

FAKULTETA ZA VARSTVO OKOLJA

DIPLOMSKO DELO

**UČINKOVITOST ČIŠČENJA INDUSTRIJSKE ODPADNE VODE
IZ MLEKARSKE DEJAVNOSTI – ANALIZA PRIMERA
IZBRANEGA PODJETJA**

JANJA PIVK

VELENJE, 2025

FAKULTETA ZA VARSTVO OKOLJA

DIPLOMSKO DELO

**UČINKOVITOST ČIŠČENJA INDUSTRIJSKE ODPADNE VODE
IZ MLEKARSKE DEJAVNOSTI – ANALIZA PRIMERA
IZBRANEGA PODJETJA**

JANJA PIVK

Varstvo okolja in
ekotehnologije

Mentorica: viš. pred. Nataša Uranjek

VELENJE, 2025

Številka: 726-6/2025-1
Datum: 3. 7. 2025

Na podlagi Diplomskega reda izdajam naslednji

SKLEP O DIPLOMSKEM DELU

Študentka Fakultete za varstvo okolja **Janja Pivk** lahko izdela diplomsko delo z naslovom v slovenskem jeziku:

Učinkovitost čiščenja industrijske odpadne vode iz mlekarske dejavnosti - analiza primera izbranega podjetja

Naslov diplomskega dela v angleškem jeziku:

Treatment efficiency of industrial wastewater from dairy production: Case study of a selected company

Mentorica: **viš. pred. Nataša Uranlek**

Diplomsko delo mora biti izdelano v skladu z Diplomskim redom FVO.

Pouk o pravnem sredstvu: zoper ta sklep je dovoljena pritožba na Senat FVO v roku 8 delovnih dni od prejema sklepa.



Prof. dr. Boštjan Pokorny
dekan



Fakulteta za varstvo okolja
Trg mladosti 7 | 3320 Velenje
t: 03 898 64 10 | e: info@fvo.si
www.fvo.si



IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana **Janja Pivk**, z vpisno številko **34220046**, študentka dodiplomskega študijskega programa Varstvo okolja in ekotehnologije, sem avtorica diplomskega dela z naslovom:

Učinkovitost čiščenja industrijske odpadne vode iz mlekarske industrije – analiza primera izbranega podjetja,

ki sem ga izdelala pod mentorstvom viš. pred. Nataše Uranjek, univ. dipl. inž. kem.

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- je predloženo delo moje avtorsko delo, torej rezultat mojega lastnega raziskovalnega dela;
- da oddano delo ni bilo predloženo za pridobitev drugih strokovnih nazivov v Sloveniji ali tujini;
- da so dela in mnenja drugih avtorjev, ki jih uporabljam v predloženem delu, navedena oz. citirana v skladu z navodili FVO;
- da so vsa dela in mnenja drugih avtorjev navedena v seznamu virov, ki je sestavni element predloženega dela in je zapisan v skladu z navodili FVO;
- se zavedam, da je plagiatorstvo kaznivo dejanje;
- se zavedam posledic, ki jih dokazano plagiatorstvo lahko predstavlja za predloženo delo in moj status na FVO;
- je diplomsko delo jezikovno korektno in da je delo lektorirala Melita Cvikel Delopst, prof.;
- da dovoljujem objavo diplomskega dela v elektronski obliki na spletni strani FVO;
- da sta tiskana in elektronska verzija oddanega dela identični.

V Velenju, dne _____

Podpis avtorice: _____

ZAHVALA

Za vso strokovno pomoč, nasvete in vodenje se zahvaljujem mentorici viš. pred. Nataši Uranjek. Hkrati se zahvaljujem doc. dr. Anji Bubik, ki mi je med laboratorijskimi analizami nudila strokovno pomoč.

Hvala Fakulteti za varstvo okolja za vso potrebno opremo za izvajanje eksperimentalnega dela diplomske naloge v njihovem laboratoriju.

Iskreno se zahvaljujem izbranemu podjetju za omogočanje analiziranja njihovih vzorcev in posredovanja vse potrebne dokumentacije.

Predvsem pa hvala Domnu, mami in ostali družini ter prijateljem, da so verjeli vame, me spodbujali in mi stali ob strani do konca pisanja mojega diplomskega dela.

IZVLEČEK

Diplomsko delo obravnava problematiko industrijskih odpadnih vod, s poudarkom na odpadnih vodah iz mlekarske industrije. Mlekarska odpadna voda zaradi visoke vsebnosti organskih snovi (maščob, ogljikovih hidratov, beljakovin ...), dušikovih spojin in drugih onesnaževal predstavlja velik okoljski izziv, zato je učinkovitost čiščenja le-te velikega pomena. V teoretičnem delu so predstavljene lastnosti industrijskih in mlekarskih odpadnih vod, razdeljene na fizikalne, kemijske in biološke parametre ter opis delovanja biološke čistilne naprave z aktivnim blatom in SBR tehnologijo. Predstavljen je zakonodajni okvir na področju varstva vod, ki vključuje *Zakon o varstvu okolja*, *Zakon o vodah* in podzakonske akte, ki določajo mejne vrednosti za posamezne parametre in pogoje za odvajanje industrijskih odpadnih vod.

Tehnologija čiščenja mlekarskih odpadnih vod v izbranem podjetju vključuje mehansko, fizikalno-kemijsko in biološko obdelavo ter dodatno dezinfekcijo z oksidacijo. Podjetje je za postavitev čistilne naprave potrebovalo okoljevarstveno dovoljenje, ki je povzeto v nadaljevanju diplomske naloge. V okoljevarstvenem dovoljenju so predpisane mejne vrednosti parametrov, dodatne omejitve in priporočila, pogoji o obratovalnem monitoringu, naloge odgovorne osebe ... V eksperimentalnem delu sem izvedla laboratorijske analize petih parametrov (pH, električne prevodnosti, KPK, BPK₅ in TN) na dveh merilnih mestih, in sicer po fizikalno-kemijskem čiščenju in na iztoku iz čistilne naprave. Na osnovi rezultatov sem izračunala učinkovitost čiščenja, razmerje med KPK in BPK₅, breme onesnaženja ter primerjavo med izmerjenimi in dimenzioniranimi vrednostmi izbranih parametrov onesnaženja.

Ugotovila sem, da so bile organske snovi, izražene kot parametra KPK in BPK₅, očiščene z več kot 90 odstotno učinkovitostjo, skupni dušik pa 86,7 odstotno učinkovitostjo. Klub temu so bile vrednosti BPK₅ na iztoku nad mejno vrednostjo. Rezultati meritev so bili v primerjavi z dimenzioniranimi vrednostmi na vtoku močno pod načrtovanimi, na iztoku pa je parameter BPK₅ presegal dimenzionirane in mejne vrednosti. Opazila sem, da so bile vrednosti pH na iztoku pod spodnjo mejo predvidenih, vendar vseeno v območju zakonsko določenih iz okoljevarstvenega dovoljenja.

Na podlagi pridobljenih rezultatov lahko zaključimo, da je čistilna naprava podjetja učinkovita in zadošča zakonskim zahtevam, razen pri odstranjevanju biološko razgradljivih snovi. Na tem področju obstajajo možnosti za izboljšave.

Ključne besede: mlekarska industrija, odpadne vode, biološko čiščenje, okoljska zakonodaja, TN, KPK, BPK₅

ABSTRACT

The thesis addresses the issue of industrial wastewater, with a focus on wastewater from the dairy industry. Due to the high content of organic substances (fats, carbohydrates, proteins, etc.), nitrogen compounds, and other pollutants, dairy wastewater poses a significant environmental challenge, making its efficient treatment highly important. The theoretical part presents the characteristics of industrial and dairy wastewater, divided into physical, chemical, and biological parameters, as well as the description of the operation of a biological treatment plant using activated sludge and SBR (Sequencing Batch Reactor) tanks. The final part of the thesis presents the legislative framework in the field of water protection. It includes the Environmental Protection Act, the Water Act, and subordinate regulations that define limit values for individual parameters and the conditions for the discharge of industrial wastewater.

The following section describes the wastewater treatment technology used in the selected company, which includes mechanical, physico-chemical, and biological treatment, as well as additional disinfection by oxidation. In order to operate the treatment plant, the company was required to obtain an environmental permit, the contents of which are summarized in the thesis. The permit defines parameter limit values, additional restrictions and recommendations, operational monitoring requirements, and the responsibilities of designated personnel.

In the experimental part, I carried out laboratory analyses of five parameters (pH, electrical conductivity, COD, BOD₅, and total nitrogen) at two sampling points: after physico-chemical treatment and at the final effluent. Based on the results, I calculated the treatment efficiency, the COD/BOD₅ ratio, the pollution load, and compared the measured values with the designed and legally prescribed limit values.

The results showed that organic substances, expressed as COD and BOD₅, were removed with over 90 % efficiency, while total nitrogen was removed with 86,7 % efficiency. However, BOD₅ concentrations in the effluent exceeded the legal limit. Compared to the design values, the measured values at the inlet were significantly lower than anticipated, while at the outlet, the BOD₅ parameter exceeded both the design and regulatory thresholds. I noticed that the pH values at the outlet were below the lower limit of the anticipated range, but still within the legally prescribed limits from the environmental permit.

Based on the obtained results, it can be concluded that the company's treatment plant is generally effective and meets the regulatory requirements, except in the removal of biodegradable organic matter, where there is room for improvement.

Keywords: dairy industry, wastewater, biological treatment, environmental legislation, TN, COD, BOD₅

KAZALO VSEBINE:

1. UVOD	1
1.1 Namen in cilji	1
1.2 Hipotezi	2
1.3 Metode dela	2
2 TEORETIČNA IZHODIŠČA	4
2.1 Industrijska odpadna vod	4
2.1.1 Lastnosti odpadnih vod	4
2.1.1.1 Fizikalni parametri	4
2.1.1.2 Kemijski parametri	5
2.1.1.3 Biološki parametri	6
2.2 Mlekarska odpadna voda	7
2.2.1 Lastnosti mlekarских odpadnih vod	7
2.2.1.1 Fizikalne lastnosti mlekarских odpadnih vod	7
2.2.1.2 Kemijske lastnosti mlekarских odpadnih vod	8
2.2.1.3 Biološke lastnosti mlekarских odpadnih voda	9
2.3 Biološko čiščenje odpadnih vod z aktivnim blatom	9
2.3.1 Sistem čiščenja z aktivnim blatom	9
2.3.2 Sistem čiščenja s šaržnim reaktorjem (SBR)	10
2.4 Zakonodajni okvir za čiščenje odpadnih vod	11
2.4.1 Evropska okoljska zakonodaja	11
2.4.2 Slovenska okoljska zakonodaja	11
2.4.2.1 Zakon o varstvu okolja	11
2.4.2.2 Zakon o vodah	12
2.4.2.3 Zakon o ohranjanju narave	13
2.4.2.4 Podzakonski akti na področju odvajanja odpadnih voda	13
3 PREGLED DOSEDANJIH RAZISKAV	15
4 MATERIALI IN METODE DELA	16
4.1 Opis čistilne naprave v izbranem podjetju	16
4.1.1 Mehanska stopnja čiščenja odpadnih vod in predakumulacijski bazen	16
4.1.2 Fizikalno-kemijsko čiščenje odpadnih vod	17
4.1.2.1 Egalizacijski bazen	18
4.1.3 Terciarno biološko čiščenje – SBR	19
4.1.4 Obdelava blata	20
4.1.5 Sistem za dodatno obdelavo vode.	21
4.1.5.1 Filtracija	21
4.1.5.2 Oksidacija – dezinfekcija	21
4.2 Okoljevarstveno dovoljenje podjetja	22
4.3 Materiali in metode dela	24
4.3.1 Vzorčenje	24
4.3.2 Merjenje pH	25
4.3.3 Merjenje elektroprevodnosti	26
4.3.4 Določitev celotnega dušika	26
4.3.5 Določitev KPK	27

4.3.6	Določitev BPK ₅	28
5	REZULTATI MERITEV IN RAZPRAVA	30
5.1	Rezultati laboratorijskih meritev in analiz	30
5.2	Učinkovitost čiščenja čistilne naprave	32
5.3	Razmerje med BPK ₅ in KPK	33
5.4	Primerjava med dimenzioniranimi in izmerjenimi vrednostmi	34
5.5	Breme onesnaženja	37
5.6	Možnosti za optimizacijo čistilne naprave	39
6	SKLEP	40
7	POVZETEK	42
8	SUMMARY	44
9	VIRI IN LITERATURA	46

KAZALO SLIK:

Slika 1: Tloris zbiralnikov čistilne naprave (1 – SBR2, 2 – SBR1, 3 – egalizacijski bazen, 4 – zbiralni bazen za ponovno uporabo vode, 5 – bazen za blato, 6 – predakumulacijski bazen, 7 – korito grabelj, 8 – jašek, 9 – rezervoar)	16
Slika 2: Izločitev delcev s siti in predakumulacijski bazen	17
Slika 3: Fizikalno-kemijsko čiščenje (VAMEF)	18
Slika 4: Egalizacijski bazen pred SBR	19
Slika 5: SBR bazena	20
Slika 6: Obdelava blata	20
Slika 7: Sistem za dodatno obdelavo vode	21
Slika 8: Rdeč kvadrat prikazuje vzorčevalno mesto vtoka po fizikalno-kemijski obdelavi, rumen kvadrat pa iztok iz čistilne naprave	24
Slika 9: pH meter	25
Slika 10: Prenosni merilnik elektroprevodnosti	26
Slika 11: Visokotemperaturni termostat	27
Slika 12: Spektrofotometer	28
Slika 13: Inkubacijske steklenice v termostatski omari na magnetnem stojalu	29

KAZALO PREGLEDNIC:

Preglednica 1: Kontaminacijske ravni neobdelane odpadne vode iz mlekar	8
Preglednica 2: Parametri, katere se meri v okviru obratovalnega monitoringa na iztoku in njihove mejne vrednosti	22
Preglednica 3: Tabela za izbor volumna vzorca	29
Preglednica 4: Tabela za določitev števila kapljic inhibitorja NTH 600	29
Preglednica 5: Rezultati laboratorijskih analiz industrijske odpadne vode na vtoku in iztoku iz čistilne naprave	30
Preglednica 6: Dnevni pretoki in povprečni rezultati meritev	31
Preglednica 7: Učinek čiščenja za posamezne parametre	32
Preglednica 8: Razmerje med BPK ₅ in KPK za vtok po fizikalno-kemijskem čiščenju	33

Preglednica 9: Povprečne laboratorijske meritve in dimenzionirane vrednosti za izbrane parametre po fizikalno-kemijskem čiščenju.....	34
Preglednica 10: Povprečne laboratorijske meritve, dimenzionirane vrednosti po terciarni stopnji čiščenja in po iztoku iz čistilne naprave ter mejne vrednosti iz OVD na iztoku.....	35
Preglednica 11: Prikaz bremena onesnaženja za parametre KPK, BPK ₅ in TN na vtoku in iztoku.....	37

KAZALO GRAFOV:

Graf 1: Učinek čiščenja glede na parametre KPK, BPK ₅ in TN	33
Graf 2: Primerjava dimenzioniranih vrednost po fizikalno-kemijskem čiščenju z izmerjenimi vrednostmi.....	34
Graf 3: Primerjava povprečnih laboratorijskih meritev z dimenzioniranimi vrednostmi po terciarni stopnji čiščenja in po iztoku iz čistilne naprave ter z mejnimi vrednostmi na iztoku iz okoljevarstvenega dovoljenja.....	35
Graf 4: Prikaz pH vrednosti iztoka glede na spodnjo in zgornjo mejo okoljevarstvenega dovoljenja in dimenzioniranih vrednosti na iztoku iz čistilne naprave	36
Graf 5: Dnevno odstranjeno breme KPK in BPK ₅ na čistilni napravi	38
Graf 6: Dnevno odstranjeno breme celotnega dušika na čistilni napravi	38

SEZNAM KRATIC:

AOX – adsorbljivi organski halogeni

BPK₅ – biokemijska potreba po kisiku v petih dneh

CIP – sistem za čiščenje in sterilizacijo (clean in place)

EU – Evropska unija

IPPC – celovito preprečevanje in nadzorovanje onesnaževanja okolja

KPK – kemijska potreba po kisiku

OVD – okoljevarstveno dovoljenje

OZN – Organizacija združenih narodov

PE – populacijski ekvivalent

RČN – rastlinska čistilna naprava

TN – celotni dušik

TN_b – celotno vezan dušik

TOC – celotni organski ogljik

UNEP – Program združenih narodov za okolje

ZON – Zakon o ohranjanju narave

ZVO – Zakon o varstvu okolja

SBR – sekvenčni biološki reaktor

1. UVOD

Ljudje se od industrijske revolucije dalje globalno soočamo z vedno večjo problematiko onesnaževanja vod kot temeljnega elementa za obstoj in razvoj vseh živih bitij (Kummu, Guillaumue, idr., 2016). Vedno več je onesnaženih virov vode, zato je ustrezno čiščenje vse bolj pomembno. Zaskrbljujoč je podatek, da je več kot 40 % svetovnih vodnih teles močno onesnaženih, kar je pokazala analiza 75.000 vodnih teles v 89 državah (UNEP, 2021). Zakonodaja za nadzor nad onesnaženjem postaja strožja, kar dodatno spodbuja podjetja k izboljšanju učinkovitosti čistilnih naprav in posledično zmanjševanju vpliva na okolje.

Industrijske odpadne vode so ena od kategorij odpadnih vod, ki nastajajo v industrijskih procesih, kot so čiščenje proizvodne opreme, CIP (clean in place) postopki, pri hlajenju, pri izpiranju cistern za transport, itd. (Drev in Panjan, 2012). Ena od najbolj problematičnih industrijskih odpadnih vod je voda iz mlekarske industrije, saj tako vrsta predelave kot čiščenje proizvodnih linij nista konstantna. Predstavlja velik okoljski izziv, saj vsebuje visoke koncentracije organskih snovi (od 3.000 do 60.000 mg KPK/L), maščob (nad 200 mg/L) in drugih onesnaževal. Najbolj problematični parametri so kemijska potreba po kisiku (v nadaljevanju KPK) in biokemijska potreba po kisiku v petih dneh (v nadaljevanju BPK₅) ter suspendirane trdne snovi, saj ob nepravilnem čiščenju močno obremenjujejo okolje. Najbolj pogost pojav preseženih vrednosti prej omenjenih parametrov je eutrofikacija vodnih površin. Glede na vrsto mlečnih proizvodov, načina čiščenja, obratovanja in ločevanja stranskih produktov se spreminjata količina in sestava odpadne vode. Na vtok čistilne naprave tako priteka voda s spreminjajočo se pH vrednostjo, visoko vsebnostjo organskih snovi in maščob (Levstek idr., 2020). To pomeni, da je za vsako mlekarno izjemno pomembno, da ima ustrezno in učinkovito čistilno napravo, ki zagotavlja zmanjšanje onesnaževal pod predpisane mejne vrednosti. Za učinkovito čiščenje je pogosto potrebno uporabiti kombinacijo mehanskega, fizikalno- kemijskega in biološkega čiščenja (Roš, Zupančič, 2010).

Podjetje, kjer sem izvajala meritve, ima lastno čistilno napravo, ki je sestavljena iz mehanske stopnje čiščenja (odstranijo se delci, večji od 2 mm), fizikalno-kemijske stopnje čiščenja (s pomočjo koagulacije, flokulacije in flotacije se odstranijo suspendirane snovi in maščobe), biološke stopnje čiščenja (z aktivnim blatom v sekvenčnem biološkem reaktorju (v nadaljevanju SBR)), obdelave blata (z dehidracijo zmesi maščob) ter sistema za dodatno obdelavo vode (filtracija in dezinfekcija z ozonom).

1.1 Namen in cilji

Namen diplomskega dela je spoznati lastnosti odpadnih vod, s poudarkom na odpadnih vodah iz mlekarske industrije, seznaniti se z delovanjem njihove biološke čistilne naprave z aktivnim blatom in SBR tehnologijo in pregledati zakonodajo na nacionalni in evropski ravni. Na čistilni napravi v izbranem podjetju bom s pomočjo lastnih vzorcev izvedla analizo izbranih parametrov in iz njih pridobila podatke o učinkovitosti čiščenja, bremenu onesnaženja in primernosti dimenzioniranja objekta.

Cilji diplomskega dela so:

- preučiti lastnosti odpadnih voda in odpadnih voda iz mlekarske industrije,
- preučiti delovanje biološke čistilne naprave z aktivnim blatom in SBR tehnologijo,

- raziskati zakonodajo na področju čiščenja in odvajanja odpadnih vod,
- analizirati tehnološki postopek delovanja čistilne naprave v izbranem podjetju,
- primerjati izmerjene koncentracije vhodnih snovi po fizikalno-kemijskem čiščenju in po iztoku z načrtovanimi vrednostmi,
- izračunati razmerje med BPK₅ in KPK,
- oceniti učinkovitost biološkega čiščenja glede na izmerjene vrednosti na vtoku in iztoku in
- izračunati breme onesnaženja.

1.2 Hipotezi

Pred pričetkom dela sem si postavila dve delovni hipotezi:

H1: Izmerjene vrednosti parametrov KPK, BPK₅ in celotnega dušika po fizikalno-kemijskem čiščenju in po iztoku ne bodo presegale načrtovanih vrednosti.

H2: Za parametre KPK, BPK₅ in celotni dušik bo učinkovitost biološkega čiščenja odpadnih vod vsaj 90 % glede na vhodne vrednosti po fizikalno-kemijskem čiščenju.

1.3 Metode dela

V okviru izvedbe diplomskega dela bom uporabila kombiniran raziskovalni pristop.

Kvantitativni del vključuje merjenje in analizo podatkov o koncentracijah določenih snovi na vtoku in iztoku čistilne naprave, kvalitativni del pa vključuje interpretacijo pridobljenih informacij, predvsem v teoretičnem delu.

Deskriptivno metodo bom uporabila za analizo in povzemanje obstoječe literature o čiščenju industrijske odpadne vode, predvsem iz mlekerske industrije. S pomočjo te metode bom opisala značilnosti onesnaženja, zakonodajne zahteve in pregledala dosedanje raziskave na tem področju.

S kavzalno-eksperimentalno metodo bom analizirala dokumentacijo podjetja (okoljevarstveno dovoljenje, podatke o dimenzioniranju čistilne naprave, obstoječe meritve ipd.) in ugotavljala razmerje med predvidenimi in dejanskimi obremenitvami na čistilno napravo.

V okviru kavzalne-eksperimentalne metode bom v laboratoriju fakultete izvedla analizo vzorcev odpadne vode (vhodne in izhodne koncentracije snovi iz čistilne naprave) za izbrane parametre:

- BPK₅,
- KPK,
- TN (celotni dušik),
- pH in
- prevodnost.

V empiričnemu delu diplomske naloge sem izvedla vzorčenje na dveh merilnih mestih čistilne naprave v izbranem podjetju. Vzorčila sem v egalizacijskem bazenu (po fizikalno-kemijskem čiščenju) in v zbiralnem bazenu za prečiščeno vodo, ki predstavlja iztok čistilne naprave. Na vsakem merilnem mestu sem vzela 4 vzorce in za vsakega naredila 3 paralelke za vsak parameter.

Podatke sem obdelala tako, da sem:

- Izračunala povprečne vrednosti za vsak parameter (aritmetična sredina).
- Izračunala učinkovitost čiščenja (v odstotkih) po posameznih parametrih.
- Primerjala izmerjene vrednosti z dimenzioniranimi podatki iz dokumentacije podjetja in mejnimi vrednostmi okoljske zakonodaje iz Uredbe o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda v vode in javno kanalizacijo (Uradni list RS, št. 64/12, 64/14, 98/15, 44/22 – ZVO-2, 75/22 in 157/22).
- Iz pridobljenih podatkov izračunala breme onesnaženja, torej dejansko dnevno maso onesnaževal na vtoku po fizikalno-kemijskem čiščenju in iztoku.

Podatke sem prikazala v tabelah in grafih ter jih interpretirala v primerjavi z zakonodajnimi zahtevami in tehnološko učinkovitostjo naprave.

2 TEORETIČNA IZHODIŠČA

2.1 Industrijska odpadna vod

Po *Uredbi o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda v vode in javno kanalizacijo* je industrijska odpadna voda odpadna voda, ki nastaja v industriji, obrtni ali obrti podobni ali drugi gospodarski dejavnosti in po nastanku ni podobna komunalni odpadni vodi (UL RS, št. 64/12, 64/14, 98/15, 44/22 – ZVO-2, 75/22 in 157/22).

Vzrokov za onesnaženost vod je več, največji vpliv imata nenehno naraščajoča industrializacija in urbanizacija. Industrijska rast in visok življenjski standard v urbanih območjih zmanjšujeta razpoložljivost naravnih virov, saj se povečuje potreba po vodi za proizvodne procese in vsakodnevno rabo (Sarkar, Chakrabarti, idr., 2005).

Industrijske odpadne vode so običajno kompleksne narave, saj lahko vsebujejo težje biorazgradljive ter biološko nerazgradljive snovi. Te je pred vrnitvijo nazaj v okolje potrebno odstraniti s postopki, ki so primerni za njen izvor (Kurbus, 2008).

Po podatkih Statističnega urada je bilo v Sloveniji leta 2024 aktivnih 23.342 podjetji v sektorju rudarstva, predelovalne dejavnosti, oskrbe z električno energijo, plinom in paro in oskrbe z vodo, ravnanjem z odpadki in odpadki ter saniranjem okolja. Od tega jih je imelo 2.108 (9,0 %) iztok odpadne vode iz industrijskih naprav (Altas okolja, 2025). Ti podatki predstavljajo pomembno vlogo industrijskih obratov pri nastajanju odpadnih vod. »V skladu z zakonodajo in smernicami morajo podjetja zagotavljati ustrezno čiščenje, da s svojimi dejanji ne povzročajo motenj v okolju.« (Drev in Panjan, 2012)

Razlogi za čiščenje odpadnih voda:

- preprečevanje bolezni,
- spoštovanje predpisov,
- zaščita pitne vode,
- zaščita površinskih vodotokov,
- ohranjanje ekosistemov in
- ohranjanje rastlin in živali.

2.1.1 Lastnosti odpadnih vod

Odpadno vodo lahko razčlenimo glede na izvor, in sicer na organsko in anorgansko in na možnost čiščenja, glede na suspendirane, koloidne ali raztopljene snovi (Hercog, 2009).

Lastnosti odpadne vode lahko ovrednotimo na 3 načine, in sicer s fizikalnimi, kemijskimi in biološkimi parametri. Ti so odvisni od uporabe pitne vode v naseljih, števila industrij in trgovin, vremena, dotoka tujih vod, itd. (Roš, Zupančič, 2010).

2.1.1.1 Fizikalni parametri

Med fizikalne parametre najprej uvrščamo celotne trdne snovi, ki so sestavljene iz plavajočih snovi, usedljivih snovi, koloidnih delcev in raztopljenih snovi. Spremljajo se tudi vonj, porazdelitev trdnih delcev, motnost, barva, temperatura, prevodnost, koncentracija in specifična masa (Roš, Zupančič, 2010).

Trdne snovi se v vodi običajno pojavljajo v več oblikah, in sicer kot celotne trdne snovi, celotne hlapne snovi, celotne fiksirane snovi, celotne suspendirane snovi, hlapne

suspendirane snovi, fiksirane suspendirane snovi, celotne raztopljene snovi, celotne hlapne raztopljene snovi, fiksirane raztopljene snovi in usedljive snovi. Vsaka od njih ima določene postopke, s katerimi se jih določi. Razmerja suspendiranih snovi se razlikujejo glede na vrsto odpadne vode (Roš, Zupančič, 2010).

Motnost odpadne vode povzročajo koloidni delci, suspendirane snovi in razgradnja organskih snovi. Merimo jo na osnovi primerjave intenzitete razpršitve svetlobe vzorca in referenčne suspenzije (Roš, Zupančič, 2010). Merjenje motnosti je pomembna, saj ima velik vpliv na prepustnost svetlobe in posledično izvajanje fotosinteze v vodnih ekosistemi (Sahu, Tikariha, 2014).

Barvo odpadne vode štejemo pod kvalitativne značilnosti, saj se meri primerjalno s standardi. Sveže odpadne vode so običajno svetlo rjave barve, sive barve so ponavadi delno razgrajene, temno sive ali črne pa kažejo na anaerobno razgradnjo. Barva industrijske odpadne vode je odvisna od sestave. (Sahu, Tikariha, 2014).

Temperatura odpadne vode je ena od pomembnejših parametrov, saj vpliva na hitrost kemijskih reakcij, vodno življenje, topnost kisika, itd. Z naraščanjem temperature pada topnost raztopljenega kisika, kemijske reakcije pa se upočasnijo (Roš, Zupančič, 2010).

Električna prevodnost nakazuje količino raztopljenih ionov (soli) in izraža sposobnost prevajanja električnega toka v vodi (Sahu, Tikariha, 2014). Višja kot je prevodnost, več je v vodi prisotnih ionov, kot so natrij, kalcij, kalij, klorid, nitrati, sulfati, itd. Povečanje prevodnosti kaže na izpuste iz industrijskih virov (Roš, Zupančič, 2010). V primeru mlekerske industrije so ti ioni posledica ostankov mlečnih izdelkov, čistilnih sredstev, soli, itd.

Koncentracijo določenih snovi v odpadni vodi izražamo v g/ L ali kg/ m³, specifično maso ali gostoto pa maso na enoto volumna (kg/ m³) (Roš, Zupančič, 2010).

2.1.1.2 Kemijski parametri

Med kemijske parametre uvrščamo pH vrednost, alkaliniteto, raztopljen kisik, kloridne ione, pline (metan, amonijak, vodikov sulfid ...), celotne organske spojine (KPK, BPK₅, AOX – adsorbiljni organski halogeni, TOC – celotni organski ogljik), dušikove in fosforjeve spojine (hranila), anorganske spojine (kovine, oksidi ...) in organske spojine (beljakovine, pesticidi) (Roš, Zupančič, 2010).

S pH vrednostjo izražamo stopnjo kislosti oz. bazičnosti odpadne vode. pH lestvica se giblje med 0 in 14, kjer je vrednost 7 nevtralna, manj kot 7 kislina in več kot 7 bazična. V naravi je sprejemljiva vrednost od 6,5 do 8,5 (Roš, Zupančič, 2010). pH vrednost odpadne vode ob neučinkovitem čiščenju močno vpliva na kakovost tal (Sahu, Tikariha, 2014).

Sveža in odpadna voda sprejemata alkaliniteto iz hidroksidov, karbonatov, hidrogen karbonatov in kationov iz kalcijevih, magnezijevih, kalijevih, natrijevih ali amonijevih ionov. Izražamo jo v mg/L kalcijevega karbonata (Roš, Zupančič, 2010). Alkaliniteta v odpadni vodi ima pomembno vlogo, saj blaži spremembe v pH vrednosti, ki jih povzročajo dodatki kislin. Predstavlja pomembno lastnost odpadne vode, saj ima vpliv na biološke procese čiščenja (Sahu, Tikariha, 2014).

Kloridni ioni so že na splošno prisotni v površinskih in podzemnih vodah zaradi izpiranja kamenin, ki vsebujejo kloride ali vdora morske vode na obali. Najdemo jih tudi v kmetijskih, domačih in industrijskih odpadnih vodah (Roš, Zupančič, 2010).

Pline, kot so dušik, kisik in ogljikov dioksid, najdemo v neobdelani odpadni vodi, ki je izpostavljena zraku kot posledica vezanja iz atmosfere. Nekateri plini nastajajo kot posledica

razgradnje organskih snovi. To so metan, amonijak in vodikov sulfid. Po obdelavi odpadne vode moramo biti pozorni še na klor in ozon, ki ju uporabljamo pri dezinfekciji (Roš, Zupančič, 2010).

Da bi ocenili količino celotne organske snovi (razgradljive in nerazgradljive) v vzorcu, uporabljamo parameter kemijske potrebe po kisiku (KPK). Temelji na kemijski oksidaciji, kjer je množina kisika ekvivalentna množini kalijevega dikromata, ki je potrebna za kemijsko oksidacijo organskih snovi, prisotnih v odpadni vodi. Običajno so rezultati KPK višji od BPK₅. Meritve se izvajajo vzporedno, saj so razmerja različna glede na vrsto odpadne vode. Po navadi je BPK₅ : KPK, 1 : 2 za surovo odpadno vodo (Hercog, 2009 v Roš, 2001).

Biokemijska potreba po kisiku (BPK₅) nam pove količino kisika, ki je potrebna za biološko razgradnjo (stabilizacijo) vzorca v 5 dneh. Razmerje biološke aktivnosti je odvisno od temperature in običajno končna razgradnja zahteva več kot 20 dni. Da bi skrajšali čas določitve BPK, so uvedli standardno metodo, kjer so kontrolirani pogoji, in sicer je temperatura 20° C in čas trajanja 5 dni. Z BPK preizkusom lahko v odpadni vodi merimo samo lahko razgradljive organske snovi. Predstavlja osnovni parameter za določevanje obremenitve vod in za projektiranje čistilnih naprav. Pred začetkom gradnje čistilne naprave je potrebno odpadi vodi določiti BPK₅, kar predstavlja merilo za potrebno množino kisika za oksidacijo organskih snovi (Roš, Zupančič, 2010).

Pomemben kemijski parameter so skupne organske snovi, ki so sestavljene iz ogljika, vodika, kisika in v nekaterih primerih dušika. Običajno organske spojine vsebujejo od 40 do 60 % proteinov, od 25 do 50 % ogljikovih hidratov in od 8 do 12 % olj ter maščob (Roš, Zupančič, 2010).

Hranila, kot so dušikove in fosforjeve spojine, imajo največji vpliv na onesnaženje površinskih vod. S svojo prekomerno prisotnostjo povzročajo pojav eutrofikacije, kar vodi v čezmerno rast alg in drugih rastlin, ki ob svoji razgradnji porabljajo kisik v vodi. Običajno to vodi v pomanjkanje kisika, kar povzroči smrt večine prisotnih organizmov in posledično porušitve ekosistema. Za industrijske vode, ki vsebujejo veliko ogljikovih in dušikovih spojin, se običajno uporablja biološko čiščenje (Kurbus, 2008).

Kovine so ena od sestavin v sveži in odpadni vodi, vendar v sledovih. V omejenih količinah predstavljajo pomemben dejavnik za biološko delovanje, v nasprotnem primeru, ko so koncentracije kovin povečane, pa povzročajo negativne spremembe na žive organizme (Roš, Zupančič, 2010).

2.1.1.3 Biološki parametri

Med biološke parametre uvrščamo identifikacijo organizmov in mikroorganizmov (bakterije, glive, praživali, mikroskopske rastline, živali, virusi), razgradljivost in ekotoksikološke teste (Roš, Zupančič, 2010).

Z vidika čiščenja odpadnih vod sta zelo pomembna biorazgradljivost in strupenost, ki se med seboj dopolnjujeta. Biorazgradnja je odvisna od strukture snovi, količine in vrst mikroorganizmov. Stopnja biološke razgradnje je manjša, če odpadna voda vsebuje strupene snovi, ki zmanjšujejo aktivnost bakterij (Kurbus, 2008).

V industrijskih odpadnih vodah se lahko nahajajo patogeni mikroorganizmi, kot so Salmonella, E. Coli, Vibrio cholerae, Yersinia, itd. V pitni vodi predstavljajo nevarnost za ljudi, v naravnem okolju pa negativno vplivajo na vodne organizme (Kurbus, 2008). Bakterije

določamo z metodo štetja na 1mL. Določamo jih kot celotne koliforme (TC), fekalne koliforme (FC) ali fekalne streptokoke (FS) (Roš, Zupančič, 2010).

2.2 Mlekarska odpadna voda

V Evropski uniji je zabeleženih več kot 12.000 obratov za predelavo mleka. Od tega jih je pet od desetih največjih svetovnih mlekarn prav evropskih (BREF, 2019 str. 333).

V sektorju živilske industrije je mlečna industrija na prvem mestu po količini proizvedene obremenjene vode in prav tako odpadnega blata v procesu biološkega čiščenja. Porabi od 0,2 do 10 litrov vode na liter predelanega mleka (Vourch idr., 2007). Z napredno opremo in učinkovitim delovanjem je mogoče doseči vrednosti od 0,8 do 1 L/kg mleka (BREF, 2019). Vzdrževati morajo čistočo in dosegati visoke higienske standarde, kar znatno povečuje količine porabljene vode (Kocjančič, 2014). Voda predstavlja glavni procesni medij in se uporablja v vseh fazah mlekarske industrije. Poraba je odvisna od načina čiščenja, hlajenja, izpiranja in vzdrževanja (Sarkar, Chakrabarti, idr., 2005).

V Sloveniji smo leta 2023 predelali 143.855 ton mleka v konzumno mleko, kar je za 7,9 % manj kot najstarejše zabeležen podatek leta 2006 (SiStat). Glede na površino in število prebivalcev spada Slovenija v velike predelovalke mleka (Drev, Panjan, 2015 v SURS, 2007). Imamo pet večjih IPPC zavezancev (podjetja ali obrati, ki so zavezani spoštovati zahteve *Direktive o celovitem preprečevanju in nadzoru nad onesnaževanjem*), ki se ukvarjajo z večino proizvedenega mleka, z obdelavo in predelavo v nadaljnje izdelke. Ostalo se izvozi (večinoma v Italijo), predela v manjših mlekarnah ali porabi na kmetijah (Drev, Panjan, 2015). Če vzamemo povprečen podatek, da se na en liter predelanega mleka porabi pet litrov vode, dobimo 719.275 m³ močno obremenjene odpadne vode (za leto 2023).

Voda v mlekarnah se uporablja za:

- čiščenje opreme in naprav,
- čiščenje embalažnih materialov,
- pasterizacijo izdelkov, za hlajenje, ogrevanje (voda, ki ne pride v stik z živili),
- predelavo izdelkov, kjer voda pride v stik s hrano in
- pranje surovin, itd (BREF, 2019).

Zasledimo lahko, da se večina mlekarn sooča s problematiko čiščenja odpadne vode predvsem zaradi lastnosti surove vode. Ta povzroča težave v procesu čiščenja, kot so nastajanje pene, slaba usedljivost blata, težavna razgradnja maščob in olj ter hranil, itd. (Andrade idr., 2014). Mlekarske odpadne vode so značilne zaradi visoke vsebnosti BPK₅, KPK in visoke stopnje raztopljenih ali suspendiranih trdnih snovi (maščob, olj, hranil), ki predstavljajo velik zalogaj za čiščenje (Sarkar, Chakrabarti, idr., 2005).

2.2.1 Lastnosti mlekarskih odpadnih vod

Mleko ima v človeškem življenju veliko vlogo. Sestavljeno je iz približno 87 % vode, ostalo pa so beljakovine, maščobe, laktoza, kalcij, fosfor, železo in vitamini (BREF, 2019, str. 334).

2.2.1.1 Fizikalne lastnosti mlekarskih odpadnih vod

Po izgledu je odpadna voda iz mlekarske industrije običajno bele barve (razen v primerih dodajanja sadnih in drugih baz) in motna zaradi suspendiranih snovi in maščob (Hercog, 2009). Vonj je običajno neprijeten, saj zaradi velike količine organskih snovi steče anaeroben

proces razgradnje, kjer se lahko tvorijo plini, kot so vodikov sulfid, amonijak in metan. Vsebnost suspendiranih trdnih snovi znaša od 350 do 1.500 mg/L (Tikariha, Sahu, 2014).

2.2.1.2 Kemijske lastnosti mlekarskih odpadnih vod

Vrednost pH v mlekarskih odpadnih vodah so v velikem razponu, in sicer se gibljejo med 4 in 12 glede na proizvodni program, način delovanja in uporabljena čistilna sredstva (Alfiah, Pertiwi, 2024). Če so mlekarske odpadne vode na vtoku čistilne naprave kisle, je zaželeno, da imajo visoko alkaliteto, saj ta omogoča manjše motnje na procese čiščenja (Hercog, 2009).

Mlekarske odpadne vode imajo visoko vsebnost ogljikovih hidratov, beljakovin, suspendiranih trdnih snovi (v povprečju 1500 mg/L), maščob, dušika, fosfatov in mlečnih kislin. Imajo visoko vsebnost organskih snovi in je razgradljiva, kar pomeni da so vrednosti BPK₅ in KPK pogosto visoke. (Alfiah, Pertiwi, 2024, v Mohebi-Fard, idr., 2015; Rohmanna, idr., 2021; Prasetyani, Suryono, 2023; Hercog, 2009). KPK vrednost se giblje okoli 4.000 mg/L, BPK₅ pa v povprečju 3.000 mg/L (Preglednica 1). Če bi v vodotok spustili 1 m³ surovega mleka, bi to pomenilo podobno BPK obremenitev, kot predstavlja dnevna količina odpadne vode za 1500 do 2000 ljudi (BREF, 2019). Odpadna voda iz mlekarske industrije vsebuje tudi veliko maščob, fosforja in amonijevega dušika (Preglednica 1) (Alfiah, Pertiwi, 2024 v Vasina in Basamykina, 2022).

Preglednica 1: Kontaminacijske ravni neobdelane odpadne vode iz mlekar

Komponenta	Razpon
SS	24–5700 mg/L
TSS	135–8500 mg/L
KPK	500–4500 mg/L
BPK ₅	450–4790 mg/L
Proteini	210–560 mg/L
Maščobe	35–500 mg/L
Ogljikovi hidrati	252–931 mg/L
Amonijak- N	10–100 mg/L
Dušik	15–180 mg/L
Fosfor	20–250 mg/L
Natrij	60–807 mg/L
Klor	48–469 (do 2000) mg/L
Kalcij	57–112 mg/L
Magnezij	22–49 mg/L
Kalij	11–160 mg/L
pH	5,3–9,4
Temperatura	12–40 °C

(Vir: Kočjančič, 2019 v Environment Agency of England and Wales, 2000 – BREF, str. 188)

2.2.1.3 Biološke lastnosti mlecarskih odpadnih voda

Odpadna voda lahko zaradi proizvodnih postopkov ali kontaminiranih materialov vsebuje patogene bakterije, ki povzročajo razne bolezni (Kocjančič, 2012).

2.3 Biološko čiščenje odpadnih vod z aktivnim blatom

Biološko čiščenje odpadnih vod vključuje več postopkov, ki temeljijo na delovanju mikroorganizmov. Mednje štejemo:

- sisteme s pritrjeno biomaso (biofilmi),
- naravne sisteme (rastlinska čistilna naprava – RČN, lagune) in
- sisteme z aktivnim blatom, kamor spada membranski bioreaktor in sekvenčni biološki reaktor (Roš, Zupančič, 2010).

2.3.1 Sistem čiščenja z aktivnim blatom

Aktivno blato je združba kosmov, ki je sestavljena iz bakterijske populacije in združbe ostalih organizmov. Med kosmi je prisotna intersticijska tekočina, katero poseljujejo razpršene bakterije, migetalkarji, prosto plavajoči bičkarji, kotačniki in drugi mnogoceličarji. Združbo aktivnega blata lahko razdelimo v dve osnovni skupini, in sicer razgrajevalci in porabniki. Razgrajevalci so organizmi, ki s pomočjo biokemijskega procesa oksidirajo prisotne organske snovi. Mednje sodijo bakterije (dispergirane, izkosmičene in nitaste) in glive. Porabniki so organizmi, ki se posredno vključujejo v čiščenje. Mednje sodijo bičkarji, korenonožci, migetalkarji, kotačniki, maloščetinci in gliste. Igrajo pomembno vlogo pri čiščenju, saj prispevajo 30 % zmanjšanja obremenitve čistilne naprave. Prisotnost in pogostost določenih vrst organizmov je posledica kakovosti in bistrosti iztoka (Urbančič, Toman, 2003).

Postopek čiščenja raztopljenih snovi, drobnih neraztopljenih snovi in koloidnih organskih onesnaževal poteka pri aerobnih pogojih po fazi predčiščenja in primarnega čiščenja. Sistem čiščenja z aktivnim blatom se lahko uporablja tudi za nitrifikacijo in denitrifikacijo, saj je možno modificirati sistem na način, da se ustvarijo anoksični in anaerobni pogoji. S postopkom nitrifikacije se izloči amonijak, ki je toksičen za vodne organizme, in ob visokih koncentracijah porablja kisik v tekočih vodah. Amonijak se pretvori v nitrat, ki pa lahko kontaminira podtalnico s toksini, ki so škodljivi za človeški organizem. Sledi proces denitrifikacije, ki poteka v anoksičnih pogojih oziroma s kisikom, prisotnim v nitratu. V več korakih se nitrat reducira v plinasti dušik, ki se na koncu sprosti v ozračje (Roš, Zupančič, 2010).

OPIS POSTOPKA:

Osnovni proces čiščenja z aktivnim blatom vsebuje tri sisteme, in sicer: prezračevalnik, bistrilnik in recirkulator blata. Odpadna voda najprej priteka v prezračevalni bazen, kjer so prisotni razviti kosmi, ki prihajajo v stik z organsko snovjo. Vsebinsko, ki je prisotna v prezračevalniku, imenujemo suspenzija aktivnega blata. Ta je sestavljena iz organske snovi, torej ogljika, ki služi kot vir energije za rast celic. Ogljik se pretvarja v celično maso, ki vsebuje večinoma mikroorganizme, inertne suspendirane in nerazgradljive suspendirane snovi, vodo in oksidirane produkte (CO_2 – ogljikov dioksid). Celična masa oz. biomasa je odvisna od lastnosti odpadne vode, okoljskih razmer in lastnosti organizmov. Voda se po procesu prezračevanja gravitacijsko pretaka v bistrilnik. Na dnu ostanejo suspendirane snovi,

na vrhu pa prečiščena voda, ki se naknadno dekantira na iztok. Del blata se vrne v prezračevalnik oziroma šaržni reaktor, del pa gre na končno obdelavo (Roš, Zupančič, 2010).

2.3.2 Sistem čiščenja s šaržnim reaktorjem (SBR)

Šaržni reaktor za razliko od konvencionalnega uporablja en sistem, kjer potekajo vsi procesi. Običajno ga sestavlja pet faz: polnjenje, reakcija, usedanje, izpust in mirovanje. Že beseda »šaržni« (reaktor) nam pove, da odpadna voda stalno priteka in odteka v sistem, kar pomeni, da predhodno potrebuje izravnalni oz. egalizacijski bazen. Bioloških reaktorjev je lahko več zaporedno vezanih v primerih, ko ni egalizacijskega bazena, da bi zagotavljal stalni pretok ali pa, ko so količine odpadne vode prevelike za volumen enega reaktorja. Tehnologija SBR procesa se uporablja za čiščenje komunalnih kot industrijskih odpadnih vod (Roš, Zupančič, 2010).

OPIS POSTOPKA:

V prvi fazi poteka proces polnjenja, kjer predhodno obdelana voda priteka v šaržni reaktor z aktivnim blatom. Ko se bazen napolni do določenega volumna, se začne faza reakcije. Z mešanjem in prepihanjem se začne proces biokemijske reakcije, do določene mere odstranitve organskih snovi. Sledi faza usedanja, kjer se ustavi proces vpihovanja zraka in mešanja. Aktivno blato se usede na dno, voda nad njim pa se postopoma odlije v bazen za čisto vodo (faza izpusta). Na koncu poteka še faza mirovanja, ki predstavlja dodatni čas za optimiziranje dolžine procesov po fazah, glede na količino in obremenjenost odpadnih voda (Roš, Zupančič, 2010).

SBR bazeni omogočajo odstranjevanje ogljikovih spojin in hranil.

Ogljikove spojine se v SBR reaktorju odstranjuje v aeracijski fazi, kjer mikroorganizmi porabljajo organsko snov kot vir ogljika in energije. Ogljikove spojine se biološko razgradijo v CO₂, vodo in novo celično maso (Roš, Zupančič, 2010).

Dušikove spojine se odstranjuje v kombinirani fazi prezračevanja in polnjenja. Obstajajo tri kombinacije čiščenja, in sicer prednitrifikacija, dvojno anoksično polnjenje in podaljšano polnjenje z več anoksičnimi fazami (Roš, Zupančič, 2010).

Fosfor se iz odpadne vode odstranjuje s skupino bakterij, katere imenujemo tudi fosfat-akumulirajoči organizmi. V anaerobni fazi (med polnjenjem) skupina bakterij porablja organske snovi in izloča fosfate v tekočo fazo. Njihova naloga v aerobni fazi je skladiščenje polifosfatov v lastne celice. Z odstranitvijo odvečnega blata odstranimo tudi vezani fosfor (Roš, Zupančič, 2010).

Prednosti SBR tehnologije čiščenja:

- enostaven nadzor in možnost prilagajanja delovanja,
- finančni prihranek, saj ni potrebe po dodatni opremi,
- visoka učinkovitost čiščenja hranil in ogljikovih spojin,
- visoka odpornost na spremembe v pretoku in obremenitve dotoka in
- zavzema manj prostora kot klasičen sistem čistilne naprave z aktivnim blatom, itd. (Roš, Zupančič, 2010).

Slabosti SBR tehnologije čiščenja:

- nitratnega recikla ne moremo obdelovati ločeno od recikla blata,
- potreba po rednem vzdrževanju,
- ne odstranjuje patogenih organizmov in

- za ustrezen rezultat čiščenja potrebno strokovno znanje upravljanja reaktorja, itd. (Roš, Zupančič, 2010).

2.4 Zakonodajni okvir za čiščenje odpadnih vod

Za odvajanje in čiščenje odpadnih vod je pomembno poznavanje zakonodajnih zahtev. Opisani so temelji evropskega okoljskega prava, okoljska zakonodaja v Republiki Sloveniji in ključni predpisi na področju čiščenja odpadnih voda.

2.4.1 Evropska okoljska zakonodaja

Evropsko okoljsko pravo se je začelo leta 1972, ko so predsedniki držav in vlad na Stockholmski konferenci OZN določili, da je skupna okoljska politika nujno potrebna. EU od leta 1973 pripravlja večletne okoljske akcijske programe, ki določajo zakonodajne cilje in predloge. Trenutno je v teku osmi okoljski akcijski program za obdobje do leta 2030, kjer je eden od ciljev ničelno onesnaževanje zraka, vode in tal (Kurrer, Petit, 2024). Prelomnica na področju varstva okolja se je zgodila leta 1987, ko je začel veljati enotni evropski akt, s katerim je bil v Pogodbo o ustanovitvi Evropske skupnosti vključeno posebno poglavje na to temo (Kocjančič, 2012).

Danes okoljska politika EU temelji na štirih načelih, in sicer previdnostno načelo, načelo preprečevanja, načelo odpravljanja onesnaževanja na viru in načelo odgovornosti. Z upoštevanjem načel želijo lajšati globalne probleme, kot so podnebne spremembe, izguba biotske raznovrstnosti, izčrpavanje in onesnaževanje naravnih virov, itd. (Kurrer, Petit, 2024)

2.4.2 Slovenska okoljska zakonodaja

Zanimanje za okolje se je v Sloveniji pojavilo v zgodnjih 70. letih, ko je bil ustanovljen prvi uradni organ, ki se je ukvarjal s problematiko onesnaženosti (Kocjančič, 2012 v Božovič, 1999).

Vsi zakoni in njihovi podzakonski akti, ki urejajo vode, so usklajeni z vodno zakonodajo Evropske unije. Med temeljne zakone, ki urejajo področje voda, spadajo *Zakon o varstvu okolja*, *Zakon o vodah*, *Zakon o ohranjanju narave* in številni podzakonski akti, ki določajo mejne vrednosti emisij snovi in energije v vodo ter mejne emisijske vrednosti (Kurbus, 2008). *Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih vod v vodo in javno kanalizacijo* predstavlja osnovo s področja odpadnih voda. Uredba temelji na mejnih vrednostih emisij snovi v tekoče površinske vode in obalno morje ali v kanalizacijo ter mejne vrednosti toplote v tekoče površinske vode. Uredba določa mejne vrednosti splošnih, bioloških, anorganskih in organskih parametrov v odpadni vodi iz virov onesnaženja, za iztok v vodotoke in kanalizacijo (Uradni list RS, št. 64/12, 64/14, 98/15, 44/22 – ZVO-2, 75/22 in 157/22).

2.4.2.1 Zakon o varstvu okolja

Prvi *Zakon o varstvu okolja* je bil sprejet leta 1999. Urejal je varstvo življenjskega in naravnega okolja za zdrav in obstojen razvoj. Eden od temeljev je bil trajnostni razvoj, torej da imajo prihodnje generacije enake možnosti zadovoljevanja potreb kot sedanje.

ZVO-2 trenutno predstavlja temeljni pravni okvir za varstvo okolja v Republiki Sloveniji. Namen zakona je zagotoviti celovito varstvo okolja, ohranjati naravne vire, preprečevati in nadzorovati onesnaževanje ter spodbujati trajnostni razvoj.

Cilji varstva okolja so:

- preprečitev in zmanjšanje obremenjevanja okolja,

- ohranjanje in izboljševanje kakovosti okolja,
- zmanjšanje emisij toplogrednih plinov in prehod v podnebno nevtralnost,
- zagotavljanje odpornosti na podnebne spremembe,
- varovanje in trajnostna raba naravnih virov ter
- ohranjanje biotske raznovrstnosti, naravnega ravnovesja in naravnih vrednot, odpravljanje posledic obremenjevanja okolja, izboljšanje porušenega naravnega ravnovesja in ponovno vzpostavljanje njegovih regeneracijskih sposobnosti.

(Uradni list RS, št. 44/22, 18/23 – ZDU-10, 78/23 – ZUNPEOVE, 23/24 in 21/25 – ZOPVOO)

Odvajanje in čiščenje odpadnih vod iz mlekarn je v *Zakonu o varstvu okolja* obravnavano z več določbami:

- Zakon upošteva načelo povzročitelj plača, kar pomeni, da pravna ali fizična oseba, katera opravlja dejavnost, ki povzroča onesnaževanje, nosi stroške za preprečevanje in zmanjševanje emisij v okolje. Stroški se imenujejo okoljske dajatve, ki jih mora povzročitelj plačevati za obremenjevanje vod. Plačujejo jih le mlekarne, ki so zavezanci za izvajanje obratovalnega monitoringa. Višina okoljskih dajatev je odvisna od učinka čiščenja komunalnih čistilnih naprav (Drev, Panjan, 2016).
- V skladu z ZVO-2 mora objekt, ki odvaja industrijske odpadne vode, izpolnjevati pogoje za pridobitev okoljevarstvenega dovoljenja. V okoljevarstvenem dovoljenju so določeni ukrepi in mejne vrednosti emisij za odvajanje odpadnih vod, ki jih more obrat upoštevati.
- Zakon predpisuje tudi monitoring kakovosti odpadnih vod na iztoku in izvajanje ukrepov za preprečitev škodljivih vplivov. To za mlekarne pomeni spremljanje parametrov predpisanih snovi.

2.4.2.2 Zakon o vodah

Zakon o vodah je bil sprejet leta 2002. Ureja upravljanje z morjem, celinskimi in podzemnimi vodami ter vodnimi in priobalnimi zemljišči. Ureja tudi upravljanje z vodami in vodnimi priobalnimi zemljišči ter obsega varstvo vod, urejanje vod in odločanje o rabi vod. Zakon o vodah ureja tudi javno dobro in javne službe na področju vod, vodne objekte in naprave ter druga vprašanja, povezana z vodami.

Cilj upravljanja z vodami ter vodnimi in priobalnimi zemljišči je doseganje dobrega stanja vod in drugih, z vodami povezanih ekosistemov, zagotavljanje varstva pred škodljivim delovanjem vod, ohranjanje in uravnavanje vodnih količin in spodbujanje trajnostne rabe vod, ki omogoča različne vrste rabe vod ob upoštevanju dolgoročnega varstva razpoložljivih vodnih virov in njihove kakovosti. Pri opredelitvi ciljev upravljanja z vodami in z njimi povezanih programih ukrepov se upoštevajo vplivi podnebnih sprememb.

Odvajanje in čiščenje odpadnih voda iz mlekarn je v *Zakonu o vodah* obravnavano z več določbami.

- Ena od določb je varstvo kakovosti vod, kjer se prepoveduje odvajanje odpadnih vod v vode ali kanalizacijo, če te ne ustrezajo predpisanim standardom. Pred izpustom morajo biti obvezno predhodno ustrezno očiščene.
- Če mlekarne odvaja prečiščeno odpadno vodo neposredno v vodotok ali podzemne vode, mora pridobiti vodno dovoljenje. Ta določa pogoje za odvajanje, kot so količina, kakovost, mejne vrednosti i...

- Poseben poudarek je na lokaciji obrata. Če leži na vodovarstvenem območju, so zahteve strožje, saj je potrebno zaščititi pitno vodo in občutljive ekosisteme.
- Če obrat (mlekarna) ni priključen na javno kanalizacijo, mora imeti lastno čistilno napravo, ki ustreza predpisanim standardom.

(Uradni list RS, št. 67/02, 2/04 – ZZdr1-A, 41/04 – ZVO 1, 57/08, 57/12, 100/13, 40/14, 56/15, 65/20, 35/23 – odl. US, 78/23 – ZUNPEOVE in 52/24 – odl. US)

2.4.2.3 Zakon o ohranjanju narave

Zakon določa ukrepe ohranjanja biotske raznovrstnosti in sistem varstva naravnih vrednot z namenom prispevati k ohranjanju narave. Ukrepi ohranjanja biotske raznovrstnosti so ukrepi, s katerimi se ureja varstvo prosto živečih rastlinskih in živalskih vrst, vključno z njihovim genskim materialom in habitatami ter ekosistemi, in omogoča trajnostno rabo sestavin biotske raznovrstnosti ter zagotavlja ohranjanje naravnega ravnovesja. Sistem varstva naravnih vrednot je sistem, ki določa postopke in načine podeljevanja statusa naravnih vrednot ter izvajanje njihovega varstva.

Povezave med ZON in čiščenjem ter odvajanjem odpadnih vod iz mlekarn, so obravnavane z določbami.

- Obrat, ki spušča prečiščene odpadne vode v okolje, more upoštevati, da s svojimi izpusti ne ogroža naravnih vrednot, kot so barja, mokrišča, ekosistemi rek, naravni habitat, itd.
- Če se obrat nahaja v neposredni bližini naravnih zavarovanih območij, kot je npr. Natura 2000, mora še posebno paziti na ustrezno čiščenje odpadnih vod, da ne pride do negativnih vplivov na varovane vrste ali habitate.
- Če pride do večjih sprememb v proizvodnji in posledično povečanih izpustov, mora obrat pridobiti mnenje ali odločbo o presoji vplivov na okolje, če bi njeno delovanje lahko vplivalo na varovana območja ali vrste.

(Uradni list RS, št. 96/04 – uradno prečiščeno besedilo, 61/06 – ZDru-1, 8/10 – ZSKZ-B, 46/14, 21/18 – ZNOrg, 31/18, 82/20, 3/22 – ZDeb, 105/22 – ZZNŠPP in 18/23 – ZDU-10)

2.4.2.4 Podzakonski akti na področju odvajanja odpadnih voda

- Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda v vode in javno kanalizacijo (UL RS, št. 64/12, 64/14, 98/15, 44/22 – ZVO-2, 75/22 in 157/22)

Podzakonski predpis, ki ureja odvajanje odpadnih vod v okolje, predpisuje mejne vrednosti emisije snovi in toplote, vrednotenje, ukrepe zmanjšanja in preprečevanja emisije, pogoje za odvajanje odpadnih vod in obveznosti investitorjev in upravljavcev naprav, ki se nanašajo na pridobitev okoljevarstvenega dovoljenja in obratovanje naprave.

- Uredbe o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadne vode iz naprav za obdelavo in predelavo živilskih in rastlinskih surovin ter mleka pri proizvodnji hrane za prehrano ljudi in živalske krme (UL RS, št. 45/07 in 44/22 – ZVO-2.)

Ta uredba ureja odvajanje odpadnih vod iz obratov, ki predelujejo živilske in rastlinske surovine ter mleko pri proizvodnji hrane za ljudi in krmo za živali. Uredba določa mejne vrednosti emisij za različne parametre in ukrepe za zmanjševanje obremenjevanja vod.

- Uredba o okoljski dajatvi za onesnaževanje okolja zaradi odvajanja odpadnih vod (UL RS, št. 80/12, 98/15 in 44/22 – ZVO-2)

Uredba določa vrsto onesnaženj, za katere se plačuje okoljska dajatev za onesnaževanje okolja kot posledice odvajanja odpadnih vod. Določa tudi prejemnike okoljske dajatve, zavezanca za plačilo, enote obremenitve in način izračuna za posamezne vrste okoljske dajatve. S tem država spodbuja zmanjševanje onesnaževanja in uvaja načelo povzročitelj plača.

- Pravilnik o prvih meritvah in obratovalnem monitoringu odpadnih vod ter o pogojih za njihovo izvajanje (Uradni list RS, št. 94/14, 98/15 in 44/22 – ZVO-2)

Ureja izvajanje prvih meritev in obratovalnega monitoringa odpadnih vod iz naprav, ki jo odvajajo v okolje ali kanalizacijo. Njihov namen je zagotoviti redno spremljanje kakovosti odpadnih vod s strani povzročitelja obremenitve in prav tako države. Povzročitelji obremenitve morajo pristojnemu organu poročati o rezultatih monitoringa in dokazovati skladnost z uredbo o emisijah.

3 PREGLED DOSEDANJIH RAZISKAV

V eni izmed študij so ugotovili, da ima predhodno čiščenje mlekarskih odpadnih vod velik pomen, saj znatno znižuje višino okoljskih dajatev za obremenjevanje vod. Predhodno čiščenje bi bilo izvedeno predvsem s postopki uporabe flokulantov in koagulantov ter flotacije. Ta postopek lahko zniža vrednosti KPK za približno 60 % in vsebnost težko hlapnih snovi za 78 % (Drev, Panjan, 2012). Avtorji ene izmed raziskav poročajo, da je dodatek koagulanta galuna zmanjšal vsebnost KPK za 68 %, medtem ko je bil pri uporabi železovega sulfata dosežen 62 % učinek (Loloei, Alidadi, idr., 2014). Iz pridobljenih rezultatov so izračunali, da če bi v eni izmed slovenskih mlekarń znižali vsebnost KPK za 60 %, bi prihranili več kot 400.000 EUR na leto. Posledično bi se jim v relativno kratkem času izplačala investicija v predhodno čiščenje na objektu (Drev, Panjan, 2012).

Ker mlekarska industrija proizvaja ogromno količino odpadne vode, ki ni strupena, samo močno organsko obremenjena, so v eni izmed študij testirali proces nanofiltracije, kot terciarno čiščenje za ponovno uporabo odpadne vode na podlagi obdelave z membranskim bioreaktorjem. Membranski bioreaktor je kot sekundarni postopek čiščenja zelo učinkovito odstranil KPK, in sicer povprečno 98 %, 86 % skupnega dušika in 89 % fosforja. Kljub dobrim rezultatom je bila še vedno prisotna visoka koncentracija raztopljenih snovi, kar onemogoča ponovno uporabo vode. Posledično so zato uvedli še nanofiltracijo, kot terciarno stopnjo čiščenja, kjer so testirali hitrosti križnega toka in ugotavljali najprimernejšo. Končni sistem obeh procesov čiščenja je dosegel skupno učinkovitost odstranjevanja KPK za 99,9 % in skupnih trdnih snovi za 93,1 %. Prečiščena voda je primerna za hlajenje, pranje zunanjih površin vozil in generacijo nizkotlačne pare, kar predstavlja velik potencial za trajnostno upravljanje z vodami (Andrade, Mendes, idr., 2014).

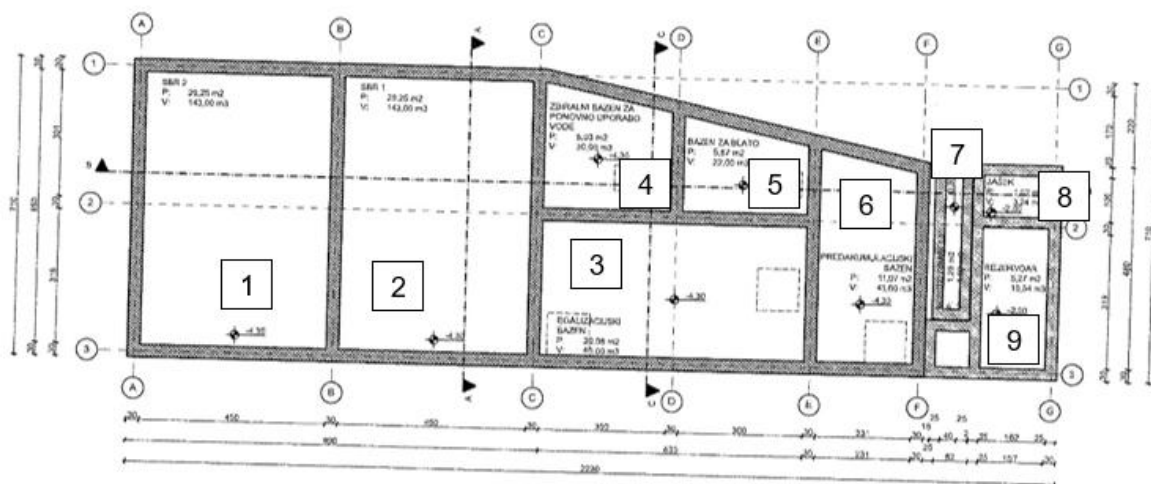
Ena od študij je raziskovala možnosti uporabe kombiniranih postopkov kemične koagulacije z železovim kloridom, mikrofiltracije in reverzne osmoze za odstranjevanje motnosti, barve, dušika, skupnega organskega ogljika (v nadaljevanju TOC) in KPK iz odpadne vode iz brazilskega podjetja, ki proizvaja mleko v prahu (Bortoluzzi, Demaman, idr., 2022). Poznamo pet tipov membranskih ločevanj, in sicer: mikrofiltracijo, ultrafiltracijo, nanofiltracijo, reverzno osmozo in elektrodializo. Razlikujejo se po materialu, iz katerega so izdelane, velikosti por in potrebni pogonski sili. Membranski proces loči tekočino na dva dela: tisti, ki prehaja skozi membrano, se imenuje permeat, zadržana frakcija pa retentat ali koncentrat (Galvão, 2018). Najprej so določili optimalno količino železovega klorida za koagulacijo, kot primarno stopnjo čiščenja pred mikrofiltracijo, ki je znašala 0,7 g/L. Barva surove odpadne vode se je po postopku mikrofiltracije zmanjšala za 95,8 %, po postopku reverzne osmoze pa za 100 %, medtem ko se je motnost po mikrofiltraciji zmanjšala za 83,7 % in po reverzni osmozi za 100 %. Tako barva kot motnost sta se po primarnem čiščenju in mikrofiltraciji ter po reverzni osmozi izrazito zmanjšali. Študija je torej pokazala 100 % odstranitev motnosti, do $98,7 \pm 0,05$ % odstranitve KPK in do $96,7 \pm 0,10$ % odstranitve TOC s kombinirano uporabo mikrofiltracijskih postopkov, reverzne osmoze in predhodno uporabo primarnega čiščenja s koagulacijo. Rezultati študije so pokazali, da uporaba prej omenjenih kombiniranih postopkov učinkovito očisti odpadne vode iz mlekarske industrije, saj dosega standarde, ki jih določa brazilska zakonodaja (Bortoluzzi, Demaman, idr., 2022).

4 MATERIALI IN METODE DELA

4.1 Opis čistilne naprave v izbranem podjetju

Povzeto po navodilih za obratovanje in vzdrževanje čistilne naprave v izbranem podjetju.

Čistilna naprava je sestavljena iz mehanske stopnje čiščenja, fizikalno-kemijskega čiščenja, biološkega čiščenja z aktivnim blatom, dezinfekcijo in obdelavo blata. Sestavlja jo več zbiralnih bazenov za posamezno čiščenje (Slika 1).



Slika 1: Tloris zbiralnikov čistilne naprave (1 – SBR2, 2 – SBR1, 3 – egalizacijski bazen, 4 – zbiralni bazen za ponovno uporabo vode, 5 – bazen za blato, 6 – predakumulacijski bazen, 7 – korito grabelj, 8 – jašek, 9 – rezervoar)

(Vir: Posredovalo izbrano podjetje, 2025)

4.1.1 Mehanska stopnja čiščenja odpadnih vod in predakumulacijski bazen

Funkcija tega koraka je izločitev večjih in manjših delcev v velikosti 2 mm iz odpadne vode z namenom izogniti se sedimentaciji in možnim zamažitvam med različnimi fazami procesa čiščenja.

Sistem sit je nameščen v betonskem kanalu in opravlja nalogo izločitve delcev. Odpadna voda teče skozi mrežo, ki je pravokotna na filtracijsko površino. Trdi delci v vodi, ki so večji od 2 mm, se odlagajo na mreži, medtem ko voda brez trdnih delcev nadaljuje svojo pot po kanalu. Proces čiščenja izvajajo prekucne ščetke, ki so montirane na rotirajočih rokah in se počasi rotirajo ter odstranjujejo material iz filtracijske površine. Izločeni delci se deponirajo v posodi, ki je nameščena na sprednji strani naprave (Slika 2).

Namen predakumulacijskega bazena je zadrževanje večjih količin odpadne vode in zagotavljanje enakomernega pretoka odpadne vode na flotacijski proces.

Količina odpadne vode je odvisna od aktivnosti proizvodnje, zato predakumulacijski bazen omogoča akumulacijo tokov in enakomerno doziranje odpadne vode v kemijski proces. Znotraj predakumulacijskega sistema je nameščeno flow jet mešalo, ki v vodo vnaša zrak in posledično preprečuje nastanek anaerobnih pogojev in pojav smradu, nivojske sonde in črpalka, ki dozira odpadno vodo v VAMEF sistem.



Slika 2: Izločitev delcev s siti in predakumulacijski bazen
(Vir: Posredovalo izbrano podjetje, 2025)

4.1.2 Fizikalno-kemijsko čiščenje odpadnih vod

Proces separacije maščob izvaja kompaktna VAMEF flotacijska enota (Slika 3). VAMEF je kontinuirno delujoča kompaktna enota za čiščenje odpadnih vod, osnovana na procesu flotacije (DAF enota), ki vključuje sledečo opremo:

- dozirne črpalke za kemikalije (koagulant, flokulant, nevtralizacijske raztopine),
- reakcijsko plovilo za mešanje (kjer potekajo reakcije koagulacije in flokulacije),
- avtomatski pH meter (pomemben za zagotavljanje učinkovitosti flokulacije),
- DAF enota za separacijo trdnih in tekočih snovi (za separacijo nastajajočega odpadnega blata iz procesa koagulacije oz. flokulacije) in
- iztok očiščene vode ter avtomatski iztok odpadnega blata.

VAMEF je pripravljen za popolni koagulacijski oz. flokulacijski proces. Čiščenje vode s koagulacijo uporablja kemikalije za pomoč pri združevanju vodnih delcev (koloidov) skupaj. Ko skupki delcev postanejo večji, jih je lažje odstraniti iz očiščene vode.

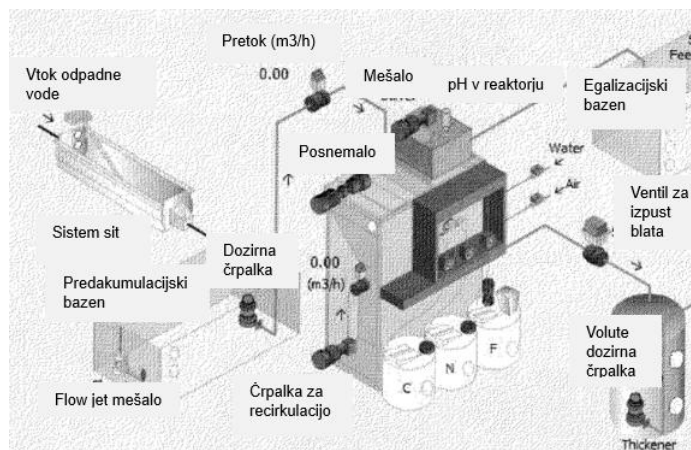
Koagulant je doziran v VAMEF dozirni cevi in ima prvi kontakt z odpadno vodo. Ta mešanica gre v reakcijsko posodo za mešanje, kjer se začne koagulacijski proces.

Kontrola pH v tem koraku je zelo pomembna za zagotavljanje visoke učinkovitosti čiščenja in je kontrolirana avtomatsko. V isti reakcijski posodi je doziranje flokulanta, ki izboljša združevanje delcev. Priprava flokulanta poteka avtomatsko iz praškastega pripravka. Avtomatski dozator odmeri 22,6 g praškastega flokulanta, ki ga nato zmeša s 16,7 litra vode. Koncentracija flokulanta tako znaša 1,4 g/L. Pripravljen flokulant ima viskozno strukturo in je obstojen več dni. Po reakcijski posodi za mešanje, gre mešanica v DAF napravo za separacijo delcev s flotacijo.

Očiščena voda odteče s pomočjo gravitacije v egalizacijski bazen.

Opadno blato, ki je izločeno na vrhu DAF, in usedlina, ki je akumulirano v usedalniku na dnu, se prečrpa v bazen za blato.

Shema tokov fizikalno-kemijskega dela čiščenja je prikazana na spodnji sliki (Slika 3).



Slika 3: Fizikalno-kemijsko čiščenje (VAMEF)
(Vir: Posredovalo izbrano podjetje, 2025)

Za obratovanje naprave VAMEF so potrebne naslednje kemikalije:

- raztopina NaOH za nevtralizacijo odpadne vode do pH 7,5,
- raztopina koagulanta polialuminijevega klorida, za tvorbo granul in
- raztopina flokulanta za tvorbo večjih flokul, ki se nato izločijo v flotacijski enoti.

Za delovanje strojnega zgoščevanja blata na dehidracijski napravi Volute je potrebna raztopina anionskega flokulanta.

Vse kemikalije morajo biti postavljene na lovilnih posodah, ustrezno označene in skladiščene v toplih prostorih.

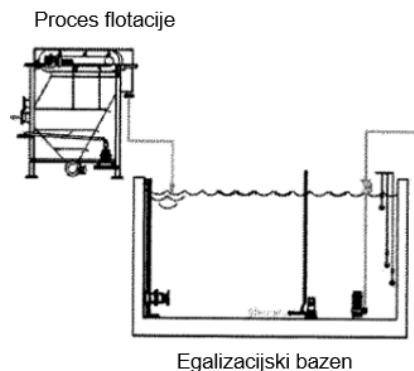
Nevtralizacijska raztopina NaOH s 50% koncentracijo se avtomatsko dovaja na sistem VAMEF, ko je pH pod 6,5.

VAMEF začne avtomatko delovati, ko je dosežen srednji nivo v predakumulacijskem bazenu in se ustavi pri minimalnem nivoju. Maksimalen nivo v predakumulacijskem bazenu bo sprožil alarm, vendar ne bo ustavil VAMEF naprave. VAMEF se ustavi tudi, ko je dosežen maksimalen nivo v bazenu za blato ali v egalizacijskem bazenu, ne glede na količino vode v predakumulacijskem bazenu.

4.1.2.1 Egalizacijski bazen

Ta faza procesa je pomembna za zagotovitev pravilne mešanice odpadne vode, ki pride iz enote VAMEF. Zagotoviti mora dovolj velike zaloge odpadne vode, saj njihovo nastajanje poteka z drugačno dinamiko kot čiščenje. V egalizacijskem bazenu je vgrajeno mešalo, ki preprečuje usedanje in zagotavlja popolno mešanje.

Iz te faze se odpadne vode sekvenčno prečrpajo v biološka reaktorja za končno razgradnjo organskih snovi (Slika 4).



Slika 4: Egalizacijski bazen pred SBR
(Vir: Posredovalo izbrano podjetje, 2025)

4.1.3 Terciarno biološko čiščenje – SBR

Biološki proces čiščenja je izveden s sekvenčnim šaržnim reaktorjem (SBR), v katerem potekata oksidacija organskih snovi in usedanje v istem bazenu (Slika 5).

Diskontinuiran proces (šaržni postopek) je podoben klasičnemu procesu čiščenja odpadne vode in je običajno uporabljen za čiščenje s srednjo in visoko organsko obremenitvijo. Od pretočnega sistema se razlikuje v tem, da se sedimentacija in oksidacija odvijata v istem bazenu.

Čistilna naprava je sestavljena iz dveh SBR bazenov, kjer traja en cikel čiščenja od 8 do 24 ur. Poteka v petih fazah, in sicer: polnjenje, nitrifikacija, denitrifikacija, usedanje in praznjenje. Uporaba dveh SBR bazenov omogoča prilagoditev na različno količino odpadne vode, ki jo je potrebno očistiti.

Zrak prihaja iz omrežja posebnih membranskih zračnih difuzorjev, nameščenih po celotni površini dna bazena, ki proizvajajo mikro zračne mehurčke in jih uvajajo v tekočo fazo. Zrak se vpihuje preko dvostopenjskih puhal, ki omogočajo ustrezno mešanje in zračenje odpadne vode z aktivno biomaso in posledično optimalno prezračenost.

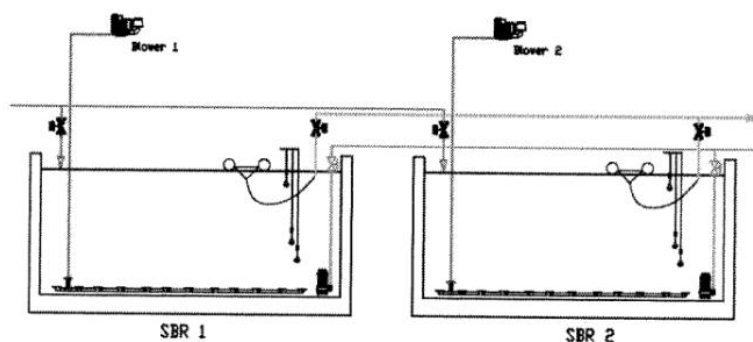
Po končni fazi sedimentacije se bistra voda (v zgornjem sloju) izčrpa iz SBR bazena s posebno plavajočo napravo, na katero je nameščena črpalka za praznjenje. Naprava deluje po principu sledenja razlike v višini vode. Znotraj biološkega tanka bo vedno ostala zadostna količina tekočega blata, pripravljenega za naslednji cikel. Odvečno blato se odstrani le po predhodni analizi stabilnosti sistema.

Po biološkem delu čiščenja se očiščena voda akumulira v zbiralniku za čisto vodo, kjer je pripravljena za dodatno obdelavo, in sicer filtracijo in oksidacijo oz. dezinfekcijo.

PRINCIP DELOVANJA:

SBR bazen se vedno polni do maksimalnega nivoja in sprazni do minimalnega nivoja v času, ki je določen za polnjenje. Če je čas polnjenja krajši, kot je kapaciteta črpalke, maksimalni nivo ne bo dosežen. Količina načrpane vode v SBR bazen se tako izračuna na podlagi razlike med minimalnim in maksimalnim nivojem ter površino SBR bazena.

Voda ob dekantaciji mora biti brez suspendiranih snovi (aktivnega blata), ker lahko zamaši sistem za dodatno obdelavo vode.

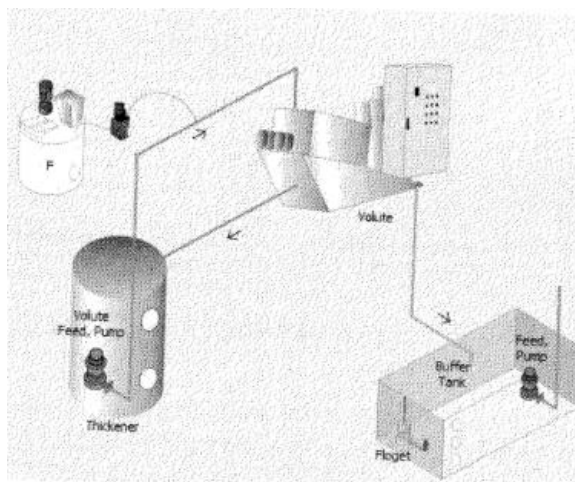


Slika 5: SBR bazena
(Vir: Posredovalo izbrano podjetje, 2025)

4.1.4 Obdelava blata

Preseženo biološko blato, ki se občasno odstranjuje iz SBR bazenov, se glede na analizo njegovega volumna prečrpa v bazen za blato (Slika 6). Prav tako se tja dovaja blato, ki je bilo separirano v prvi fazi DAF čiščenja. Strojno zgoščanje blata (dehidracijski sistem) je sestavljen iz Volute dehidracijske enote, ki vrši postopek zmanjševanja volumna in teže blata.

Delo, ki ga opravi enota Volute, je optimiziran z dodatkom flokulanta v blato. Flokulant se pripravi z avtomatsko enoto za pripravo ustrezne koncentracije tega produkta.



Slika 6: Obdelava blata
(Vir: Posredovalo izbrano podjetje, 2025)

PRINCIP DELOVANJA:

Strojno zgoščanje se začne, ko je dosežen minimalni nivo in se ustavi, ko nivo blata doseže minimalni nivo. Maksimalni nivo v bazenu za blato bo sprožilo alarm in ustavilo VAMEF.

Pri strojnem zgoščevanju je zelo pomembno, da se spremlja tako kvaliteta zgoščenega blata, kot tudi centrata, ki se vrača nazaj v predakumulacijski bazen. V primeru, da blato ni dovolj zgoščeno, bo centrat vseboval visoko koncentracijo suspendiranih snovi, ki se bodo ponovno izločile na napravi VAMEF in tako vrtele v sistemu.

4.1.5 Sistem za dodatno obdelavo vode.

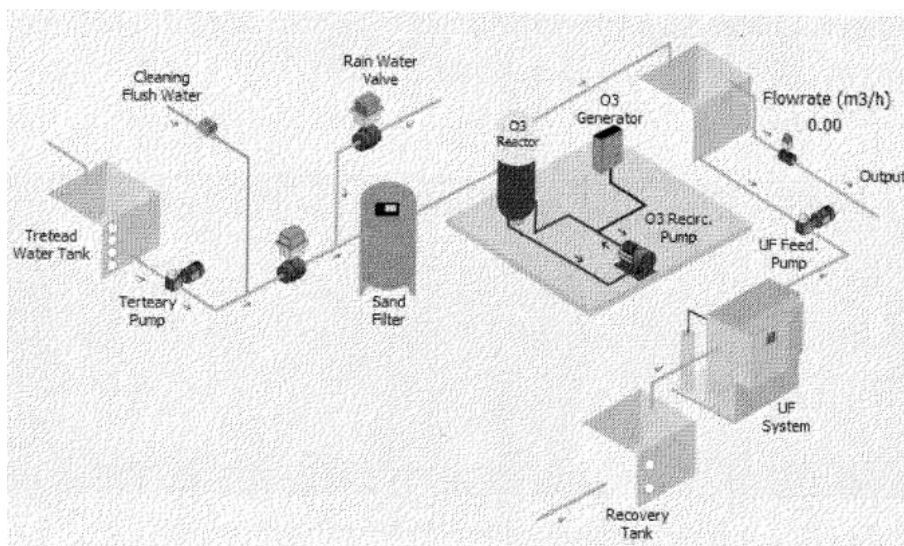
4.1.5.1 Filtracija

Očiščena voda iz SBR bazenov se iz zbiralnika za čiščeno industrijsko vodo prečrpa v sistem filtracije s peščenim filtrom (Slika 7). V sistem se izločijo suspendirani delci, ki se nahajajo v odpadni vodi in omogoča prvovrstno bistrost te vode. Ta sistem služi tudi kot zaščitni sistem za nadaljnjo oksidacijo.

4.1.5.2 Oksidacija – dezinfekcija

Za dezinfekcijo očiščene vode skrbi ozonska oksidacijska tehnologija. Ozon je zelo močen oksidant in omogoča zadostno dezinfekcijo in nasičenost s kisikom za iztok v naravovarstveno območje. V primerjavi z ostalimi dezinfekcijskimi tehnologijami ima ozon zelo močno oksidacijsko moč, ki jo nobena druga ne more preseči, prav tako pa ni odvisna od faze razbistritve in čiščenja odpadne vode, ki se jo očiščuje, kot ostale tehnologije npr. UV dezinfekcija.

Ker je ozon zelo močen in nestabilen plin, mora biti proizveden na mestu in uporabljen takoj. Zaradi tega sistem čiščenja temelji na ozonskem generatorju in reaktorju, ki zagotovi zadostno količino in mešanje ozona.



Slika 7: Sistem za dodatno obdelavo vode
(Vir: Posredovalo izbrano podjetje, 2025)

4.2 Okoljevarstveno dovoljenje podjetja

Izbranemu podjetju se je na podlagi prvega odstavka 84. člena *Zakona o varstvu okolja* izdalo okoljevarstveno dovoljenje glede emisij v vode za obratovanje naprave z zmogljivostjo 10.000 litrov predelanega mleka na dan. V prvem odstavku 22. člena *Uredbe o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih vod v vode in javno kanalizacijo* je predpisano, da mora za obratovanje naprave ali vsako večjo spremembo v obratovanju naprave, ki odvaja industrijske odpadne vode posredno v podzemne vode, pridobiti okoljevarstveno dovoljenje. Za zagotavljanje skladnosti z zakonodajo morajo izpolnjevati naslednje pogoje;

Povzeto po okoljevarstvenem dovoljenju podjetja, leta 2017.

Upravljalcu se na iztoku dovoli odvajanje industrijske odpadne vode, ki se predhodno očisti na industrijski čistilni napravi, posredno v podzemne vode v največji letni količini 17.885 m³, z največjo dnevno količino 49 m³ in z največjim 6-urnim povprečnim pretokom 1 l/s.

Upravljelec mora zagotoviti izvedbo prvih meritev in izvajanje obratovalnega monitoringa. Prve meritve se izvedejo med poskusnim obratovanjem ali pa po vzpostavitvi stabilnih obratovalnih razmer, vendar ne prej kot v treh in ne kasneje kot v devetih mesecih po zagonu industrijske čistilne naprave. V okviru izvedbe prvih meritev se morajo na merilnem mestu izvesti 6-urna vzorčenja odpadne vode trikrat letno v obsegu, ki je predpisan v Preglednici 2. Upravljelec mora zagotavljati, da v odpadni vodi iz iztoka ne bo preseženih mejnih vrednosti parametrov.

Preglednica 2: Parametri, katere se meri v okviru obratovalnega monitoringa na iztoku in njihove mejne vrednosti

Parameter	Izražen kot	Mejna vrednost
Temperatura		30 °C
pH – vrednost		6,5–9
Neraztopljene snovi		35 mg/L
Usedljive snovi		0,3 mg/L
Strupenost za vodne bolhe	S _D	2
Klor – prosti	Cl ₂	0,05 mg/L
Celotni klor	Cl ₂	0,4 mg/L
Amonijev dušik	N	5 mg/L
Celotni fosfor	P	1 mg/L
Sulfat	SO ₄	200 mg/L
Sulfid	S	0,1 mg/L
Sulfit	SO ₃	1 mg/L
Celotni organski ogljik (TOC)	C	30 mg/L
Kemijska potreba po kisiku (KPK)	O ₂	125 mg/L
Biokemijska potreba po kisiku (BPK ₅)	O ₂	25 mg/L
Težkohlapne lipofilne snovi (maščobe, mineralna olja...)		10 mg/L
Adsorbiljivi organski halogeni (AOX)	Cl	0,1 mg/L
Celotni dušik	N	10 mg/L
Koncentracija kisika	O ₂	90 %

(Vir: Okoljevarstveno dovoljenje podjetja, 2017)

Upravljalcu se na iztoku dovoli odvajanje komunalne odpadne vode v javno kanalizacijo v največji letni količini 650 m³, v največji dnevni količini 3 m³ in z največjim 6-urnim povprečnim pretokom 0,2 L/s. Zagotoviti mora odvajanje industrijske odpadne vode posredno v podzemne vode preko ustreznega objekta za ponikanje.

Upravljalca mora za izvajanje prvih meritev in obratovalnega monitoringa odpadnih vod zagotoviti stalno merilno mesto, ki je dovolj veliko in dostopno ter opremljeno tako, da je meritve mogoče izvajati merilno neoporečno, tehnično ustrezno in brez nevarnosti za izvajalca meritev.

Poročilo o prvih meritvah mora upravljalca predložiti Agenciji Republike Slovenije za okolje v tridesetih dneh po opravljenih meritvah, poročilo o obratovalnem monitoringu odpadnih vod pa vsako leto, najpozneje do 31. marca za preteklo leto.

Upravljalca mora imeti poslovnik za obratovanje industrijske čistilne naprave in zagotoviti vodenje obratovalnega dnevnika. Poslovnik je sestavljen iz navodil za spremljanje in vrednotenje pravilnega delovanja industrijske čistilne naprave. V navodilih je zapisano mesto, pogostost, čas in način vzorčenja ter parametri, ki se bodo merili v okviru lastnih meritev. Upravljalca mora v okviru teh meritev dnevno spremljati vsaj temperaturo, pH, koncentracijo kisika, KPK in celotni dušik. Rezultate lastnih meritev se beleži v obratovalni dnevnik.

Podjetje mora zagotoviti odgovorno osebo, ki skrbi za obratovanje in vzdrževanje industrijske čistilne naprave ter vodi obratovalni dnevnik.

Blato, ki nastaja pri obratovanju industrijske čistilne naprave, je potrebno oddati kot odpadke.

Podjetje mora pri obratovanju naprave izvajati posebne ukrepe, ki zmanjšujejo emisije snovi ali toplote zaradi odvajanja industrijskih odpadnih vod. Med te ukrepe sodijo: varčevanje z vodo, uporaba manj škodljivih surovin in materialov v tehnološkem postopku, uporaba čistil in dezinfekcijskih sredstev, ki vsebujejo čim manj adsorbiranih organskih halogenov (AOX), enakomerno odvajanje odpadne vode na čistilno napravo, zamenjava klora v dezinfekcijskih sredstvih z vodikovim peroksidom in perocetno, itd.

Upravljalca naprave je dolžen ob izpadu industrijske čistilne naprave ali ob kakršnikoli okvari v proizvodnji, ki bi lahko povzročila čezmerno obremenitev industrijskih odpadnih vod na iztoku, sam takoj začeti izvajati ukrepe za odpravo okvare. Tak dogodek je potrebno takoj prijaviti inšpekciji, pristojni za varstvo okolja in inšpekciji, pristojni za ribištvo.

Čistilna naprava se nahaja na zakraselem območju, kjer ni vodotokov, prav tako pa po mnenju upravljalca javne kanalizacije industrijske odpadne vode ni možno odvajati v javno kanalizacijo. Posledično se industrijska odpadna voda preko čistilne naprave odreja posredno v podzemno vodo. Med najvišjo gladino podzemne vode in dnem objekta za ponikanje se mora nahajati plast neomočenih sedimentov ali zemljin ali filtrnega materiala debeline najmanj 1 m.

Lokacija čistilne naprave predstavlja življenjski prostor človeške ribice, zato sta parametra sulfat (SO_4) in koncentracija kisika prilagojena glede na njene življenjske potrebe.

Koncentracija kisika mora namreč dosegati 90 %, za sulfat pa je mejna vrednost 200 mg/L (Preglednica 2).

4.3 Materiali in metode dela

Namen vzorčenja je pridobiti reprezentativne vzorce odpadne vode za analizo predvidenih parametrov. Na osnovi pridobljenih rezultatov se izvede primerjava vhodnih koncentracij BPK₅, KPK in celotnega dušika po fizikalno-kemijskem čiščenju z dimenzioniranimi vrednostmi in ocena učinkovitosti delovanja čistilne naprave v izbranem podjetju, glede na BPK₅, KPK in celotni dušik.

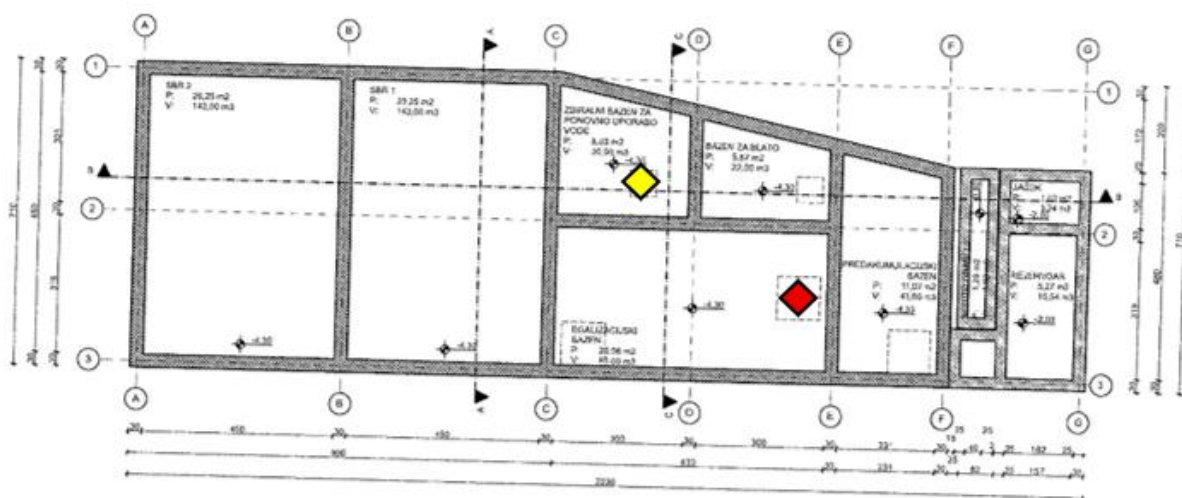
4.3.1 Vzorčenje

Vzorčenje sem izvedla ročno, neposredno po fizikalno-kemijskem čiščenju v egalizacijskem bazenu in na iztoku iz čistilne naprave. V času vzorčenja postopek oksidacije z ozonom ni deloval, kar pomeni, da je bil iztok odvzet po terciarni stopnji čiščenja. Za vzorčenje sem uporabila čisto plastenko, ki sem jo predhodno izprala z vzorcem. Glede na način vzorčenja sem izbrala naključni oz. trenutni vzorec, ob enakem času, da so med seboj primerljivi.

Po odvzemu sem vzorce zamrznila na temperaturo -18 °C in s tem preprečila biokemijske spremembe in razgradnjo organskih snovi, ki bi lahko vplivali na končne rezultate.

Vtoki: Vzorčenje štirih vtokov (1 L) iz egalizacijskega bazena (po fizikalno-kemijskem čiščenju) od 2. 6. 2025 do 5. 6. 2025 (Slika 8, rdeč kvadrat). Vtoki so bili odvzeti ob 15. uri, ko se proizvodnja konča in voda fizikalno-kemijsko obdela.

Iztoki: Vzorčenje štirih iztokov (1 L) iz bazena za čisto vodo od 3. 6. 2025 do 6. 6. 2025 (Slika 8, rumeni kvadrat). Zaradi zadrževalnega časa, ki omogoča šaržnemu reaktorju (SBR) popolno obdelavo odpadne vode, sem vzorce iztokov vzela naslednji dan ob 20. uri.



Slika 8: Rdeč kvadrat prikazuje vzorčevalno mesto vtoka po fizikalno-kemijski obdelavi, rumen kvadrat pa iztok iz čistilne naprave

Vzorce vtokov in iztokov sem analizirala trikrat za vsak parameter, s čimer sem zagotovila večjo reprezentativnost vzorcev.

4.3.2 Merjenje pH

Ime metode: SIST ISO 10523 (1996)

Princip delovanja: pH meter meri kislost ali bazičnost raztopine na podlagi električne napetosti, ki nastane med dvema elektrodama, in sicer merilno in referenčno. Merilna elektroda zaznava koncentracijo vodikovih ionov (H^+) v vzorcu, referenčna elektroda pa služi kot primerjalna osnova. Razlika v napetosti med elektrodama je odvisna od pH vrednosti raztopine. Naprava to razliko pretvori v pH vrednost, ki jo prikaže na zaslonu. Meritve temeljijo na Nernstovi enačbi in so odvisne tudi od temperature, zato je pomembna pravilna kalibracija in stabilno temperaturno okolje.

Uporabljena oprema: LLG-pH meter 7



*Slika 9: pH meter
(Vir: foto. J. Pivk, 2025)*

Območje določitve: od 0 do 14

Opis izvedbe analize:

Za merjenje pH vrednosti vzorcev sem uporabila namizni pH meter z ustrezno kalibrirano stekleno elektrodo. Vzorci so bili pred meritvijo segreti na sobno temperaturo približno 20 °C. Meritve sem izvedla tako, da sem elektrodo potopila v dekantiran vzorec (brez usedlin) in počakala, da se vrednost na zaslonu stabilizira, nato pa rezultat zabeležila. Elektrodo sem med posameznimi vzorci temeljito splaknila z deionizirano vodo in s tem preprečila kontaminacijo med meritvami. Po končanih meritvah sem shranila elektrodo v pokončen položaj in jo zaščitila s pokrovom, v katerem je KCl.

4.3.3 Merjenje elektroprevodnosti

Ime metode: SIST EN 27888 (1993)

Princip delovanja: Merilnik elektroprevodnosti deluje na osnovi merjenja sposobnosti raztopine, da prevaja električni tok. Med dvema elektrodama teče tok, naprava pa na osnovi upora oziroma toka izračuna prevodnost. Bolj kot je raztopina ionsko bogata, višja je izmerjena prevodnost.

Uporabljena oprema: prenosni merilnik elektroprevodnosti WTW Multi 3620 IDS



Slika 10: Prenosni merilnik elektroprevodnosti
(Vir: foto. J. Pivk, 2025)

Območje določitve: 0,000 μ S/cm do 500 mS/cm

Opis izvedbe analize:

Za merjenje elektroprevodnosti vzorcev sem uporabila ustrezno kalibriran prenosni merilnik elektroprevodnosti. Vzorci so bili pred meritvijo segreti na sobno temperaturo približno 20 °C. Elektrodo sem potopila v vzorec in počakala, da se vrednost ustali ter zabeležila rezultat.

4.3.4 Določitev celotnega dušika

Analizna metoda se uporablja za območje od 5 do 40 mg/L TN_b.

Ime metode: EN ISO 11905-1, ISO23697-1 – kivetni test HACH TN_b LCK 238

Princip delovanja: test LCK 238 omogoča določanje celotno vezanega dušika, vključno z amonijevim, nitritnim, nitratnim in organsko vezanim dušikom. Razkroj poteka po metodi Koroleff (peroksodisulfat) in fotometrično zaznavanje 2,6-dimetilfenola.

Uporabljena oprema: VELP OV5 homogenizator, spektrofotometer HACH DR3900 s tehnologijo RFID, HACH HT200S visokotemperaturni termostat



Slika 11: Visokotemperaturni termostat
(Vir: foto. J. Pivk, 2025)

Opis izvedbe analize:

Na vtoku je bilo pričakovati višje vrednosti TN_b , kot je zgornja meja kivetnega testa LCK 238, zato je bilo potrebno vzorec redčiti. Začela sem z 1 minuto homogenizacije čistega vzorca, nato pa ga razredčila v razmerju 1 : 3, kar pomeni, da sem v bučko s prostornino 100 mL odmerila 25 mL vzorca in 75 mL deionizirane vode. Vzorca na iztoku ni bilo potrebno homogenizirati, saj ni vseboval usedlin, ne redčiti, saj smo pričakovali nižje vrednosti od maksimalne, zgornje meje. V prazno kiveto sem odmerila 0,5 mL vzorca, nato dodala 2,0 mL reagenta A in na koncu eno tableto iz epruvete B. Kiveto sem zaprla s pokrovčkom in jo postavila v visokotemperaturni termostat. Po 15 minutah sem počakala na ohladitev do sobne temperature in jo 3 krat obrnila. Iz pripravljene raztopine sem odpipetirala 0,5 mL vzorca v že pripravljeno kiveto z reagenti. Kiveto sem zaprla, premešala in počakala 15 minut. V zadnjem koraku sem kiveto obrisala, jo vstavila v fotometer in zabeležen rezultat na vtoku pomnožila s faktorjem redčenja – 4. Iztok sem samo prepisala. Celotni postopek sem ponovila trikrat za vsak vzorec in na koncu izračunala povprečno vrednost.

4.3.5 Določitev KPK

Analizna metoda se uporablja za območje od 15 do 150 mg/L O_2

Ime metode: ISO 6060-1989, DIN 38409-H41-H44 – kivetni test HACH COD LCK 314

Princip delovanja: metoda temelji na principu oksidacije organskih snovi z močnim oksidacijskim sredstvom – kalijevim dikromatom ($K_2Cr_2O_7$) in žvepleno kislino (H_2SO_4) po metodi z zaprtim refluxom in spektrofotometrično določitvijo KPK.

Uporabljena oprema: VELP OV5 homogenizator, spektrofotometer HACH DR3900 s tehnologijo RFID, HACH HT200S visokotemperaturni termostat



Slika 12: Spektrofotometer
(Vir: foto. J. Pivk, 2025)

Opis izvedbe analize:

Zaradi pričakovanih visokih vrednosti KPK na vtoku je bilo potrebno vzorec predhodno razredčiti. Najprej sem ga eno minuto homogenizirala s soničnim homogenizatorjem, nato pa ga razredčila v razmerju 1 : 24, in sicer tako, da sem v 250 ml bučki odmerila 10 mL vzorca in ga pomešala z 240 mL deionizirane vode. V predhodno premešano kiveto z reagenti sem odmerila 2 mL razredčenega vzorca iz vtoka. Vzorec na iztoku sem testirala direktno, brez homogenizacije ali redčitve. Kiveto se zaprla s pokrovčkom, vsebino ponovno premešala in jo postavila v visokotemperaturni termostat za 15 min. Vzorec sem še vroč ponovno premešala in počakala, da se ohladi na sobno temperaturo ter da se usedline usedejo na dno. Nato sem kiveto obrisala in jo vstavila v fotometer, ki je na podlagi adsorbance določil koncentracijo KPK v mg O₂/L. Ker gre za razredčen vzorec vtoka, sem dobljeno vrednost pomnožila s faktorjem redčenja (25) in na ta način izračunala dejansko koncentracijo KPK v originalnem vzorcu. Celoten postopek sem ponovila trikrat za vsak vzorec in iz rezultatov izračunala povprečno vrednost.

4.3.6 Določitev BPK5

Analizna metoda se uporablja za območja od 0 do 4000 mg O₂/L nerazredčenega vzorca.

Ime metode: Interna metoda SAP 2 – določitev BPK5 PO WTW manometrični metodi.

Princip delovanja: Merjenje BPK poteka manometrično (merjenje sprememb v tlaku) v zaprtem sistemu OxiTop. V preteklosti so za merjenje BPK uporabljali živo srebro, danes pa ta metoda predstavlja okoljsko tveganje zaradi toksičnosti živega srebra, zato se opušča in nadomešča z manometrično. Sistem deluje na podlagi merjenja podtlaka, ki nastane v merilni steklenici in se zaznava z OxiTop merilno glavo, ki je zelo občutljiv tlačni senzor. Izmerjeni tlak se nato samodejno pretvori v končni rezultat, ki se izpiše v enoti mg O₂/L. Oksidacijo amonija pri meritvi inhibiramo z NTH 600 nitrifikacijskim inhibitorjem. Mikroorganizmi v vzorcu porabljajo kisik in tvorijo CO₂, ta se adsorbira v tableti natrijevega hidroksida in nastane podtlak.

Uporabljena oprema: WTW-OxiTop merilne glave, inkubacijske steklenice, termostatska omara in magnetno stojalo za inkubacijske steklenice.



Slika 13: Inkubacijske steklenice v termostatski omari na magnetnem stojalu
(Vir: foto. J. Pivk, 2025)

Opis izvedbe analize:

Najprej sem glede na izmerjen KPK določila pričakovano vrednost BPK_5 . Pri industrijskih odpadnih vodah je BPK_5 približno 70 % vrednosti KPK. Glede na pričakovani rezultat sem iz Preglednice 3 izbrala ustrezen volumen vzorca, in sicer 365 mL za iztok in 43,5 mL za vtok.

Preglednica 3: Tabela za izbor volumna vzorca

VOLUMEN VZORCA (mL)	MERILNO OBMOČJE (mg/L)	FAKTOR
432	0–40	1
356	0–80	2
250	0–200	5
164	0–400	10
97	0–800	20
43,5	0–2000	50
22,7	0–4000	100

(Vir: J. Pivk, 2025)

Dobro premešane vzorce se odmeri v ustrezno »overflow« bučko. Te se prelije v inkubacijsko steklenico, ki je predhodno dvakrat sprana z vzorcem in nato osušena. V vsako steklenico damo paličasti magnet in inhibitor NTH 600, ki prepreči tvorjenje CO_2 z amonijem. Število kapljic se prilagodi volumnu vzorca (Preglednica 4). V vsako steklenico vstavimo gumijasti zamašek in vanj dve granuli NaOH. Na OxiTop glavi nastavimo ustrezne volumne vzorca in čas merjenja ter pritisnemo tipko za začetek. Steklenice vstavimo na magnetno stojalo v termostatsko omaro, kjer je stalnih 20 °C in po petih dneh odčitamo rezultate, izražene v $mg\ O_2/L$.

Preglednica 4: Tabela za določitev števila kapljic inhibitorja NTH 600

VOLUMEN VZORCA (mL)	MERILNO OBMOČJE (mg/L)	ŠT. KAPLJIC INHIBITORJA
432	0–40	9
356	0–80	7
250	0–200	5
164	0–400	3
97	0–800	2
43,5	0–2000	1
22,7	0–4000	1

(Vir: J. Pivk, 2025)

5 REZULTATI MERITEV IN RAZPRAVA

Eksperimentalni del diplomske naloge je osredotočen na analizo učinkovitosti delovanja biološke čistilne naprave v izbranem podjetju, ki se ukvarja z mlekarsko dejavnostjo. Analiza temelji na lastnih meritvah parametrov KPK, BPK₅, celotnega dušika, pH in prevodnosti na vtoku v šaržni reaktor (po fizikalno-kemijskem čiščenju) in na iztoku iz naprave.

5.1 Rezultati laboratorijskih meritev in analiz

V Preglednici 5 so prikazani rezultati meritev parametrov trenutnih vzorcev mlekarske odpadne vode na vtoku, po fizikalno-kemijskem čiščenju in na iztoku iz čistilne naprave. Meritve so bile izvedene v laboratoriju Fakultete za varstvo okolja v Velenju. Vzorci so bili zamrznjeni in odtajani na sobno temperaturo na dan meritev. Vsak vzorec je bil analiziran v treh ponovitvah, kar omogoča večjo natančnost in zanesljivost meritev, s čimer se poveča tudi reprezentativnost analitskega rezultata.

Preglednica 5: Rezultati laboratorijskih analiz industrijske odpadne vode na vtoku in iztoku iz čistilne naprave

ID vzorca	Št. Ponovitev	pH	Prevodnost [μS/cm]	KPK [mg/L]	BPK ₅ [mg/L]	TN [mg/L]
Vtok 1	1	6,1	3720	2164	825	22
	2			2403	824	53,2
	3			1073	404	44,8
Iztok 1	1	6,6	774	63,7	46,5	5,3
	2			56,7	47,5	<5
	3			54,2	47,2	5,1
Vtok 2	1	6,7	3120	1414	703	34,1
	2			2183	720	43,6
	3			1620	668	54,4
Iztok 2	1	6,8	667	40,4	35,5	<5
	2			45,3	33,6	<5
	3			43	34,2	<5
Vtok 3	1	6,6	3130	1736	1002	47,6
	2			1738	834	53,2
	3			1790	701	46,8
Iztok 3	1	6,9	570	30	26,5	<5
	2			30,1	25,5	<5
	3			29,6	24,9	<5
Vtok 4	1	6,3	3390	1441	854	31,3
	2			1980	932	54
	3			2383	770	19,2
Iztok 4	1	6,7	478	15,6	15,7	<5
	2			15,8	16,8	<5
	3			12,9	16	<5

(Vir: J. Pivk, 2025)

Paralelke za parametre KPK, BPK₅ in TN so si bile dokaj podobne. Kjer so bila odstopanja večja od 20 % glede na dva bolj ujemajoča rezultata, se vrednosti niso upoštevala h končnemu izračunu povprečja. Do odstopanj bi lahko prišlo zaradi neenakomerne homogenizacije pri redčenju vzorcev, med pipetiranjem ali v merilni tehniki.

Vrednosti pH so na vtoku v šaržni reaktor in na iztoku iz čistilne naprave dokaj podobne. Glede na postavitev čistilne naprave menim, da se pH vrednost najbolj spremeni na fizikalno-kemijskem čiščenju, kjer se glede na pH surove vode dodaja baza, koagulant in flokulant. Sem mnenja, da je to razlog, da so izmerjene vrednosti dokaj podobne na vtoku v šaržni reaktor in iztoku iz čistilne naprave.

Preglednica 6: Dnevni pretoki in povprečni rezultati meritev

Datum vzorčenja	Pretok [m ³ /dan]	Vtok					Iztok				
		pH	Prevodnost [μS/cm]	KPK [mg/L]	BPK5 [mg/L]	TN [mg/L]	pH	Prevodnost [μS/cm]	KPK [mg/L]	BPK5 [mg/L]	TN [mg/L]
2.06.2025	44	6,1	3720	2283	824	49	/	/	/	/	/
3.06.2025	35	6,7	3120	1517	697	38,8	6,6	774	58,2	47,1	5,1
4.06.2025	30	6,6	3130	1755	768	49,2	6,7	667	42,9	34,4	<5
5.06.2025	38	6,3	3390	2181	852	25,2	6,9	570	29,9	25,6	<5
6.06.2025		/	/	/	/	/	6,7	478	14,8	16,2	<5

(Vir: J. Pivk, 2025)

V analiziranih vzorcih je bila električna prevodnost na vtokih zelo visoka, s povprečnimi vrednostmi 3340 μS/cm, kar kaže na močno ionsko obremenitev industrijske odpadne vode (Preglednica 6). Po čiščenju so bile izmerjene vrednosti nižje, in sicer povprečno 622 μS/cm, kar pomeni, da je bil velik del raztopljenih snovi odstranjen (Preglednica 6). Mejna vrednost prevodnosti ni regulirana za odpadne vode.

Pretok se dnevno spreminja glede na delovanje proizvodnje in ne presega najvišje dovoljene vrednosti, in sicer 49 m³/dan.

Na razlike v dnevnih vtokih na čistilno napravo bi lahko vplivalo delovanje proizvodnje. Imajo določen sistem, kjer je en dan proizvodnja, naslednji dan sprejem mleka in tako dalje. Od podjetja sem dobila informacijo, da je bilo na dan odvzetega 4. vzorca vtoka proizvodnja izdelkov z dodatkom proteinov. Skleпам, da je to vzrok za visoko vrednost parametrov KPK in BPK₅.

Izmerjenega skupnega dušika je bilo na iztokih večinoma pod 5 mg/L. Točnih koncentracij nimamo, saj so bile pod spodnjo mejo območja merjenja.

5.2 Učinkovitost čiščenja čistilne naprave

Preglednica 7 prikazuje učinek čiščenja za parametre KPK, BPK₅ in celotni dušik. Za izračun so bile uporabljene povprečne vrednosti za vsak vtok in iztok iz čistilne naprave. Pri celotnem dušiku sem na mestu, kjer je bilo izmerjeno < 5 (kar je spodnja meja izbrane analizne metode), upoštevala 5 mg/L.

Preglednica 7: Učinek čiščenja za posamezne parametre

Datum	UČINKOVITOST ČIŠČENJA KPK	UČINKOVITOST ČIŠČENJA BPK ₅	UČINKOVITOST ČIŠČENJA TN
2.06.2025	97,5	94,3	89,6
3.06.2025	97,2	95,1	87,1
4.06.2025	98,3	96,7	89,8
5.06.2025	99,3	98,1	80,2

(Vir: J. Pivk, 2025)

Učinkovitost čiščenja nam pove, koliko snovi je bilo odstranjenih iz odpadne vode med čiščenjem (v odstotkih).

Izračuna se jo po enačbi:

$$\text{Učinkovitost} = \frac{\text{koncentracija vhodne snovi} - \text{koncentracija izhodne snovi}}{\text{koncentracija vhodne snovi}} * 100$$

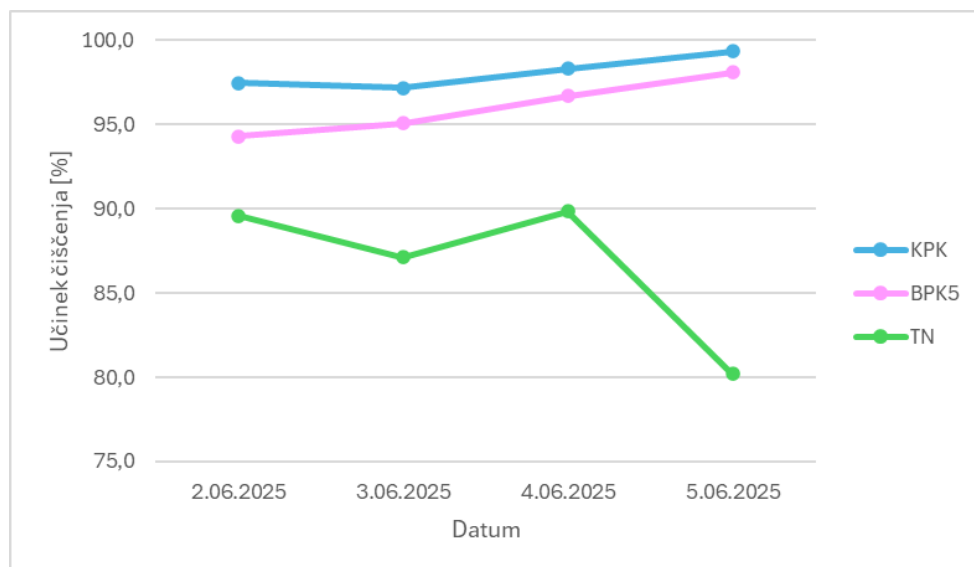
Učinkovitost čiščenja za KPK in BPK₅ je bila v vseh primerih višja od 94 %, kar pomeni visoko učinkovitost odstranjevanja organskih snovi (Preglednica 7). Povprečna učinkovitost čiščenja za parameter KPK je bila 98,1 %, za BPK₅ 96 %, za skupni dušik pa 86,7 %. Kljub temu, da je učinkovitost čiščenja skupnega dušika nekoliko nižja, so bile vse vrednosti na iztoku pod mejno vrednostjo 10 mg/L, kar pomeni, da naprava zadovoljuje okoljsko-pravne zahteve.

Kljub visoki učinkovitosti čistilne naprave pri odstranjevanju biološko razgradljivih snovi (izraženih kot BPK₅) so bile vrednosti na iztoku nad mejno vrednostjo. Razlogov za to je lahko več, in sicer neravnovesje hranil v biološkem reaktorju, prenizka temperatura, kratek zadrževalni čas preobremenjenost, itd.

Poleg laboratorijskih analiz, izvedenih v okviru eksperimentalnega dela, sem pridobila tudi dve poročili podjetja, ki vsebujeta podatke o izmerjenih koncentracijah BPK₅ na iztoku iz čistilne naprave. V obeh primerih so bile izmerjene vrednosti bistveno nižje od tistih, ki sem jih izmerila sama. BPK₅ je bil v poročilu iz leta 2018 6 mg/L, v poročilu iz leta 2021 pa 4 mg/L, medtem, ko so bile vrednosti mojih analiz po terciarni stopnji med 47,1 in 16,2 mg/L. V času vzorčenja ni deloval postopek ozonacije, kar lahko vpliva na končno razgradnjo organskih snovi. Njihove analize so bile sicer izvedene po metodi SIST EN ISO 5815-1:2019.

Graf 1 prikazuje učinek čiščenja za parametre KPK, BPK₅ in TN. Učinkovitost čiščenja organskih snovi, prikazanih kot KPK in BPK₅, dnevno narašča in se bliža 100 %, celotni dušik pa z dnevi niha. Pri rezultatu učinkovitosti čiščenja celotnega dušika moramo upoštevati, da je bila v zadnjih treh dneh uporabljena spodnja meja detekcije izbrane analizne metode, in

sicer 5 mg/L, saj točne vrednosti koncentracije TN zaradi omejitve metode ne poznamo. Podatek lahko bistveno vpliva na rezultat učinkovitosti čiščenja tega parametra, vendar pa je vzrok za nižji učinek čiščenja tudi nižja koncentracija TN na vtoku v reaktor.



Graf 1: Učinek čiščenja glede na parametre KPK, BPK₅ in TN

5.3 Razmerje med BPK₅ in KPK

BPK₅ predstavlja količino kisika, ki jo porabijo mikroorganizmi pri razgradnji biorazgradljivih organskih snovi v odpadni vodi, KPK pa količino kisika, ki je potrebna za popolno oksidacijo vseh organskih snovi v vodi s pomočjo močnega oksidanta. Razmerje med BPK₅ in KPK nam pove, kolikšen del organske snovi je mikrobiološko razgradljiv.

Razmerje se izračuna po naslednji enačbi:

$$\text{Razmerje} = \frac{\text{BPK}_5}{\text{KPK}}$$

- Če je $\text{BPK}_5/\text{KPK} > 0,5$ pomeni, da je več kot polovica organske snovi biorazgradljive, kar pomeni, da je odpadna voda primerna za biološko čiščenje.
- Če je BPK_5/KPK med 0,3 in 0,5, je biorazgradljivost srednja.
- Če je $\text{BPK}_5/\text{KPK} < 0,2$, je voda slabo razgradljiva in so potrebni dodatni postopki čiščenja, npr. kemična oksidacija.

Preglednica 8: Razmerje med BPK₅ in KPK za vtok po fizikalno-kemijskem čiščenju

Datum	Razmerje BPK ₅ /KPK
2.06.2025	0,4
3.06.2025	0,5
4.06.2025	0,4
5.06.2025	0,4

(Vir: J. Pivk, 2025)

V našem primeru (Preglednica 8) je razmerje na vtoku na čistilno napravo po fizikalno-kemijskem čiščenju med 0,4 in 0,5, kar kaže na zmerno biorazgradljivost odpadne vode. Dobljene vrednosti so za mlekarne pričakovane, saj so prisotne tako enostavne organske snovi (laktaza, beljakovine, itd.), kot tudi nekaj težje razgradljivih komponent (maščobe, detergenti, itd.).

5.4 Primerjava med dimenzioniranimi in izmerjenimi vrednostmi

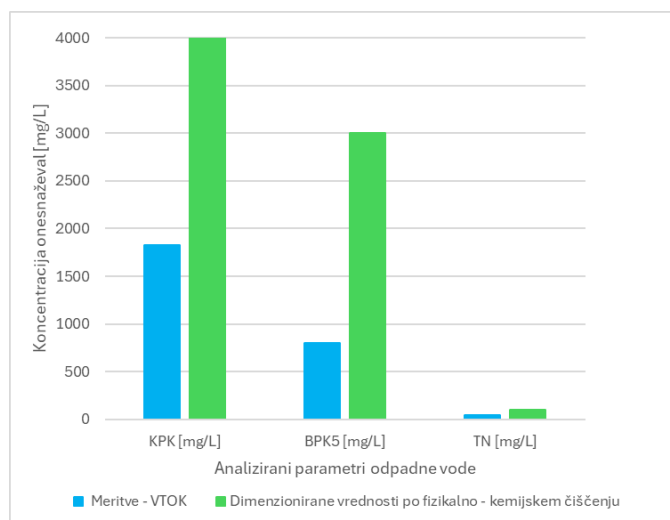
Preglednica 9 prikazuje povprečne vrednosti laboratorijske meritve posameznih parametrov in dimenzionirane vrednosti na čistilni napravi na merilnem mestu vtoka, po fizikalno-kemijskem čiščenju. Iz podatkov je razvidno, da povprečne izmerjene vrednosti izbranih parametrov ne presegajo dimenzioniranih in pomeni, da naprava ni preobremenjena.

Preglednica 9: Povprečne laboratorijske meritve in dimenzionirane vrednosti za izbrane parametre po fizikalno-kemijskem čiščenju

Parameter	Meritve - VTOK	Dimenzionirane vrednosti – po fizikalno-kemijskem čiščenju
pH	6,4	/
Prevodnost [μS/cm]	3340	/
KPK [mg/L]	1934	4000
BPK ₅ [mg/L]	785	3000
TN [mg/L]	40	100

(Vir: J. Pivk, 2025)

Rezultati meritev so pokazali, da so bile koncentracije KPK, BPK₅ in TN po fizikalno-kemijskem čiščenju znatno pod dimenzioniranimi vrednostmi (Graf 2). Povprečne izmerjene vrednosti KPK na vtoku so znašale 1934 mg/L, kar je za 51,6 % manj v primerjavi z dimenzioniranimi. Prav tako so bile povprečne vrednosti BPK₅ nižje od dimenzioniranih, in sicer za 74,7 %. Vrednosti skupnega dušika so bile prav tako nižje od dimenzioniranih, in sicer za 60 %. Električne prevodnosti in pH koncentracije nisem primerjala, saj v projektni dokumentaciji ni bilo podatka o teh parametrih.



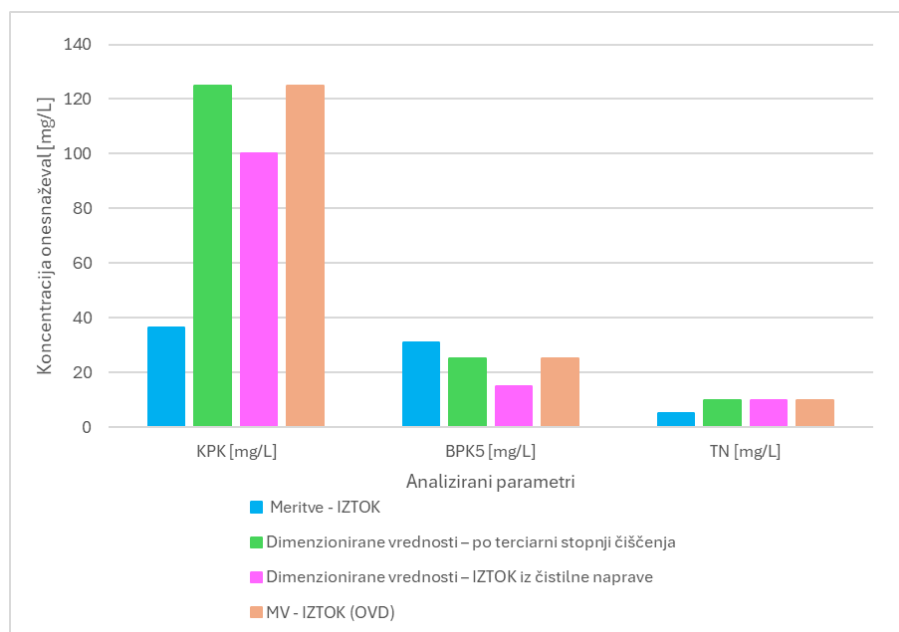
Graf 2: Primerjava dimenzioniranih vrednosti po fizikalno-kemijskem čiščenju z izmerjenimi vrednostmi
(Vir: J. Pivk, 2025)

Preglednica 10: Povprečne laboratorijske meritve, dimenzionirane vrednosti po terciarni stopnji čiščenja in po iztoku iz čistilne naprave ter mejne vrednosti iz OVD na iztoku

Parameter	Meritve - IZTOK	Dimenzionirane vrednosti – po terciarni stopnji čiščenja	Dimenzionirane vrednosti – IZTOK iz čistilne naprave	MV - IZTOK (OVD)
pH	6,7	7,2 - 7,8	7,2 - 7,8	6,5 - 9,0
Prevodnost [μS/cm]	622	/	/	/
KPK [mg/L]	36,4	125	<100	125
BPK ₅ [mg/L]	30,8	25	<15	25
TN [mg/L]	5	10	<10	10

MV – Mejne vrednosti po Uredbi o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda v vode in javno kanalizacijo (Uradni list RS, št. 64/12, 64/14, 98/15, 44/22 – ZVO-2, 75/22 in 157/22)

OVD – okoljevarstveno dovoljenje
(Vir: J. Pivk, 2025)



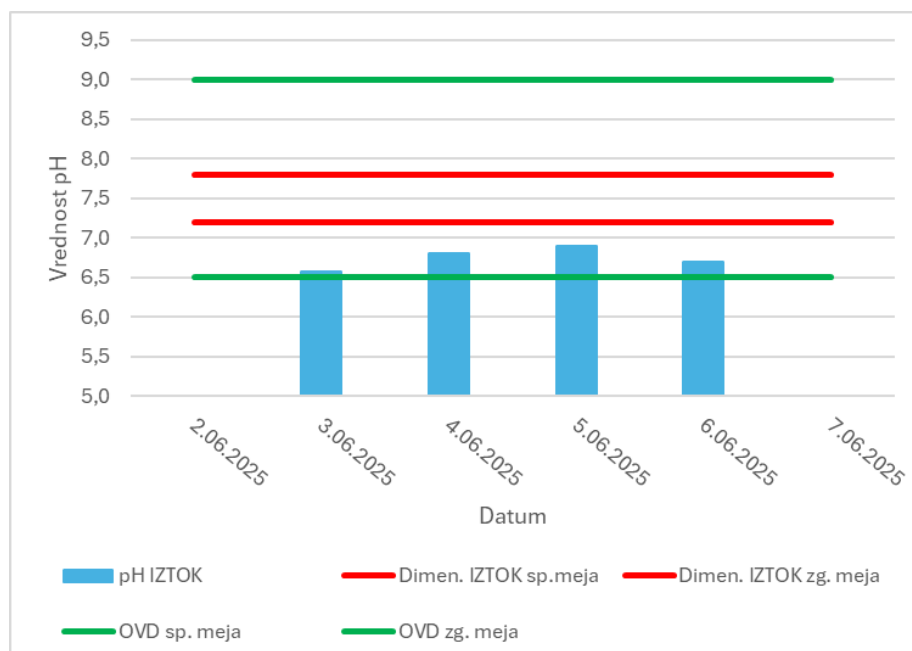
Graf 3: Primerjava povprečnih laboratorijskih meritev z dimenzioniranimi vrednostmi po terciarni stopnji čiščenja in po iztoku iz čistilne naprave ter z mejnimi vrednostmi na iztoku iz okoljevarstvenega dovoljenja

Kot je razvidno iz Preglednice 10 in Grafa 3, so rezultati iztoka izmerjenih parametrov KPK in TN pod dimenzioniranimi in mejnimi vrednostmi, razen BPK₅, ki jih presega. Med terciarno stopnjo čiščenja in iztokom je še postopek filtracije in oksidacije z ozonom, ki vodo še dodatno očisti, saj so vrednosti parametrov zaradi občutljivega območja lokacije podjetja načrtovane na nižje vrednosti, kot to narekuje zakonodaja v okoljevarstvenem dovoljenju. Povprečna vrednost izmerjenega parametra KPK je bila 36,4 mg/L, kar je za 63,6 % manj od dimenzionirane vrednosti na iztoku in za 70,9 % manj od dimenzionirane vrednosti po terciarni stopnji čiščenja in mejne vrednosti iz OVD. Povprečna vrednost štirih vzorcev iztoka iz čistilne naprave za parameter BPK₅ je 30,8 mg/L, kar pomeni, da presega mejne vrednosti na izpustu in dimenzionirane vrednosti po terciarni stopnji čiščenja za 23,2 % in dimenzionirane vrednosti na iztoku za 105 %. Povprečne izmerjene vrednosti skupnega

dušika so bile pod 5 mg/L, kar pomeni za približno 50 % manj od dimenzioniranih in mejnih vrednosti.

Iz podatkov je razvidno, da parameter BPK_5 ne dosega predpisanih mejnih vrednosti odpadne vode za iztok v okolje. Glede na to, da je BPK_5 na iztoku iz čistilne naprave razmeroma visok, lahko sklepamo, da se biološki proces razgradnje organskih snovi še ni popolnoma zaključil. To lahko pomeni, da ni bilo doseženo optimalno delovanje mikroorganizmov oz. aktivnega blata. Ne smemo zanemariti tudi napak v meritvah, saj je na primer težko verjetno v iztoku 4 (Preglednica 5) BPK_5 višji od KPK.

Menim, da bi z izvajanjem postopka oksidacije z ozonom lahko znižali vrednost BPK_5 na iztoku iz čistilne naprave.



Graf 4: Prikaz pH vrednosti iztoka glede na spodnjo in zgornjo mejo okoljevarstvenega dovoljenja in dimenzioniranih vrednosti na iztoku iz čistilne naprave

Povprečni pH štirih vzorcev iztoka je bil 6,7. Za pH vrednost moramo gledati območje, v katerem se le-ta lahko giblje. Torej, glede na OVD je pH vrednost lahko v območju med 6,5 in 9,0 (oziroma, če bi veljale dimenzionirane mejne vrednosti, bi bilo to območje med 7,2 in 7,8, znotraj rdečih črt na Grafu 4). Rezultati meritev kažejo, da pH vrednost ne dosega predvidenih vrednosti, dosega pa zakonsko predpisna v OVD.

Električne prevodnosti ni bilo moč primerjati, saj zanjo ni določenih mejnih in ne dimenzioniranih vrednosti.

5.5 Breme onesnaženja

Preglednica 11: Prikaz bremena onesnaženja za parametre KPK, BPK₅ in TN na vtoku in iztoku

Datum	2.06.2025	3.06.2025	4.06.2025	5.06.2025
Pretok [m³/dan]	44	35	30	38
Breme KPK VTOK [kg/dan]	100	53,1	52,6	82,9
Breme BPK ₅ VTOK [kg/dan]	36,3	24,4	23,0	32,4
Breme TN VTOK [kg/dan]	2,2	1,4	1,5	1,0
Breme KPK IZTOK [kg/dan]	2,6	1,5	0,9	0,6
Breme BPK ₅ IZTOK [kg/dan]	2,1	1,2	0,8	0,6
Breme TN IZTOK [kg/dan]	0,2	0,2	0,2	0,2
Odstranjeno breme KPK v kg/dan	97,9	51,6	51,7	82,3
Odstranjeno breme BPK₅ v kg/dan	34,2	23,2	22,3	31,8
Odstranjeno breme TN v kg/dan	1,9	1,2	1,3	0,8

(Vir: J. Pivk, 2025)

Breme onesnaženja sem izračunala po enačbi:

$$L = Q * c,$$

kjer je:

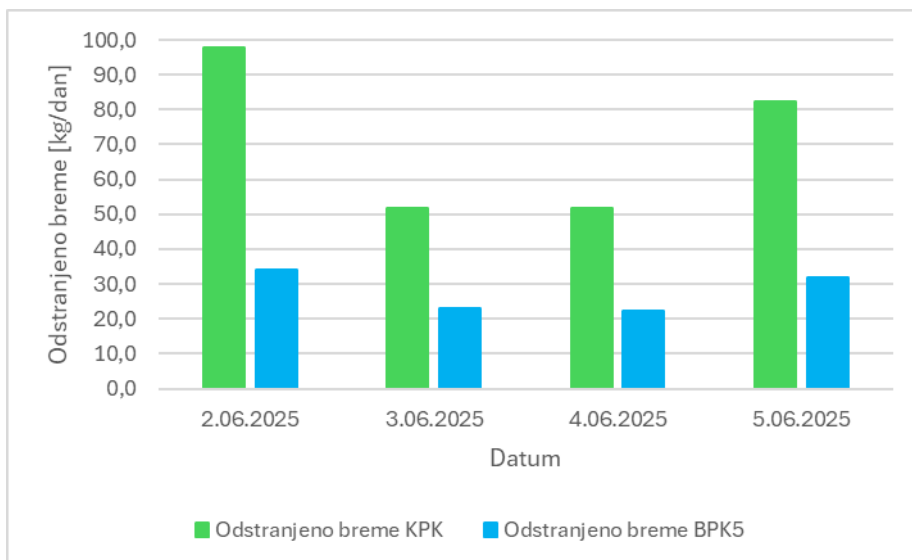
L = breme onesnaženja

Q = pretok

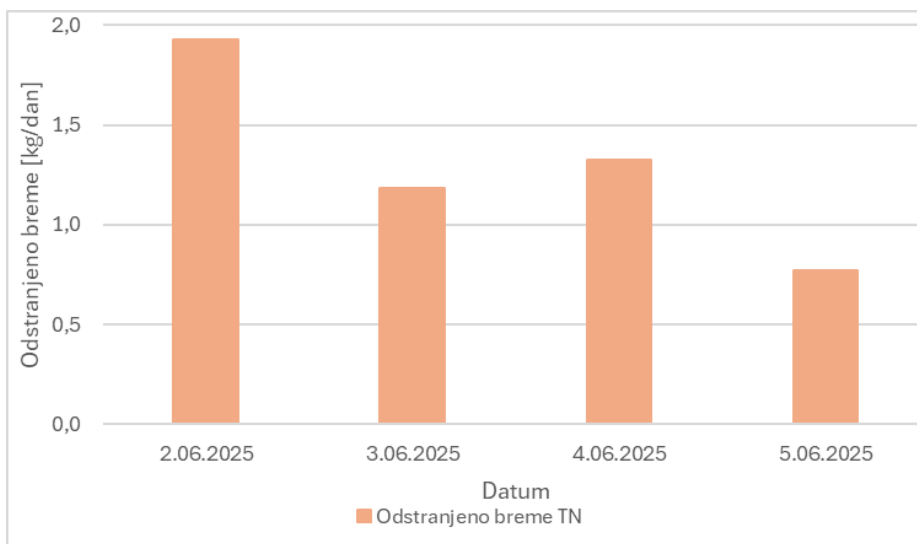
c = koncentracija snovi

Prikazane vrednosti predstavljajo dejansko dnevno maso onesnaževal na vtoku po fizikalno-kemijskem čiščenju in iztoku v obdobju od 2. do 5. junija. Za izračun bremena onesnaženja za posamezen parameter sem pri koncentraciji snovi izbrala povprečne izmerjene vrednosti iz Preglednice 6.

Breme organskih snovi (izraženo kot KPK) na vtoku po fizikalno-kemijskem čiščenju se je gibalo med 52,6 in 100 kg/dan, BPK₅ med 24,4 in 36,3 kg/dan, skupni dušik pa med 1,0 in 2,2 kg/dan. Podatki potrjujejo visoko organsko obremenjenost mlekarske odpadne vode. Na iztoku so bile vrednosti bremena za KPK in BPK₅ bistveno nižje, in sicer med 0,6 in 2,6 kg/dan, za skupni dušik pa 0,2 kg/dan oziroma manj, saj so bile ostale izmerjene vrednosti pod spodnjo mejo detekcije – 5 mg/L. Podatki o bremenu onesnaženja potrjujejo visoko učinkovitost čiščenja, saj takšne razlike v masi pomenijo, da čistilna naprava vsak dan odstrani več deset kilogramov onesnaževal, ki bi sicer prešla v naravno okolje.



Graf 5: Dnevno odstranjeno breme KPK in BPK₅ na čistilni napravi



Graf 6: Dnevno odstranjeno breme celotnega dušika na čistilni napravi

Graf 5 in 6 ponazarjata dnevno odstranjeno maso onesnaževal organskih snovi (KPK), biorazgradljivih organskih snovi (BPK₅) in celotnega dušika. Odstranjeno breme vseh treh parametrov je bilo najvišje 2. junija, kar je posledica najvišjega pretoka. Čistilna naprava je ta dan očistila 97,9 kg organskih snovi, izraženih v KPK, od tega 34 kg biorazgradljivih organskih snovi, izraženih v BPK₅ in 2 kg skupnega dušika. Pri dušiku so opažena manjša nihanja v razponu od 0,8 do 1,9 kg/dan. Za izračun sem uporabila spodnjo mejo analizne metode, in sicer 5 mg/L.

5.6 Možnosti za optimizacijo čistilne naprave

Na podlagi rezultatov laboratorijskih analiz in primerjave izmerjenih vrednosti z dimenzioniranimi ter mejnimi vrednostmi je mogoče podati nekaj predlogov za izboljšanje učinkovitosti čiščenja odpadnih vod v izbranem podjetju.

Kljub temu, da sta parametra KPK in TN na iztoku iz čistilne naprave pod mejnimi vrednostmi in kažeta zadovoljivo učinkovitost, pa parameter BPK₅ v določenih primerih presega dovoljeno vrednost. To kaže na manj učinkovito odstranjevanje biološko razgradljivih snovi v biološki fazi obdelave.

Ena izmed izboljšav bi lahko bila optimizacija biološkega procesa v šaržnem reaktorju (SBR). Mikroorganizmi v aktivnem blatu za svoje delovanje potrebujejo zadostno količino hranil, pomembna je starost blata, prezračevanje, temperatura, usedljivost itd. Potrebno bi bilo narediti podrobno analizo blata in ga glede na rezultate prilagoditi lastnostim vhodne vode. Glede na to, da je usmerjanje programa procesov čiščenja v biološkem reaktorju računalniško vodeno, bi lahko sistem dodatno prilagodili tako, da bi bilo čiščenje organsko razgradljivih snovi učinkovitejše. V diplomsko delo bi bilo potrebno vključiti tudi zadnjo fazo čiščenja, in sicer oksidacijo z ozonom, s čimer bi preverili končno vsebnost koncentracije BPK₅.

Pomemben je tudi predhodni fizikalno-kemijski postopek čiščenja, kjer se odstrani suspendirane in raztopljene organske snovi. Izboljšali bi lahko doziranje koagulanta, flokulanta in baze. Razmerje med dodanimi kemikalijami je ključnega pomena za učinkovito odstranitev koloidnih delcev. Posebno pozornost je potrebno nameniti pH metru, saj se baza in flokulant avtomatsko dodajata na podlagi rezultatov meritev, ki jih javi avtomatski pH meter. Sistem bi bilo potrebno pregledati in ugotoviti, zakaj pH vrednost na iztoku ni znotraj dimenzioniranih.

Z vidika ponovne uporabe vode v tehnoloških procesih, bi to pripomoglo k zmanjšanju porabe sveže vode in posledično zmanjšanju stroškov. Primer dobre prakse je podjetje Cinkarna Celje d. d., ki želi nadomestiti vodo iz reke Hudinje z odpadno vodo iz Centralne čistilne naprave Celje. Prečiščeno vodo bi bilo potrebno obdelati še s filtracijo z ultrafiltracijskimi membranami in demineralizirati z reverzno osmozo. V izbranem podjetju bi to predstavljalo trajnostni model krožnega gospodarstva, saj zmanjšuje količino izpuščenih organskih snovi v tla. Posledično bi glede na okoljsko zakonodajo optimizacija čistilne naprave lahko prispevala k dodatnemu znižanju okoljskih dajatev za obremenjevanje vod, saj te temeljijo na masi onesnažil, ki jih dejansko izpustijo v okolje. Prečiščena voda bi se lahko uporabljala za ogrevanje, hlajenje in pranje površin.

S celostnim pristopom in uvedbo nekaterih ukrepov bi podjetje lahko dodatno izboljšalo učinkovitost čiščenja ter povečalo skladnost s predpisi, hkrati pa zmanjšalo vpliv na okolje in dolgoročne stroške obratovanja.

6 SKLEP

V sektorju živilske industrije je mlečna industrija na prvem mestu po količini proizvedene obremenjene vode in odpadnega blata v procesu biološkega čiščenja. Porabi sicer od 0,2 do 10 litrov vode na liter predelanega mleka (Vourch idr., 2007). Surova odpadna voda iz mlekarske industrije vsebuje ogromno organskega onesnaženja, ki je pri čiščenju zelo trdovraten. Vzdrževati je potrebno čistočo in dosegati visoke higienske standarde, kar znatno povečuje količine porabljene vode (Kocjančič, 2014). Voda predstavlja glavni procesni medij in se uporablja v vseh fazah mlekarske industrije. Poraba je odvisna od načina čiščenja, hlajenja, izpiranja in vzdrževanja (Sarkar, Chakrabarti, idr., 2005).

Diplomsko delo je razdeljeno na dva dela, in sicer na teoretični in eksperimentalni del. Cilji teoretičnega dela so bili preučiti lastnosti odpadnih vod s poudarkom na mlekarški industriji, preučiti način delovanja biološke čistilne naprave in raziskati zakonodajo na področju čiščenja in odvajanja odpadnih vod. V eksperimentalnem delu sem analizirala postopek delovanja čistilne naprave v izbranem podjetju, izračunala razmerja med BPK_5 in KPK s podatki pridobljenimi v laboratoriju na primeru vzorcev vtoka in iztoka iz čistilne naprave izbranega podjetja. Prav tako sem z dobljenimi podatki ocenila učinkovitost biološkega čiščenja glede na izmerjene vrednosti na vtoku in iztoku, primerjala izmerjene vrednosti z dimenzioniranimi za izbrane parametre in nazadnje izračunala breme onesnaženja.

Na podlagi pridobljenih laboratorijskih rezultatov lahko ovrednotim dve hipotezi, ki sem si ju zastavila pred začetkom dela.

H1: Izmerjene vrednosti parametrov KPK, BPK_5 in celotnega dušika po fizikalno-kemijskem čiščenju in po iztoku ne bodo presegale dimenzionirane vrednosti.

Na podlagi pridobljenih rezultatov laboratorijskih analiz za parametre KPK, BPK_5 in TN lahko **hipotezo 1 delno potrdim**. Po fizikalno-kemijskem čiščenju so bili vsi parametri močno pod dimenzioniranimi vrednostmi, in sicer KPK za 52 %, BPK_5 za 75 % in skupni dušik za 60 %. Podatki so spodbudni, saj to pomeni, da je zmogljivost čistilne naprave načrtovana na večje obremenitve, ki bi se lahko zgodile ob možnosti povečanja proizvodnje.

Izmerjena parametra KPK in TN na iztoku sta pod dimenzioniranimi vrednostmi, odstopa samo BPK_5 . Rezultati analize KPK na iztoku so pokazali, da so vrednosti v času vzorčenja dosegale le 36 % maksimalne projektirane vrednosti, kar pomeni, da ne presegajo načrtovanih. Povprečna vrednost štirih vzorcev iztoka iz čistilne naprave za parameter BPK_5 presega dimenzionirane vrednosti za 105 %. Povprečne izmerjene vrednosti skupnega dušika so bile pod 5 mg/L, kar pomeni za 50 % manj od dimenzioniranih.

Presenetil nas je povprečni podatek o vrednosti pH na iztoku, ki je bil za 0,5 nižji od spodnje meje predvidenih vrednosti na samem iztoku. Še vedno pa je ta v območju zakonodajno predpisanih vrednosti okoljevarstvenega dovoljenja, saj se spodnja in zgornja meja razlikujeta glede na načrtovane oziroma zakonodajne zahteve.

H2: Za parametre KPK, BPK_5 in celotni dušik bo učinkovitost biološkega čiščenja odpadnih voda vsaj 90 %, glede na vhodne vrednosti.

Po opravljenih izračunih učinkovitosti za parametre KPK, BPK_5 in celotnega dušika lahko **hipotezo 2 delno potrdim**. Učinkovitost čiščenja za KPK in BPK_5 je bila v vseh primerih višja od 90 %, kar pomeni visoka učinkovitost odstranjevanja organskih snovi. Učinkovitost čiščenja skupnega dušika je bila 86,7 %, kar pomeni za 3,3 % manj, kot sem v hipotezi zastavila. Kljub temu, da je učinkovitost čiščenja skupnega dušika nekoliko nižja, so bile vse vrednosti na iztoku pod mejno vrednostjo. Ravno obratno se je zgodilo z BPK_5 , kjer so bile

Pivk, J.: Učinkovitost čiščenja industrijske odpadne vode iz mlekarske dejavnosti – analiza primera izbranega podjetja, FVO, Velenje 2025

končne vrednosti kljub visoki učinkovitosti čistilne naprave pri odstranjevanju biološko razgradljivih snovi nad mejno vrednostjo.

7 POVZETEK

V diplomskem delu sem obravnavala problematiko industrijskih odpadnih vod, s poudarkom na odpadnih vodah iz mlekarske industrije. Opisane so lastnosti industrijskih odpadnih vod in odpadnih vod iz mlekarn, ki se delijo na fizikalne, kemijske in biološke. Zaradi visokih vsebnosti organskih snovi, ki obremenjujejo okolje, je ustrezno čiščenje teh vod izrednega pomena. V teoretičnem delu sem obravnavala tudi način delovanja biološke čistilne naprave z aktivnim blatom in SBR bazenom in zakonodajni okvir na področju čiščenja vod, tako na evropski kot slovenski ravni. Poudarek je bil na zakonih, kot sta *Zakon o varstvu okolja* in *Zakon o vodah* ter na podzakonskih aktih, kjer so med drugimi določene mejne vrednosti onesnaževal. V poglavju o dosedanjih raziskavah sem obravnavala primere dobrih praks za ponovno uporabo očiščene odpadne vode z metodo nanofiltracije in reverzne osmoze ter o študiji, kjer so ugotovili, da ima predhodno čiščenje mlekarških odpadnih vod z uporabo koagulantov in flokulantov velik vpliv na zniževanje okoljskih dajatev za obremenjevanje voda.

Opisana je tehnologija čiščenja odpadne vode iz primera izbranega podjetja, ki vključuje mehansko, fizikalno-kemijsko, biološko obdelavo odpadne vode in oksidacijo. Povzeto je tudi okoljevarstveno dovoljenje podjetja, kjer so opisane mejne vrednosti parametrov in druge omejitve pri delovanju čistilne naprave.

Eksperimentalni del zajema izvedbo vzorčenja in analiz v izbranem podjetju, ki ima lastno čistilno napravo. Za boljše razumevanje lastnosti odpadnih vod in delovanja čistilne naprave, sem v izbranem podjetju vzorčila na dveh točkah: vtok po fizikalno-kemijskem čiščenju in iztok po terciarni stopnji čiščenja. V laboratoriju fakultete sem naredila analizo vzorcev, in sicer na pet parametrov. Merila sem pH, prevodnost, kemijsko potrebo po kisiku (KPK), biokemijsko potrebo po kisiku v petih dneh (BPK₅) in skupni dušik (TN). Vzorce sem za boljše reprezentativnost analizirala v treh ponovitvah. Z rezultati laboratorijskih meritev sem izračunala učinkovitost čiščenja, razmerje med BPK₅ in KPK, breme onesnaženja in primerjala izmerjene vrednosti z dimenzioniranimi in mejnimi.

Z izračunom sem ugotovila, da je za parametra KPK in BPK₅ učinkovitost čiščenja nad 90 %, za skupni dušik pa 86,7 %. Za biorazgradljivo organsko snov (BPK₅) to ne pomeni dovolj učinkovitega čiščenja, saj so bile izmerjene vrednosti iztokov večinoma nad mejno vrednostjo. Kljub manjši učinkovitosti čiščenja skupnega dušika izmerjene vrednosti ne presegajo mejnih vrednosti. Skupno gledano je analiza pokazala, da je biološka čistilna naprava učinkovita, a z možnostmi optimizacije, predvsem pri odstranjevanju organsko razgradljivih snovi (BPK₅). Poudariti pa je potrebno, da je moje delo zajemalo vzorčenje in analizo odpadne vode v tehnološki stopnji šaržnega reaktorja (SBR), torej vtok v SBR, ki predstavlja odpadno vodo po fizikalno-kemijskem čiščenju ter iztok iz SBR reaktorja, ki pa mu v sklopu celotne naprave sledi še filtracija in ozoniranje.

Podjetje je pred gradnjo čistilne naprave analiziralo surovo odpadno vodo iz proizvodnje in na ta način določilo tip čistilne naprave in dimenzionirane vrednosti parametrov med vsako tehnološko stopnjo. Načrtovane vrednosti sem v eksperimentalnem delu primerjala z izmerjenimi in ugotovila, da so bile v času našega vzorčenja vrednosti parametrov KPK, BPK₅ in TN na vtoku po fizikalno-kemijskem čiščenju močno pod dimenzioniranimi. Na iztoku iz čistilne naprave smo izmerili koncentracije parametrov KPK in TN pod dimenzioniranimi in mejnimi vrednostmi, kar pomeni, da očiščena voda izpolnjuje okoljske zahteve za izpust v okolje, medtem ko je bila koncentracija parametra BPK₅ nad dimenzioniranimi vrednostmi in je presegala mejne vrednosti iz OVD za izpust v okolje.

Pivk, J.: Učinkovitost čiščenja industrijske odpadne vode iz mlekarske dejavnosti – analiza primera izbranega podjetja, FVO, Velenje 2025

Diplomsko delo prikazuje pomembnost celovitega pristopa k čiščenju mlekarskih odpadnih vod, kjer je poleg tehnološke učinkovitosti pomembna tudi skladnost z zakonodajo. Rezultati nam povejo oceno trenutnega stanja in možnosti za izboljšave.

8 SUMMARY

In my thesis, I addressed the issue of industrial wastewater, with a focus on wastewater from the dairy industry. The characteristics of industrial and dairy wastewater are described, categorized into physical, chemical, and biological properties. Due to the high content of organic matter, which burdens the environment, appropriate treatment of these waters is of great importance. In the theoretical part, I also discussed the functioning of a biological treatment plant with activated sludge and an SBR (Sequencing Batch Reactor) tank, as well as the legislative framework for wastewater treatment at both the European and Slovenian levels. Emphasis was placed on laws such as the Environmental Protection Act and the Water Act, along with secondary legislation, which among other things defines the limit values for pollutants. In the chapter on previous research, I presented examples of good practices for the reuse of treated wastewater using nanofiltration and reverse osmosis methods, and a study which found that pre-treatment of dairy wastewater using coagulants and flocculants significantly reduces environmental charges for water pollution.

The wastewater treatment technology used by the selected company is described, including mechanical, physico-chemical, biological treatment, and oxidation. The company's environmental permit is also summarized, describing the limit values for parameters and other operational constraints for the treatment plant.

The experimental part includes sampling and analysis carried out in a selected company that operates its own wastewater treatment plant. To better understand the characteristics of the wastewater and the functioning of the treatment plant, I took samples at two points: the influent after physico-chemical treatment and the effluent after the tertiary treatment stage. In the laboratory at the faculty, I analyzed the samples for five parameters: pH, conductivity, chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand over five days (BOD_5), and total nitrogen (TN). Each sample was analyzed in triplicate to ensure greater representativeness. Based on the laboratory results, I calculated the treatment efficiency, the BOD_5/COD ratio, the pollution load, and compared the measured values with the designed and limit values.

Based on the calculations, I found that the treatment efficiency for COD and BOD_5 exceeded 90%, and for total nitrogen it was 86.7%. Unfortunately, for biodegradable organic matter (BOD_5), this was not sufficient, as the measured outflow values mostly exceeded the limit value. Despite the lower efficiency for total nitrogen, the measured values did not exceed the limit values. Overall, the analysis showed that the biological treatment plant is effective, but with potential for optimization, especially in the removal of biodegradable organic substances (BOD_5). It is important to emphasize that my work involved sampling and analyzing wastewater at the technological stage of the Sequencing Batch Reactor (SBR), meaning the influent to the SBR, which represents wastewater after physico-chemical treatment, and the effluent from the SBR reactor, which is subsequently subjected to filtration and ozonation as part of the overall treatment process.

Before constructing the treatment plant, the company analyzed raw wastewater from production, which served as a basis for determining the type of treatment plant and the designed parameter values at each technological stage. In the experimental part, I compared these designed values with the measured ones and found that at the time of sampling, the parameter values for COD, BOD_5 , and TN at the inflow after physico-chemical treatment were significantly below the designed values. At the outflow from the treatment plant, we measured concentrations of COD and TN below both the designed and limit values, indicating that the treated water meets environmental requirements for discharge into the

environment. However, the BOD₅ concentration exceeded both the designed values and the limit values set in the environmental permit for discharge.

This thesis demonstrates the importance of a comprehensive approach to the treatment of dairy wastewater, where compliance with legislation is just as important as technological efficiency. The results provide an assessment of the current situation and indicate opportunities for improvement.

9 VIRI IN LITERATURA

Acman D. (2014). Analiza obremenjenosti mešane komunalne odpadne vode iz kanalizacijskega sistema Velenje–Šoštanj. Diplomaska naloga., 2014. Medmrežje: https://fvo.si/images/pdf/2014040918_DIPLOMA-DAVID_ACMAN.pdf (28. 6. 2025)

Alfiah, T., Pertiwi, D. D. 2024: Performance of Dairy Factory Wastewater Treatment Plant (Case Study of Pasuruan Dairy Factory East Java). Journal of Community Based Environmental Engineering and Management, 8(2), Article 2. Medmrežje: <https://doi.org/10.23969/jcbeem.v8i2.17576> (29. 05. 2025)

Andrade, L. H., Mendes, F. D. S., Espindola, J. C. in Amaral, M. C. S. (2014). Nanofiltration as tertiary treatment for the reuse of dairy wastewater treated by membrane bioreactor. *Separation and Purification Technology*, 126, 21–29. Medmrežje: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.01.056> (29. 05. 2025)

Bortoluzzi, A. C., Demaman Oro C. E., idr. (2023). Combination of chemical coagulation and membrane-based separation for dairy wastewater treatment. J Food Sci Technol 60, 84–91. Medmrežje: <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05590-2> (14. 08. 2025)

Drev, D., Panjan, J. 2012: Učinkovito predhodno čiščenje mleinarskih odpadnih vod. Acta Hydrotechnica, 25(43), 129–140. Medmrežje: <https://repozitorij.uni-lj.si/Dokument.php?id=86476> (29. 05. 2025)

Galvão, D. F. (2018). Membrane Technology and Water Reuse in a Dairy Industry. InTech. doi: 10.5772/intechopen.76464 Medmrežje: <https://www.intechopen.com/chapters/61182> (11. 08. 2025)

Globally, 3 billion people at health risk due to scarce data on water quality. Medmrežje: <https://www.unep.org/news-and-stories/story/globally-3-billion-people-health-risk-due-scarce-data-water-quality> (30. 05. 2025)

Hercog, J., 2009: Ocena možnosti izboljšave delovanja ČN mleinarske industrije: diplomaska naloga. Medmrežje: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=24402> (30. 05. 2025)

Kummu, M., Guillaume, J. H. A., de Moel, H., Eisner, S., Flörke, M., Porkka, M., Siebert, S., Veldkamp, T. I. E., Ward, P. J. (2016). The world's road to water scarcity: Shortage and stress in the 20th century and pathways towards sustainability. *Scientific Reports*, 6, 38495. Medmrežje: <https://doi.org/10.1038/srep38495> (28. 5. 2025)

Kurbus, T. 2008. Razvoj visoko učinkovitega postopka čiščenja odpadnih vod v šaržnem biološkem reaktorju: Doktorska disertacija. Medmrežje: https://www.pif.si/sites/default/files/inline-files/Doktorska_disertacija-Tanja_Kurbus_363.pdf (31.05.2025)

Kurrer, C., Petit, A. 2024. Okoljska politika: splošna načela in osnovni okvir. Medmrežje: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/sl/sheet/71/okoljska-politika-splosna-nacela-in-osnovni-okvir> (10. 06. 2025)

Levstek, M., Brajer Huma, B., Stražar, M., Javornik, V., Kogej, S., Kelečević, D. 2020: Problematika čiščenja mleinarske odpadne vode. Vodni dnevi 2020. Rimske Toplice, 2025, stran 63, 64

Medmrežje 1: <https://www.gov.si teme/industrija/>

Medmrežje

2: https://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso

Meničanin, U. 2017. Zniževanje vsebnosti snovi v mlekarški odpadni vodi [Univerza v Mariboru, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo]. Medmrežje: <https://dk.um.si/lzpisGradiva.php?id=67714> (30. 05. 2025)

Loloei, M., Alidadi, H., idr. 2014. Study of the coagulation process in wastewater treatment of dairy industries. *International Journal of Environmental Health Engineering*, 3(1), 12. Medmrežje: https://journals.lww.com/ijeh/fulltext/2014/03000/study_of_the_coagulation_process_in_wastewater.11.aspx (15. 08. 2025)

Odvajanje in čiščenje komunalne in padavinske odpadne vode | GOV.SI. (b. d.). Portal GOV.SI. Medmrežje: <https://www.gov.si teme/odvajanje-in-ciscenje-komunalne-in-padavinske-odpadne-vode/> (29. 05. 2025)

Pravilnik o prvih meritvah in obratovalnem monitoringu odpadnih vod ter o pogojih za njihovo izvajanje. Uradni list RS, št. 94/14, 98/15 in 44/22 – ZVO-2. Medmrežje: <https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=PRAV12112>

Ramsuroop, J., Gutu, L., Ayinde, W. B., Basitere, M., Manono, M. S. 2024: A Review of Biological Processes for Dairy Wastewater Treatment and the Effect of Physical Parameters Which Affect Their Efficiency. *Water*, 16(4), Article 4. Medmrežje: <https://doi.org/10.3390/w16040537> (29. 05. 2025)

Roš, M., Zupančič, G. D. (2010). Čiščenje odpadnih voda (1. izd., Ekotehnologije in trajnostni razvoj 1, Let. 3). Visoka šola za varstvo okolja.

Santonja, G. G., idr. 2019. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Food, Drink and Milk Industries. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU. Medmrežje: file:///C:/Users/pivkj/Downloads/JRC118627_FDM_Bref_2019_published.pdf (10. 6. 2025)

Sarkar, B., Chakrabarti, P. P., Vijaykumar, A. in Kale, V. (2006). Wastewater treatment in dairy industries—Possibility of reuse. *Desalination*, 195(1), 141–152. Medmrežje: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.11.015> (30. 05. 2025)

Številne priložnosti in ovire za izkoriščanje sekundarnega vira vode—ESG 186—Zelena Slovenija. 2024: Medmrežje: <https://www.zelenaslovenija.si/esg/stevilne-priloznosti-in-ovire-za-izkoriscanje-sekundarnega-vira-vode-esg-186/> (29. 05. 2025)

Tikariha, A., & Sahu, O. (2014). Study of Characteristics and Treatments of Dairy Industry Waste Water. *Journal of Applied & Environmental Microbiology*, 2(1), Article 1. Medmrežje: <https://doi.org/10.12691/jaem-2-1-4> (30. 05. 2025)

Urbančič, G., Toman, M. J. (2003). Varstvo celinskih voda. Ljubljana, Študentska založba.

Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadne vode iz naprav za obdelavo in predelavo živalskih in rastlinskih surovin ter mleka pri proizvodnji hrane za prehrano ljudi in živalske krme, Uradni list RS, št. 45/07 in 44/22 – ZVO-2. Medmrežje: <https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=URED4451>

Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda v vode in javno kanalizacijo, Uradni list RS, št. 64/12, 64/14, 98/15, 44/22 – ZVO-2, 75/22 in 157/22. Medmrežje: <https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=URED6070>

Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadne vode iz naprav za obdelavo in predelavo živalskih in rastlinskih surovin ter mleka pri proizvodnji hrane za prehrano ljudi in živalske krme. Uradni list RS, št. 45/07 in 44/22 – ZVO-2.

Medmrežje: <https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=URED4451>

Uredba o okoljski dajatvi za onesnaževanje okolja zaradi odvajanja odpadnih voda. Uradni list RS, št. 80/12, 98/15 in 44/22 – ZVO-2.

Medmrežje: <https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=URED6149>

Vourch, M., Balannec, B., Chaufer, B., Dorange, G. (2008). Treatment of dairy industry wastewater by reverse osmosis for water reuse. *Desalination*, 219(1), 190–202.

Medmrežje: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.05.013> (30. 05. 2025)

Zakon o vodah, Uradni list RS, št. 67/02, 2/04 – ZZdrl-A, 41/04 – ZVO-1, 57/08, 57/12, 100/13, 40/14, 56/15, 65/20, 35/23 – odl. US, 78/23 – ZUNPEOVE in 52/24 – odl. US. Medmrežje: <https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=ZAKO1244>

Zakon o ohranjanju narave, Uradni list RS, št. 96/04 – uradno prečiščeno besedilo, 61/06 – ZDru-1, 8/10 – ZSKZ-B, 46/14, 21/18 – ZNOrg, 31/18, 82/20, 3/22 – ZDeb, 105/22 – ZZNŠPP in 18/23 – ZDU-1O

Medmrežje: <https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=ZAKO1600>

Zakon o varstvu okolja, Uradni list RS, št. 44/22, 18/23 – ZDU-1O, 78/23 – ZUNPEOVE, 23/24 in 21/25 – ZOPVOOV.

Medmrežje: <https://pisrs.si/pregledPredpisa?id=ZAKO8286>

Zinadini, S., Vatanpour, V., Zinatizadeh, A. A., Rahimi, M., Rahimi, Z., in Kian, M. (2015). Preparation and characterization of antifouling graphene oxide/polyethersulfone ultrafiltration membrane: Application in MBR for dairy wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 7, 280–294. Medmrežje: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2015.07.005> (25. 05. 2025)

Ye, M., Li, Y.-Y. 2023: Methanogenic treatment of dairy wastewater: A review of current obstacles and new technological perspectives. *Science of The Total Environment*, 866, 161447. Medmrežje: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161447> (28. 05. 2025)