tablica 10: Operativni troškovi biološkog pročišćavanja UPOV-a Delnice (izradio autor)

Tablica 11: Dimenzije jedinice za biološko pročišćavanje (izradio autor)

Tablica 12: Dimenzije MBR bazena (izradio autor)

Tablica 13: Operativni troškovi biološkog pročišćavanja UPOV-a Siffiano (izradio autor)

Tablica 14: Operativni troškovi obrade viška mulja UPOV-a Delnice (izradio autor)

Tablica 15: Operativni troškovi obrade viška biološkog mulja UPOV-a Siffiano (izradio autor)

Tablica 16: Zahtijevani izlazni parametri II. stupnja pročišćavanja otpadnih voda sukladno Pravilniku o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda, NN 26/20 (izradio autor)

Tablica 17: Rezultati provedenih analiza za UPOV Delnice u 2022. godini (izradio autor)

Tablica 18: Zahtijevani izlazni parametri za osjetljiva područja sukladno Pokrajinskim zakonu od 18. lipnja 2002. godine, br. 8 „Pravilnik o vodi“, Dodatak A (izradio autor)

Tablica 19: Rezultati provedenih analiza za UPOV Siffiano u 2022. godini (izradio autor)

Tablica 20: Prikaz bodovanja za parametar troškova investicije (izradio autor)

Tablica 21: Prikaz bodovanja za parametar operativnih troškova (izradio autor)

Tablica 22: Prikaz bodovanja za parametar prostorne komponente (izradio autor)

Tablica 23: Prikaz bodovanja za parametar složenosti kontrole i procesa (izradio autor)

Tablica 24: Prikaz bodovanja za parametar efekta pročišćavanja (izradio autor)

Tablica 25: Izračun konačne ocijene usporedbe tehnologija (izradio autor)

POPIS SLIKA

Slika 1: Faze SBR tehnologije u reaktoru

(<https://repositorij.vuka.hr/islandora/object/vuka%3A717/datastream/PDF/view>)

Slika 2: Načini provedbe filtracije

(<https://solarisbiotechusa.com/why-use-tangential-flow-filtration>)

Slika 3: Udio materijala u osnovnim membranskim modulima (Judd, 2011.)

Slika 4: Mehanizmi začepeljivanja membrana (Mijatović i Matošić, 2020.)

Slika 5: Lokacija UPOV-a Delnice (Google karte – vlastita izrada)

Slika 6. Uređaj za pročišćavanje otpadnih voda Delnice (vlastita fotografija)

Slika 7. Bakarčev slap na recipijentu Delnički potok (vlastita fotografija)

Slika 8. Lokacija UPOV-a Siffiano (Google karte – vlastita izrada)

Slika 9. Pogled na uređaj za pročišćavanje otpadnih voda Siffiano (vlastita fotografija)

Slika 10. Jezero pročišćene otpadne vode (vlastita fotografija)

Slika 11. Automatska gruba rešetka i stanica za prihvatanje sadržaja septičkih i crnih jama (vlastita fotografija)

Slika 12. Kompaktni uređaj za mehaničku predobradu otpadnih voda (vlastita fotografija)

Slika 13. Fino sito (vlastita fotografija)

Slika 14. Aerirani pjeskolov i mastolov (vlastita fotografija)

Slika 15. Klasifikator i ispirrač pijeska (vlastita fotografija)

Slika 16. Crpna stanica ispred SBR reaktora (vlastita fotografija)

Slika 17. SBR reaktori (vlastita fotografija)

Slika 18. Automatski uzorkivač i Khafagi – Venturi mjerni kanal (vlastita fotografija)

Slika 19. Bazen denitrifikacije (vlastita fotografija)

Slika 20. Bazeni nitrifikacije (vlastita fotografija)

Slika 21. MBR bazeni (vlastita fotografija)

Slika 22. Modul Kubota EK300 (LADURNER S.r.l., 2010.)

Slika 23. Pločasta membrana (vlastita fotografija)

Slika 24. Strojarnica jedinice za biološko pročišćavanje otpadne vode (vlastita fotografija)

Slika 25. Spremnik viška mulja (vlastita fotografija)

Slika 26. Spiralna presa u objektu dehidracije mulja (vlastita fotografija)

Slika 27. Kontaktni reaktor za stabilizaciju mulja (vlastita fotografija)

Slika 28. Pogled na upravnu zgradu i objekt dehidracije mulja (vlastita fotografija)

Slika 29. Postrojenje za dehidraciju mulja – centrifuga (vlastita fotografija)

Slika 30. Pogled na UPOV La Center, Washington, SAD (The MBR site)

Slika 31. Prikaz izlaznih parametara na UPOV-u La Center (The MBR site)

Slika 32. Usporedba operativnih troškova na UPOV-u La Center (The MBR site)

1. UVOD

Tema ovog diplomskog rada je usporedba rada uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (UPOV) SBR i MBR tehnologijom. Pročišćavanje otpadnih voda već duži niz godina aktualna je problematika na državnoj razini, a u svrhu zaštite voda od štetnog zagađenja ali i zadovoljavanja zakonske regulative u tijeku su investicije na izgradnji i/ili rekonstrukciji većeg broja UPOV-a. Zahtijevani stupanj pročišćavanja ovisno o području na kojem se nalazi propisan je važećom zakonskom regulativom dok je odabir tehnologije pročišćavanja krajnja odluka javnog isporučitelja vodne usluge i jedinica lokalne i regionalne samouprave. U svrhu odabira optimalnog postupka pročišćavanja otpadnih voda, odnosno tehnologije pročišćavanja otpadnih voda često se „lome koplja“ i izrađuju varijantna rješenja u kojima se temeljem dostupnih ulaznih parametara ocjenjuje i uspoređuje primjena različitih tehnologija pročišćavanja otpadnih voda. Uz sve manje zastupljenu konvencionalnu tehnologiju (eng. CAS) gotovo uvijek se vrši usporedba SBR i MBR tehnologije. U pravilu se temeljem izrađenog varijantnog rješenja odabire optimalna tehnologija što u konačnici rezultira izgradnjom UPOV-a s tom tehnologijom.

Ideja za odabir ove teme diplomskog rada proizlazi iz želje da se na primjeru izgrađenih i funkcionalnih UPOV-a prikaže realna usporedba dviju tehnologija pročišćavanja otpadnih voda, u ovom slučaju SBR i MBR tehnologije. Da bi usporedba bila moguća i realna bilo je potrebno pronaći UPOV-e podjednake veličine i ulaznog opterećenja koji rade duži niz godina, ali naravno s različitim tehnologijama. Kao idealni pokazali su se UPOV Delnice veličine 6600 ES s SBR tehnologijom i UPOV Siffiano u Republici Italiji, autonomna pokrajina Bolzano, veličine 6000 ES s MBR tehnologijom.

Radi boljeg razumijevanja rada samih tehnologija u uvodnom dijelu prikazati će se ukratko svaka od zastupljenih tehnologija počevši s povijesnim razvojem, opisom biološkog pročišćavanja otpadnih voda kao suštinskim dijelom svake tehnologije, svojevrsnim specifičnostima te zahtjevima pri radu i održavanju koji se moraju poštivati.

Kako bi se stvorila što bolja slika predmetnih UPOV-a prikazati će se njihove osnovne karakteristike u smislu veličine, smještaja u prostoru, mikrolokacije, makrolokacije, specifičnosti područja i klime, povijesti izgradnje i početka njihovog rada.

Za svaku analizu potrebno je uspostaviti određene kriterije kojima će se kasnije vršiti ocjenjivanje tehnologija, a kao polazište za iste koristiti će se upravo kriteriji kakvi se primjenjuju prilikom izrade varijantnih rješenja, od investicijskih i operativnih troškova, preko prostorne komponente, složenosti kontrole i procesa do krajnjeg efekta pročišćavanja. Za svaki od predviđenih kriterija odrediti će se postotak njihovog udjela u ukupnoj ocjeni, a unutar nekih od kriterija i segmenti pojedinog procesa u cjelokupnom postupku pročišćavanja otpadnih voda koji će se analizirati.

Kako bi se rad tehnologija čim bolje prikazao u praksi te da bi se kasnije mogla provesti adekvatna analiza u središnjem dijelu diplomskog rada izvršiti će se opis primijenjenih tehnologija na ova dva konkretna primjera. Sustav pročišćavanja otpadne vode SBR tehnologijom u Delnicama i MBR tehnologijom u Siffianu podijeliti će se na mehanički predtretman, biološko pročišćavanje i obradu viška biološkog mulja. Za svaki od ovih segmenata detaljnije će se opisati njihov rad s osvrtom na zahtjeve i specifičnosti vezane uz primijenjenu tehnologiju te konkretne podatke o troškovima potrebnim za rad postrojenja u vidu energenata, upravljanja procesom i održavanja. Krajnji cilj svakog UPOV-a je postizanje zadanih i zahtijevanih parametara u izlaznoj otpadnoj vodi pa će se za oba razmatrana postrojenja prikazati krajnji rezultat rada, odnosno efekt pročišćavanja otpadnih voda temeljen na analizama koje se sukladno zakonskoj regulativi kako Hrvatske tako i Italije moraju provoditi.

U završnom dijelu izvršiti će se ocjena tehnologija pročišćavanja otpadne vode i usporedba prema ranije zadanim kriterijima, a sukladno konkretnim podacima navedenim u ranijem opisu pojedinog segmenta rada svakog od UPOV-a i instalirane tehnologije.

Pročišćavanje otpadnih voda te za tu svrhu razvoj tehnologija prisutno je, može se slobodno reći i na svjetskoj razini, pa će se u jednom poglavlju rada osvrnuti na kratak primjer usporedbe tehnologija u SAD-u, na UPOV-u a La Center koji je prvotno pročišćavao otpadnu vodu SBR tehnologijom da bi se kasnije prenamijenio u MBR.

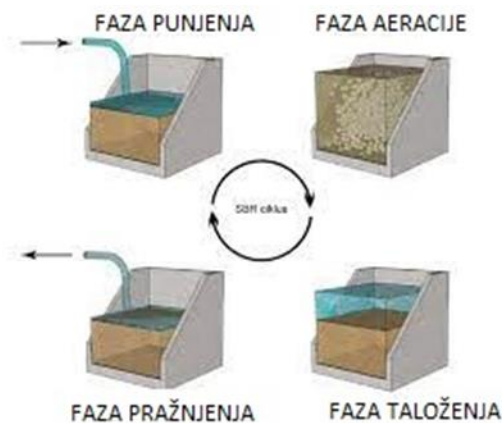
Krajnji cilj usporedbe bio bi realan prikaz razlike u tehnologijama i ostvarenim efektima temeljen na konkretnim podacima i troškovima dobivenim od upravitelja koji daju realnu sliku rada, a što nije moguće adekvatno prikazati varijantnim rješenjima prilikom izbora optimalne tehnologije.

2. OPIS SBR TEHNOLOGIJE PROČIŠĆAVANJA OTPADNIH VODA

SBR (*eng. Sequencing Batch Reactor*) tehnologija jedna je od najčešće korištenih tehnologija u sustavu pročišćavanja otpadnih voda. Ovaj sekvencijalni šaržni reaktor predstavlja biološki postupak pročišćavanja koji radi na principu aktivnog mulja, a datira još s početka 1900-ih godina. Krajem 1950-ih i početkom 1960-ih razvojem novih tehnologija i opreme ova tehnologija postaje sve zastupljenija. Biološki procesi nitrifikacije i denitrifikacije, odnosno sve njegove faze odvijaju se u istom bazenu šta zahtjeva njegov značajniji volumen, ali upravo zato rezultira velikom učinkovitošću te predstavlja fleksibilno rješenje pri velikim fluktuacijama organskog i hidrauličkog opterećenja.

Sam biološki proces koncipiran je na način da mikroorganizmi poput bakterija, kvasca i algi, ali i viši organizmi poput protozoa i metazoa koji su povezani sa suspendiranim tvarima s kojima čine flokule aktivnog mulja razgrađuju organske i hranjive tvari u otpadnoj vodi. Mikroorganizmi teže prirastu biomase, pri čemu koriste otopljene tvari sa ugljikom, dušikom i fosforom kao izvor energije i komponenti za ugradnju u vlastite stanice procesima oksidacije i redukcije. Optimalan omjer za rast mikroorganizama je C:N:P = 100:5:1, a s obzirom na različito podrijetlo otpadne vode potrebno je održati hranjive sastojke u navedenim odnosima.

Kod pročišćavanja otpadnih voda u jednom volumenu razlikujemo četiri faze koje se odvijaju unutar pravilnih vremenskih okvira (Slika 1.).



Slika 1. Faze SBR tehnologije u reaktoru

<https://repositorij.vuka.hr/islandora/object/vuka%3A717/datastream/PDF/view>

Prva faza predstavlja punjenje reaktora otpadnom vodom nakon izvršenog mehaničkog stupnja obrade. Količina vode koja će se prihvatiti u reaktor unaprijed je određena za jednu šaržu rada.

Iduća faza obrade otpadne vode je faza aeracije u kojoj se vrši intenzivna opskrba kisikom (aeriranje) kako bi se potaknula razgradnja organskih tvari te uklanjanje amonijaka i fosfora biološkim postupkom ili kemijskim taloženjem (percipitacijom). U komunalnim otpadnim vodama veliku zastupljenost ima dušik (N) koji se u kanalizacijskom sustavu razgrađuje u amonijev dušik ($\text{NH}_4\text{-N}$), pa u ovoj fazi oksidira preko nitrita ($\text{NH}_2\text{-N}$) u nitrat ($\text{NH}_3\text{-N}$). Ovaj postupak naziva se nitrifikacija. Slijedeći proces uklanjanja dušičnih spojeva je anoksična faza, odnosno denitrifikacija. Denitrifikacijom je nitrata nastale u prethodnoj fazi potrebno smanjiti što se postiže oduzimanjem otopljenog kisika bakterijama, pa one kisik koji im je neophodan za život uzimaju iz nitrata ($\text{NH}_3\text{-N}$), a tom redukcijom nitrata nastaje plinovit dušik (N_2) koji odlazi u atmosferu (Felber i Fischer, 2014.).

Faza taloženja treća je faza obrade koja se događa u SBR bazenu. Možemo ju nazvati i faza mirovanja kako bi se postigla sedimentacija aktivnog mulja na dnu bazena dok se pročišćena otpadna voda zadržava na površini. Da bi postigli maksimalnu sedimentaciju izuzetno je važna kvaliteta aktivnog mulja iz razloga da u idućoj fazi ne dođe do nekontroliranog istjecanja s pročišćenom vodom. Višak mulja s dna bazena najčešće se uklanja pumpama i odvaja u zaseban spremnik iz kojega slijedi daljnja obrada.

Nakon faze mirovanja, ispuštanje pročišćene vode (efluenta) na površini bazena vrši se pomoću nekog od tipa dekantera, pa tu fazu nazivamo faza dekantiranja ili pražnjenja.

Ispuštanjem pročišćene vode iz bazena u prijemnik završava jedna šarža pročišćavanja te se u bazen dovodi nova otpadna voda čime započinje novi ciklus.

SBR tehnologija najčešće se koristi za manje i uređaje srednje veličine. Za uređaje srednje veličine izrađuju se u pravilu dvije paralelne linije što prije svega pridonosi lakšem održavanju, moguć je rad jedne linije dok se na drugoj vrše radovi redovnog ili vanrednog

održavanja. Kod manjih uređaja influent se obrađuje u jednom volumenu koji se dimenzionira na način da ima funkciju ujednačavanja dotoka otpadnih voda.

Kako bi se osigurao stalan protok i dotok hranjivih tvari u biološkom procesu dimenzioniranje volumena treba biti precizno pri čemu je u obzir potrebno uzimati stalni dotok organske tvari, ali i vršne dotoke naročito uslijed prodora oborinskih voda. Dimenzioniranje se temelji na empirijskom iskustvu, a neke od prednosti SBR uređaja su svakako:

- otpornost na organske i hidrauličke amplitude,
- zadovoljavajuća kvaliteta efluenta,
- mogućnost homogeniziranja influenta,
- veliki postotak izdvajanja suspendirane tvari,
- zadovoljavajući parametri viška mulja prije daljnje obrade,
- automatiziranost kompletnog procesa,
- mogućnost daljinskog nadzora i upravljanja i
- mogućnost dogradnje tercijarnog stupnja.

Kako svaka tehnologija tako i ovaj proces pročišćavanja iziskuje stručno osoblje pri upravljanju, održavanju i vođenju procesa. Pri usporedbi na neke prijašnje tehnologije moglo bi se izdvojiti tek nekoliko čimbenika koji se ne bi karakterizirali kao nedostaci već neizbježne komponente bez kojih ovakav sustav ne bi mogao adekvatno funkcionirati, a to su slijedeće:

- potrebno stručno osoblje,
- veći operativni i troškovi električne energije,
- potreba za rezervnim dijelovima,
- zahtjevnije održavanje,
- precizno dimenzioniranje i osiguravanje ujednačavanja protoka i dotoka organske tvari i
- zbrinjavanje viška mulja.

3. OPIS MBR TEHNOLOGIJE PROČIŠĆAVANJA OTPADNIH VODA

MBR (*eng. Membrane Bioreactor*) ili (membranski biološki reaktor) tehnologija predstavlja tehnološki napredak u pročišćavanju otpadnih voda, a pojavljuje se 1960-ih godina. Prvi membranski biološki reaktor za potrebe pročišćavanja komunalnih otpadnih voda proizvela je korporacija Dorr-Oliver, Inc. Connecticut, SAD. Unatoč mnogim nedostacima tadašnjeg uređaja ova korporacija utrla je put razvoju membranske tehnologije koja za pročišćavanje koristi aktivni mulj u kombinaciji s membranskom filtracijom. Ovaj sustav svoj razvoj i unapređenje nije doživio u SAD-u već 1970-ih i 1980-ih u Japanu (Stephenson i sur., 2000.).

MBR sustav je u biti reaktor suspendirane biomase s poroznom membranom o kojoj ovisi krajnji rezultat pročišćavanja otpadne vode. Upravo su membrane ključna karika ove tehnologije, pa je razvoj iste ovisio o razvoju samih membrana. Tako su prve membrane bile konstruirane na način da se nalaze van volumena, spojene tokom otpadne vode iz biološkog reaktora (tzv. „side-stream“ konfiguracija). Razvojem tehnologije kroz godine kao kvalitetnije rješenje koje koristi velika većina današnjih MBR sustava pokazale su se membrane uronjene u volumenu biološkog reaktora (tzv. „immersed“ konfiguracija). Upravo takve uronjene membrane s ravnim membranskim platnima („flat sheets“) primijenile su se na japanskom uređaju u Hiroshimi 1990. godine s protokom od 25 m³/dan (Judd, 2006.). Ove membrane za niže radne tlakove, manjom potrošnjom energije, rastresanjem i aeracijom s ciljem sprečavanja začepljenja, a time i dužim životnim vijekom dizajnirala je i razvila japanska tvrtka Kubota, pa možemo reći da je ista pionir u razvoju modernih membranskih sustava.

Danas je primjena MBR procesa prisutna kako u obradi komunalnih otpadnih voda tako i industrijskih otpadnih voda s visokim stupnjem pročišćavanja, pri čemu je kod komunalnih voda sustav jednostavniji u odnosu na industrijske, pa se veća pažnja posvećuje upravno u tom dijelu naročito radi smanjenja troškova eksploatacije i mogućeg iskorištenja efluenta kao tehnološke vode.

Membrane su konceptualno dvodimenzionalni materijali koji koriste membransku filtraciju za fizičko odvajanje čestica ovisno o njihovoj veličini, obliku i strukturi. Da bi

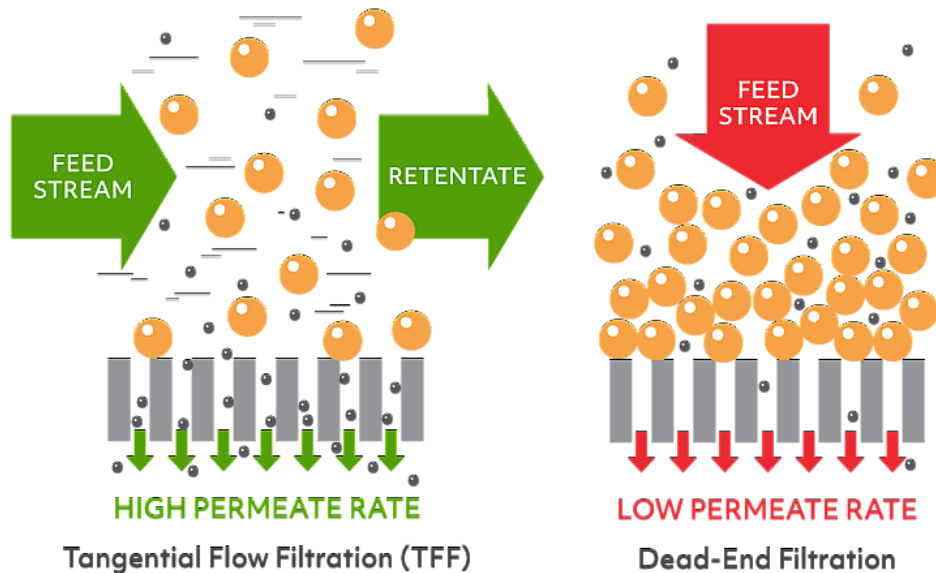
tekućina (permeat ili filtrat) prošla kroz pore na membrani, a u reaktoru se zadržala koncentrirana otopljena tvar (koncentrat ili retentat) potrebna je sila koja se naziva transmembranski tlak, a predstavlja razliku tlaka s obje strane membrane.

Membranske procese možemo podijeliti prema veličini pora membrane i potrebnom transmembranskom tlaku za svaki od procesa na (Mijatović i Matošić, 2020.):

- mikrofiltraciju (MF): veličina pora > 100 nm pri tlaku 0,1 – 2 bara,
- ultrafiltraciju (UF): veličina pora 5 – 100 nm pri tlaku 1 – 5 bara,
- nanofiltraciju (NF): veličina pora 1 – 5 nm pri tlaku 5 – 20 bara i
- reversnu osmozu (RO): veličina pora < 1 nm pri tlaku 10 – 100 bara.

U pravilu postoje dva načina provedbe filtracije (Mijatović i Matošić, 2020.):

- klasična filtracija (*eng. dead end filtration*) pri kojoj voda dolazi pod pravim kutom na membranu i sva prolazi kroz membranu i
- tangencijalna filtracija (*eng. cross – flow filtration*) pri kojoj se samo dio vode filtrira kroz membranu, a preostali dio ostaje s koncentriranom tvari (Slika 2.).



Slika 2. Načini provedbe filtracije

(<https://solarisbiotechusa.com/why-use-tangential-flow-filtration>)

Membrane se najčešće koriste kod pročišćavanja otpadnih voda srednjih i velikih naselje tu u industrijskim postrojenjima, a kao što je već napomenuto ključan su faktor u

ovoj tehnologiji pročišćavanja otpadnih voda, pa je važno koja će se membrana odabrati kako bi se postigao najveći efekt pročišćavanja, a očekuje se da zadovolji tražene parametre protoka ovisno o površini, zadržavanje čestica, mehaničku otpornost i trajnost. Da bi se zadovoljili navedeni parametri zajedno sa otpornošću na temperaturne promjene, promjene u koncentraciji oksidansa prilikom kemijskog čišćenja membrana i promjene pH – vrijednosti membrane moraju biti izrađene od kvalitetnih materijala, a danas su to najčešće polimeri i keramika.

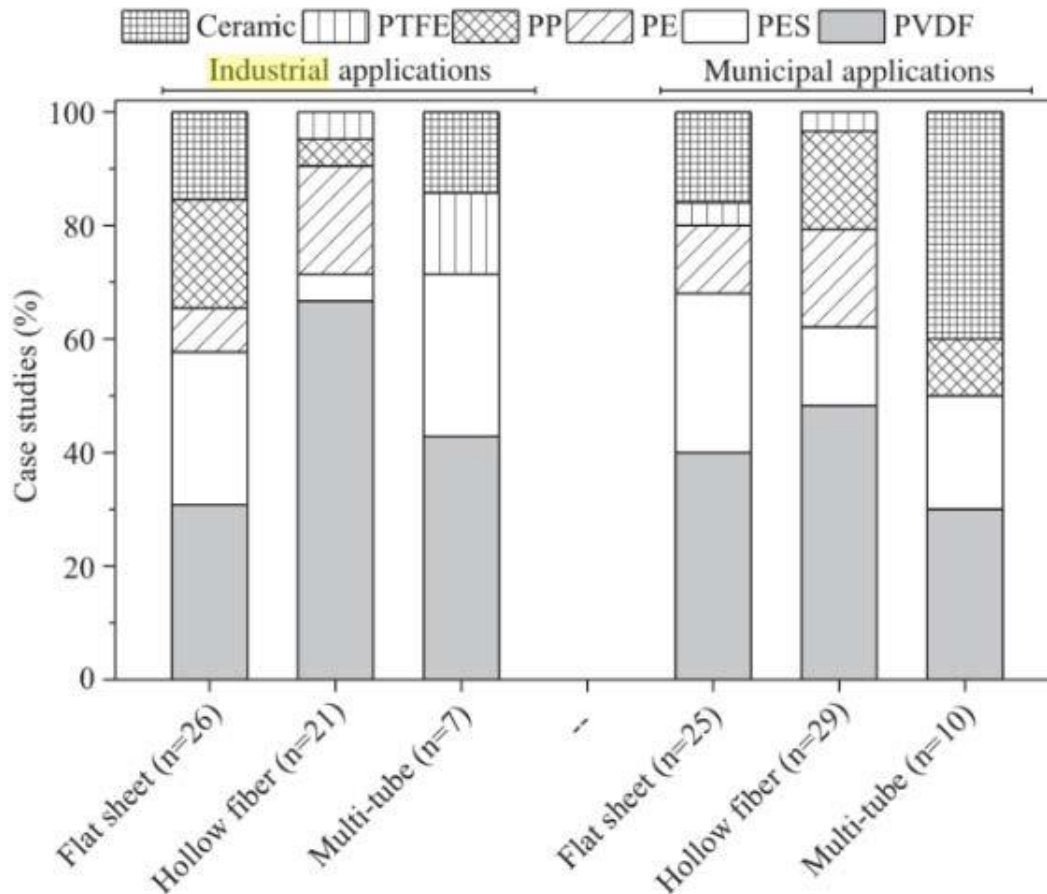
Membrane izrađene od polimera imaju prednost niske cijene, ali se radi o hidrofobnim materijalima osjetljivim na začepljenje pora membrana česticama iz otpadne vode. Danas se koriste membrane od različitih polimera poput celuloza acetata (CA), polipropilena (PP), polietilena (PE), politetrafluoretilena (PTFE), polisulfona (PS) i poliakrilonitrila (PAN), a zbog izuzetne kemijske otpornosti i fleksibilnosti najčešće se koriste membrane izrađene od polietersulfona (PES) i poliviniliden difluorida (PVDF).

Membrane izrađene od keramika posjeduju veliku kvalitetu te su dugotrajne, ali su i ekonomski nepovoljnije naročito kod velikih postrojenja gdje su potrebne velike površine, pa je to odstupanje od polimernih značajnije (Judd, 2006.).

Kako bi proces pročišćavanja otpadne vode MBR tehnologijom bio zadovoljavajući izuzetno je važna konfiguracija membrana i membranski moduli koji se razlikuju geometrijski (ravni i cilindrični) s različitim udjelima ranije navedenih materijala te se dijele u šest osnovnih konfiguracija (Judd, 2006.):

- pločaste membrane / ravna platna (*eng. flat sheet (FS)*),
- šuplja vlakna (*eng. hollow fibre (HF)*),
- (multi)tubularne membrane (*eng. multi – tube (MT)*),
- kapilarne cijevi (*eng. capillary tubes (CT)*),
- nabrani filter ulošci (*eng. pleated filter cartridge (FC)*) i
- spiralno namotane membrane (*eng. spiral – wound (SW)*).

U MBR tehnologiji pročišćavanja otpadnih komunalnih i industrijskih voda koriste se prve tri navedene konfiguracije (Slika 3.), a kod uronjenih membrana često se koriste kazete sastavljene od pločastih membrana.



Slika 3. Udio materijala u osnovnim membranskim modulima (Judd, 2011.)

Kao sasvim sigurno jedna od tehnologija koja daje najbolje rezultate efluenta pogodnog i za ponovno korištenje (tehnološka voda, navodnjavanje) MBR tehnologija dovedena je do zavidne razine u sustavu obrade i pročišćavanja otpadnih voda, a neke od prednosti su svakako slijedeće:

- visok stupanj pročišćene otpadne vode,
- visoka kvaliteta efluenta,
- zahtjeva mali prostor u odnosu na druge tehnologije,
- dobro vrijeme zadržavanja i koncentracija mulja,
- automatiziranost procesa i
- mogućnost daljinskog nadzora i upravljanja.

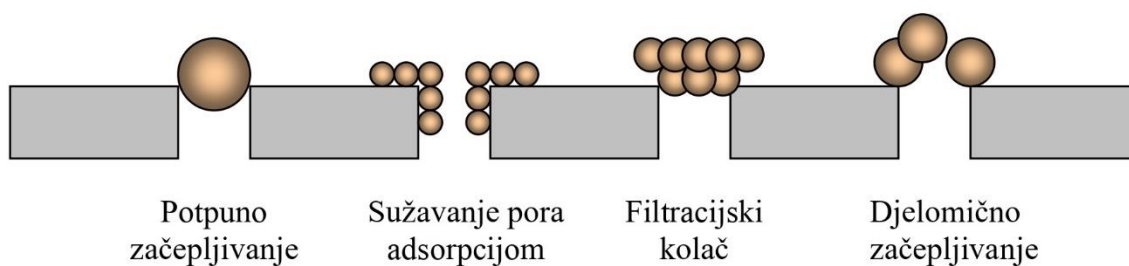
MBR tehnologija razvijana je godinama te se kroz taj razvoj uspješno riješila većina problema vezana uz rad poput očekivanog vijek trajanja membrana i potrebne energije

za filtraciju. Međutim i dalje postoje određeni zahtjevniji aspekti ove tehnologije bez kojih ista ne može funkcionirati, a neophodni su za njen ispravan rad pa ih možemo okarakterizirati kao svojevrsne nedostatke poput:

- začepljenje i onečišćenje membrana,
- ekonomski zahtjevno investiranje,
- veći operativni i troškovi električne energije,
- potrebno stručno osoblje,
- potreba za rezervnim dijelovima i zamjena membrana i
- zahtjevnije održavanje.

Od navedenog važno je istaknuti da je unatoč razvoju tehnologije začepljivanje membrana i dalje najveći problem MBR tehnologije, pa se ulažu značajni naponi kako bi se problem riješio ili pak sveo na najmanju moguću mjeru. Do začepljivanja membrana dolazi spontanim povećanjem tlaka ili smanjenjem protoka filtrata, a mehanizam začepljivanja (Slika 4.) koji će biti najzastupljeniji ovisi o interakciji sastava otpadne vode i materijalu od kojeg je membrana izrađena. Stupanj začepljenja membrane određuje se prema vrsti začepljenja, pa ga možemo podijeliti na (Mijatović i Matošić, 2020.):

- reverzibilno začepljivanje – moguće uklanjanje fizičkim čišćenjem,
- ireverzibilno začepljivanje – moguće uklanjanje kemijskim čišćenjem i
- nepovratno začepljivanje – nemoguće uklanjanje čišćenjem.



Slika 4. Mehanizmi začepljivanja membrana (Mijatović i Matošić, 2020.)

4. KARAKTERISTIKE RAZMATRANIH UPOV-a

Kako bi se dobio bolji uvid u način rada SBR i MBR tehnologije pročišćavanja otpadnih komunalnih voda prikazati će se rad dvaju uređaja na kojima su zastupljene navedene tehnologije. SBR tehnologijom vrši se pročišćavanje na UPOV-u Delnice, a MBR tehnologijom na UPOV-u Siffiano.

Ova dva uređaja izabrana su za usporedbu zbog sličnih karakteristika poput veličine, geografskog položaja i klime što će se pobliže prikazati u narednom tekstu ovoga rada.

4.1. Uređaj za pročišćavanje otpadnih voda Delnice

Gradsko naselje Delnice smješteno je u središnjem dijelu Gorskog kotara u Primorsko – goranskoj županiji. Na 698 metara nadmorske visine najviši je grad Republike Hrvatske te s populacijom od 3.861 stanovnika predstavlja i administrativno središte. Površina područja Grada Delnica je 230 km², a ukupan broj stanovnika u svih 55 naselja iznosi 5.135. Naselje Delnice locirano je na Delničkom polju u brdovitom okruženju Drgomlja, Petehovca i Japlenškog vrha, a u njegovom sjeveroistočnom dijelu nalazi se UPOV Delnice (Slika 5.).



Slika 5. Lokacija UPOV-a Delnice (Google karte – vlastita izrada)

Reljef ovog područja je krški s podlogom od vapnenačko – dolomitskih stijena, a prostire se na području od Kupske doline (210 m n.m.) do Nacionalnog parka Risnjak (1.528 m n.m.) što čini kontinentalni karakter s planinskom klimom i mnoštvom oborine (kiša i snijeg). Utjecajem klimatskih promjena dolazi do sve većih odstupanja od prosječnih temperatura, pa zadnjih nekoliko godina ljetne temperature znaju doseći i 30 °C, a u nižim područjima i pokoji stupanj više. Za ovo područje karakterističan je veliki broj kišnih dana s visokim godišnjim prosjekom padalina većim od 2.000 mm.

UPOV Delnice (Slika 6.) nalazi se na samom rubu naselja u Supilovoj ulici udaljen svega 50 m od najbližih stambenih objekata na zasebnoj čestici veličine 7.496 m². U njegovom bližem okruženju unutar 300 – 600 m nalazi se još rekreacijska zona – kupalište Delnički potok s izletištem Furmanski fojnar te vojarna „Drgomalj“ i gradsko groblje.



Slika 6. Uređaj za pročišćavanje otpadnih voda Delnice (vlastita fotografija)

UPOV Delnice opterećenja 6.600 ES kakav danas postoji pušten je u rad 2017. godine kao uređaj II. stupnja pročišćavanja otpadnih voda s aerobnom stabilizacijom mulja, ali povijest njegove izgradnje seže još u 70-e godine prošlog stoljeća. Prvi projekt uređaja za biološko pročišćavanje otpadnih voda izrađen je 1977. godine, ali je izgrađen i pušten u rad tek 1987. godine. Tek nakon puštanja u rad uređaja koji je prema dostupnoj

tehničkoj dokumentaciji imao sve elemente današnjeg (ulazna građevina s grubom i finom rešetkom i pjeskolovom, aeracijski bazeni, crpnu stanicu za povrat mulja, spremnik za zgrušavanje mulja, kompresorsko postrojenje te pogonsko – upravljačku zgradu) osim linije obrade viška mulja uvidjelo se da su troškovi eksploatacije visoki što u to vrijeme nažalost nije bilo odobravano, pa je uređaj ubrzo prestao s radom (ECOINA, 2009.).

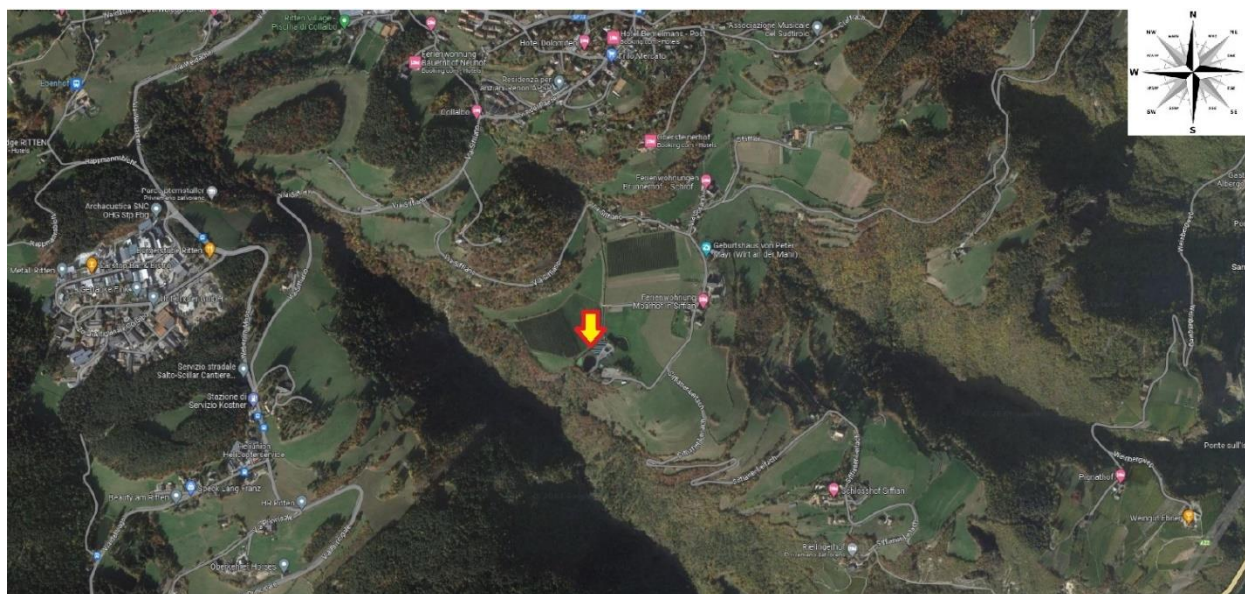
Prva rekonstrukcija UPOV-a Delnice izvedena je 1995. godine kojom je prvotni uređaj u biti degradiran u I. stupanj samo sa mehaničkim pročišćavanjem. Obzirom da tadašnji uređaj nije mogao zadovoljiti potrebne parametre pročišćavanja otpadnih voda što je rezultiralo ispuštanjem prevelike koncentracije organskog opterećenja u prijemnik bilo je nužno izvršiti rekonstrukciju i izgraditi uređaj II. stupnja sukladno važećoj zakonskoj regulativi. S izradom projektne dokumentacije rekonstrukcije UPOV-a Delnice kakav danas poznajemo započelo se tek 2009. godine da bi se nakon niza projekata i izmjena 2015. godine ishodila *Potvrda o izmjeni i dopuni glavnog projekta* nakon čega je započela rekonstrukcija UPOV-a koja je uspješno izvršena kako je već navedeno 2017. godine. Ispust pročišćene vode sukladno izveden je u recipijent Delnički potok (Slika 7.).



Slika 7. Bakarčev slap na recipijentu Delnički potok (vlastita fotografija)

4.2. Uređaj za pročišćavanje otpadnih voda Siffiano

Selo Siffiano nalazi se u Republici Italiji, regija Trentino – Alto Adige, pokrajina Bolzano, a pripada općini Renon – Ritten od čijeg je gradskog središta Klobensteina udaljeno oko 1,4 km. Smješteno na 936 metara nadmorske visine na visoravni s prekrasnim pogledom na Dolomite ovo malo životopisno selo s bogatom poviješću broji svega 48 stanovnika. U južnom dijelu naselja nedaleko seoske crkve Svetog Petra koja datira iz 1389. godine smješten je UPOV Siffiano (Slika 8.) koji osim komunalnih voda naselja Siffiano pročišćava i otpadne vode glavnog grada općine Klobensteina i gradića Lengmoosa s okolnim područjem.



Slika 8. Lokacija UPOV-a Siffiano (Google karte – vlastita izrada)

Ovaj dio Dolomita u pokrajini Trentino jedan je od najljepših alpskih krajolika velikog geološkog značaja kao što su prirodne krške formacije, na svijetu najveći broj različitih vapnenačkih formacija na ograničenom prostoru. Ovdje se nalaze najviše vapnenačke litice na svijetu oblikovane erozijom, glacijacijom i potresima, a česta pojava su klizišta tla, poplave i lavine. Visoravan Ritten na kojoj se nalazi i selo Siffiano pitomiji je dio Sarnataških Alpa s umjerenom kontinentalnom klimom iz razreda snježno – šumskih klima čije su obilježje oštre zime, kratko proljeće te toplo i vlažno ljeto s maksimalnim temperaturama i preko 30 °C, malim brojem kišnih dana u godini i s više od 300 sunčanih dana u godini.

Uređaj za pročišćavanje otpadnih voda Siffiano (Slika 9.) nalazi se 250 m južno od sela Siffiano u depresiji zemljišta koje je isušeno i razvijeno za te potrebe na ukupnoj površini od 6.850 m².



Slika 9. Pogled na uređaj za pročišćavanje otpadnih voda Siffiano (vlastita fotografija)

Prvotni UPOV Siffiano veličine 5.000 ES izgrađen je i pušten u rad još 1984. godine koji je u otvorenim aeriranim bazenima razgrađivao otpadnu vodu. U svrhu poboljšanja funkcionalnosti sustava tijekom godina obnavljana je i dograđivana tehnološka oprema, pa je tako 2000. godine ugrađeno novo fino sito, a 2001. godine novi kompresori za potrebe pročišćavanja otpadnih voda aktivnim muljem. Obzirom da se 1997. godine u Italiji mijenja regulativa vezano uz granične vrijednosti emisija otpadnih voda iz UPOV-a, a proširuje se na uklanjanje dušikovih i fosfornih spojeva, postojeće postrojenje više ne ispunjava tražene zahtjeve pa je potrebna njegova rekonstrukcija. Iz tog razloga 2005. godine razmatrana su alternativna rješenja postojeće odvodnje i pročišćavanja otpadnih voda prije svega uzimajući u obzir specifičnu hidrološku situaciju visoravni Ritten. Odlučeno je da se zadrži koncepcija postojećeg sustava javne odvodnje koncipiranog na način da se otpadna voda obrađuje na istoj lokaciji s tehnologijom određenom prema

zadanim kriterijima. Razmatrani kriteriji uključivali su specifičnost područja s obzirom na lokaciju (postojeća infrastruktura, okolno područje i vizualna integracija), aspekt obrade otpadne vode (rekonstrukcija postojećeg sustava, budući populacijski ekvivalenti i nove tehnologije) te ekonomski aspekt (obrada mulja s drugih postrojenja, odnos troškova i koristi i održivost rješenja).

Kako bi se poboljšao rad tada degradiranog postrojenja i zadovoljila zakonska regulativa, nakon razmatranja svih prednosti i nedostataka od više razmatranih rješenja kao najoptimalnije pokazala se izgradnja te 2009. godine puštanje u rad UPOV-a s MBR tehnologijom kapaciteta 6.000 ES sa središnjim postrojenjem za obradu mulja iz lokalnog sustava i dovozom mulja iz okolnih UPOV-a općine Ritten na daljnju obradu.

Jedan od bitnih razloga odabira sustava i tehnologije pročišćavanja je i upravo efikasna tehnologija obrade komunalnih voda koja rezultira zajamčenom kvalitetom otpadne vode koja se može koristiti kao voda za navodnjavanje (Slika 10.), a što je od velike važnosti za poljoprivredu u sušnom Rittenu.



Slika 10. Jezero pročišćene otpadne vode (vlastita fotografija)

5. USPOREDBA TEHNOLOGIJA KROZ RAD RAZMATRANIH UPOV-a

Oba razmatrana uređaja u funkciji su već duži niz godina i prema podacima upravitelja, a što će se kroz ovaj rad također prikazati, zadovoljavaju sve tražene parametre pročišćavanja otpadne vode.

Usporedba rada UPOV-a razmatrati će se kroz funkcionalne dijelove, odnosno segmente tehnološkog procesa koji su uspostavljeni na oba UPOV-a s već spomenutom analizom rada i krajnjim efektom pročišćavanja. Predviđena je usporedba rada prema slijedećim cjelinama:

- mehanički predtretman otpadnih voda,
- biološko pročišćavanje otpadnih voda,
- obrada viška biološkog mulja i
- rezultati rada razmatranih UPOV-a.

Kroz već spomenuti postupak usporedbe, a kako bi se što bolje prezentirao, za svaki UPOV detaljnije će se opisati rad svake funkcionalne cjeline, odnosno njenih najvažnijih tehnoloških segmenata.

5.1. Kriterij analize

Da bi se tehnologije mogle usporediti potrebno je postaviti određene kriterije koji će se kasnije evaluirati i dovesti do krajnjeg zaključka i ocjene. Kvalitativna analiza obuhvatiti će slijedeće parametre:

- troškove investicije,
- operativne troškove,
- prostornu komponentu,
- složenost kontrole i procesa i
- efekte pročišćavanja otpadnih voda.

Predviđeno je da svaki od navedenih parametara u konačnoj evaluaciji posjeduje određenu kvantificiranu vrijednost u odnosu na ukupnu sumu svih parametara. Radi dobivanja krajnjeg rezultata svaki parametar prikazati će se temeljem postotka svoje vrijednosti u izračunu konačne ocjene (*Tablica 1.*).

Tablica 1: Udio parametara u vrijednosti izračuna konačne ocijene (izradio autor)

Parametar	Postotak u ukupnoj ocjeni	Koeficijent kod izračuna
Trošak investicije	10	0,10
Operativni trošak	10	0,10
Prostorna komponenta	5	0,05
Složenost kontrole i procesa	60	0,6
Efekt pročišćavanja	15	0,15

Vrednovanje će se odrediti iskustveno i prema općenitoj praksi vrednovanja koje se inače vrši prilikom odabira tehnologije u fazi pripreme i projektiranja. Dobiveni rezultat koji će se temeljiti na stvarnim podacima dobivenim od upravitelja u biti će odražavati realno stanje u odnosu na uvriježene kriterije.

Analiza troškova investicije i operativnih troškova obuhvaća financijski aspekt pri čemu se za svaki UPOV uzima konačna vrijednost i operativni troškovi u periodu od godine dana, a kao referentna uzeti će se 2022. godina.

Bodovanje troškova investicije određuje se prema izrazu (1) čija inačica se inače koristi kod bodovanja ekonomski najpovoljnije ponude u postupku javne nabave:

$$C_I = C_n / C_v \cdot 50 \quad (1)$$

gdje je C_I broj bodova za razmatranu tehnologiju, C_n je niži investicijski trošak od dviju tehnologija, C_v je investicijski trošak tehnologije za koju se vrši izračun, a 50 je maksimalni broj bodova koji se može ostvariti za ovaj parametar.

Broj ostvarenih bodova u parametru troškova investicije prikazati će se tablično za svaku tehnologiju (Tablica 2.).

Tablica 2: Način bodovanja za parametar troškova investicije (izradio autor)

Tehnologija	Trošak investicije (EUR)	Broj bodova (0 – 50)
SBR (UPOV Delnice)	2.073.627,31	0 – 50
MBR (UPOV Siffiano)	2.428.623,38	0 – 50

Bodovanje operativnih troškova određuje se po istom principu kao i za troškove investicije, a prema izrazu (2) čija inačica se inače koristi kod bodovanja ekonomski najpovoljnije ponude u postupku javne nabave:

$$C_o = C_n / C_v \cdot 50 \quad (2)$$

gdje je C_o broj bodova za razmatranu tehnologiju, C_n je niži operativni trošak od dviju tehnologija, C_v je operativni trošak tehnologije za koju se vrši izračun, a 50 je maksimalni broj bodova koji se može ostvariti za ovaj parametar.

Broj ostvarenih bodova u parametru operativnih troškova prikazati će se tablično za svaku tehnologiju (*Tablica 3.*).

Tablica 3: Način bodovanja za parametar operativnih troškova (izradio autor)

Tehnologija	Operativni trošak (EUR/god)	Broj bodova (0 – 50)
SBR (UPOV Delnice)	79.868,00	0 – 50
MBR (UPOV Siffiano)	129.992,00	0 – 50

Prostorna komponenta za UPOV jednim je dijelom vezan uz troškove izgradnje iz razloga što potreba za većim zemljištem i objektima podrazumijeva i veće troškove investicije. Stoga će ovaj parametar obuhvatiti prostorni aspekt u vidu površine koju objekti zauzimaju, konfiguraciju terena i druge relevantne prostorne komponente i eventualne ograničavajuće faktore.

Bodovanje sukladno kriteriju segmenata građevine koji su vezani uz određenu tehnologiju u parametru prostorne komponente prikazati će se tablično (*Tablica 4.*).

Tablica 4: Način bodovanja za parametar prostorne komponente (izradio autor)

Kriterij	SBR (Delnice)	MBR (Siffiano)
Površina izgrađenosti (0 – 10)	0 – 10	0 – 10
Potreban volumen/površina objekata (0 – 20)	0 – 20	0 – 20
Komunikacije i raspored objekata (0 – 20)	0 – 20	0 – 20
Ukupno (0 – 50)	0 – 50	0 – 50

Vrlo važan parametar koji će se razmatrati je složenost kontrole i procesa s obzirom da isti zahtijeva mnoge druge preduvjete i zahtjeve poput stručne osposobljenosti osoblja, stupnja moguće automatizacije, tehnoloških specifičnosti i sl. Upravo ovaj parametar najbolje će se sagledati kroz analizu dvaju UPOV-a kroz funkcionalne segmente koji će se prikazati u nastavku.

Bodovanje sukladno kriterijima segmenata unutar tehničko – tehnološkog procesa u parametru složenosti kontrole i procesa prikazati će se tablično (*Tablica 5.*).

Tablica 5: Način bodovanja za parametar složenosti kontrole i procesa (izradio autor)

Kriterij	SBR (Delnice)	MBR (Siffiano)
Mehanički predtretman (0 – 5)	0 – 5	0 – 5
Osjetljivost na varijacije ulaznog hidrauličkog opterećenja (0 – 5)	0 – 5	0 – 5
Osjetljivost na varijacije ulaznog organskog opterećenja (0 – 5)	0 – 5	0 – 5
Jednostavnost vođenja procesa (0 – 5)	0 – 5	0 – 5
Automatiziranost rada (0 – 5)	0 – 5	0 – 5
Utjecaj plivajućeg mulja (0 – 5)	0 – 5	0 – 5
Produkcija viška mulja (0 – 5)	0 – 5	0 – 5
Dehidracija mulja (0 – 5)	0 – 5	0 – 5
Pojava neugodnih mirisa (0 – 5)	0 – 5	0 – 5
Opseg radova održavanja (0 – 5)	0 – 5	0 – 5
Ukupno (0 – 50)	0 – 50	0 – 50

Nedvojbeno je da se ovdje radi o provjerenim tehnologijama koje su kako je vidljivo u uvodnom dijelu, kroz godine rada i usavršavanja dovedene do visokog stupnja produciranog efluenta koji treba zadovoljiti sve zahtjeve vezane uz zadanu kvalitetu. Eventualna lošija kvaliteta krajnjeg rezultata pročišćavanja otpadnih voda mogla bi biti posljedica eventualnih manjkavosti u radu, vođenju rada i uštedama na pozicijama gdje to može utjecati na krajnji rezultat pa se svakako kao posljednji parametar mora sagledati rezultat rada odnosno efekt pročišćavanja otpadnih voda.

Bodovanje sukladno kriteriju zadanih parametara pročišćavanja otpadnih voda u parametru efekta pročišćavanja prikazati će se tablično, a kao referentna razmatrati će se 2022. godina (*Tablica 6.*).

Tablica 6: Način bodovanja za parametar efekta pročišćavanja otpadnih voda (izradio autor)

Kriterij	SBR (Delnice)	MBR (Siffiano)
Kvaliteta efluenta (0 – 35)	0 – 35	0 – 35
Postotak pročišćavanja suspendirane tvari (0 – 5)	0 – 5	0 – 5
Postotak pročišćavanja KPK (0 – 5)	0 – 5	0 – 5
Postotak pročišćavanja BPK ₅ (0 – 5)	0 – 5	0 – 5
Ukupno (0 – 50)	0 – 50	0 – 50

5.2. Mehanički predtretman

Mehaničko pročišćavanje prvi je stupanj pročišćavanja komunalnih otpadnih voda. Pročišćavanjem fizikalnim i/ili kemijskim putem prvim stupnjem pročišćavanja vrši se taloženje suspendirane tvari pri čemu se njena količina u otpadnoj vodi smanjuje za najmanje 50% dok se BPK₅ ulazne otpadne vode umanjuje za najmanje 20% (Pravilnik o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda, NN, 2020, 26.). Uklanjanje krupnijeg materijala i suspendirane tvari u pravilu se postiže rešetkama, sitima, grabljama i taložnicima dok se sitnije plivajuće čestice uklanjaju aeriranim mastolovom. U narednim potpoglavljima opisati će se tehnologija mehaničkog predtretmana prema instaliranim elementima za svaki UPOV zasebno pri čemu će se navesti tehničke karakteristike, troškovi upravljanja, održavanja i energije te efekti pročišćavanja otpadnih voda.

5.2.1. UPOV Delnice

Otpadna voda do prvog objekta mehaničkog pročišćavanja, automatske grube rešetke (Slika 11.), dovodi se dovodnim cjevovodom profila DN 400 mm. Smještena van objekata ispod drvene nadstrešnice, automatska rešetka svijetlog otvora između štapova rešetke $s = 20$ mm predviđena je da zadrži i izdvoji veći dio krupnijeg otpada koji se nalazi u otpadnoj vodi i na taj način spriječi eventualna začepljenja u daljnjim fazama pročišćavanja kao i crpnih agregata u crpnim stanicama. Rešetka koja je ugrađena u

kanal pod kutom od $\alpha = 70^\circ$ radi u automatskom radu na način da se temeljem razine vode u kanalu ispred i iza rešetke putem pneumatskih nivo sonde uključuje i isključuje njen rad. Kapacitet automatske grube rešetke je veći i iznosi $Q_{max} = 80$ l/s, a iz razloga većih količina otpadne vode i krupnijeg otpada zbog dotoka oborinskih voda tijekom kišnog razdoblja (Prongrad biro, 2015.).



Slika 11. Automatska gruba rešetka i stanica za prihvata sadržaja septičkih i crnih jama
(vlastita fotografija)

Kao što je vidljivo na prethodnoj slici neposredno uz automatsku grubu rešetku smještena je kompaktna jedinica za prihvata sadržaja septičkih i crnih jama koja je opremljena zatvorenim spremnikom s ugrađenom rešetkom, automatskom finom rešetkom s presom i Perrot – spojnicom DN 100 mm za priključenje crijeva prilikom ispuštanja sadržaja iz specijalnog vozila. Na finoj automatskoj rešetki svijetlog otvora ulaznog bubnja $s = 6$ mm zadržava se krupniji sadržaj kao i dio pijeska i masnoća, a

kapacitet rešetke ovisi o udjelu suhe tvari u sadržaju dopremljenom specijalnim vozilom. Na presi u sklopu rešetke masa izdvojenog grubog materijala smanjuje se za oko 40% i odlaže u prihvatni kontejner. Tekući dio sadržaja septičkih i crnih jama odvodi se u crpnu stanicu iz koje se vrši doziranje u proces sustava pročišćavanja. Ova otpadna voda visokog je organskog opterećenja, pa ju je u fazu daljnjeg pročišćavanja potrebno dozirati u manjim količinama, te je stoga crpna stanica opremljena mješačem s propelerom kako bi se spriječile nakupine organskih tvari na stjenkama crpne stanice (Prongrad biro, 2015.).

Kompletna otpadna voda i medij preostao nakon tretmana na automatskoj gruboj rešetki gravitacijski, a tlačno iz crpne stanice nakon obrade u kompaktnoj jedinici odlazi u ulaznu crpnu stanicu gdje ju crpni agregati pojedinačnog kapaciteta $Q = 60$ l/s u naizmjeničnom radu odvođe na kompaktni uređaj za mehaničku predobradu (Slika 12.).



Slika 12. Kompaktni uređaj za mehaničku predobradu otpadnih voda (vlastita fotografija)

Kompaktni uređaj za mehaničku predobradu otpadnih voda u nadzemnoj je izvedbi, a za potreban kapacitet i efekt pročišćavanja ugrađena je jedinica u dimenzijama: dužina 5.000 mm, širina 1.795 mm i visina 2.320 mm. Kompaktna jedinica sastoji se od finog sita s presom svijetlog otvora ulaznog bubnja $s = 3$ mm, produžnog aeriranog pjeskolova i mastolova te kosog spiralnog transportera kojim se vrši transport izdvojenog pijeska iz medija. Postupak je automatiziran, a fino sito s presom koje izdvaja sav organski i anorganski otpad veći od 2 – 3 mm te dio pijeska i masnoće ispire se vodom u ciklusima. Kosim pužnim transporterom otpad odlazi u presu čime mu se masa smanjuje za oko 40% ulaznog volumena. Obradeni otpad u kompaktnoj jedinici (pijesak, otpad s finog sita i flotat) izdvaja se u prihvatne kontejnere. Zbrinjavanje otpada vrši za to ovlaštena i specijalizirana tvrtka (Prongrad biro, 2015.).

Kao što je iz teksta vidljivo mehanički predtretman automatizirani je proces prvog stupnja pročišćavanja. Međutim, zbog velikog broja pokretnih i rotirajućih elemenata, crpnih agregata te medija koji se u njemu obrađuje, potrebna je stalna kontrola, upravljanje i čišćenje, zahtjevnije je i održavanje, a sve to utječe na njegove operative troškove (*Tablica 7.*).

Tablica 7: Operativni troškovi mehaničkog predtretmana UPOV-a Delnice (izradio autor)

Trošak	EUR/god.
Energenti	7.685,00
Upravljanje procesom	3.410,00
Održavanje i ostalo	11.881,00
Ukupno	22.976,00

5.2.2. UPOV Siffiano

Otpadna voda iz naselja obuhvaćenih lokalnim sustavom javne odvodnje dovodi se do lokacije UPOV-a dovodnim cjevovodom profila DN 315 mm gdje se prije procesa pročišćavanja ulazni dotok mjeri Khafagi – Venturi mjernim kanalom.

Proces mehaničkog pročišćavanja započinje na finom situ dimenzioniranom za maksimalni dotok $Q = 60$ l/s koji se odnosi na vršni dotok kada pada kiša. Instalirano je

fino sito s presom profila košare 800 mm koja služi za odvajanje organskog i anorganskog otpada većeg od 2 mm koje obavlja četiri radna procesa istovremeno u toj integriranoj jedinici (prosijavanje, prijenos, pranje te odvodnjavanje i zbrinjavanje), a nalazi se u zatvorenom objektu (Slika 13.).



Slika 13. Fino sito (vlastita fotografija)

Otpad sakupljen na finom situ odlaže se u vreće, a otpadna voda gravitacijski odlazi na daljnju obradu na građevinu pjeskolova i mastolova predviđenog za maksimalni protok od $Q = 25$ l/s. Odvajanje pijeska i inertnog materijala predviđeno je aeriranim uzdužnim hvatačem pijeska koji je konstruiran kao pravokutni uzdužni spremnik s konusnim dnom duljine 12,00 m, širine 2,30 m, dubine 3,70 m te dubine vode 2,05 m s paralelnim kanalom za masnoće (Slika 14.). U aeriranom odjeljku vrši se taloženje pijeska, dok se u umirenom skuplja plutajuća mast i odvaja samohodnim strugačem s dvije oštrice do stražnjeg kraja

bazena, te preko žljeba u sustav filtarskih vrećica. Voda iz sustava filtarskih vrećica pumpa se natrag na ulaz u pjeskolov (H & T PlanungsBüro, 2006.).



Slika 14. Aerirani pjeskolov i mastolov (vlastita fotografija)

Nataloženi pijesak s dna bazena potiskuje se strugačem u udubljenje na ulazu u bazen odakle se pomoću potopne pumpe odvodi na daljnju obradu u cilju uklanjanja organskih komponenti. Pijesak se odvodi tlačnim cjevovodom DN 125 mm do klasifikatora i ispirača pijeska koji se nalazi u zajedničkoj prostoriji s finim sitom (Slika 15.). Tako ispran pijesak oslobođen organskih komponenti iz spremnika se odvodi pužnim transporterom i zbrinjava u kontejneru.

Ovim procesom završava mehanička obrada otpadne vode, a kako bi se izbjeglo predimenzioniranje biološke komponente i preopterećenje membranske jedinice maksimalno hidrauličko opterećenje ograničeno je na $Q = 13,3$ l/s u normalnom radu i $Q = 18$ l/s kratkotrajno. Za kompenzaciju maksimalne dnevne količine oborine izgrađen je kišni bazen zapremnine 750 m^3 koji sakuplja svu dnevnu količinu otpadne vode koja se u

normalnom radu ne može obraditi. Kišni bazen funkcionira kao međuspremnik, jer se po dostizanju prosječnih uvjeta dotoka otpadna voda iz njega povratno pumpa u fazu biološke obrade.

Kada se uzmu u obzir sve faze rada UPOV-a i njegovi kapaciteti, kada pada kiša isti može zajedno s međuspremnikom apsorbirati dnevnu količinu otpadne vode od 2.021,32 m³. Ako se iznimno pojave veće količine oborine, pretpostavlja se da je voda već toliko razrijeđena da se nakon prolaska kroz sustav finog sita može ispuštati izravno u poplavno područje preko preljevnog kanala sustava međuspremnika (H & T PlanungsBüro, 2006.).



Slika 15. Klasifikator i ispirač pijeska (vlastita fotografija)

Važno je napomenuti da na UPOV-u postoji i stanica za prihvat fekalija iz septičkih i sabirnih jama kućanstava koje se dovoze specijalnim vozilima i prazne u podzemni spremnik. Spremnik fekalija zapremnine 13,8 m³ smješten je podzemno i prekriven

armiranobetonskim poklopcem u cilju sprečavanja širenja neugodnih mirisa. Otpadna voda iz spremnika pumpanjem se odvodi na proces pročišćavanja koji započinje na finom situ gdje se miješa s ulaznom otpadnom vodom.

Vidljivo je da se mehaničko pročišćavanje otpadne vode na UPOV-u Siffiano suštinski ne razlikuje od onoga na UPOV-u Delnice ali je linija vode postavljena drugačije i potpuno gravitacijski čime su izbjegnuta pumpanja kompletne količine otpadne vode. Također, tehnologija izdvajanja pijeska i masti koja se koristi klasična je s otvorenim bazenom čime se stvara ušteda prije svega na potrošnji električne energije u odnosu na kompaktnu jedinicu za mehaničku predobradu instaliranu u Delnicama. Kao i u svakom drugom sustavu gdje se vrši mehanička obrada otpadnih voda pa tako i u ovom, potrebno je konstantno održavanje, čišćenje i kontrola što se odražava na operativnim troškovima rada (*Tablica 8.*).

Tablica 8: Operativni troškovi mehaničkog pročišćavanja UPOV-a Siffiano (izradio autor)

Trošak	EUR/god.
Energenti	3.253,00
Upravljanje procesom	2.184,00
Održavanje i ostalo	7.877,00
Ukupno	13.314,00

5.3. Biološko pročišćavanje

Biološko pročišćavanje drugi je stupanj pročišćavanja komunalnih otpadnih voda koje u najvećem dijelu svog sastava sadrže organske biorazgradive tvari. Temelji se na aktivnosti mikroorganizama koji u aerobnim i anaerobnim uvjetima razgrađuju organsku i hranjivu tvar u otpadnoj vodi. Kemijskim procesima koji se u pravilu događaju u reaktorima drugim stupnjem pročišćavanja BPK₅ ulazne otpadne vode nakon procesa smanjuje se za oko 70 – 90%, dok je udio KPK izlazne vode manji za oko 75% u odnosu na ulaznu otpadnu vodu. U daljnjem tekstu izvršiti će se presjek biološkog pročišćavanja sukladno uspostavljenim tehnologijama za svaki UPOV zasebno s osvrtom na tehnološke karakteristike, troškove upravljanja, održavanja i energije te efekte pročišćavanja.

5.3.1. UPOV Delnice

Nakon mehaničkog predtretmana otpadna voda se zajedno s filtratom spiralne prese iz strojne dehidracije mulja, vodom iz „mokrog“ scrubbera za obradu plinova prilikom dehidracije mulja vapnom, vodom iz filtrirajućeg bubnja prese, te u incidentnim situacijama prelievnom vodom iz silosa mulja, sakuplja u crpnoj stanici ispred SBR reaktora (Slika 16.).



Slika 16. Crpna stanica ispred SBR reaktora (vlastita fotografija)

Crpna stanica opremljena je dvama crpnim agregatima $Q = 45$ l/s koji rade u naizmjeničnom radu puneći reaktore u automatiziranom radu ovisno o procesu obrade u kojem se svaki od dva reaktora trenutno nalazi, a što je regulirano elektromotornim zasunima instaliranim na dolaznoj cijevi iznad SBR reaktora (Prongrad biro, 2015.).

Dimenzije SBR reaktora (Tablica 9.) dobivene su dimenzioniranjem za proces s aktivnim muljem s istovremenom aerobnom stabilizacijom mulja i povremenom denitrifikacijom sukladno njemačkim normama ATV-DVWK-A 131 – Dimensioning of Single-Stage Activated Sludge Plants (May, 2000.) i DWA-M 210 – Belebunganlagen mit

Aufstaubetrieb (SBR) (Juli, 2009.). Optimalnim u radu kao i investicijska ušteda pokazala se izgradnja dva SBR reaktora.

Tablica 9: Dimenzije SBR reaktora (izradio autor)

Duljina	20,55 m
Širina	14,00 m
Maksimalna razina vode	6,00 m
Volumen jednog bazena	1.726,00 m ³
Ukupni volumen bazena	3.452,00 m ³

Zbog veće organske opterećenosti ulazne otpadne vode ($BPK_5 = 566,81 \text{ mg/l}$), ali i potrebne obrade sadržaja septičkih i crnih jama kod kojih je zbog medija koji je dugo vremena proveo u anaerobnim uvjetima mnogo sporija razgradnja organske tvari ($BPK_5 = 1.000,00 - 20.000,00 \text{ mg/l}$), u dva SBR reaktora (Slika 17.) odabran je ciklus obrade vode u trajanju od 8 sati, a prema slijedećim fazama (Prongrad biro, 2015.):

- faza reakcije6 sati,
 - aerobna faza (nitrifikacija),
 - aerobna faza (denitrifikacija),
- faza taloženja1 sat,
- faza dekantiranja1 sat,
 - dekantiranje,
 - izdvajanje viška mulja.

Upravljanje ciklusima je automatizirano putem PLC-a (*eng. Programmable Logic Controller*), a kontrolu i eventualne promjene voditelj UPOV-a može izvršiti u SCADA-i (*eng. Supervisory Control And Data Acquisition*). Radi lakše kontrole i upravljanja procesom u reaktorima je ugrađena mjerno – regulacijska oprema:

- hidrostatska sonda za mjerenje nivoa vode u bazenima,
- sonda za mjerenje mutnoće (suspendirane tvari),
- procesni senzor za mjerenje količine otopljenog kisika i
- REDOX sonda za kontrolu nitrifikacije i denitrifikacije.



Slika 17. SBR reaktori (vlastita fotografija)

Puhala za dovod zraka u SBR reaktore smještena su u prizemlju pogonsko – upravne zgrade, a instalirana su ukupno tri puhala pri čemu je za svaki reaktor predviđeno po jedno puhalo, dok je treće pričuvno za oba reaktora. Dodavanje zraka u bazene izvedeno je putem uronjenih aeratora – mješača koji su se prilikom povećanog opterećenja na uređaju pokazali kao vrlo fleksibilno rješenje (Prongrad biro, 2015.).

Da bi se u četvrtoj fazi izvršilo ispuštanje pročišćene otpadne vode u recipijent svaki SBR reaktor opremljen je „plivajućim“ dekanterom koji ovisno o količini otpadne vode u bazenima klize po vodilicama. U fazi ispuštanja pročišćene vode na dekanteru se otvaraju preljevni zazori, a da bi se onemogućilo ispuštanje eventualnog plivajućeg mulja potopljeni preljev na dekanteru onemogućava istjecanje gornjih 20 cm površinske vode.

Na dnu bazena vrši se taloženje mulja, a tijekom faze dekantiranja višak mulja ovisno o njegovoj koncentraciji izdvaja se crpljenjem iz bazena u spremnik viška mulja iz kojega će na daljnu obradu.

Kontrola ispravnosti ispuštene vode vrši se putem automatskog uzorkivača (Slika 18.) za uzimanje uzoraka pročišćene vode instaliranog u sklopu Khafagi – Venturi mjernog kanala kojim se bilježi količina pročišćene vode prije ispuštanja u recipijent.



Slika 18. Automatski uzorkivač i Khafagi – Venturi mjerni kanal (vlastita fotografija)

Biološko pročišćavanje otpadne vode najzahtjevnija je i najkompleksnija faza pročišćavanja u sklopu SBR tehnologije. Iako se radi o uspostavljenom i automatiziranom procesu potrebna je svakodnevna kontrola i upravljanje te se jedino na taj način mogu optimizirati troškovi energije, a redovnim održavanjem spriječiti znatniji troškovi popravaka i zamjene opreme što se tada pozitivno odražava na ukupne operative troškove biološkog pročišćavanja otpadne vode koji su najveća stavka u cijelom sustavu UPOV-a Delnice (*Tablica 10.*).

Tablica 10: Operativni troškovi biološkog pročišćavanja UPOV-a Delnice (izradio autor)

Trošak	EUR/god.
Energenti	20.260,00
Upravljanje procesom	11.083,00
Održavanje i ostalo	8.923,00
Ukupno	40.266,00

5.3.2. UPOV Siffiano

Jedinica za biološko pročišćavanje sastoji se od podzemnog otvorenog bazena denitrifikacije (DEN zona) te biološkog bazena s aktivnim muljem i zatvorenih bazena za membranske jedinice (MBR bazen), bazena za privremeno skladištenje i povrat od odvodnjavanja mulja, okna za plutajući mulj i strojarnice. Optimalne dimenzije jedinice za biološko pročišćavanje (*Tablica 11.*) dobivene su proračunom za maksimalno hidrauličko opterećenje $Q = 13,3 \text{ l/s}$ u normalnom radu i $Q = 18 \text{ l/s}$ kratkotrajno.

Tablica 11: Dimenzije jedinice za biološko pročišćavanje (izradio autor)

Duljina	21,70 m
Širina	13,00 m
Dubina bazena	5,50 m
Dubina vode	4,07 – 4,55 m

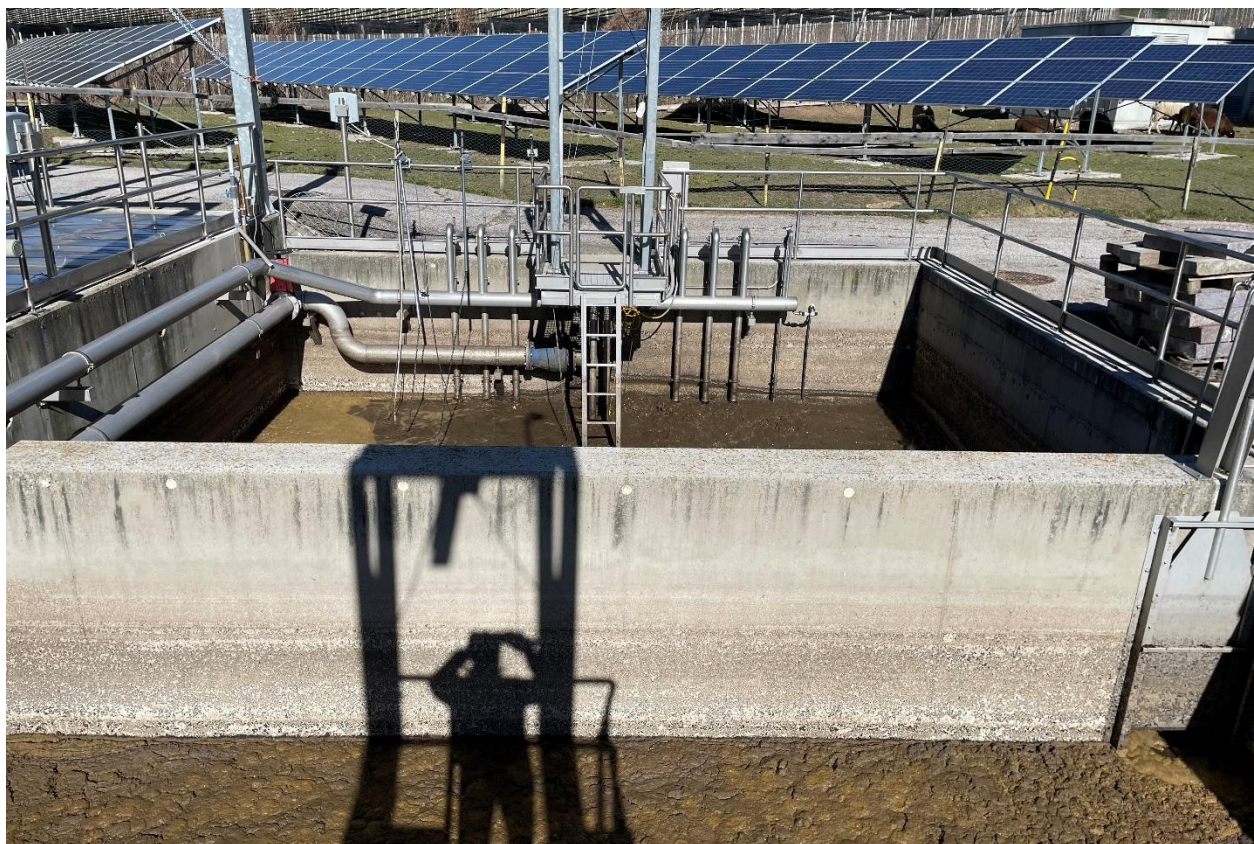
Proces biološkog pročišćavanja započinje u bazenu za denitrifikaciju u koji se dovodi otpadna voda nakon mehaničkog pročišćavanja, recirkulacija iz MBR bazena, nadmuljna voda iz spremnika mulja i višak vode nakon dehidracije mulja.



Slika 19. Bazen denitrifikacije (vlastita fotografija)

Svrha denitrifikacije je redukcija nitrata proizvedenih u procesu oksidacije – nitrifikacije. DEN zona je anoksična zona, a sastoji se od jednog bazena zapremnine 150,12 m³ u kojem je instaliran mješač s ugrađenim pogonskim motorom za održavanje potpune suspenzije i miješanje sadržaja bazena. Količina nitratnog dušika koju treba denitrificirati osigurava se odgovarajućom recirkulacijom mješavine vode i mulja iz aerirane zone. Temeljem prosječne dnevne količine otpadne vode u biološkom procesu proračunato je deset ciklusa recirkulacije, a razlikuje se u zimskom i ljetnom periodu radi temperature vode što utječe na odvijanje kemijskih procesa (H & T PlanungsBüro, 2006.).

Nakon faze denitrifikacije otpadna voda se gravitacijski odvodi u nitrifikacijsku zonu koja se sastoji od dviju linija aeriranih bazena (Slika 20.) zapremnine 2 × 177,05 m³.



Slika 20. Bazeni nitrifikacije (vlastita fotografija)

Faza nitrifikacije dimenzionirana je pod istim radnim uvjetima kao i denitrifikacija. Za oksidaciju organske tvari i amonijevog nitrata u procesu je potrebno održavati najmanje 2 mg O₂/l što se osigurava putem potopljenih aeratora. U svakom od aeracijskih bazena ugrađeno je petnaest ploča aeratora koje osiguravaju finu aeraciju. Dovod potrebnog

zraka osigurava se putem puhala smještenih u jednom od prostora upravne zgrade, a dovodi se do bazena cjevovodom DN 200 mm. Kapacitet puhalo određen je proračunom u najnepovoljnijim uvjetima, odnosno ljeti kada su temperature više, a topivost kisika niža uz pretpostavku da je u bazenu koncentracija aktivnog mulja 15 g/l. Optimalna koncentracija aktivnog mulja u procesu pročišćavanja MBR tehnologijom iznosi 10 g/l temeljem čega je dimenzioniran volumen kompletne biološke jedinice.

Dio III. stupnja pročišćavanja otpadne vode je kemijsko uklanjanje fosfata koje se također vrši u aeracijskom bazenu izravnim dodavanjem otopine željeznog klorida (FeCl_3). Uklanjanje se vrši procesom taloženja na način da se izdvaja u fazi uklanjanja viška mulja iz MBR bazena.

Upravljanje je automatizirano, a za potrebe kontrole i upravljanja ugrađena je slijedeća mjerno – regulacijska oprema:

- optički senzor za on-line mjerenje sadržaja otopljenog kisika,
- dvostruki senzor za mjerenje NH_4/NO_3 , regulaciju i kontrolu stupnja nitrifikacije,
- sonda za mjerenje koncentracije mulja.

Završnu fazu biološkog procesa čini srž MBR tehnologije – mikrofiltracijske membrane koje predstavljaju fizičku barijeru između suspendirane tvari i pročišćene vode. Negativan tlak koji se stvara membrana omogućava usisavanje pročišćene vode preko površine membranske ploče i ispuštanje u izlazni kolektor, a zadržavanje aktivnog mulja i čestica manjih od 0,4 μm na površini. Instalirane pločaste membrane zahvaljujući vrlo malim veličinama pora jamče drenažu vode bez plutajuće tvari i/ili bakterija. Kontinuirani protok zraka, koji se u vodu upuhuje preko odgovarajućih aeratora stvara grubu aeraciju ispod membrana čime se ostvaruje potrebna turbulencija kako bi površina membrane bila čista od naslaga.

Takav način odvajanja pročišćene vode dozvoljava stvaranje visoke koncentracije biomase u bioreaktoru i visoku starost mulja čime se on dodatno stabilizira, te nije potrebna naknadna faza stabilizacije (H & T PlanungsBüro, 2006.).

Temeljem zadanih hidrauličkih parametara određena je dimenzija MBR bazena (Slika 21.) i ukupna potrebna površina membrana.



Slika 21. MBR bazeni (vlastita fotografija)

Obzirom da se UPOV Siffiano nalazi u planinskom predjelu gdje prevladava kontinentalna klima pri čemu nisu izuzetak temperature ispod ništice tijekom zimskih mjeseci, bazeni za membranske jedinice, odnosno cjevovodi, ventili i ostala ugrađena oprema zaštićeni su od smrzavanja mobilnim poklopcima s hidrauličnim podizačima za potrebe održavanja.

Proračunom, za prosječni dnevni dotok otpadne vode od $540 \text{ m}^3/\text{d}$ dobivena je ukupna potrebna površina filtera (membrana) od 1.920 m^2 . Temeljem potrebne površine za mikrofiltraciju ugrađeno je ukupno osam modula tipa Kubota EK300 (240 m^2 svaki) odnosno za svaku nitrifikacijsku liniju ugrađena su po četiri modula u dvije razine čime su određene potrebne dimenzije MBR bazena (*Tablica 12.*).

Tablica 12: Dimenzije MBR bazena (izradio autor)

Duljina	5,80 m
Širina	4,00 m
Korisna dubina bazena	4,55 m
Volumen bazena	105,56 m ³
Volumen oba bazena	211,12 m ³

Navedeni moduli (Slika 22.) opremljeni su s dva paketa pločastih membrana (Slika 23.) postavljenih iznad aeratora usidrenih na dno spremnika. Hidraulički dizajn mikrofiltracijske sekcije pogoduje je maksimalnoj fleksibilnosti te je moguće odvojiti jedan ili više modula od linije za obradu bez potrebe za prekidom ekstrakcije permeata. Također, moguće je izvaditi jedan ili više modula kada je spremnik pun, bez snižavanja razine u spremniku za mikrofiltraciju. Modul je ugrađen u profile od nehrđajućeg čelika sa sustavom ventilacije i kolektorima za ekstrakciju permeata (LADURNER S.r.l., 2010.).



Slika 22. Modul Kubota EK300
(LADURNER S.r.l., 2010.)



Slika 23. Pločasta membrana
(vlastita fotografija)

Odabrana opcija dvaju zasebnih bazena za uronjene membrane pogodna je i radi lakšeg održavanja, a MBR jedinice ne mogu se hidraulički preopteretiti (oštetiti) jer je maksimalni volumen ograničen snagom usisnih crpki.

Permeat se ekstrahira pomoću dvije volumetrijske rotacijske pumpe, svaka za jedan red modula, koje se nalaze u strojarnici smještenoj u podzemni dio jedinice za biološko pročišćavanje otpadne vode (Slika 24.). Za slučaj interventnog održavanja predviđena je i rezervna pumpa kako ne bi došlo do prekida u procesu pročišćavanja. Također, zahvaljujući sustavu pneumatskih ventila ove pumpe imaju mogućnost promjene smjera vrtnje čime je moguće istisnuti zrak koji se stvara u cjevovodu za ekstrakciju permeata.



Slika 24. Strojarnica jedinice za biološko pročišćavanje otpadne vode (vlastita fotografija)

Mjerači tlaka nalaze se na kolektorima permeata i služe za konstantnu detekciju transmembranskog tlaka donjeg i gornjeg reda membrana. Kako bi se eliminirao bilo kakav preferirani put distribucije zraka, kompresori linije za mikrofiltraciju odvojeni su od

kompresora linije nitrifikacije, a predviđena su ukupno tri kompresora, dva radna te jedan rezervni (LADURNER S.r.l., 2010.).

Za potrebe održavanja membrana potrebno je kemijsko pranje modula koje se vrši poluautomatski na način da se nakon aktiviranja ventila za kemijsko pranje pripremi odgovarajuća otopina NaCl (natrijevog hipoklorita) i promjenom smjera usisnih pumpi izvrši slanje u module. Za redovno održavanje potrebna su dva pranja godišnje.

Nakon završenog procesa mikrofiltracije pročišćena voda odvodi se u okno za uzorkovanje i dalje u jezero čiste vode, dok se višak mulja iz MBR bazena izvlači specijalnim suho montažnim pumpama i šalje u spremnik viška mulja odakle odlazi na daljnju obradu što je idući korak i ove tehnologije.

Vidljivo je da je kao i kod SBR tehnologije biološko pročišćavanje izuzetno zahtjevan i složen proces pročišćavanja i kod MBR tehnologije. Potrebno je osposobljeno osoblje te stalno praćenje i kontrola procesa što se naročito odnosi na membranske sustave. Tako je primjerice potrebna stalna optička kontrola procesa radi utvrđivanja ispravnosti pojedinih membrana što je vidljivo kada prozirna odvodna cijev postane siva. Također, mutnoća se prati i on-line pomoću mjerača mutnoće. Uz potrošnju električne energije, kemikalija i ostalih režijskih troškova, rutinsko i redovno održavanje svakako se odražava na ukupne operativne troškove biološke faze pročišćavanja (*Tablica 13.*).

Tablica 13: Operativni troškovi biološkog pročišćavanja UPOV-a Siffiano (izradio autor)

Trošak	EUR/god.
Energenti	50.746,00
Upravljanje procesom	16.378,00
Održavanje i ostalo	20.155,00
Ukupno	87.279,00

5.4. Obrada viška biološkog mulja

Nusprodukt svake tehnologije pročišćavanja komunalnih otpadnih voda je otpadni mulj. Znamo da svaka stanica ima životni vijek pa se iz tog razloga povećava količina aktivnog, ali i starog mulja koji uklanjamo iz reaktora neovisno o tehnologiji pročišćavanja.

Bez obzira na karakteristike i količinu nastalog mulja koja varira uslijed različitih organskih opterećenja otpadne vode kao i zbog same tehnologije pročišćavanja, otpadni mulj je potrebno adekvatno obraditi i zbrinuti. Prvi cilj obrade mulja je smanjenje njegovog volumena što se postiže uklanjanjem što veće količine vode. U konačnici, da bi se otpadni mulj mogao zbrinuti na ekološki, ali i ekonomski prihvatljiv način da ne predstavlja opasnost kako za ljude tako i za okoliš, potrebno ga je stabilizirati, odnosno iz njega ukloniti patogene organizme koji uzrokuju daljnje truljenje i pojavu neugodnih mirisa. Postoji više načina obrade otpadnog mulja, a kako se isto provodi, koje su tehnološke karakteristike te troškovi upravljanja, održavanja i energenata na dva predmetna UPOV-a prikazati će se u daljnjem tekstu.

5.4.1. UPOV Delnice

Višak mulja nakon završenog procesa u SBR reaktorima crpljenjem se izdvaja u spremnik viška mulja zapremnine 65,10 m³ (Slika 25.) koji je dimenzioniran temeljem dnevnog viška mulja, njegovom dnevnom i volumenu po ciklusu te koncentracije suhe tvari u izdvojenom mulju.



Slika 25. Spremnik viška mulja (vlastita fotografija)

Mulj izdvojen u spremnik iz postupka biološke obrade aerobno je stabilan, prije daljnje obrade nije ga potrebno dodatno ugušćivati već samo homogenizirati što se vrši uronjenim mješačem – aeratorom. Takav u potpunosti homogeniziran mulj dovodi se vijčanom crpkom do spiralne prese za strojnu dehidraciju (Slika 26.). Kapacitet spiralne prese je $Q = 7,50 \text{ m}^3/\text{dan}$ što se pokazalo mnogo više od potrebnog jer se na UPOV-u Delnice u prosjeku obradi oko $3,00 \text{ m}^3/\text{dan}$, a maksimalna zabilježena količina je $5,00 \text{ m}^3/\text{dan}$. Otopina polielektrolita iz tekućeg koncentrata koja se koristi u postupku dehidracije dozira se vijčanom crpkom, a za potrebe iznošenja muljnog kolača na daljnju obradu vapnom koristi se spiralni transporter koritastog tipa. Pročišćavanje zraka u objektu dehidracije mulja vrši se putem kemijskog filtera, a otpadni zrak iz kojeg je ranije adsorpcijskim postupkom vodom uklonjen amonijak centrifugalnim ventilatorom odvodi se u atmosferu (Prongrad biro, 2015.).



Slika 26. Spiralna presa u objektu dehidracije mulja (vlastita fotografija)

Završna obrada strojno dehidriranog mulja je stabilizacija mikroniziranim živim vapnom (CaO) u kontaktnom reaktoru (Slika 27.) čime se u potpunosti uništavaju eventualni patogeni organizmi preostali u višku mulja.



Slika 27. Kontaktni reaktor za stabilizaciju mulja (vlastita fotografija)

Stabilizirani mulj pužnim transporterom odlaže se u kontejner za odlaganje mulja koji se nalazi u vanjskom prostoru prilagođenom za pristup vozilom koje ga može dalje transportirati i zbrinjavati. Koncentracija suhe tvari u proizvedenom mulju je od 25% do 30%, a zbrinjavanje otpada vrši za to ovlaštena i specijalizirana tvrtka.

Obrada biološkog viška mulja i njegova krajnja proizvedena masa najviše je uvjetovana radom SBR tehnologije. I u ovoj fazi proces je automatiziran i postavljen prema ulaznim parametrima, ali se kroz eksploataciju pokazalo da se kvalitetnim upravljanjem i praćenjem procesa te iskustvenim promjenama parametara mogu ostvariti bolji rezultati pročišćavanja, pa tako i proizvodnje mulja. Ono što je važno za operativne troškove rada u ovoj fazi je odabir optimalnog koncentrata polielektrolita i količina otopine koja se dozira u procesu (*Tablica 14.*).

Tablica 14: Operativni troškovi obrade viška biološkog mulja UPOV-a Delnice (izradio autor)

Trošak	EUR/god.
Energenti	6.986,00
Upravljanje procesom	2.558,00
Održavanje i ostalo	7.082,00
Ukupno	16.626,00

5.4.2. UPOV Siffiano

Nakon postupka filtracije višak mulja tlačnim cjevovodom odvodi se prema središnjem sustavu obrade mulja u spremnik viška mulja zapremnine 350 m³. Ovaj središnji sustav obrade mulja u Siffianu osmišljen je i dimenzioniran na način da se u njemu dehidrira mulj i sa svih ostalih UPOV-a općine Ritten: Wangen, Oberinn, Oberbozen, Uterinn i Lengstein.

Digestirani i istaloženi mulj i navedenih UPOV-a dovodi se na UPOV Siffiano putem cisterni u tekućem obliku gdje se prazni u sabirni podzemni spremnik zapremnine 25 m³ koji se nalazi ispred objekta dehidracije mulja (Slika 28.). Iz spremnika koji se radi sprečavanja pojave neugodnih mirisa nalazi podzemno, mulj se pumpom odvodi u zajednički spremnik viška mulja. Kod izgradnje UPOV-a Siffiano predviđeno je da se na postrojenju godišnje obradi oko 1.300 m³ mulj s okolnih UPOV-a i 1.500 m³ mulja s UPOV-a Siffiano što ukupno čini 2.800 m³ godišnje iz čega proizlazi oko 450 m³ dehidriranog mulja godišnje (H & T PlanungsBüro, 2006.).



Slika 28. Pogled na upravnu zgradu i objekt dehidracije mulja (vlastita fotografija)

Linija za obradu mulja nalazi se u zatvorenom objektu duljine 6,60 m, širine 7,60 m i visine 4,20 m u kojem je smještena sva potrebna oprema. Mulj se iz spremnika mulja pumpom dovodi na dehidraciju koja se uz doziranje polielektrolita vrši centrifugom (Slika 29.), a linija mulja projektirana je za obradu 100 m³ mulja dnevno s 2 – 5% suhe tvari.



Slika 29. Postrojenje za dehidraciju mulja – centrifuga (vlastita fotografija)

Nakon obrade centrifugom koncentracija suhe tvari u odvodnjenom mulju iznosi od 25 – 30%, a kolač od prešanog mulja odvodi se pumpom visoke gustoće iz podzemnog spremnika na vlastiti prostor kompostane. Na prostoru UPOV-a predviđen je i alternativni prostor za smještaj kontejnera suhog mulja (H & T PlanungsBüro, 2006.).

Dnevna količina dehidriranog mulja iznosi oko 20 m³ sa 79 m³ muljne vode dnevno koja se cjevovodom odvodi u bazen jedinice za biološku obradu. Također, muljna voda koja se sakupi u spremniku mulja odvodi se na biološku obradu putem pumpe podesive visine koja se nalazi u spremniku.

Obrada viška biološkog mulja uvelike ovisi o starosti mulja i sadržaju suhe tvari nakon biološke obrade. Samim procesom i tehnologijom pročišćavanja kako u MBR tako i u SBR tehnologiji postiže se određena koncentracija suhe tvari prije postupka dehidracije što uvelike utječe na operativne troškove. Tehnološki proces na UPOV-u Siffiano kako je već spomenuto rezultira s oko 2 – 5% suhe tvari što je mnogo više od oko 0,4% na UPOV-u Delnice. Tehnologija dehidracije mulja je različita na ova dva UPOV-a ali u oba slučaja daje dobre rezultate ali u slučaju UPOV-a Siffiano uz zahtjevnije održavanje i veću potrošnju energije. Kod samih operativnih troškova obrade mulja na UPOV-u Siffiano (*Tablica 15.*) potrebno je uzeti u obzir i količinu mulja dopremljenu s okolnih UPOV-a te se radi kvalitetnije usporedbe ista neće uzimati u obzir.

Tablica 15: Operativni troškovi obrade viška biološkog mulja UPOV-a Siffiano (izradio autor)

Trošak	EUR/god.
Energenti	11.060,00
Upravljanje procesom	3.276,00
Održavanje i ostalo	14.993,00
Ukupno	29.329,00

5.5. Rezultati rada razmatranih UPOV-a

Sagledavajući rad obje tehnologije kroz funkcionalne cjeline vidljivo je da ovi UPOV-i uz kvalitetno vođenje i upravljanje dobro funkcioniraju. Da bi se u potpunosti opravdao njihov rad i rezultati potrebno je sagledati i krajnji efekt pročišćavanja što je vidljivo kroz analize efluenta i mulja nakon procesa pročišćavanja. Bez obzira što je UPOV Siffiano III. stupnja, radi optimalne usporedbe sagledavati će se parametri II. stupnja pročišćavanja, a koji su vezani odnosno određeni važećom zakonskom regulativom.

5.5.1. UPOV Delnice

Nakon završetka rekonstrukcije 2017. godine UPOV Delnice kontinuirano radi, a temeljem vodopravne dozvole potrebno je vršiti kontrolu influenta i efluenta. Uzorkovanje se vrši četiri puta godišnje iz kompozitnog uzorka u pravilnim vremenskim razmacima od strane ovlaštenog laboratorija.

Dozvoljeni parametri pročišćavanja otpadnih voda u Republici Hrvatskoj definirani su *Pravilnikom o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda* (NN 26/20) gdje je sukladno Odluci o određivanju osjetljivih područja (NN 81/10) naselje Delnice unutar vodnog područja rijeke Dunav koje je u cijelosti sliv osjetljivog područja. Temeljem članka 7. stavka 13. za aglomeracije u navedenom području s opterećenjem od 2.000 ES do 10.000 ES komunalne otpadne vode pročišćavaju se prije ispuštanja u recipijent II. stupnjem pročišćavanja pri čemu su određeni zahtijevani izlazni parametri (*Tablica 16.*).

Tablica 16: Zahtijevani izlazni parametri II. stupnja pročišćavanja otpadnih voda sukladno Pravilniku o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda, NN 26/20 (izradio autor)

Parametar	Maksimalno dopuštena koncentracija	Minimalno smanjenje ulaznog opterećenja
Ukupne suspendirane tvari (ST)	35 mg/l	75%
Biokemijska potrošnja kisika BPK ₅	25 mg/l	70%
Kemijska potrošnja kisika KPK	125 mg/l	90%

Uvidom u izvršene analize isporučitelja vodne usluge vidljivo je da od početka rada UPOV-a Delnice nije bilo odstupanja od maksimalno dopuštenih koncentracija. Kako na UPOV-u postoji stanica za prihvat sadržaja septičkih i sabirnih jama iz provedenih analiza vidljivo je da se tijekom ljetnih mjeseci kada je dovoz tog sadržaja intenzivniji višestruko povećava ulazno organsko opterećenje. Unatoč povećanom organskom opterećenju svi parametri izlazne otpadne vode su niži od maksimalno dopuštene koncentracije. Obzirom da se kao referentna uzima 2022. godina, temeljem četiri provedene analize izračunate su prosječne vrijednosti za tu referentnu godinu (*Tablica 17.*).

Tablica 17: Rezultati provedenih analiza za UPOV Delnice u 2022. godini (izradio autor)

Parametar [mg/l]	03/2022		06/2022		09/2022		12/2022		%
	ulaz	izlaz	ulaz	izlaz	ulaz	izlaz	ulaz	izlaz	
ST	281	9,2	1086	2	399	4,1	81	7,9	96,44
BPK ₅	460	7	4800	5	750	4	150	5	98,63
KPK	746	36	7424	30	1195	30	336	30	95,83

5.5.2. UPOV Siffiano

Pokrajinskim zakonom od 18. lipnja 2002. godine, br. 8 „Pravilnik o vodi“, člankom 33. stavak a) propisuje se da do 2005. godine svi UPOV-i jednakog ili većeg kapaciteta od 2.000 ES moraju biti podvrgnuti sekundarnom stupnju pročišćavanja koji omogućuje usklađenost s graničnim vrijednostima emisija iz Dodatka A istog zakona. Granične vrijednosti navedene u Prilogu A odgovaraju strožim propisima koji su uspostavljeni za osjetljiva područja, a kako je autonomna pokrajina Bolzano sve vodene površine stavila pod zaštitu sukladno navedenom zakonu, primjenjuju se granične vrijednosti za ispuštanje u osjetljiva područja uključujući ukupni dušik i fosfor. Dodatkom A navedenog zakona određene su dopuštene koncentracije za osjetljiva područja (*Tablica 18.*).

Tablica 18: Zahtijevani izlazni parametri za osjetljiva područja sukladno Pokrajinskim zakonu od 18. lipnja 2002. godine, br. 8 „Pravilnik o vodi“, Dodatak A (izradio autor)

Parametar	Maksimalno dopuštena koncentracija	Minimalno smanjenje ulaznog opterećenja
Ukupne suspendirane tvari (ST)	35 mg/l	90%; ulaz > 350 mg/l
Biokemijska potrošnja kisika BPK ₅	25 mg/l	90%; ulaz > 300 mg/l
Kemijska potrošnja kisika KPK	100 mg/l	80%; ulaz > 500 mg/l
Ukupni fosfor	2 mg/l	80%; ulaz > 10 mg/l
Ukupni dušik	15 mg/l	70%; ulaz > 50 mg/l
Amonijev dušik (NH ₄ -N)	8 mg/l za T 12°C 12 mg/l za T 10°C	

UPOV Siffiano pušten je u rad 2009. godine od kada se i provode analize influenta i efluenta, a sukladno regulativi prate se parametri za osjetljiva područja odnosno III. stupnja pročišćavanja otpadnih voda, pa će se ti podaci i prikazati ali će se za potrebe analize rada oba UPOV-a kao relevantni uzimati samo podaci II. stupnja pročišćavanja. Važno je napomenuti da zbog uspostavljenog III. stupnja pročišćavanja MBR tehnologijom ne postoji obaveza praćenja ukupne suspendirane tvari, pa će se kao izlazni parametar uzimati količina < 1 mg/l koja je bila predviđena projektom. Kako je već ranije navedeno, i na UPOV-u Siffiano postoji stanica za prihvrat sadržaja septičkih i sabirnih

jama čime se povećava ulazno organsko opterećenje ali jednolikim doziranjem u sustav biološkog pročišćavanja izbjegnuta pojava tzv. pikova, a svi parametri izlazne otpadne vode za referentnu 2022. godinu niži su od maksimalno dopuštene koncentracije (*Tablica 19.*).

Tablica 19: Rezultati provedenih analiza za UPOV Siffiano u 2022. godini (izradio autor)

Parametar	ulaz	izlaz	Smanjenje [%]
Ukupne suspendirane tvari (ST)	30 – 170	< 1,0	99,80
Biokemijska potrošnja kisika BPK ₅	386	2,7	99,30
Kemijska potrošnja kisika KPK	687	19,8	97,12
Ukupni fosfor	7,14	0,66	90,76
Ukupni dušik	62,8	15,4	75,48
Amonijev dušik (NH ₄ -N)	49,6	3,46	93,02

5.6. Ocjena tehnologija pročišćavanja i usporedba

Temeljem podataka navedenih u prethodnim poglavljima izvršiti će se analiza sukladno ranije zadanim kriterijima kako bi se dobila kvalitetna usporedba rada predmetnih UPOV-a sa SBR i MBR tehnologijom. Analiza svakog od zadanih parametara izvršiti će se opisno temeljem ranije iskazanog načina rada samih tehnologija, određenih specifičnosti te zahtjevnosti u vođenju procesa, a ocjena će se prikazati tablično.

5.6.1. Trošak investicije

Kao prvi parametar izvršiti će se analiza troškova investicije odnosno izgradnje pojedinog UPOV-a. Radi usporedbe vrijednosti ovdje je potrebno napomenuti da su UPOV-i građeni i pušteni u rad u vremenskom razmaku od 8 godina, Siffiano 2009., a Delnice 2017. godine. Ako se u obzir uzme razlika u periodu ugovaranja od 2006. do 2014. stopa inflacije u Italiji iznosila je oko 13% ali jednako tako postoji i realna razlika u standardu, a prema tome i vrijednosti roba i usluga, između Italije i Hrvatske pa možemo reći da su vrijednosti investicije realno usporedive.

Za rekonstrukciju UPOV-a Delnice i uspostavu SBR tehnologije pročišćavanja otpadnih voda investicijski trošak za sve potrebne radove u cilju postizanja pune

funkcionalnosti iznosio je 2.073.627,31 eura bez PDV-a, dok je za izgradnju UPOV-a Siffiano s MBR tehnologijom bilo potrebno investirati 2.428.623,38 eura bez PDV-a.

Broj bodova za vrijednost investicije u postupku ove analize za UPOV Delnice dobiva se iz ranije definirane formule koja iznosi:

$$C_I = 2.073.627,31 / 2.073.627,31 \cdot 50 = 50,00$$

dok za UPOV Siffiano istim izračunom dobivamo:

$$C_I = 2.073.627,31 / 2.428.623,38 \cdot 50 = 42,69.$$

Pema vrijednostima svake pojedine investicije kao i broju ostvarenih bodova u parametru troškova investicije (*Tablica 20.*) možemo zaključiti da je uspostava MBR tehnologije na primjeru UPOV-a Siffiano i bez uzimanja u obzir elemenata III. stupnja pročišćavanja očekivano skuplja od uspostave SBR tehnologije u Delnicama što ipak možemo pripisati novijoj tehnologiji koja je na tržištu zastupljena u manjem postotku. Razmatrajući pak današnje trendove u djelatnosti odvodnje i pročišćavanja otpadnih voda možemo sigurno reći da se ova dva UPOV-a izgrade danas, da bi razlika u trošku investicije zasigurno bila manja iako i dalje u korist SBR tehnologije.

Tablica 20: Prikaz bodovanja za parametar troškova investicije (izradio autor)

Tehnologija	Trošak investicije (EUR)	Broj bodova (0 – 50)
SBR (UPOV Delnice)	2.073.627,31	50
MBR (UPOV Siffiano)	2.428.623,38	42,69

5.6.2. Operativni trošak

Kod operativnih troškova rada UPOV-a, a što je vidljivo i u ranijim poglavljima ovoga rada kod opisa rada pojedinih segmenata procesa pročišćavanja, u obzir se uzimaju režijski troškovi, troškovi redovnog održavanja te trošak upravljanja i vođenja procesa odnosno potrebne radne snage. Kao referentna godina za analizu i usporedbu uzeti će se 2022., a prema podacima dobivenih od upravitelja operativni troškovi za UPOV Delnice iznose 79.868,00 eura dok je za pogon i održavanje UPOV-a Siffiano u 2022. godini utrošeno 129.992,00 eura.

Kod analize troškova rada UPOV-a Siffiano izuzeli su se troškovi koji se odnose na III. stupanj pročišćavanja kao i troškovi obrade mulja dovezenog s drugih UPOV-a. Kako bi se troškovi prikazali realno, za trošak električne energije što je daleko najveći pogonski trošak uzela se jedinstvena cijena kilovat sata (kWh), odnosno cijena koja je važeća u Republici Hrvatskoj. Također, kod izračuna troškova osoblja na UPOV-u Siffiano isti su se umanjili zbog realne razlike u visini osobnih primanja dviju država. Kod ostalih razmatranih troškova ne postoji velika razlika u cijenama između dviju država, pa se eventualna razlika u izračunu smatra zanemarivom.

Kao i kod investicijskih, operativni troškovi za UPOV Delnice boduju se sukladno ranije definiranoj formuli, pa tako za UPOV Delnice izračunavamo:

$$C_o = 79.868,00/79.868,00 \cdot 50 = 50,00$$

a za UPOV Siffiano prema istoj formuli dobijemo:

$$C_o = 79.868,00/129.992,00 \cdot 50 = 30,72.$$

Iz dobivenih vrijednosti (*Tablica 21.*) vidljivo je da su operativni troškovi rada UPOV-a Siffiano osjetno viši od troškova rada UPOV-a Delnice. Najosjetnija razlika je u potrošnji električne energije koja je gotovo pa duplo veća te najviše izražena kod biološkog procesa u MBR tehnologiji što je već ranije spomenuto. Upravo iz razloga velike potrošnje električne energije na lokaciji UPOV-a Siffiano izgrađena je solarna elektrana čime je analizirajući dobivene podatke za 2022. godinu vlastita proizvodnja iznosila 30% ukupne potrošnje električne energije što na nešto manje od 400.000,00 kWh godišnje nije nimalo zanemariva vrijednost. Ova investicija u solarnu elektranu svakako je hvalevrijedna, a ista će se također u svrhu smanjenja režijskih troškova uskoro dogoditi i na lokaciji UPOV-a Delnice. Unatoč navedenoj uštedi nepobitna je činjenica da upravo MBR tehnologija troši znatno veću količinu električne energije u odnosu na SBR tehnologiju.

Tablica 21: Prikaz bodovanja za parametar operativnih troškova (izradio autor)

Tehnologija	Operativni trošak (EUR/god)	Broj bodova (0 – 50)
SBR (UPOV Delnice)	79.868,00	50
MBR (UPOV Siffiano)	129.992,00	30,72

Razmatrajući i analizirajući rad kako UPOV-a u Delnicama tako i u Siffianu, a najviše u komunikaciji s upraviteljima do izražaja su došle i neke moguće uštede na operativnim troškovima koje su se mogle ostvariti drugačijim postavom tehnološkog procesa i opreme. Primjerice, u slučaju delničkog UPOV-a jedinica mehaničkog predtretmana potroši oko 20% ukupne potrebne električne energije za rad UPOV-a dok je u Siffianu taj udio samo 2%. Činjenica je da je kvalitetna mehanička obrada otpadne vode nužna kod SBR tehnologije, ali se u svrhu uštede na operativnim troškovima možda moglo primijeniti rješenje iz Siffiana. Slično je primjenjivo i kod obrade mulja, ali s obzirom da se vrši usporedba dvaju konkretnih primjera izgrađenih UPOV-a ti aspekti se analiziraju kod složenosti i kontrole procesa.

5.6.3. Prostorna komponenta

Sama prostorna komponenta najbolje je opisana u početnom dijelu gdje su navedene neke ključne karakteristike oba UPOV-a, pa će se u ovoj analizi iste u kratko rezimirati i sumirati ranije navedeno uzimajući u obzir površinu izgrađenosti, volumen i površinu objekata te komunikacije.

Same čestice na kojima su izgrađeni UPOV-i podjednake su veličine i iskorištene sukladno potrebama svoje namjene. Svi objekti UPOV-a Siffiano ukupno gledajući zauzimaju veću površinu prvenstveno radi bazena čiste vode i kišnog bazena koji su neophodni obzirom na postavljeni tehnološki proces i potrebu za korištenjem pročišćene vode u poljoprivredi što je pak rezultat trećeg stupnja pročišćavanja. Oba UPOV-a izgrađena su ranijih godina te se prilikom rekonstrukcije i primjene predmetnih tehnologija lokacije nisu mijenjale. Glede lokacije u Siffianu su se razmatrala i alternativna rješenja, ali se ipak zadržala ova lokacija na udaljenosti od cca 250 m od naselja, koja se prema svim analizama pokazala i ekonomična i vizualno prihvatljiva. U Delnicama nije postojala alternativna lokacija te je UPOV ostao na istoj lokaciji, na rubu naselja ali svega 50 m od stambenih objekata. Obzirom da je tema rada usporedba tehnologija ovi lokacijski faktori neće se uzimati u analizu, već sama prostorna komponenta za koju možemo reći da je podjednako dobro iskorištena na oba UPOV-a kako je već navedeno sukladno traženoj namjeni.

Kod razmatranja volumena, odnosno površina objekata do izražaja dolazi razlika u biološkom procesu između primijenjene SBR i MBR tehnologije što je u biti i suština procesa dok kod mehaničkog dijela i obrade mulja ne postoje znatnije razlike. Mehanički predtretman je u Delnicama tehnološki zahtjevniji, ali površina i volumen objekata bilo otvorenih ili zatvorenih su podjednaki. Potreban prostor za obrada mulja također je podjednak na oba objekta gdje je tehnološki proces smješten u zatvorene objekte.

Ono što u ovome dijelu predstavlja razliku kod dviju tehnologija je upravo potrebna površina i volumen objekata za biološku obradu otpadnih voda. Uzmemo li podatak da kod SBR tehnologije u Delnicama ukupan potreban volumen SBR reaktora u kojima se odvija sav proces iznosi 3.452 m^3 u odnosu na $807,74 \text{ m}^3$ u Siffianu koji uključuje sve jedinice i faze biološke obrade bez strojaricom dolazimo do jednostavnog zaključka da je za MBR tehnologiju potreban znatno manji prostor i volumen bazena za obradu otpadne vode. Ova komponenta je svakako prednost MBR tehnologije uspostavljene u Siffianu, ali i općenito u odnosu na SBR tehnologiju, pa iz tog razloga to utječe i na ocjenu u ovoj analizi.

Same komunikacije i raspored objekata u većem dijelu nisu toliko rezultat uspostavljenih tehnologija koliko cjelokupnog procesa i građevinskog aspekta. Raspored objekata i komunikacije zadovoljavaju zadane potrebe za funkcionalnošću postrojenja u redovnom radu i prilikom zahvata na održavanju opreme i servisa. Ono što se može izdvojiti je ponovo u slučaju SBR bazena složeniji proces kod pristupa dizanju i servisu opreme u bazenima (aeratori i dekanteri) u odnosu na jednostavniji kod MBR postrojenja.

Sve ranije navedeno rezultira (*Tablica 22.*) podatkom da je u ovom parametru MBR tehnologija na UPOV-u Siffiano kao i općenito zahtjeva i manji prostor i manji volumen.

Tablica 22: Prikaz bodovanja za parametar prostorne komponente (izradio autor)

Kriterij	SBR (Delnice)	MBR (Siffiano)
Površina izgrađenosti (0 – 10)	10	10
Potreban volumen/površina objekata (0 – 20)	10	20
Komunikacije i raspored objekata (0 – 20)	18	20
Ukupno (0 – 50)	38	50

5.6.4. Složenost kontrole i procesa

Analiza složenosti kontrole i procesa obuhvaća samu srž procesa pročišćavanja i odnosa dviju razmatranih tehnologija. Obrada otpadnih voda na UPOV-ima zahtjevan je proces pri čemu i SBR i MBR tehnologija imaju određene specifičnosti i zahtjeve koje je potrebno sagledavati tijekom rada te po potrebi mijenjati i prilagođavati ovisno o promjenama ulaznih parametara. Upravo iz tih razloga ovaj tehnološki dio procesa pročišćavanja na kraju donosi zadovoljavajući i željeni rezultat, pa ga je u analizi potrebno vrednovati u većem postotku u odnosu na ostale parametre.

Mehaničko pročišćavanje prvi je stupanj pročišćavanja otpadnih voda i kao takav neizbježan element kod obje ovdje zastupljene tehnologije. Odabir prije svega opreme nužne za mehaničko pročišćavanje ovisi dobrim dijelom o preferencijama investitora, ali može se reći i slobodi koja je dana projektantima tijekom izrade rješenja. Iz opisa rada ovih dvaju UPOV-a može se iščitati kako svaki posjeduje gotovo jednake elemente obrade, u potpunosti ispunjava svoju zadanu funkciju, ali dobrim dijelom putem drugačijih tehničkih rješenja. Najveća razlika vidljiva je u fazi izdvajanja pijeska i masnoća gdje je u Delnicama isto zajedno s finim sitom smješteno u jedinicu mehaničkog predtretmana dok je u Siffianu izdvojeno pri čemu je pjeskolov i mastolov zasebna građevina. Rezultat odabrane tehnologije je povećana potrošnja energije, te zahtjevnije održavanje u Delnicama, pa je u ovome dijelu jednostavnost u procesu na strani UPOV-a Siffiano.

Varijacije ulaznog hidrauličkog opterećenja neizbježan su faktor svakog sustava s razdjelnim sustavom odvodnje, a upravo iz ovih primjera može se zaključiti kako se svi upravitelji sustavom bore s istim problemima koji kada se ne riješe u sustavu potrebno ih je rješavati na zadnjoj točki odnosno na UPOV-ima. U ova dva slučaja obzirom da se radi o različitim tehnologijama, problem se i rješava na različite načine. Na UPOV-u Delnice u startu su predimenzionirani SBR bazeni u svrhu prihvata kišnog dotoka. Povećano hidrauličko opterećenje negativno utječe na biološke procese u bazenima na što voditelj UPOV-a mora intervenirati u smislu ubrzanja procesa. Ovaj postupak rezultira zadovoljavajućim izlaznim parametrima, ali svakako zahtjeva stručnu osposobljenost i znanje voditelja pročišćavanja te se smatra kako bi izgradnja retencijskog bazena bila povoljnije rješenje za proces. Međutim, radi same lokacije isto nije bilo moguće. Na

primjeru Siffiana i MBR tehnologije taj problem riješen je međuspremnikom (kišnim bazenom) koji je u mogućnosti privremeno zaprimiti veću količinu dotoka koju je zatim u redovnim uvjetima rada potrebno prepumpati u sustav biološkog pročišćavanja otpadne vode što pak rezultira povećanjem troška električne energije. Također voditelj UPOV-a može u fazi većeg dotoka povećati tlak na membranama i time povećati njihov kapacitet što opet rezultira povećanim troškovima i zahtjeva stručno osoblje. Može se zaključiti da se ovaj neizbježan problem kod obje tehnologije može adekvatno riješiti uz već navedene postupke, ali je potrebno napomenuti da uspostavljen biološki proces kod MBR tehnologije ipak bolje podnosi varijacije ulaznog hidrauličkog opterećenja.

Dnevne varijacije ulaznog organskog opterećenja te doziranje sadržaja septičkih i sabirnih jama koji je višestruko organski opterećen uvelike utječu na proces biološkog pročišćavanja. SBR i MBR tehnologije su tzv. jednovolumenske tehnologije gdje se biološki procesi odvijaju u jednom spremniku (bazenu), pa se varijacije organskog opterećenja moraju i rješavati u tom volumenu. Kod MBR tehnologije fleksibilnost u varijacijama postignuta je zbog uobičajeno za tu tehnologiju veće starosti i veće mase mulja gdje njegova koncentracija iznosi oko 10 g/l. SBR tehnologija u svom biološkom procesu nije toliko fleksibilna na povećanje organskog opterećenja jer ima mlađi mulj i manju koncentraciju (oko 4 g/l), pa se problem mora rješavati radom u promjeni volumena biološkog reaktora.

Pojedini aspekti vođenja procesa pročišćavanja često su navođeni tijekom opisa rada oba UPOV-a, a ono što se u načelu može iščitati jest da obje tehnologije zahtijevaju stalno praćenje i kontrolu procesa. SBR tehnologija ciklički je proces koji se provodi u jednom volumenu koji je kako je ranije navedeno kod promjena opterećenja moguće prilagođavati i mijenjati. Bitno je održavati fizikalno – kemijske karakteristike aktivnog mulja kako bi izlazni rezultati bili zadovoljavajući, a kako bi se isto postiglo potrebna je redovita kontrola od strane stručne osobe. Kod MBR tehnologije sam biološki postupak nije složeniji u odnosu na SBR tehnologiju, a kod varijacija uzlaznog opterećenja čak i jednostavniji za vođenje biokemijskih procesa. Ono na što je potrebno obratiti najveću pažnju kod MBR tehnologije je funkcionalnost, održavanje i zaštita membrana što iziskuje kontinuirano praćenje procesa te stručno i osposobljeno osoblje za rad s kemikalijama.

Eventualna nepažnja prilikom vođenja procesa može za posljedicu imati oštećenje membrana i time prouzročiti veće financijske izdatke, pa se upravo iz tog razloga SBR tehnologiji daje prednost u vođenju procesa.

Automatiziranost rada prisutna je kod obje tehnologije, te se sve redovne faze i procese može nadzirati i njima upravljati putem SCADA sustava kojim su opremljena i ova dva UPOV-a.

Do pojave plivajućeg mulja dolazi uslijed poremećaja u biokemijskim procesima, a kod SBR tehnologije može rezultirati povećanom koncentracijom suspendirane tvari u efluentu dok u MBR tehnologiji plivajući mulj nema nikakav utjecaj na izlaznu otpadnu vodu obzirom da membrane predstavljaju fizičku barijeru za mulj. Pravilnim odabirom dekantera kod SBR tehnologije može se većim dijelom spriječiti pojava mulja u efluentu.

Produkcija viška mulja izravni je rezultat biološke obrade otpadnih voda kod obje tehnologije. Sagledavajući proces kod oba UPOV-a može se vidjeti da je produkcija mulja približno jednaka, odnosno da i SBR i MBR tehnologija u svom tehnološkom procesu potpuno ispunjavaju traženu svrhu i produciraju viška mulja. Stoga se može zaključiti da produkcija viška mulja ne ovisi o tehnologiji već o opterećenju UPOV-a.

Bez obzira na različitu tehnologiju dehidracija mulja na oba UPOV-a daje dobre rezultate, a nakon tehnološke obrade koncentracija suhe tvari je zadovoljavajuća, prosječno 25 – 30% suhe tvari. Veći troškovi obrade mulja u Delnicama zbog manje koncentracije suhe tvari jesu rezultat primijenjene SBR tehnologije, ali je krajnji rezultat jednak te ne postoje značajne razlike u složenosti kontrole i procesa u postupku dehidracije mulja.

Neugodni mirisi uvijek se vežu uz djelatnost odvodnje i pročišćavanja otpadnih voda te su se razvojem tehnologija isti nastojali svesti na najmanju moguću mjeru. Na primjerima naročito UPOV-a Delnice, ali i UPOV-a Siffiano gdje su postrojenja smještena na rubnim dijelovima naselja može se zaključiti da kod SBR i MBR tehnologije pojave neugodnih mirisa u biološkom procesu nema. Razlog leži u već ranije spomenutim tzv. jednovolumenskim tehnologijama gdje tehnološki procesi ne dozvoljavaju pojavu neugodnih mirisa uslijed anaerobnih procesa.

Niti jedan UPOV bez obzira na instaliranu tehnologiju ne može zadržati svoju funkcionalnost bez redovnog održavanja, pa jednako tako niti jedna tehnologija nije otporna na manjak održavanja. Dobar pokazatelj redovnog održavanja su uz kvalitetno vođenje predmetni UPOV-i koji već duži niz godina rade i daju zadovoljavajuće rezultate. U slučaju ugrađene zadovoljavajuće opreme SBR tehnologija ne zahtjeva opsežnije i zahtjevnije radove održavanja uz ono redovito. Kod MBR tehnologije, a potvrđeno je i od strane voditelja UPOV-a Siffiano, potrebno je dodatno održavanje membrana, pri čemu se iste dva puta godišnje moraju ispirati otopinom natrijeva hipoklorita, a jednom godišnje moduli se vade iz spremnika, peru i podvrgavaju vizualnom pregledu što je pak zahtjevniji postupak u odnosu na SBR tehnologiju.

Analizom ovog parametra vidljivo je da su obje tehnologije visokoučinkovite i zadovoljavaju svoju namjenu. Ipak krajnji rezultat (*Tablica 23.*) daje prednost MBR tehnologiji bez obzira na nedvojbeno zahtjevnije vođenje procesa i održavanje.

Tablica 23: Prikaz bodovanja za parametar složenosti kontrole i procesa (izradio autor)

Kriterij	SBR (Delnice)	MBR (Siffiano)
Mehanički predtretman (0 – 5)	4	5
Osjetljivost na varijacije ulaznog hidrauličkog opterećenja (0 – 5)	3	4
Osjetljivost na varijacije ulaznog organskog opterećenja (0 – 5)	4	5
Jednostavnost vođenja procesa (0 – 5)	4	3
Automatiziranost rada (0 – 5)	5	5
Utjecaj plivajućeg mulja (0 – 5)	4	5
Produkcija viška mulja (0 – 5)	5	5
Dehidracija mulja (0 – 5)	5	5
Pojava neugodnih mirisa (0 – 5)	5	5
Opseg radova održavanja (0 – 5)	5	4
Ukupno (0 – 50)	44	46

5.6.5. Efekt pročišćavanja otpadne vode

Dobar efekt pročišćavanja otpadne vode postiže se pravilno uspostavljenim tehnološkim procesom bilo da se radi o SBR ili MBR tehnologiji. Ovisno o instaliranoj tehnologiji i opremi stručna osoba zadužena za vođenje procesa upravlja radom UPOV-a. Iz svega ranije navedenog može se iščitati da svaka od tehnologija ima svoje specifičnosti i zahtjeva konstantno praćenje procesa pročišćavanja, te redovno održavanje kako opreme tako i sustava u cijelosti. Upravo na primjeru ova dva UPOV-a vidljivo je da uz ispravno vođenje procesa i SBR i MBR tehnologija mogu zadovoljiti zakonom propisane parametre pročišćavanja.

Sve dostupne analize efluenta za referentnu 2022. godinu pokazale su kod oba UPOV-a izlazne parametre koji zadovoljavaju II. stupanj pročišćavanja, odnosno III. stupanj u slučaju Siffiana. Iz analiza ali i samog rada UPOV-a Siffiano vidljivo je da su rezultati svih zahtijevanih parametara za nijansu bolji od onih u Delnicama što se prije svega može pripisati instaliranoj MBR tehnologiji, pa je i ocjena efekta pročišćavanja sukladna tome (*Tablica 24.*). Ono što se kod krajnjeg efekta pročišćavanja može okarakterizirati kao prednost MBR tehnologije u odnosu na SBR je koncentracija suspendirane tvari u efluentu koja je nakon prolaska kroz membrane gotovo zanemariva. Također, bolji parametri kemijske potrošnje kisika i biokemijske potrošnje kisika postižu se većom koncentracijom mulja u jedinici za biološko pročišćavanje otpadne vode, a koja omogućuje veći efekt razgradnje organske tvari u zadanoj jedinici vremena.

Tablica 24: Prikaz bodovanja za parametar efekta pročišćavanja (izradio autor)

Kriterij	SBR (Delnice)	MBR (Siffiano)
Kvaliteta efluenta (0 – 35)	35	35
Postotak pročišćavanja suspendirane tvari (0 – 5)	4	5
Postotak pročišćavanja KPK (0 – 5)	4	5
Postotak pročišćavanja BPK ₅ (0 – 5)	4	5
Ukupno (0 – 50)	47	50

5.6.6. Izračun konačne ocjene usporedbe tehnologija

Kako bi se izvršila završna analiza i usporedba SBR i MBR tehnologije na primjeru rada UPOV-a Delnice i UPOV-a Siffiano potrebno je rezimirati sve razmatrane parametre sukladno unaprijed određenim kriterijima i udjelima pojedinog parametra u konačnoj ocjeni (*Tablica 25.*).

Tablica 25: Izračun konačne ocjene usporedbe tehnologija (izradio autor)

Parametar	Koeficijent parametra	Bodovi SBR (Delnice)	Bodovi MBR (Siffiano)	Ocjena SBR (Delnice)	Ocjena MBR (Siffiano)
Trošak investicije	0,10	50	42,69	5	4,27
Operativni trošak	0,10	50	30,72	5	3,07
Prostorna komponenta	0,05	38	50	1,9	2,5
Složenost kontrole i procesa	0,6	44	46	26,4	27,6
Efekt pročišćavanja	0,15	47	50	7,05	7,5
Ukupno	1	229	216,58	45,35	44,94

Ocjenjivanje je provedeno sukladno uvriježenim kriterijima usporedbe tehnologija zastupljenih u sustavu pročišćavanja otpadnih voda pri čemu se radilo sa konkretnim i egzaktnim podacima upravitelja sustava prikupljenih osobnim obilaskom, te sustavnim razmatranjem rada obje tehnologije. Iz prikazanog se može zaključiti da je ocjena rada SBR tehnologije na UPOV-u Delnice odnosno MBR tehnologije na UPOV-u Siffiano u biti podjednaka. Jasno je vidljivo da svaka od navedenih tehnologija posjeduje određene prednosti, ali i specifičnosti te zahtjeva sustavno i redovno održavanje. Ako razmatramo sam tehnološki proces u cijelosti i rezultat pročišćavanja otpadne vode MBR tehnologija u konačnici ima svojevrsnu prednost, ali je ista uvjetovana većim investicijskim troškovima, većom potrošnjom električne energije i zahtjevnijim održavanjem od SBR tehnologije, pa se zaključuje da prednost nema niti jedna tehnologija u odnosu na drugu.

6. PRIMJER USPOREDBE TEHNOLOGIJA PROVEDEN U SAD-U

Usporedba rada SBR i MBR tehnologije istražena je na primjeru UPOV-a La Center (Slika 30.) u istoimenom gradu savezne države Washington u SAD-u.



Slika 30. Pogled na UPOV La Center, Washington, SAD (The MBR site)

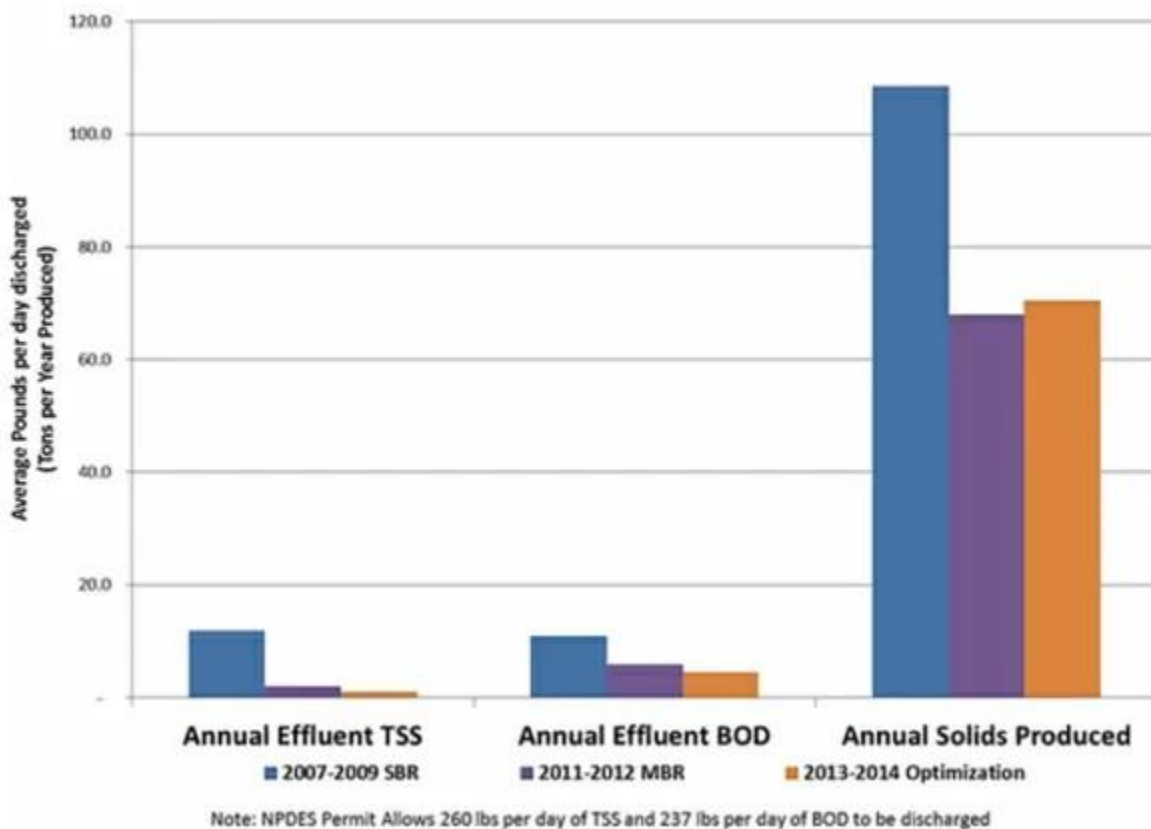
La Center mali je gradić s populacijom od 3.100 stanovnika, a prvotni UPOV s konvencionalnom tehnologijom s aktivnim muljem izgrađen je 1967. godine. U narednim godinama isti je više puta nadograđivan da bi se rekonstrukcijom 2004. godine uspostavila SBR tehnologija, a 2011. godine započelo se procesom uvođenja MBR tehnologije. Proces pročišćavanja vršio se u četiri SBR reaktora, a nakon uspostavljanja MBR tehnologije s obzirom na količinu i opterećenje otpadne vode dovoljna su dva, dok dva predstavljaju rezervu u slučaju povećanja influenta.

Upravo je zamjena ovih dviju tehnologija omogućila usporedbu rada i operativnih troškova SBR i MBR tehnologije prvenstveno iz razloga što su raspolagali troškovima rada obiju tehnologija u određenom vremenskom razdoblju sa vrlo sličnim količinama i opterećenjima otpadne vode. U razdoblju od 2007. do 2014. (Slika 31.) raspolagalo se podacima o godišnjem protoku (*eng. annual flow*), količini suspendirane tvari (*eng. TSS*),

godišnjem organskom opterećenju (*eng. BOD*) i količini viška mulja (*eng. solids*). Upravitelj je također na zahtjev vlasnika kasnije krenuo u optimalizaciju radi smanjenja operativnih troškova pročišćavanja. Investicijske troškove na ovom primjeru nije bilo optimalno uspoređivati.

Podaci koji su se provedenom usporedbom mogli iščitati pokazali su da je prelazak sa SBR na MBR tehnologiju rezultirao boljom kvalitetom efluenta u slijedećim parametrima (The MBR site):

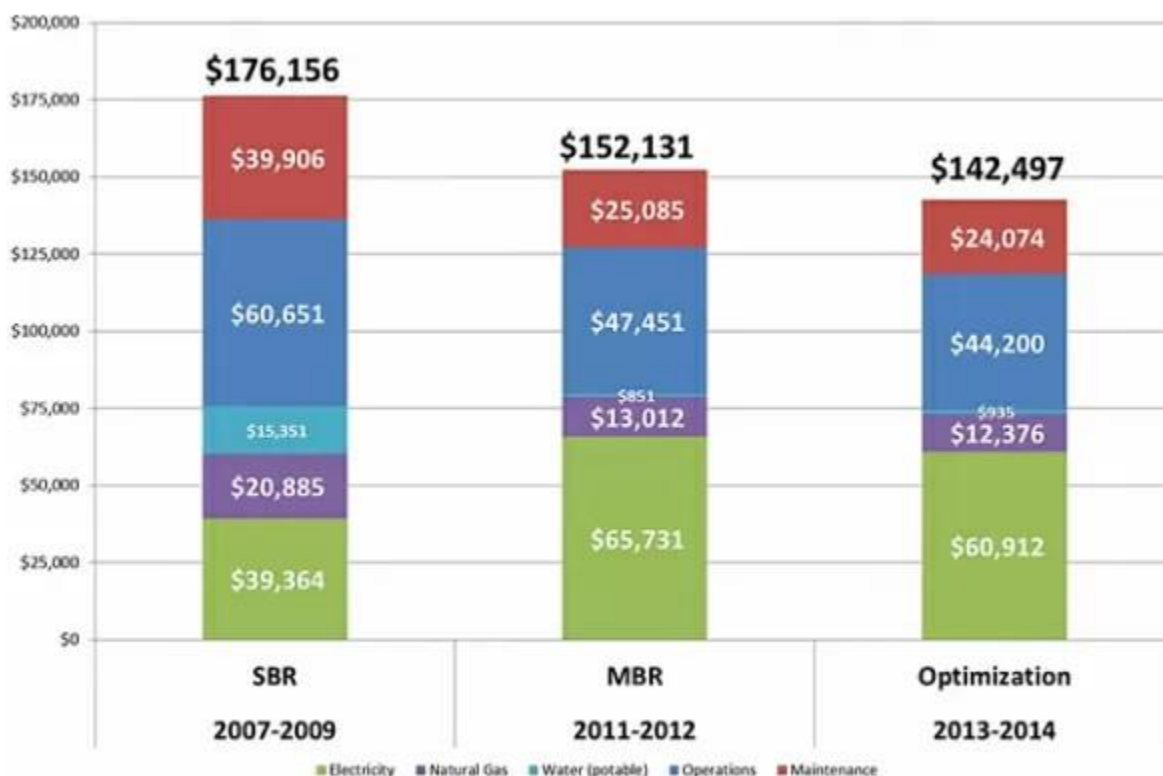
- suspendirana tvar: smanjenje za 92%,
- organsko opterećenje BPK₅: smanjenje za 57%,
- višak mulja: smanjenje za 32%.



Slika 31. Prikaz izlaznih parametara na UPOV-u La Center (The MBR site)

Navedeni podaci pokazuju da je unatoč većoj energetskej potražnji MBR tehnologije u odnosu na SBR došlo do smanjenja operativnih troškova za 13% što se u obrazloženju

prpisuje prije svega smanjenju uporabe polimera i energenata potrebnih za obradu viška mulja, a iz razloga smanjenja ukupnih količina. Također, ušteda je ostvarena zbog edukacije osoblja za potrebe održavanja pri čemu su se manje ugovarale te usluge s vanjskim suradnicima, a ostvarila se i mogućnost korištenja tehnološke vode nakon procesa pročišćavanja (Slika 32.).



Slika 32. Usporedba operativnih troškova na UPOV-u La Center (The MBR site)

Iz svega navedenog može se zaključiti da MBR tehnologija troškovima rada ipak može parirati SBR tehnologiji (The MBR site). Činjenica je da troškovi električne energije kod MBR tehnologije čine preko 40% svih operativnih troškova, ali se isto može nadoknaditi smanjenjem preostalih troškova i optimalizacijom rada i upravljanja. Potrebno je nadodati kako je ovo kvalitetna usporedba temeljena na stvarnim izlaznim podacima koji su rezultat ulaganja i optimalizacije rada u cilju smanjenja troškova. Možemo zaključiti da bi se ovakvom tendencijom optimalizacije troškova i kod rada SBR tehnologijom ostvarile određene uštede čime bi troškovi rada ovih dviju tehnologija vjerojatno bili podjednaki.

7. ZAKLJUČAK

Pročišćavanje otpadnih voda složen je proces, a odabir optimalne tehnologije prvi je korak ka ostvarenju tog cilja. Odabrana tehnologija već u fazi projektiranja uvjetovati će postavu cjelokupnog tehnološkog procesa kojim će se jamčiti ostvarivanje potrebnih izlaznih parametara, a najbolji pokazatelj koliko je isto uspješno je rad UPOV-a. Upravo ovim diplomskim radom prikazan je konkretan rad dva UPOV-a, Delnice i Siffiano sa SBR, odnosno MBR tehnologijom biološke obrade te njihova međusobna usporedba.

Nedvojbeno je da se radi o tehnologijama koje su se kroz duži niz godina razvijale, usavršavale te implementirale u mnoga postrojenja, a uz konvencionalnu najzastupljenije su tehnologije u procesu pročišćavanja otpadnih voda. Svaka od tehnologija bez obzira na različite pristupe i tehnološka rješenja apsolutno zadovoljava traženu svrhu, pa je vjerojatno suvišno istraživati ili ukazivati na svojevrsne nedostatke pojedinog procesa, a pri tome zadržati realnu dozu objektivnosti. Ono što se smatra ostvarenim, a bio je i cilj ovog diplomskog rada je upravo realan prikaz primjene tih dviju tehnologija u praksi potkrepljeno konkretnim i stvarnim podacima.

Da bi se željena usporedba izvršila sistemski kroz sve segmente rada postrojenja bilo je neophodno razraditi sustav kriterija i ocjenjivanja za što je polazište bilo upravo ono što se jednim dijelom željelo postići, a to je teza potkrepljuje li se konkretnim primjerom iz prakse teorija postavljena kod varijantnih rješenja odabira optimalne tehnologije. Objektivnan odgovor je, većinom ne. Kriteriji kojima se izvršila analiza na konkretnim primjerima istovjetni su onima u postupku ocjenjivanja varijantnih rješenja, a rezultati su većim dijelom različiti od dokumenata koji su bili dostupni u ovom istraživanju. Potrebno je napomenuti da je svaki UPOV različit i njegov rad u mnogome ovisi o upravitelju i stručnom osoblju. Međutim, same tehnologije kada su uspješno implementirane dovoljno su egzaktna u svojim postavkama i rezultatima, a samim time i usporediva kod jednakih veličina kao što je primjer Delnica i Siffiana.

Kada je cilj nekog tehnološkog sustava postići krajnji rezultat koji nam je konkretno određen zakonskom regulativom onda je potrebno prije svega voditi se kvalitetnim tehnološkim rješenjima koja će doprinijeti ostvarivanju tog cilja sagledavajući naravno i

financijske mogućnosti. Danas kada se investicije u odvodnju i pročišćavanje otpadnih voda baziraju na financiranju bilo iz EU ili sličnih fondova, pri čemu je za povoljno sufinanciranje najvažnija dobra priprema i prijava dokumentacije, trošak investicije manji je čimbenik u odabiru tehnologije. U istom tom sustavu operativni troškovi nisu zanemariva stavka ali zna se da se isti pokrivaju iz pružanja usluge te djelatnosti što naravno ne znači i ne može biti razlog nerealnih želja, a to ovdje nije ni slučaj. Upravo iz navedenih razloga smatra se da najveću „težinu“ u analizi i ocjeni rada UPOV-a ima upravo tehnologija procesa pročišćavanja otpadne vode.

Kroz središnji dio rada prikazan je i opisan proces pročišćavanja na oba UPOV-a u tri osnovna segmenta, mehanički predtretman, biološko pročišćavanje i obrada viška mulja. Za svaki od navedenih segmenta prikazani su elementi i rezultati rada te realni od upravitelja dobiveni troškovi. Vidljivo je da se UPOV-i osim osnovne razlike tehnologija biološke obrade dijelom razlikuju i u mehaničkom pročišćavanju otpadne vode i obradi mulja. Instalirana rješenja su različita, jedna zahtjevnija za upravljanje i vođenje procesa, druga pak rezultiraju višim operativnim troškovima, ali u konačnici sva rezultiraju i više no zadovoljavajućim izlaznim parametrima. Upravo su izlazni parametri, odnosno krajnji efekt pročišćavanja otpadne vode još jedan važan segment u analizi i ocjeni rada. Konkretno, analize izlazne vode UPOV-a Siffiano koje se odnose na II. stupanj pročišćavanja pokazuju nešto veće postotke pročišćavanja ali rezultati UPOV-a Delnice također pokazuju vrijednosti koje su daleko niže od minimalno dozvoljenih koncentracija. Razlozi takvih rezultata rada UPOV-a Siffiano sigurno se nalaze u MBR tehnologiji gdje je primjerice uz redovno održavanje membrana u efluentu praktički nemoguće pronaći koncentraciju suspendirane tvari veću od 1 mg/l. Možda je upravo to ključna razlika u upravljanju procesom u odnosu na SBR tehnologiju gdje je velika odgovornost na znanju i sposobnosti voditelja pročišćavanja otpadne vode da organsko opterećenje i suspendiranu tvar u izlaznoj vodi zadrži u dozvoljenim koncentracijama. SBR tehnologija taj zahtjevniji dio „kompenzira“ manjim operativnim troškovima, jer membranska tehnologija zahtjeva konstantnu brigu i održavanje membrana, a potrošnja električne energije pokazala se i na ovom primjeru duplo većom u odnosu na SBR. Upravo na temelju tih u oba slučaja pojedinih boljih i manje boljih parametara može se zaključiti da

su i SBR i MBR tehnologija jednakovrijedne, odnosno da ne bi bilo realno dati prednost jednoj u odnosu na drugu.

Već ranije zaključilo se da obje tehnologije zadovoljavaju sve tražene parametre na UPOV-ima na kojima su integrirane u proces pročišćavanja otpadne vode. Kada bi sada u teoriji zanemarili nužnost III. stupnja u Siffianu zbog osjetljivosti područja i potrebe za korištenjem pročišćene vode u poljoprivredi, bilo bi zanimljivo sagledati bi li se na UPOV-ima mogle zamijeniti tehnologije i da li bi tada rezultat pročišćavanja otpadne vode bio zadovoljavajući ili pak bolji u nekoj varijanti.

Kada bi SBR tehnologiju primijenili na UPOV-u Siffiano za biološku jedinicu bio bi potreban mnogo veći prostor što ne bi bio problem, jer je sam prostor dovoljno velik čak i uz zadržavanje egalizacijskog bazena. Sama rješenja mehaničkog predtretmana i obrade viška mulja mogla bi ostati ista. Sukladno važećoj zakonskoj regulativi za II. stupanj pročišćavanja u Italiji koja je što se tiče zahtijevanih parametara gotovo jednaka Hrvatskoj, SBR tehnologija po uzoru na delničku dala bi tražene rezultate uz osjetno smanjenje operativnih troškova rada.

S druge strane i MBR tehnologija iz Siffiana bila bi primjenjiva na UPOV-u Delnice gdje bi vjerojatno najveći zahvat bio u građevinskom smislu zbog neophodne izgradnje egalizacijskog bazena. Prostor u Delnicama jest ograničen i površinom i konfiguracijom, ali uz dodatna prepumpavanja sustav bi se mogao implementirati. U slučaju jednakih tehnoloških rješenja mehaničkog predtretmana i obrade mulja MBR tehnologija na UPOV-u Delnice sigurno bi zadovoljila tražene parametre, ali isto toliko sigurno rezultirala bi nešto većim investicijskim troškom, a svakako mnogo većim operativnim.

Navedeno je ipak samo teorija, a kao i u kompletном diplomskom radu smatra se da je ipak bolje držati se konkretne, mjerljive i dokazive realnosti koja pokazalo se nije loša, dapače vrlo je dobra i takvu ju je potrebno i održati, sustav po potrebi unaprijediti te sačuvati za korištenje na dugi niz godina.

8. LITERATURA I IZVORI

Knjige

Felber, H; Fischer, M., *Priručnik za tehničke voditelje uređaja za pročišćavanje*, 17. izdanje, F.Hirhammer, Zagreb, 2014.

Stephenson, T.; Judd, S., Jefferson, B.; Brindle, K.: *Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment*, IWA Publishing, London, 2000.

Judd, S., *The MBR book of Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment*, First edition, Elsevier, Oxford, 2006.

Judd, S., *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment*, Second edition, Elsevier, Oxford, 2011.

Mijatović, I., Matošić, M.; *Tehnologija vode (interna skripta)*, PBF sveučilišta u Zagrebu, dopunjeno izdanje, Zagreb, 2020.

Tehnička dokumentacija

ECOINA d.o.o., *Idejni projekt izbora optimalne varijante rekonstrukcije UPOV-a Delnice*, ECOINA d.o.o., Zagreb, 2009.

PRONGRAD BIRO d.o.o., *Izmjena i dopuna glavnog projekta Rekonstrukcija uređaja za pročišćavanje otpadnih voda Delnice*, Mapa 1 - 14, Prongrad biro d.o.o., Zagreb, 2015.

H & T Planungsbüro, *Neubau Kläranlage Siffian*, Technischer Bericht mit Besitzerliste A₁, H & T Planungsbüro, Bozen, 2006.

H & T Planungsbüro, *Neubau Kläranlage Siffian*, Anlagenbemessung zur Abwasserreinigung A_{1.1}, H & T Planungsbüro, Bozen, 2006.

LADURNER S.r.l., *IDA Siffiano*, LADURNER S.r.l., Bolzano, 2010.

Propisi

Pravilnik o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda, Narodne novine, 2020, 26.

Landesgesetz vom 18. Juni 2002, Nr. 8, Bestimmungen über die Gewässer

Internetski izvori

AZU voda, <https://www.azuvoda.hr/category/sekundarni-tretman/sekvencijalni-sarzni-reaktor-sbr/>, pristup 02.05.2023.

Mrkonja, L.: *Usporedba fizikalno – kemijskih, naprednih oksidacijskih procesa i bioloških za obradu tekstilnih otpadnih voda*
<https://repositorij.vuka.hr/islandora/object/vuka%3A717/datastream/PDF/view>, pristup 02.05.2023.

AZU voda, <https://www.azuvoda.hr/category/sekundarni-tretman/membranski-bioreaktor-mbr/>, pristup 10.05.2023.

The MBR site, <https://www.thembrsite.com/features/how-much-does-a-membrane-bioreactor-cost-the-relative-cost-of-an-mbr-vs-an-sbr/>, pristup 25.05.2023.

Suedtirol-it, <https://www.suedtirol-it.com/renon/collalbo.html>, pristup 07.08.2023.

Südtirol, <https://www.suedtirol.info/de/de>, pristup 07.08.2023.