

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



MIHA MAUČEC

**UPORABA MEMBRANSKIH BIOREAKTORJEV NA
KOMUNALNIH ČISTILNIH NAPRAVAH**

DIPLOMSKA NALOGA

**UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM VODARSTVO
IN KOMUNALNO INŽENIRSTVO**

Ljubljana, 2016

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

Spodaj podpisani študent Miha Maučec, vpisna številka 26105223, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Uporaba membranskih bioreaktorjev na komunalnih čistilnih napravah.

IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*

- a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
- b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobil vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V: Ljubljani
Datum: 05.09.2016

Podpis študenta:

Bibliografsko – dokumentacijska stran z izvlečkom

UDK:
Avtor: Miha Maučec
Mentor: doc. dr. Darko Drev
Somentor: asist. dr. Mario Krzyk
Naslov: Uporaba membranskih bioreaktorjev na komunalnih čistilnih napravah
Tip dokumenta: diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema: 56 strani, 11 preglednic, 4 grafikoni, 19 slik.
Ključne besede: MBR, čistilna naprava, membranski bioreaktor, votla vlakna, mašenje, filtracija, Zenon, Kubota

Izvleček

V diplomski nalogi je predstavljena uporaba membranskih bioreaktorjev na komunalnih čistilnih napravah. V industriji se takšni sistemi uporabljajo že dalj časa, saj prispevajo k boljšemu čiščenju odpadnih in tehnoloških voda. Z vse strožjimi standardi o izpustih iz čistilnih naprav se je začela uporaba membranskih bioreaktorjev tudi na komunalnih čistilnih napravah.

Cilj naloge je bil opisati postopek čiščenja odpadnih voda z membranskimi bioreaktorji, ter predstaviti prednosti in slabosti teh sistemov. Podjetja so k razvoju membranskih bioreaktorjev pristopila na različne načine, tako je prišlo do nastanka več vrst sistemov membran, različnih materialov membran ter postopkov v samem delovanju membranskih bioreaktorjev. Tako so predstavljeni najpogosteje uporabljeni sistemi, kateri so že dobro preverjeni za uporabo na komunalnih čistilnih napravah, saj so v uporabi že vrsto let.

Iz preučevanja literature je bilo razvidno, da uporaba membranskih bioreaktorjev na komunalnih čistilnih napravah še ima določene pomanjkljivosti. Predvsem stroškovno gledano še niso izenačeni z običajnimi biološkimi čistilnimi napravami, kar pa je posledica, menjavanja membran, ter neuveljavljenosti membranskih bioreaktorjev, kar posledično zvišuje ceno postavitve sistema. Določene pomanjkljivosti membranskih bioreaktorjev so tudi pri vzdrževanju oziroma čiščenju membran.

Bibliographic – documentalistic information and abstract

UDC

Author: Miha Maučec

Supervisor: Assist. Prof. Darko Drev Ph.D.

Co-Supervisor: Assist. Mario Krzyk Ph.D.

Title: Usage of membrane bioreactors for municipal wastewater treatment plants

Type of document: Graduation Thesis – University studies

Notes: 56 pages, 11 tabels, 4 graphs, 19 images.

Keywords: MBR, wastewater treatment plant, membrane bioreactor, hollow fibre, fouling, filtration, Zenon, Kubota

Abstract

We wanted to present the usage of membrane bioreactors for municipal wastewater treatment plants. In industries such systems are widely spread contributing to improve wastewater treatment. With increasing standards on discharges from wastewater treatment plants began usage of membrane bioreactors at municipal treatment plants.

The aim of the thesis was to describe the process of wastewater treatment with membrane bioreactors and to present advantages and disadvantages of these systems. Companies that produce membrane bioreactors have different ways of approaching to development. So there has been the emergence of several types of membrane systems, materials and procedures in the proper functioning of membrane bioreactors. We have presented the most commonly used systems, which are already well proven for usage for municipal wastewater treatment plants, since they have been in operation for several years.

By studying the literature it showed that the usage of membrane bioreactors for municipal wastewater treatment plants stil has some drawbacks. Particularly the operating costs are higher than by conventional biological wastewater treatment plants, which is result of membrane exchange. Since the membrane bioreactors are not commonly used at this type of treatment plants the costs of instaling the system are therefore also higher. Some of setbacks of membrane bioreactors can be found in intense maintance and cleaning of the membranes.

Zahvala

Zahvaljujem se vsem, ki so mi kakorkoli pomagali ob izdelavi diplomske naloge, posebej profesorju doc. dr. Darko Drevu in asistentu dr. Mariu Kzyku, ter gospodu Egonu Batiču univ. dipl. inž. kem. inž. za posredovanje podatkov.

Zahvaljujem se tudi družini in prijateljem, ki so mi stali ob strani celotno študijsko obdobje.

KAZALO VSEBINE

Izjave	ii
Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček	iii
Bibliographic-dokumentalistic information and abstract	iv
Zahvala	v
Kazalo vsebine	vi
Kazalo preglednic	viii
Kazalo grafikonov	ix
Kazalo slik	x
Kratice	xi
1 UVOD	1
2 MEMBRANSKI BIOREAKTORJI (MBR)	2
2.1 Splošne značilnosti membranskih bioreaktorjev	2
2.2 Tipi Membranskih bioreaktorjev (MBR)	3
2.2.1 Potopljeni membranski bioreaktorji	4
2.2.2 Cross – flow (prečnotočno) membranski bioreaktorji	5
2.2.3 Primerjava potopljenih in cross – flow MBR	7
2.3 Načrtovanje membranskih bioreaktorjev	9
2.3.1 Teoretični pregled	9
2.3.2 Vpliv na sistem aktivnega blata	10
2.3.3 Predčiščenje	11
2.4 Delovanje MBR	12
2.4.1 Delovanje potopljenih MBR	12
2.4.2 Delovanje cross – flow MBR	13
2.4.3 Mašenje membrane	13
2.4.4 Čiščenje membrane	14
2.4.5 Potencial membranskih bioreaktorjev	17
3 Komericalni membranski bioreaktorji	19
3.1 Kubota	19
3.1.1 Opis sistema	19
3.1.2 Opis delovnja	19
3.2 Zee Weed membrane	20
3.3 Orelis in Mutsui Chemicals	21
3.3.1 Ubis	21
3.4 US Filter	21
3.5 Membratex, Weirenvig, Aquatec in Bioscan A/S	21

4	Predstavitev praktične uporabe membranskih čistilnih naprav	23
4.1	Opis vodne skupnosti Erftverband	23
4.2	Opis čistilnih naprav z MBR na območju združenja Erftverband	24
4.2.1	Predčiščenje	24
4.2.2	Bioreactor	24
4.2.3	Membrane in filtracija	25
4.3	Pregled Rodingen MBR	26
4.4	Pregled Nordkanal MBR	27
4.5	Pregled Glessen MBR	28
4.6	Vpliv na kvaliteto vodotokov	29
4.6.1	Vpliv Rodingen MBR na potok Finkelbach	29
4.6.2	Vpliv Nordkanal MBR na kanal Nordkanal	30
4.6.3	Vpliv Glessen MBR na potok Glessner	30
5	Predstavitev komunalne čistilne naprave z MBR v Novem mestu	31
5.1	Opis Območja čistilne naprave	31
5.1.2	Opis predhodne čistilne naprave	33
5.2	Načrtovanje nove čistilne naprave	35
5.2.1	Financiranje in izvedba projekta	35
5.2.2	Priprava dokumentacije	36
5.2.3	Razlogi za uporabo MBR sistema	36
5.2.4	Tehnološka izhodišča za načrtovanje	36
5.3	Nova čistilna naprav z MBR sistemom	38
6	ZAKLJUČEK	41
7	LITERATURA	43

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Faze delovanja membranskih bioreaktorjev	13
Preglednica 2: Različni moduli proizvajalca ZeeWeed	20
Preglednica 3: Specifikacije mehanskega predčiščenja na čistilnih napravah	24
Preglednica 4: Količine ključnih parametrov na čistilnih napravah	24
Preglednica 5: Način volumni in zahteve na iztoku obratovanja	25
Preglednica 6: Podatki glede membran in filtracije	26
Preglednica 7: Zahteve zakonodaje, številke označene z rdečo so presežene vrednosti	33
Preglednica 8: Izhodiščni parametri dimenzioniranja	37
Preglednica 9: Zahtevani iztočni parametri	37
Preglednica 10: Mejne vrednosti in rezultati prvih meritev	39
Preglednica 11: Stroški obratovanja primerjava 1-6 2011:2013	40

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1. Prikaz povečanja pretoka glede na povečan tlak na membranah	7
Grafikon 2: Prikaz prepustnosti membrane kot funkcija časa, dveh režimov čiščenja	15
Grafikon 3: Spreminjanje kakovosti vode v potoku Finkelbach	29
Grafikon 4: Spreminjanje kakovosti vode v kanalu Nordkanal	30

KAZALO SLIK

Slika 1: Shema običajne čistilne naprave z membranskim bioreaktorjem.	2
Slika 2: Velikost por pri različnih tipih filtracij	3
Slika 3: Prikaz različnih tipov filtriranja	4
Slika 4: Shematski prikaz potopljenega MBR sistema	4
Slika 5: Shematski prikaz cross – flow (prečnotočnega) MBR sistema	6
Slika 6: Shema Nizko tlačne cross – flow membrane (LPCF MBR)	8
Slika 7: Pogled na kom. čistilno napravo z MBR, zgrajeno v kraju Varssveld na Nizozemskem	17
Slika 8: Shematski prikaz ploščatega potopljenega membranskega bioreaktorja	19
Slika 9: Prikaz sestava ZeeWeed membran v kasete in povezave v bazenu	20
Slika 10: Območje združenja Erftverband in lokacije kom. čistilnih naprav in naprav z MBR	23
Slika 11: Shematski prikaz Rodingen MBR	26
Slika 12: Shematski prikaz Nordkanal MBR	27
Slika 13: Shematski prikaz Glessen MBR	28
Slika 14: Pregledna karta občutljivega območja zaradi eutrofikacije	31
Slika 15: Pregledna karta občutljivega območja zaradi kopalnih voda: terciarnočiščenje	32
Slika 16: Pregledna karta občutljivega območja zaradi kopalnih voda: mikrobiološke zahteve	32
Slika 17: Shematski prikaz čistilne naprave v Novem mestu	34
Slika 18: Shematski prikaz čistilne naprave v Novem mestu po rekonstrukciji	39
Slika 19: Moderna membranska čistilna naprava v Novem mestu	40

KRATICE

BPK	Biokemjska potreba po kisiku	[mg]
CaCO_3	Kalcijev karbonat	
CČN	Centralna čistilna naprava	
$\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$	Citronska kislina	
CaPO_4	Kalcijev fosfat	
DK DOX smell	snov za vezavo vonjav	
F_m	Membranski tok	
FeCl_3	Železov triklorid	
FePO_4	Železov fosfat	
HCl	Klorovodikova kislina	
H_2O_2	Vodikov peroksid	
H_2SO_4	Žveplova kislina	
KPK	Kemijska potreba po kisiku	[mg]
LPCF	Low pressure cross-flow	
MBR	Membranski bioreaktor	
MLSS	Sušina blata	[mg/l]
NaOCl	Natrijev klorooksid	
NaOH	Natrijev hidroksid	
N_{tot}	celoten dušik	
N-H_4	amonium	
TSS	Skupne suspendirane snovi	
γ	Viskoznost tekočine	
Φ	Prepustnost membrane	[l/m ² h]
Δp_{TM}	Trans membranski tlak	[bar]

1 UVOD

Čista voda je vir življenja za ljudi, živali in rastline. Več kot 97% vode na svetu je slane, večina sladke vode se nahaja v ledenikih ali v obliki vlage, tako je manj kot odstotek sladke vode na voljo človeku (D.G.Rao, 2013). Prebivalstvo se veča in z višjim standardom, se povečuje tudi poraba vode po prebivalcu. V EU je povprečna poraba 70 m^3 na prebivalca letno, slovenska poraba je nekoliko manjša in znaša 42 m^3 na prebivalca letno. Vsa ta voda se po različnih poteh vrne v naravo. Naša odgovornost je poskrbeti, da jo vrnemo naravi kakršno smo prejeli.

Čeprav vodo človeštvo porablja za različne namene že od svojega obstoja, je zavednje o čiščenju odpadne vode relativno novo. Prve čistilne naprave so se pojavile v Angliji v poznem 19. stoletju, predvsem zaradi izbruha bolezni in smradu (Udo Wiesmann, 2007).

V današnjem času je približno 70% odstotkov prebivalstva EU priključenih na čistilne naprave, ta delež je največji na Nizozemskem kjer dosegajo 99%. V Sloveniji je ta delež po podatkih iz leta 2012, 55%, kar pomeni da slaba polovica prebivalstva še vedno uporablja greznice (Marjan Zajc, 2013).

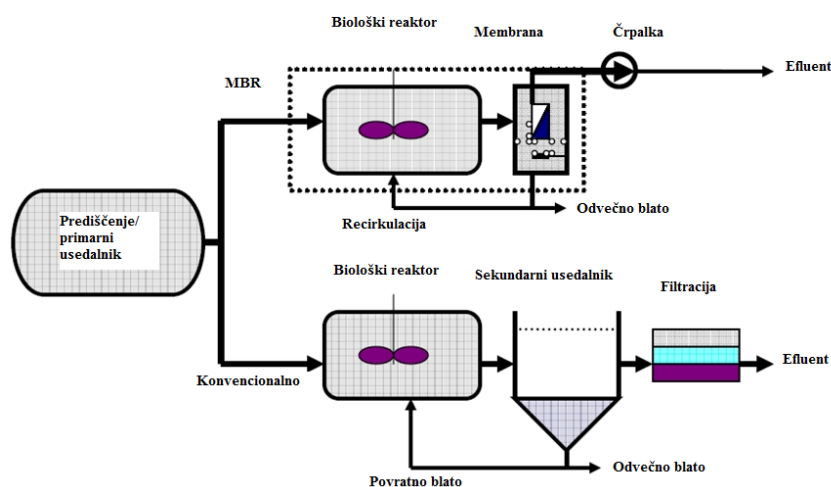
Večina delujočih čistilnih naprav je bioloških čistilnih naprav s sekundarnim in terciarnim čiščenjem, katere so v zadnjih letih nadomestile zastarele naprave s primarnim čiščenjem ter tako močno izboljšale kakovost vodotokov. Z večanjem urbaniziranega prebivalstva so tudi večje potrebe po vodi, kar povzroča večje količine odpadne vode.

V bolj razvitih državah so zaradi tega že začeli z uvajanjem novejših načinov ravnanja z odpadnimi vodami, da bi dosegali boljše čiščenje. Ena od možnosti za povečanje kakovosti čiščenja je postavitve čistilnih naprav z membranskimi bioreaktorji, kateri dosegajo boljše rezultate pri tretiranju odpadne vode.

2 Membranski bioreaktorji (MBR)

2.1 Splošne značilnosti membranskih bioreaktorjev

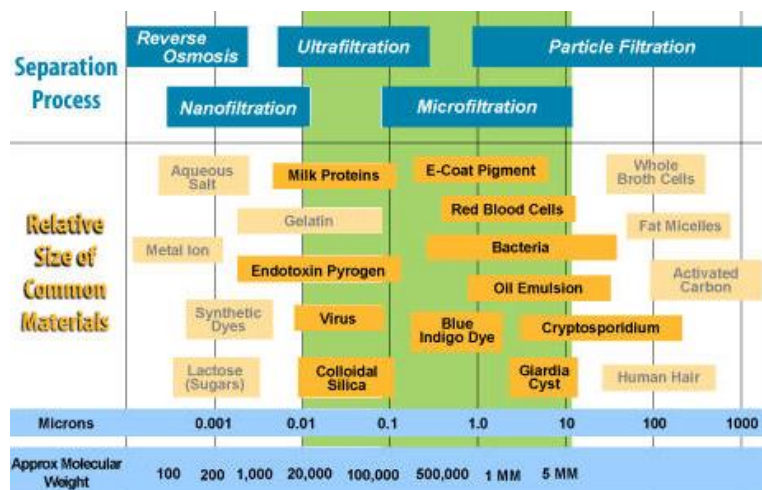
Glavna razlika med običajnimi čistilnimi napravami in membranskimi bioreaktorji je nadomestitev gravitacijskega usedanja v sekundarnem posedalniku s filtracijo preko membrane, kot je prikazano na sliki 1.



Slika 1: Shema običajne čistilne naprave z membranskim bioreaktorjem. (vir: A.C. van Handel in sodelavci, 2012)

Pri običajnih čistilnih sistemih z aktivnim blatom, koncentracije suspendiranih snovi redko presegajo količine $6 \text{ g TSS} \cdot \text{l}^{-1}$ (suspendirane snovi na liter), gibljejo se okoli $3\text{--}4 \text{ g TSS} \cdot \text{l}^{-1}$. Pri dopolnitvi usedalnika z membransko filtracijo se te količine lahko zelo povečajo, saj pri membranah koncentracije blata ne omejuje zmožnost posedanja marveč karakteristike filtracije. Tako so koncentracije suspendiranih snovi lahko tudi do $50 \text{ g TSS} \cdot \text{l}^{-1}$, pri membranskih bioreaktorjih (MBR) so najbolj pogoste med 10 in $50 \text{ g TSS} \cdot \text{l}^{-1}$.

Membrane uporabljene v procesih filtracije delujejo v območju mikrofiltracije in ultrafiltracije. Velikost por je med 0.01 in $0.4 \text{ } \mu\text{m}$, kar daje membranam zmožnost odstranjevanja bakterij in virusov.



Slika 2: Velikost por pri različnih tipih filtracij (vir: Koch Membrane systems, 2004).

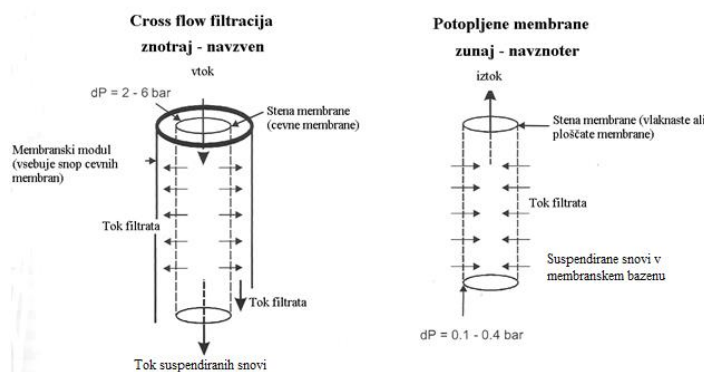
Prvi membranski bioreaktorji kot čistilne naprave so se pojavili v devetdesetih letih prejšnjega stoletja, čeprav je bilo že veliko pred tem znano, da so membrane lahko nadomestilo za običajen usedanik. Glavni razlogi zakaj je ta tehnologija tako nova so:

- Visoki investicijski stroški, ter stroški zamenjave membran
- Višja poraba energije napram običajnim čistilnim napravam
- Problem mašenja membran
- Slaba kvaliteta membran in membranskih modulov

V vseh letih od začetka prvih MBR je prišlo do močnega razvoja, tako so sedaj lahko že konkurenčni običajnim čistilnim napravam.

2.2 Tipi membranskih bioreaktorjev (MBR)

Filtracijski sistemi več ali manj delujejo na podoben način. Pod pritiskom se filtrira tekočina preko polprepustne ovire, pri čemer se izločajo vsi delci večji od velikosti por. Pri membranskih bioreaktorjih je lahko tok filtriranja usmerjen od znotraj navzen (cross – flow filtracija) ali pa od zunaj navznoter (submerged membranes) potopljene membrane (Stephenson in sodelavci, 2000).

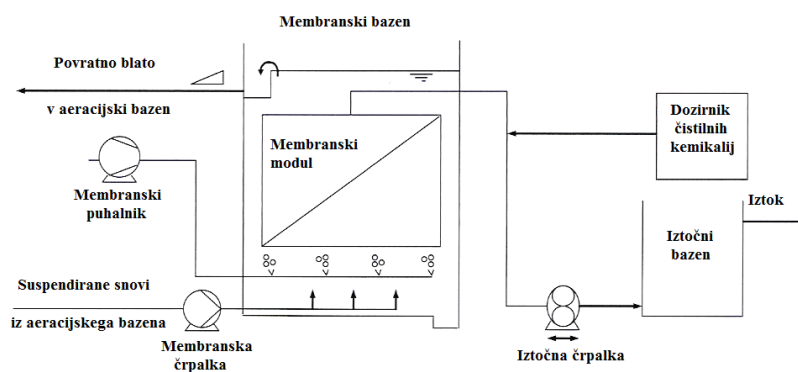


Slika 3. Prikaz različnih tipov filtriranja (A.C. van Handel, 2012)

Pri cross - flow membranah, se suspendirane snovi črpa skozi snop cevnih membran, katere so povezane znotraj večje zaprte cevi – membranskega modula. Pritisk preko površine membrane iztiska efluent skozi steno membrane iz cevi. Potopljene membrane so pa postavljene v bazen in jih oblivajo suspendirane snovi. Na membrane s pomočjo črpalke deluje vakuum, ki preko stene membrane vsrka filtrirano tekočino.

2.2.1 Potopljeni membranski bioreaktorji

Pri potopljenih MBR sta v uporabi dva tipa: ploščate in vlaknaste membrane, vsak tip ima svoje prednosti in slabosti v osnovi sta pa kot na shematskem prikazu slike 4. Membrane so vstavljene v membranski bazen, membranski bioreaktorji so imeli v začetku membrano vstavljeno neposredno v aeracijski bazen, vendar se je to izkazalo za problematično.



Slika 4. Shematski prikaz potopljenega MBR sistema (Vir: A.C. van Haandel, 2012)

Število bazenov je odvisno od količine vtoka, vendar sta potrebna vsaj dva zaradi izpiranja in vzdrževanja. V membranski bazen je vstavljen en ali več membranskih modulov vsak pa je sestavljen

iz več membran. Vsi moduli so povezani na eno iztočno cev s črpalko. Med delovanjem membranskega bazena se črpajo raztopljene snovi iz bioreaktorja v membranski bazen ter se porazdelijo pod membranskimi moduli. V uporabi je tudi sistem pri katerem se suspendirane snovi v membranski bazen pretakajo le s pomočjo gravitacije. V tem primeru iztočna črpalka vzpostavlja vakuum 0.1 do 0.2 bara po celotnem sistemu membran vse do iztočnega bazena ter končnega iztoka.

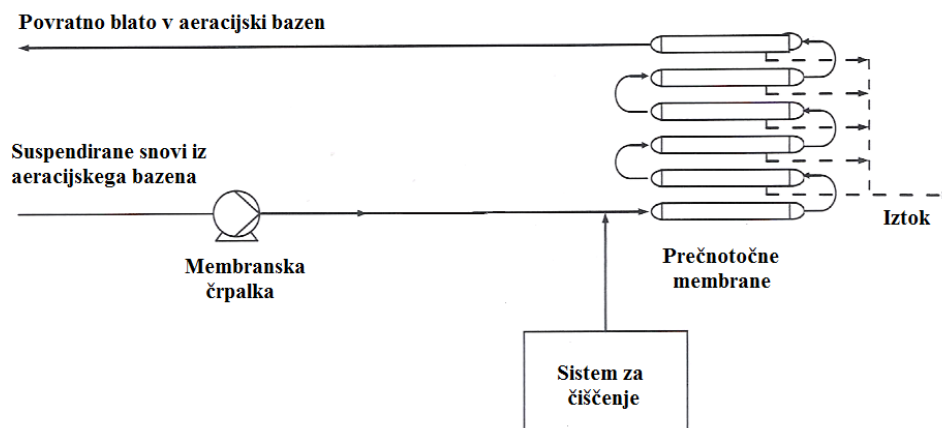
Z doseganjem kakovosti iztoka brez suspendiranih snovi, se koncentracija suspendiranih snovi v membranskem bazenu povečuje. Na površini membran se zato pojavi plast blata, katera bi brez dotoka nove odpadne vode popolnoma zamašila pore in ustavila pretok. Temu se izognemo s pravočasnim čiščenjem membran ter stalnim dotokom odpadne vode, ki mora biti enak pretoku iztočne vode in povratnega blata.

Z debeljenjem sloja blata na membrani se izboljšuje filtracijska sposobnost membrane, saj so zmanjšane pore in je prehodnost suspendiranih snovi otežena. Čeprav to doprinese k boljšemu učinku čiščenja se povečuje tako imenovani trans-membranski tlak Δp_{TM} in zmanjšuje tok skozi membrano. Za optimalno delovanje membrane je potrebno kontrolirati debelino blata kar se dosega z naslednjimi mehanizmi:

- Periodično aerirati membrane in s tem osveževati sloj blata
- Periodično povratno izpirati membrane z vodo iz iztočnega bazena s čimer se odstrani sloj blata in odmaši pore membrane. Ta postopek je mogoč le pri vlaknastih membranah.
- Vzpostaviti periodično ustavljanje dotoka vode, medtem ko so membrane še vedno aerirane. Ta postopek se imenuje počivanje (relaxation) in je alternativa povratnemu izpiranju vlaknastih membran.

2.2.2 Cross – flow (prečnotočni) membranski bioreaktorji

Cross – flow (prečnotočni) membranski bioreaktorji ne potrebujejo membranskega bazena. Namesto tega so zloženi na podpornikih ali stojalih v bližini aeracijskega bazena. Vsak vsebuje 3 do 7 prečnotočnih modulov v vsakem modulu pa je snop cevni membran. Pred membranami je čistilna enota katera periodično dovaja kemikalije za čiščenje membran, kot prikazuje slika 5.



Slika 5. Shematski prikaz cross – flow (prečnotočnega) MBR sistema (Vir: A.C. van Haandel, 2012)

Najpogostejši premeri cevčic so 8mm ali 5.2mm. Trend je v zmanjševanju premerov saj se s tem povečuje površina modulov in s tem zmanjšuje recirkulacijski tok, kar pripelje do povečanega toka efluenta in zmanjšane porabe energije. Poleg tega je še prednost možnosti povratnega izpiranja manjših cevčic. Membranski moduli so na voljo v več standardnih velikostih najpogostejša je 3" in 8". Tako ima 8" modul premer 206mm dolžino 3 metrov in površino 27m² pri 8mm cevčicah in 33m² pri 5.2mm cevčicah. Suspendirane snovi krožijo s hitrostjo 3-5 m/s pri povprečnem tlaku 3–7 barov. Tlak potreben za kroženje je odvisen od lastnosti odpadne vode, koncentracije suspendiranih snovi in števila tipa ter konfiguracije membranskih modulov. Iztok iz membranskih cevčic je pravokoten glede na recirkulacijski tok, zato tudi ime cross – flow (prečnotočna) filtracija. Hitrost tekočine v membranskih cevčicah je velika predvsem zato, da se povzroči turbolenca s katero se osvežuje sloj blata ter preprečuje mašenje na površini membrane. Recirkulacijski tok je tako mnogo večji kot pretok iztoka. Zarad večjih pretokov kot pri potopljenih membranskih bioreaktorjih so veliko manj dovzetni do mašenja.

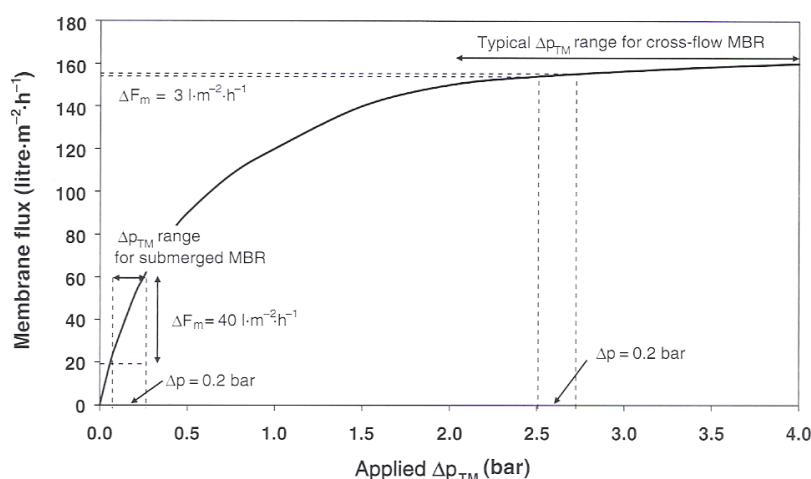
2.2.3 Primerjava potopljenih in cross - flow MBR

Prvotno so se za procese čiščenja uporabljali cross – flow moduli, vendar se je izkazalo, da so stroški energije zelo visoki in tako ti sistemi niso bili primerni za uporabo na komunalnih čistilnih napravah, čeprav so bili zelo uspešni v industrijskih obratih.

Potopljeni membranski sistemi porabijo manj energije, membrane postajajo čedalje cenejše, tako kljub višjim začetnim investicijskim stroškom potopljeni sistemi izpodrivajo cross – flow MBR. Cross- flow sistemi imajo tudi določene prednosti:

- Visoka zanesljivost in zmanjšana občutljivost pri mašenju membran
- Cross – flow sistemi so manj odvisni od karakteristik blata kot potopljeni sistemi
- Membrane so robustnejše kot pri potopljenih modulih, kar omogoča intenzivnejše čiščenje
- Membrane cross – flow modulov so lažje dostopne in tako jih je lažje vzdrževati

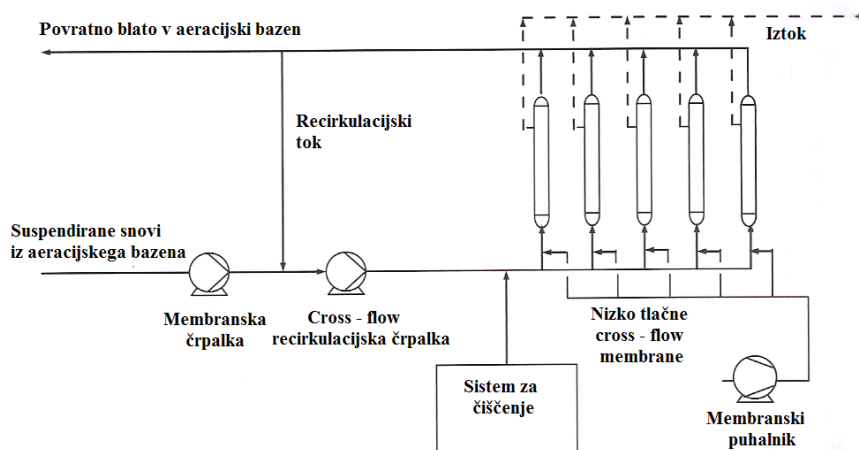
Razen višje porabe energije imajo cross – flow moduli pomanjkljivost glede prilagajanja na nihanje pretoka in dotoka. Potopljene membrane lahko nekaj časa delujejo nad običajnimi pretoki s povečanjem pretoka na iztočni črpalki. Ob povečanju membranskega toka potopljene membrane od 20 na 60 l/m²·h, se poveča tlak za 0.2 bara. Takšen pretok povzroči povečano mašenje membran, s tem se tlak še povečuje dokler se membrana popolnoma ne zamaši. Tako se lahko povečan pretok na membrani izvaja največ 1 do 2 dni. V primeru cross- flow membran pa podobno povečanje tlaka na membrano, zaradi že tako ali tako višjih tlakov na membrani doprinese pretočnost le do 3 l/m²·h, kar je samo 2% povečanje.



Grafikon 1. Prikaz povečanja pretoka glede na povečan tlak na membranah. (Vir: A.C. van Hanndel, 2012).

Prilagodljivost potopljenih membran je tako veliko boljša, kar je zelo uporabno pri čistilnih napravah z veliko razliko med maksimalnimi ter povprečnimi pretoki. Takšen primer so čistilne naprave kjer dotekajo odpadne vode mešanega sistema in so velike razlike med deževnim ter suhim pretokom. Iz grafa je razvidno, da s povečanjem tlaka na membrano lahko dosežemo trojno povečanje pretoka. V primeru da deževni tok ne presega trojnega toka v suhem obdobju, lahko membrane dimenzioniramo na povprečni pretok. Pri cross – flow membranah je potrebno dimenzioniranje na maksimalne pretoke, tako prihaja do predimenzioniranja sistemov, kar ni ekonomično. Cross – flow sistemi so uporabni predvsem za čiščenje na manjših napravah do velikosti pretokov 30 m³/h, ali v primeru da gre za ravnanje z bolj onesnaženimi vodami

S poznavanjem pomanjkljivosti in prednosti obeh sistemov je prišlo do razvoja tako imenovanih nizko tlačnih cross – flow modulov (LPCF) MBR. Pri teh sistemih so uporabljene cross – flow membrane z lastnostmi potopljenih in cross – flow membran. Porabo energije so znižali z zmanjševanjem hitrosti tekočine na 0.5 do 1 m/s, z dovajanjem zraka, pa se vzdržuje membrane čiste. Podobno kot pri potopljenih membranah so periodično čiščene s povratnim tokom in imajo obdobja počitka (relax). Tlak na membranah je podoben kot pri potopljenih membranah in se giblje med 0.1 do 0.4 bare.



Slika 6: Shema Nizko tlačne cross – flow membrane (LPCF MBR). (Vir: A.C. van Hanndel, 2012)

Zaradi nižjega pretoka skozi membrano je mašenje cevnih membran manjše, z bolj robustno zgradbo pa so manj občutljive na čiščenje. S to kombinacijo obeh sistemov so tudi dimenzije membran manjše.

2.3 Načrtovanje membranskih bioreaktorjev

2.3.1 Teoretični pogled

Tok skozi membrano je funkcija sile (trans membranski tlak) in odpornosti membrane. Odpornost membrane je posledica velikosti toka skozi membrano (F_m), stopnje mašenja membrane in temperature tekočine. Pri membranskih reaktorjih je najpomembneje vzdrževati čim večji pretok skozi membrano ob minimalni porabi energije. Iz tega sledi, da morajo membrane delovati ob najnižjem trans membranskem tlaku (Δp_{TM}). Ta je odvisen tudi od materiala membran, saj je potrebna čim manjša odpornost in zmanjšano mašenje. S povečanjem Δp_{TM} bo ob nespremenjeni prepustnosti membrane narasel pretok skozi membrano, vendar pa poleg povečane porabe energije doprinese hitrejše mašenje in slabšo prepustnost membrane.

Pri cross – flow membranah določimo Δp_{TM} , z razliko med dvema merilci tlaka. Prvi je postavljen na strani dotoka suspendiranih snovi, drugi pa na koncu membranskega modula.

Določanje Δp_{TM} pri potopljenih membranah je nekoliko bolj zahtevno, ker ne gre za zaprt sistem, saj je bazen s suspendiranimi snovmi odprt. Tako je merilec tlaka postavljen na iztočno črpalko. Tlak je določen z dvema meritvama; prvo ko je črpalka ustavljena ($p_{statičen}$) in drugo ko je črpalka v delovanju ($p_{dinamičen}$). Razlika med meritvama pove kolik je padec tlaka na membrani (Δp_{TM}). Meritve je potrebno izvajati večkrat, saj so nihanja v membranskem bazenu, ki povzročajo različen $p_{statičen}$.

Membranski tok (F_m) je odvisen od trans membranskega tlaka (Δp_{TM}), tako je primernejši parameter za opis delovanja membrane njena prepustnost ($l/m^2 \cdot h \cdot bar$).

$$\Phi = F_m / \Delta p_{TM}$$

Razmerje med Δp_{TM} in rezultirajočim F_m ni linearno, zato je pomembno, da prepustnost določamo pri standardiziranih membranskih pretokih. Maksimalna prepustnost je odvisna od tipa membrane in odpadne vode.

Nenaden padec prepustnosti membrane nakazuje na težave: to lahko pomeni da je membranski pretok previsok, ali da rast bakterij in tvorba sluzi zapirata pore membrane. Na prepustnost vpliva stopnja mašenja in sprememba temperature. Pri višjih temperaturah se z nižanjem viskoznosti vode pore širijo in tako povečajo prepustnost. Najboljše je če vpliv temperature določimo za specifično kombinacijo odpadne vode in membrane. Najpogosteje je uporabljena metoda, ki upošteva viskoznost vode in temperaturo (referenčna temperatura je 15°C):

$$\Phi_{T,ref} = \Phi_T * (v_T / v_{T,ref})$$

Pri čemer sta v_T ; $v_{T,ref}$: viskoznost pri delovanju in viskoznost pri referenčni temperaturi.

$$v_{T,ref} = 0,0006 * T^2 - 0,0517 * T + 1,9285$$

$$= 1,288 \text{ za } T_{ref} = 15^\circ\text{C}$$

T - temperatura reaktorja

Druga korelacija je pri referenčni temperaturi 20°C:

$$\Phi_{T,20} = \Phi_T * \exp [- 0,0026 * (T - 20)]$$

Pri čemer sta Φ_T in $\Phi_{T,ref}$; prepustnost pri delovanju in prepustnost pri referenčni temperaturi.

Vsaka membrana ima določene karakteristike pretoka, kateri je odvisen od odpadne vode in temperature tekočine, tako je zelo pomembno od kje pride odpadna voda. Pri komunalnih čistilnih napravah so tako pretoki 20 - 25 l/m²h, pri industrijskih napravah pa je to znatno manj in se giblje med 5 – 15 l/m²h.

2.3.2 Vpliv na sistem aktivnega blata

Bistvene razlike med membranskimi bioreaktorji in običajnimi sistemi z aktivnim blatom so naslednji:

- Kontroliranje količine tekočine

Pri običajnem sistemu z aktivnim blatom nivo hidravličnega profila upada z oddaljenostjo od vtoka (vtok → bazen z aktivnim blatom → usedalnik → iztok). Povečanje na vtoku rezultira s povečanjem na vseh nivojih sistema, tako da zelo težko pride do prelivanja v kateri koli fazi. Pri uporabi membranskih bioreaktorjev, pa je na koncu iztočna črpalka, katera nadomešča gravitacijski tok kot je to pri običajnih sistemih. V primeru neuravnovešenja pri vtoku in na iztoku, pride do prelivanja oz. praznega membranskega bazena. Zaradi tega je potrebno kontrolirati količino tekočine v bazenu z aktivnim blatom. Membranske enote se po potrebi prižigajo in ugašajo in s tem uravnavajo pretok, ali pa se uporabi dodaten volumen za zapolnjevanje primanjkovanja tekočine (Udo Wiesmann, 2007).

- Delovanje pri višjih koncentracijah blata

Glavna prednost delovanja pri višji koncentraciji blata je zmanjšanje volumnov za čiščenje. Slabost tega se pojavi ob višjih pretoka, saj imajo zaradi tega večji vpliv na kvaliteto iztoka. To pa ni problem samo pri MBR ampak tudi pri običajnih sistemih, saj tam zaradi višjih pretokov pride do mešanja

aktivnega blata, ter prenosa v usedlanik, kar prav tako zmanjšuje sposobnost čiščenja (Paola Foladori, 2010).

Drug vpliv koncentracije je na povečano porabo kisika in s tem večje stroške aeracije, ki lahko dovede do pojava penjenja, kar je tudi en od dejavnikov katerega je potrebno kontrolirati pri MBR.

- Aerobno povratno blato

Povratno blato pri običajnih sistemih z aktivnim blatom je anoksično ali anaerobno, saj se je ves kisik porabil v sekundarnem usedalniku. V primeru MBR je povratno blato se vedno aerobno (4 – 6 mg O₂/l). Pri cross – flow MBR so te količine enake kot na koncu aerobnega območja čiščenja (1 – 2 mg O₂/l). Povratni tok blata je veliko večji in dosega 4 – 6 kratnik vtoka za potopljene MBR in 10 – 20 kratnik za cross – flow MBR.

Povratno blato iz MBR se tako ne vrača v anaerobno oz. anoksično območje, če hočemo izvajati odstranjevanje nutrientov, saj bi to negativno vplivalo na denitrifikacijo in biološko razgradnjo fosforja.

2.3.3 Predčiščenje

Membrane delujejo kot mikroskopsko sito, zato je pomembno, da preprečimo dotok večjih trdnih delcev, saj so membrane dovzetne do makro mašenja zaradi plastike, las in drugih snovi. Ročno čiščenje membran je zelo zahtevno delo, tako je bolje predhodno preprečiti dostop teh večjih delcev. Kot prvo je priporočljivo postaviti mrežo z 6 – 7 mm odprtini, kateri sledi sito z odprtini 0.6 – 1.0 mm. Namesto tega je lahko postavljen tudi primarni usedalnik, vendar je potrebno pred njim dati mrežo za večje delce.

Druge neželjene snovi v odpadni vodi so olja in maščobe, saj prav tako mašijo pore in s tem zmanjšujejo prepustnost. Na komunalnih čistilnih napravah za lovljenej olj postavijo aerirano peskovno prepreko, katera poleg olj odstranjuje tudi delce peska.

2.4 Delovanje MBR

2.4.1 Delovanje potopljenih MBR

Potopljene membrane delujejo po naslednjih standardiziranih fazah:

- Delovni način: iztočna črpalka deluje in proizvaja efluent, membrane so aerirane, s tem je tudi sloj blata na membranah osvežen. Membranska črpalka pretaka suspendirane raztopljene snovi po membranskem bazenu.
- Povratno izpiranje: iztočna črpalka pri povišanem pretoku (100 – 120%) s pomočjo ventilov vzvratno črpa tekočino. Med tem še vedno potekata aeracija in recirkulacija suspendiranih raztopljenih snovi v membranskem bazenu. Ta del postopka se nanaša samo na cevne membrane.
- Počivanje (relaxation): iztočna črpalka je izklopljena, ta postopek se uporablja pri ploščatih membranah namesto povratnega izpiranja. Aeriranje in recirkulacija potekata nemoteno.
- Stanje pripravljenosti: gre za stanje ko so nekateri membranski moduli zaustavljeni, pri tem deluje blago aeriranje in počasen pretok skozi membranski bazen. Ta postopek se izvaja izmenično za vse membranske bazene.
- Čiščenje

Trajanje posameznih faz delovanja, je različno glede na odpadno vodo, karakteristike blata in stopnje mašenja. Tipični časovni intervali delovanja so prikazani v preglednici 1:

Preglednica 1: Faze delovanja membranskih bioreaktorjev (Vir: A.C. van Hanndel, 2012)

Faza delovanja	Cevne membrane	Ploščate membrane
Delovni način	400 s	415 s
Povratno izpiranje 115%	20 s	-
Počivanje	-	45 s
Skupen čas delovanja	420 s	460 s
η (razmerje net / gross pretok)	$(400*1-20*1.15)/420=0.9$	$(415*1.0)/460 = 0.9$

2.4.2 Delovanje cross – flow MBR

Cross – flow membrane delujejo neprekinjeno tako tudi nimajo različnih faz delovanja. Pri nižjem pretoku se nekatere membrane zaustavi. Med delavanjem so ene v stanju pripravljenosti druge pa v delovnem načinu. Ta tip membran lahko deluje neprestano vse dokler ne dosežejo minimalnega pretoka pri katerem jih je potrebno čistiti.

3.4.3 Mašenje membran

Mašenje membran povzroča zmanjševanje pretoka skozi membrano, ter prepustnost membrane, kar je pglaviten problem MBR. Tudi pri najboljših membranskih sistemih prihaja do mašenja. Poznamo dve vrsti mašenja makro in mikro. Pri prvem gre za večje delce kot so: plastika, lasje in podobni odpadki. Že v prejšnjem poglavju je napisano kako se izloča te delce. Mikro mašenje pa povzročajo organske, bio ali anorganske snovi. Pogosto gre za proces adsorpcije in absorpcije na površini membrane. Takšnih snovi se ne da odstraniti s povratnim izpiranjem ali aeriranjem pri tem je potrebno poseči po kemičnem čiščenju.

- Anorgansko mašenje

Pri tem gre za nalaganje neorganskih trdnih snovi na membrano, najpogosteje so to:

- CaCO_3 : izločanje je odvisno od pH odpadne vode. Pri intenzivnem aeriranju se CO_2 odstrani in tako zviša pH na 0.5 – 1.0 Pri višjih vrednostih pH se CaCO_3 slabše izloča, tako lahko z kisliniskim čiščenjem odstranjujemo takšno mašenje.
- FePO_4 in CaPO_4 : te kovinske soli so problematične v primeru, ko gre za odstranjevanje fosforja ter reakcija še ni potekla do konca. Čiščenje se izvaja s kislinami pri nizkem pH.

- Železovi oksidi in hidroksidi (Fe_2O_3 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$): Železo je lahko prisotno v odpadni vodi ali dodano ob odstranjevanju fosforja. Te kompleksne spojine se odstranjujejo s tvorjenjem kompleksnih organskih spojin kot sta citronska in oksalna kislina. Čiščenje poteka ob nizkem pH z močnimi anorganskimi kislinami kot je HCl.

- Organsko mašenje

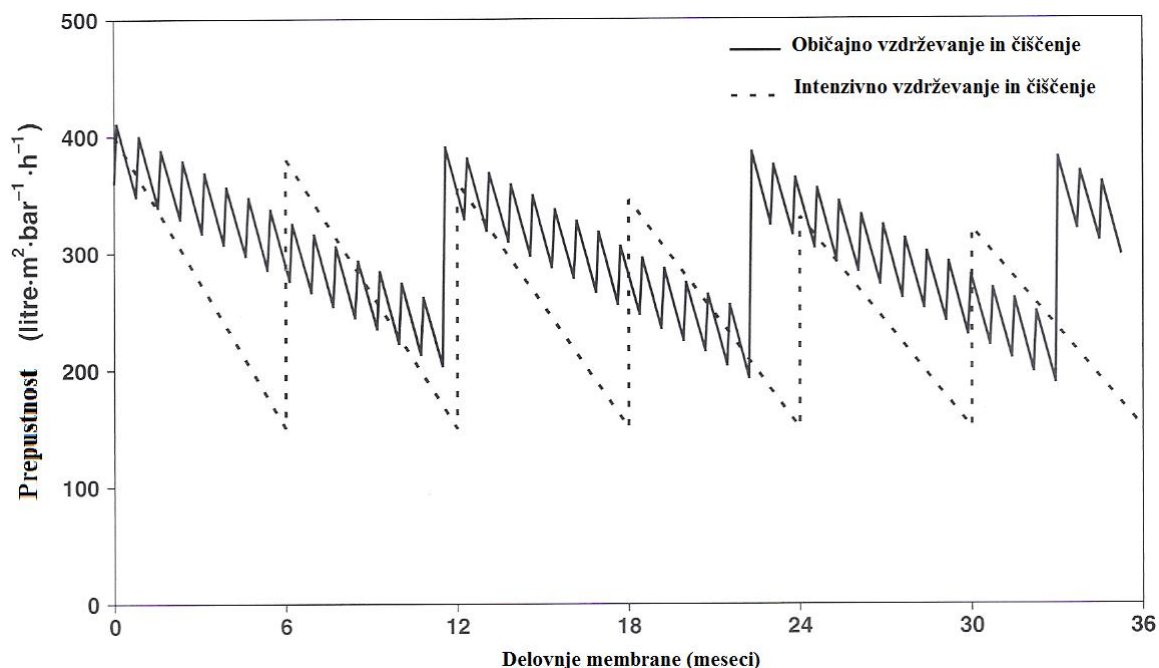
Do tega prihaja zaradi suspendiranih organskih snovi kot so olja in maščobe, ali druge organske spojine ki se oprimejo membranskega materiala ali imajo veliko molsko težo. Za odstranjenje manjših količin olj se uporablja NaOH odstranjevanje drugih organskih snovi pa dosežemo z močnimi oksidanti kot je NaOCl ali H_2O_2 , pri visokem pH.

- Biomašenje

Gre za rezultat biološke rasti (bakterije, glive) na površini membrane, kar pripelje do mašenja por zaradi biomase ali prekritja membrane s sluzjo. Biomašenje se prepreči z dobro načrtovanim MBR ter že v prejšnjih fazah čiščenja kjer poteka nitrifikacija. Pojav biomašenja odpravimo z močnimi oksidanti kot je NaOCl ali H_2O_2 pri visokem pH ali NaOH.

2.4.4 Čiščenje membran

Večino primerov mikro mašenja se da odstraniti s pomočjo kemičnega čiščenja. Pri tem se uporabljajo močne kemikalije (oksidanti, kisline in baze), katere so škodljive za membrane in jim skrajšujejo življenjsko dobo. Zaradi tega je pomembno dobro urediti vse postopke čiščenja pred MBR, da sploh ne prihaja do pretiranega mašenja membran. Raziskava Beverwijk o MBR sistemih je pokazala da je redno (manj intenzivno) čiščenje bolj učinkovito kot občasno (bolj intenzivno) čiščenje (van de Roest in sodelavci, 2002). Ne samo da se podaljša življenjska doba membrane, tudi povprečna prepustnost membrane je s tem večja, kar je prikazano na grafikonu 2.



Grafikon 2: Prikaz prepustnosti membrane kot funkcija časa, dveh režimov čiščenja. (Vir: van de Roest in sodelavci, 2002)

- Režim pri katerem je izvedeno redno (enkrat na dva tedna) blago kemično čiščenje, katero je občasno dopolnjeno z bolj intenzivnim v primeru da prepustnost membrane pade pod določeno stopnjo.
- Režim kjer je dopuščeno, da prepustnost pade do najnižje stopnje, čemur sledi intenzivno čiščenje za ponovno vzpostavitev prepustnosti.

Glede na naravo mikro mašenja se uporablja različne kemikalije ali kombinacije kemikalij, kot je predstavljeno v prejšnjem poglavju. Iztočni vodi iz membran se doda kemikalije in vzpostavi povratno izpiranje skozi membrane, ali se membrane potopi v kemično raztopino. V začetku so se membrane odstranjevale iz bazenov in se jih je čistilo v posebej za to namenjenih bazenih, kar je bilo težavno in zamudno. Namesto tega so uvedli nove načine čiščenja:

- Redno čiščenje na mestu (vlaknaste membrane in cross – flow membrane)

Pri tem postopku ostanejo membrane potopljene v bazenu, zaustavi se dotok odpadne vode in aeriranje, membrane pa večkrat povratno izperemo s shranjeno tekočino iztoka.

Glede na obliko in stopnjo zamašenja se pri iztočni črpalki dodajajo potrebne kemikalije (NaOCl in NaOH), katere se pomešajo s tekočino in oblivajo membrane. Zaradi možnosti medsebojnega reagiranja kemikalij se postopek izvaja v dveh ciklih z vmesnim izpiranjem. Pri čiščenju membran z dovodom

tekočine na zgornjem delu se uproablja večji pretok (110-120% običajnega pretoka), kot pri čiščenju membran z dotokom na spodnjem delu modula kjer pretok dosega le 10-15% običajnega.

Na splošno cross – flow membrane potrebujejo manj čiščenja kakor potopljene membrane, saj zaradi delovanja pri višjih hitrostih pretoka ne prihajo do tolikšnega nabiranja snovi na membranah. Membrane se čistijo 4-12 krat letno, ob manjših volumnih membranskih modulov je čiščenje učinkovitejše, saj se uporabljajo močnejše kemikalije, kot so mešanice oksidantov, anorganske kisline, detergenti, NaOH in druge. Postopek čiščenja cross – flow membran se začne s pripravo čistilne raztopine v sistemu za čiščenje. Iz modula odteče biomasa in jo zamenja voda, vzpostavi se povezava s sistemom čiščenja od koder ob nizkem tlaku prične dotekati čistilna raztopina v membranski modul.

- Redno čiščenje na zraku (vlaknaste membrane)

Bistvena razlika med čiščenjem na mestu in na zraku je, da se pred čiščenjem izprazni membranski bazen. Zaradi tega je potrebno uporabiti manj kemikalij, saj ne prihaja do reakcije s suspendiranimi snovmi v bazenu, čiščenje pa lahko poteka pri višjih temperaturah kar izboljša rezultat čiščenja. Po končanem čiščenju se membranski bazen izpere z biomaso.

- Intenzivno čiščenje (ploščate membrane)

Ploščatih membran ne moremo čistiti s povratnim izpiranjem, saj bi se plošče ob tlakih višjih od 0.05 – 0.1 bara napihnile in počile. Čiščenje se tako izvaja ročno. Vsak modul se poveže s čistilnim bazenom v katerem je čistilna tekočina. Volumen čistilne tekočine potreben za čiščenje predstavlja trikratnik volumna modula. Zaradi individualnega čiščenja modulov je ta postopek delovno zelo zahteven.

Avtomatizacija postopka čiščenja je draga predvsem pri večjih sistemih, saj je potrebno vsak modul opremiti z ventili. Glede na zahtevnost postopka čiščenja se ga izvaja le 1 do 2 krat letno, pri čemer se porabi velika količina kemikalij, kar lahko rezultira v slabši kakovosti efluenta.

- Obnovitveno čiščenje (vlaknaste membrane)

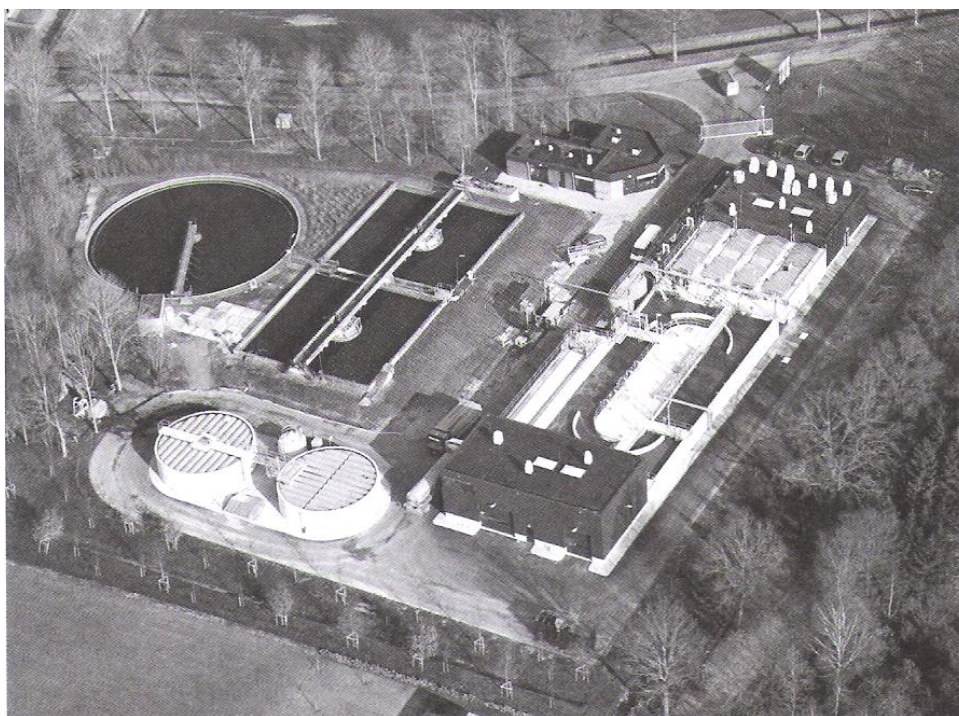
Ta oblika čiščenja se uporablja v primeru, ko je potrebno izboljšati prepustnost membran, ali če redno čiščenje nima zadovoljivega učinka. Prepustnost membran tudi po čiščenju ni povrnjena v začetno stanje, saj že po nekaj dneh delovanja pride do velikega padca prepustnosti membrane. Pri komunalnih čistilnih napravah gre za padec prepustnosti membrane iz 800 na 400 l/m²*h*bar in tudi z obnovitvenim čiščenjem tega padca prepustnosti membrane ne odpravimo.

Med čiščenjem je membranski bazen popolnoma izprazen in očiščen z vodo ali iztočno tekočino. Ko se bazen napolni z vodo in visoko koncentriranimi kemikalijami se vzpostavi aeriranje membrane. To traja več ur po končanem postopku se bazen izprazni, zopet očisti ter ponovno napolni z vodo in biomaso. Podobno kot pri intenzivnem čiščenju tudi tu prihaja do poslabšanja kvalitete efluenta zaradi večje količine porabljenih kemikalij.

2.4.5 Potencial membranskih bioreaktorjev

Tehnologija membranskih bioreaktorjev velja za preverjeno in zanesljivo. V zadnjih 25 letih je bil narejen velik napredek pri načrtovanju in delovanju MBR. Takšen napredek je bil omogočen s pomočjo nacionalnih programov financiranja, kot je projekt Beverwijk WWTP na Nizozemskem. Pri tem projektu so sodelovali proizvajalci membran, inženirski biroji in odbor za ravnanje z vodami. Ukvarjali so se s postavitvijo pilotskih sistemov MBR med leti 2001 in 2002, ter nadaljnjimi testiranjem čistilnih naprav. Rezultati projekta so bili izboljšana zanesljivost delovanja, daljša življenjska doba membran, zmanjšana poraba energije in boljše razumevanje mašenja membran (Udo Wiesmann, 2007).

Na svetu deluje več sto manjših industrijskih sistemov zgrajenih že v devetdesetih letih nahajo se v Evropi, Severni Ameriki na Japonskem, v Avstraliji skratka na vseh kontinentih. Na Japonskem deluje celo več kot 1000 industrijskih in komunalnih MBR. Konec devetdesetih so se začele graditi tudi večje komunalne čistilne naprave z MBR tehnologijo ena prvih je bila zgrajena v Varsseveldu na Nizozemskem velikosti 800 m³/h, slika 7.



Slika 7: Pogled na komunalno čistilno napravo z MBR zgrajeno v kraju Varssveld na Nizozemskem. Levo je star del naprave, desno pa od spodaj navzgor, predčiščenje, membranski bioreaktorji (potopljene votlo vlaknaste membrane) in prostor za puhalnike in črpalke. (Vir: Christoph Brepolis, 2011)

Membranski bioreaktorji postajajo čedalje bolj konkurenčni običajnim čistilnim napravam, saj so se membrane v zadnjih letih pocenile. Še vedno pa je njihova razširjenost dokaj nizka. Za postavitev MBR se odločajo predvsem zaradi:

- Omejitve velikosti prostora čistilne naprave
- Strožjih zahtev kakovosti efluenta zaradi ranljivega vodotoka ali možnosti ponovne uporabe efluenta
- Težav pri posedanju v sekundarnem usedalniku

Slabosti zaradi katerih se težje odločajo za postavitev MBR sistemov so:

- Višji investicijski in operativni stroški
- Večja zahtevnost delovanja sistema ter potreba po bolj izobraženem kadru.
- Ekološki vidiki glede uporabe kemikalij za čiščenje in večja poraba energije.

Stroški pri postavitvi MBR sistema napram običajne čistilne naprave so približno 50% višji. Ta razlika ni le zaradi večjih investicijskih in operativnih stroškov. Poleg teh so stroški za postavitev boljšega pred čiščenja ter večjo stopnjo avtomatizacije sistema in porabe energije. Če se bodo cene zemljišč v prihodnosti dvigovale zna biti faktor manjšega tlorisa za MBR ugoden dejavnik pri odločanju za postavitev sistema. Prav tako prihajajo v veljavo strožji standardi za kvaliteto efluenta, kar zna biti dodaten razlog za večje število čistilnih naprav z MBR. Tudi povečanje prebivalstva in s tem večje količine odpadne vode so razlog za razmislek postavitve MBR sistema na že obstoječo čistilno napravo, saj se s tem tloris skoraj ne povečuje in ni dodatnih stroškov za odkup zemljišč oz. v gostih poselitvah kjer niti ni prostora za širitev (Nancy G. Love).

3. Komercialni membranski bioreaktorji

3.1 Kubota

Leta 1989 se je Japonska vlada odločila spodbuditi večje korporacije, da vlagajo v novejšo tehnologijo za čiščenje odpadnih voda katere bi dosegale boljše rezultate čiščenja pri manjših velikostih tlorisov naprav. Med podjetji je bila tudi Kubota, katera je razvila ploščat potopljen membranski bioreaktor (T. Stephenson 2001).

3.1.1 Opis sistema

Pri sistemu Kubota gre za membrane potopljene v bazen z aktivnim blatom katero ima koncentracijo raztopljenih suspendiranih snovi med 15 in 20 g/l. Membranski modul je sestavljen iz dveh delov. Zgornji del vsebuje 150 ploščatih membran, ki so vstavljene v ohišje iz umetne mase. Na spodnjem delu je vgrajen razpršilec mehurčkov kateri med delovanjem dovaja mehurčke ter aktivno blato do plošč, ki se nahajajo višje. S pomikanjem mehurčkov se ustvari tok s hitrostjo 0.5 m/s kar zmanjšuje mašenje membrane in ob nizkem tlaku povzroči iztok efluenta. Moduli so postavljeni na stojala, površina posamezne plošče znaša 0.8 m² velikost por pa je 0.4 μm.



Slika 8: Shematski prikaz ploščatega potopljenega membranskega bioreaktorja. (Vir: Kubota Membrane Europe LTD, 2015)

3.1.2 Opis delovanja

Med normalnim delovanjem suspendirane snovi tečejo preko membranskega modula. Pretok je vzpostavljen gravitacijsko s hidravličnim gradientom med 1 in 1.5 m. Število modulov je odvisno od

potrebnega skupnega pretoka. Pretok na iztoku pa je odvisen od padca hidravličnega gradienta. Za ta sistem je potrebno postaviti predčiščenje s siti velikosti 2-3mm.

3.2 ZeeWeed membrane

Membrane ZeeWeed so odporne na klor in delujejo v območju mikrofiltracije z velikostjo por 0.1 μm . Gre za vlaknaste membrane s premerom 19mm in delujejo kot potopljene membrane. Na pokončen okvir so pritrjena vlakna z iztokom na obeh straneh. Na spodnjem delu so postavljeni aeratorji za mešanje tekočine.

Moduli so sestavljeni v kasete katere so povezane v membranskem bazenu. Več kaset je lahko vzporedno vezanih na eno črpalko.



Slika 9: Prikaz sestave ZeeWeed membran v kasete in povezave v bazenu (Vir: Umpqua Basin Water Association Inc., 2015).

Hitorst pretoka filtracije je med 40 in 70 $\text{l/m}^2\cdot\text{h}$, pri tlaku 0.1 do 0.5 bara. Za pretok skrbi centrifugalna črpalka, ki z občasnim povratnim izpiranjem ohranja membrane dobro prepustne. Zaradi nizkega tlaka na membranah redko prihaja do mašenja. V tabeli 2 so prikazane specifikacije različnih ZeeWeed membran.

	ZW 150	ZW500
Dimenzije modula [cm]	Višina: 180	Višina: 200
	Širina: 50	Širina: 70
	Debelina: 10	Debelina: 20
Površina membrane [m^2]	14	46
Število modulov v kaseti	12	8
Dimenzije kaset	Višina: 200	Višina 200
	Širina: 190	Širina: 180
	Debelina: 70	Debelina: 70

Skupna površina membrane [m ²]	168	368
--	-----	-----

Tabela 2: Različni moduli proizvajalca ZeeWeed (Vir: Stephenson in sodelavci, 2001)

3.3 Orelis in Mutsui Chemicals

Proizvajalec ploščnih membran s posebnostjo, da membrane niso potopljene, ampak delujejo zunaj MBR. Plošče so narejene iz akrilonitril polimera in so vstavljene v ohišja iz neerjavečega jekla. Hitrost tekočine skozi membrano je 1 do 2 m/s zrak za mešanje, pa se dovaja s posebno črpalko. Poraba energije je med 1 in 3 kW/m³. Pretok skozi sistem je približno 100 l/m²*h in lahko brez čiščenja membran deluje do 45 dni.

3.3.1 Ubis

Sistem Ubis je bil razvit z namenom internega čiščenja odpadne vode iz kuhinj, umivalnic in sanitarij to je tako imenovana siva voda (graywater). Voda je zbrana v mešalnem bazenu z aktivnim blatom v katerem je koncentracija suspendiranih snovi 20g/l. S pretokom skozi membrano se voda očisti suspendiranih snovi, bakterij in virusov. Tako gre nazaj v sistem in se uprablja za splakovanje sanitarij.

3.4 US Filter

Za Avstralsko tržišče so proizvedli sistem membranskih bioreaktorjev z votlimi vlakni z velikostjo por 0.2µm in delujejo kot potopljene membrane. S periodičnim čiščenjem pod visokim pritiskom vpihanega zraka odstranjujejo nabrane trdne delce na membrani. Membrane so lahko direktno potopljene v bazen bioreaktorja (Gorden Werner in sodelavci, 1993)

Za uporabo v Nemčiji je bil razvit sistem Kompajet z uporabo cevni membran na cross-flow modulih. Za pretok s hitrostjo 1.5 do 3.5 m/s, skrbi recirkulacijska črpalka. Poraba energije dosega vrednosti med 1.0 in 2.5 kW/m³, količina pretoka pa znaša od 20 do 50 l/m²*h (Stephenson in sodelavci 2001).

3.5 Membratex, Weirenvig, Aquatec in Bioscan A/S

Vsi od navedenih proizvajalcev uporabljajo v obtočnih membranskih bioreaktorjih cevne membrane. Membratex je leta 1980 nadgradil svoj system z anaerobno presnovo ultra-filtracije (Aduf), za čiščenje močno onesnaženih predelovalno živilskih industrijskih voda. V podjetju Aquatec so njihove membrane, ter system nadgradili za uporabo na komunalnih čistilnih napravah.

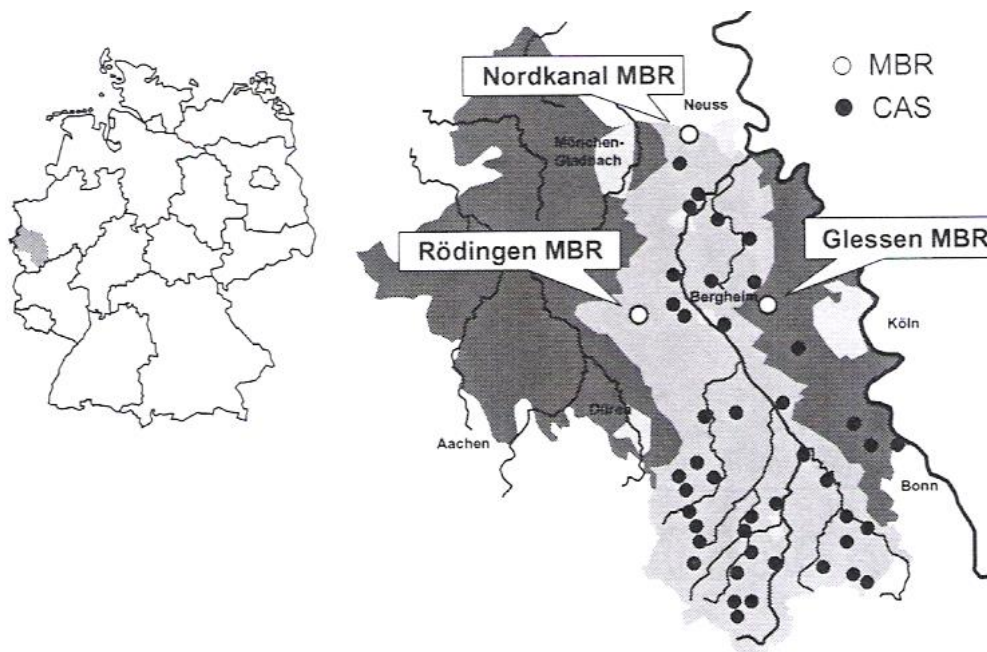
Membratske cevne polietersulfonske membrane imajo velikost por ranga 0,1 μm dolžina vsake cevke je 3 metre v vsakem modulu, pa vzdolžno potekata dva para cevčic vezanih v snope po 20. Zaradi svoje posebne oblike so cenovno bolj dostopne, saj ne potrebujejo visoktlačnega sistema podpore.

4 Predstavitev praktične uporabe membranskih čistilnih naprav

4.1 Opis vodne skupnosti Erftverband

Gre za posebno združenje Severnega Porenja – Vestfalije v Nemčiji. Na tem območju trenutno deluje 44 čistilnih naprav s količinami od 500 do 132000 PE s čimer skrbijo za čiščenje odpadne vode več kot milijon prebivalcev.

Večina čistilnih naprav je bila v zadnjih letih posodobljenih tako, da izpolnjujejo višje standarde pri čiščenju odpadnih voda. Ravno Erftverband je bil prvi, ki je v Nemčiji postavil komunalno čistilno napravo z MBR leta 1999. Nekaj let za tem leta 2004 je bila postavljena še čistilna naprava Nordkanal, katera je bila v tistem času največja MBR komunalna čistilna naprava na svetu. Tretji MBR na tem območju je bil dokončan leta 2008.



Slika 10: Območje združenja Erftverband in lokacije komunalnih čistilnih naprav in naprav z MBR (Vir: Christoph Brepols, 2011).

Reka Erft po kateri se imenuje združenje se zliva v Ren severo zahodno od Kolna. Območje združenja pokriva preko 2000 km². Na območju ni velikih industrijskih obratov, ima pa velik vpliv na okolje rudnik lignita, zaradi katerega so na območju nizki nivoji podtlanice. Zaradi tega se veliko rek ob sušnih obdobjih večinoma napaja z iztoki od čistilnih naprav. Že v preteklosti je bilo dobro poskrbljeno za čiščenje odpadnih voda, saj ima kar tretjina čistilnih naprav tudi terciarno čiščenje za doseganje višjih kakovosti iztoka. Ravno zaradi vseh teh dejavnikov je padla odločitev za postavitev čistilnih naprav z MBR.

4.2 Opis čistilnih naprav z MBR na območju združenja Erftverband

4.2.1 Predčiščenje

Odpadne vode iz gospodinjstev vsebujejo veliko trdnih odpadkov, kateri znajo biti velika težava za membrane, zato je mehansko predčiščenje zelo pomembno.

Na Rodingen MBR so prvotno uporabljali za mehansko predčiščenje mreže z velikostjo 3mm, kar se je kmalu izkazalo za slabost, saj je prihajalo do mašenja in poškodb na membranah, tako je bilo potrebno izpopolniti sistem sit. Na tabeli 3 so prikazani postopki predčiščenja za čistilne naprave.

Preglednica 3: Specifikacije mehanskega predčiščenja na čistilnih napravah (Vir: Christoph Brepols, 2011)

Rodingen 3000 PE	Glessen 9000 PE	Nordkanal 80000 PE
Mreža z odprtinami 3mm dvojni kanal	Mreža z odprtinami 6mm enojni kanal 20mm mreža ob prelivanju	Mreža z odprtinami 5mm dvojni kanal
Aerirana peščena past	Aerirana peščena past	Aerirana peščena past
Obtočno sito 0.5 mm	Sito z odprtinami 1.5mm dvojni kanal	Sito z odprtinami 1.5mm dvojni kanal 1.0mm sito ob prelivanju

4.2.2 Bioreaktor

Biološko čiščenje je bilo načrtovano kot aerobna stabilizacija blata z nizkim razmerjem med hranili in mikroorganizmi (F:M) in zadrževalnim časom blata več kot 25 dni. Tudi konvencionalne čistilne naprave imajo podobne specifikacije vendar se MBR razlikujejo pri hidravličnih zadrževalnih časih in koncentracijah blata. Kar je razvidno iz preglednice 4.

Preglednica 4: Količine ključnih parametrov na čistilnih napravah (Vir: Christoph Brepols, 2011)

Parameter	Rodingen	Glessen	Nordkanal	KČN
Koncentracija blata [kg TSS/m ³]	12 – 18	8 - 12	12	3 – 5
F:M [kgBOD/kg TSS dan]	0.04	0.03	< 0.05	< 0.05
Hidravlični zadrževalni čas [h]	3.6	6.2	4.6	> 14
Zadrževalni čas blata [dan]	25	> 25	25	> 25

Zaradi višje koncentracije blata pri MBR so dimenzije reaktorjev lahko manjše, vendar pa obstaja omejitev. Ugotovljeno je bilo, da se pri koncentracijah višjih od 15 kg/m^3 pojavlja akumulacija stoječega blata v kasetah filtrov, kar zmanjšuje učinkovitost membran. Kljub temu pogoju so MBR po volumnih do trikrat manjši od konvencionalnih čistilnih naprav. Hidravlični zadrževalni časi so znižani za 50 – 70%, kar je posledica boljše dinamike biološkega čiščenja. Iz prakse je razvidno, da je zahtevana kvaliteta efluenta dosežena pri vseh pogojih tudi ob nižjih hidravličnih časih kot je priporočeno, ter da je ob višjih obremenitve nitrifikacija izvedena do konca. Preglednica 5 prikazuje način obratovanja in zahteve kakovosti efluenta.

Preglednica 5: Način, volumni in zahteve na iztoku obratovanja (Vir: Christoph Brepols, 2011).

	Rodingen	Glessen	Nordkanal
Volumen bioreaktorja	$400\text{m}^3 + 80\text{m}^3$ (filtracijski bazeni)	$1600\text{m}^3 + 320\text{m}^3$ (filtracijski bazeni)	9300m^3
Specifičen volumen	160L/PE	213L/PE	116L/PE
Način obratovanja	Simultana aerobna stabilizacija blata	Simultana aerobna stabilizacija blata	Simultana aerobna stabilizacija blata
Odstranjevanje dušika	Intermitirana / upstream denitrifikacija	Intermitirana denitrifikacija	Upstream denitrifikacija
Odstranjevanje fosforja	Hkratno upadanje	Hkratno upadanje	Hkratno upadanje
Temperatura	5°C	8°C	10°C
Zahteve efluenta	$\text{COD} < 30\text{mg/L}$ $\text{NH}_4\text{-N} < 4\text{mg/L}$ $\text{P}_{\text{tot}} < 1.5\text{mg/L}$	$\text{COD} < 30\text{mg/L}$ $\text{NH}_4\text{-N} < 1.5\text{mg/L}$ $\text{P}_{\text{tot}} < 0.6\text{mg/L}$	$\text{COD} < 90\text{mg/L}$ $\text{NH}_4\text{-N} < 10\text{mg/L}$ $\text{P}_{\text{tot}} < 1.5\text{mg/L}$

4.2.3 Membrane in filtracija

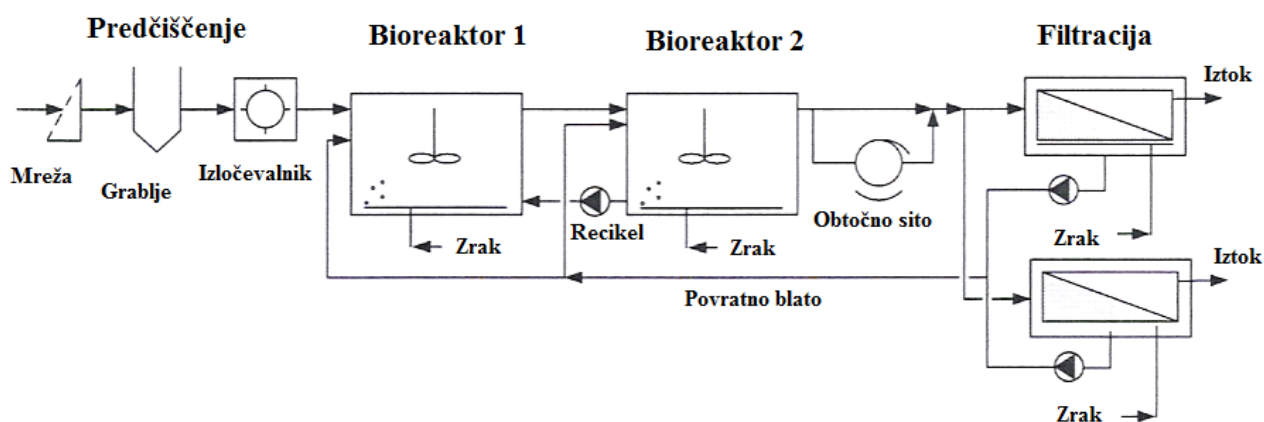
Reaktorji na čistilnih napravah so opremljeni s potopljenimi votlo vlaknastimi (HF) mikrofiltracijskimi membranami. Čistilni napravi Rodingen in Glessen imata ločene membranske bazene na čistilni napravi Nordkanal, pa so membrane vstavljene direktno v nitrifikacijski bazen. Filtriranje poteka neprekinjeno, saj je postavitev narejena tako, da se lahko posamezno linijo membran izključi zaradi manjših pretokov ali potrebe čiščenja.

Preglednica 6: Podatki glede membran in filtracije (Vir: Christoph Brepols, 2011).

	Rodingen	Glessen	Nordkanal
Površina membrane	5280m ²	12100m ²	84480m ²
Tip membrane	HF moduli, ZeeWeed 500C/KMS Puron	HF moduli, ZeeWeed 500D	HF moduli, ZeeWeed 500C
Konfiguracija	2 ločena membranska bazena	4 ločeni membranski bazeni	8 integriranih filtracijskih linij
Projektiran pretok	26 l/m ² *h	24 – 32 l/m ² *h	24 – 32 l/m ² *h
Kapaciteta puhalnika na membransko linijo	1150 m ³ /h	1000m ³ /h	4250m ³ /h

4.3 Pregled Rodingen MBR

Prva MBR čistilna naprava v Nemčiji je bila ravno Rodingenska zgrajena leta 1999 zaradi strožjih zahtev efluenta. Upoštevajoč vse dejavnike so se odločili da namesto širitve obstoječe čistilne naprave postavijo novo čistilno napravo z MBR. Postavljena je bila kot popolnoma delujoča pilotska naprava za raziskovanje tehnologije membranskih bioreaktorjev.



Slika 11: Shematski prikaz Rodingen MBR (Vir: Christoph Brepols, 2011)

Zgrajena sta bila dva membranska bazena s popolnoma enako opremo, da bi lahko čim boljše opazovali biološke procese in proces filtracije. Prvotna postavitev čistilne naprave se je z leti spreminjala in dopolnjevala, tako uspešno deluje že več kot 15 let.

Prispevno območje:

Zmogljivost	3000PE
Površina	22ha tlakovanih površin
Kanalizacijski sistem	mešan sistem

Vtok odpadne vode

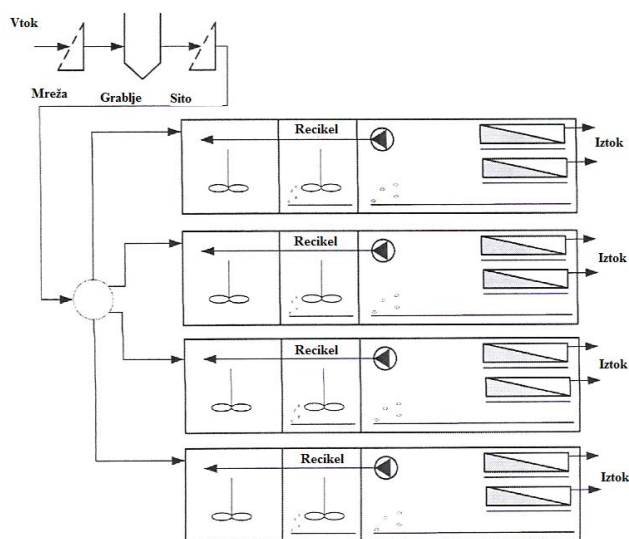
Letna količina odpadne vode	150000 m ³
Maksimalen dotok, sušno obdobje	56m ³ /h
Maksimalen dotok, deževno obdobje	135m ³ /h

Projektiran influent

Kemijska potreba po kisiku KPK	420kg/d
Dušik	40kg/d
Trdne snovi	250kg/d
Fosfor	10kg/d

4.4 Pregled Nordkanal MBR

Čistilna naprava ima votlo vlaknaste membrane, vendar za razliko od Rodingenske nima membran v ločenih bazenih, ampak so potopljene direktno v bioreaktorje. Za tak sistem so se odločili na podlagi numerične simulacije toka popolnega mešanja v bazenih bioreaktorja. Odpadna voda je prečiščena mehansko, kemično in biološko. Čistilna naprava ima naslednje korake kot je prikazano na sliki 12.



Slika 12: Shematski prikaz Nordkanal MBR (Vir: Christoph Brepols, 2011)

Prispevno območje:

Zmogljivost	80000PE
Površina	1350ha tlakovanih površin
Kanalizacijski sistem	mešan sistem

Vtok odpadne vode

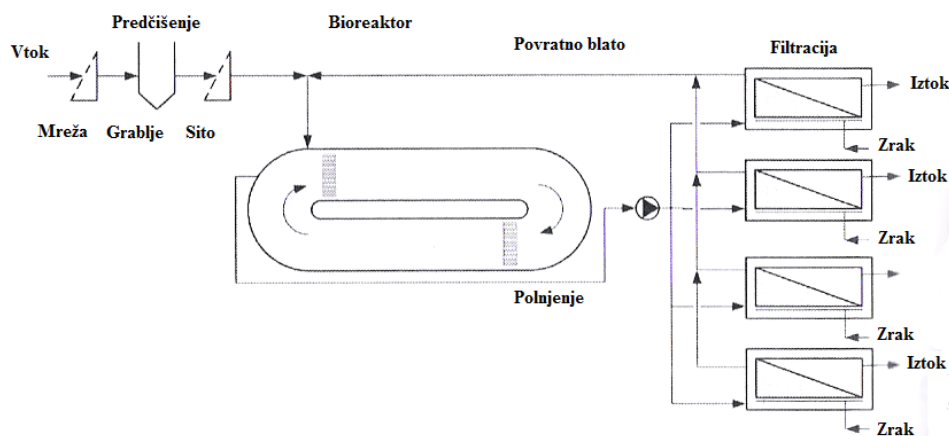
Letna količina odpadne vode	5500000 m ³
Maksimalen dotok, sušno obdobje	1024m ³ /h
Maksimalen dotok, deževno obdobje	1880m ³ /h

Projektiran influent

Kemijska potreba po kisiku KPK	9600kg/d
Biološka potreba po kisiku BPK ₅	5250kg/d
Dušik	897kg/d
Trdne snovi	5600kg/d
Fosfor	123kg/d

4.5 Pregled Glessen MBR

Čistilna naprava se nahaja ob potoku Pulheimer Bach, kateri se po nekaj kilometrih razliva v močvirje brez drugega dotoka. Poleg tega je močvirje glavni napajalnik podtalnice, katero črpajo za potrebe mesta Koln. Zaradi tega je bilo odločeno, da se predhodno čistilno napravo zamenja z novo čistilno napravo z MBR, ki bo izpolnjevala vse zahteve odstranjevanja organskih snovi, prav tako pa skrbela za zdravo vodo brez patogenov, ki bi lahko bili škodljivi za talno vodo.



Slika 13: Shematski prikaz Glessen MBR (Vir: Christoph Brepols, 2012)

Prispevno območje:

Zmogljivost	9000PE
Površina	52ha tlakovanih površin
Kanalizacijski sistem	mešan sistem

Vtok odpadne vode

Letna količina odpadne vode	900000 m ³
Maksimalen dotok, sušno obdobje	156m ³ /h
Maksimalen dotok, deževno obdobje	268m ³ /h

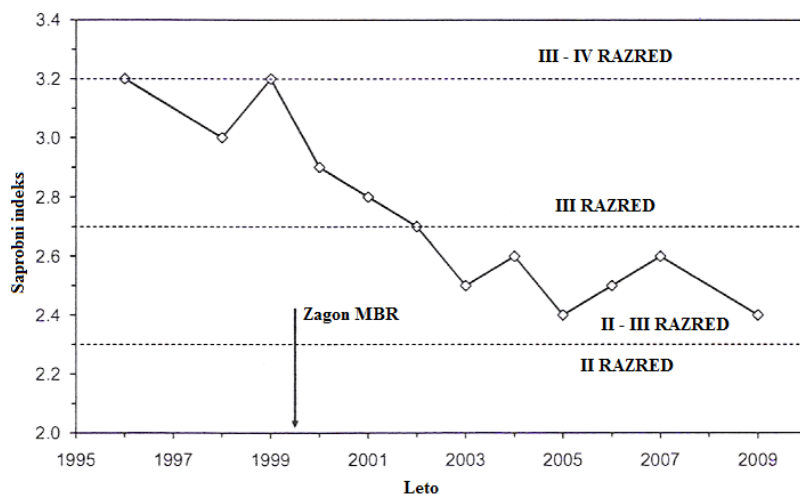
Projektiran influent

Kemijska potreba po kisiku KPK	1008kg/d
Dušik	99kg/d
Trdne snovi	15kg/d
Fosfor	603kg/d

4.6 Vplivi na kvaliteto vodotokov

4.6.1 Vpliv Rodingen MBR na potok Finkelbach

Iztok iz čistilne naprave Rodingen je speljan v Finkelbach. Potok se napaja predvsem od padavin, tko da v suhem obdobju presahne in ima edino napajanje od iztoka čistilne naprave. Zaradi teh okoliščin je potrebno na čistilni napravi popolnoma izločiti dušik in fosfor, ker pri Finkelbachu ne gre za kopalno vodo ni potrebe po dezinfekciji.

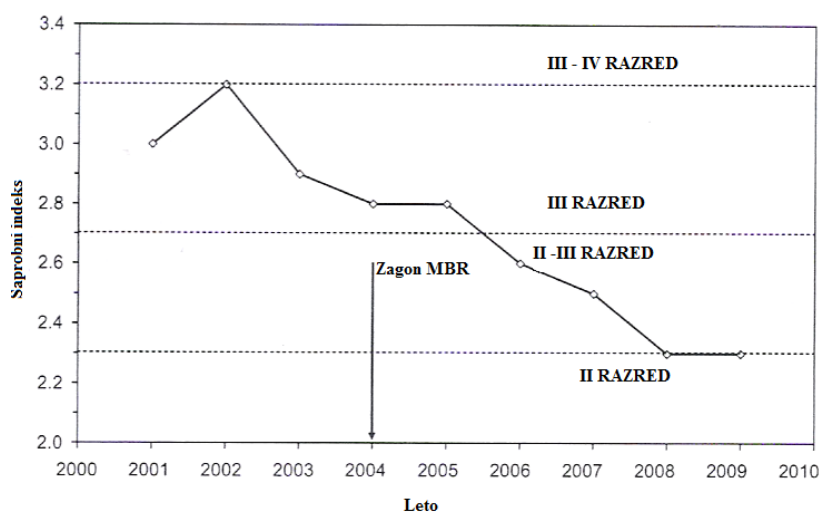


Grafikon 3: Spreminjanje kakovosti vode v potoku Finkelbach (Vir Christoph Brepols, 2011)

Po pričakovanjih se je kvaliteta vodotoka z leti izboljševala in se danes uvršča v drugi oz. tretji kakovostni razred.

4.6.2 Vpliv Nordkanal MBR na kanal Nordkanal

Nordkanal je ostanek nedokončanega povezovalnega kanala med reko Ren in Maas. Danes teče na dolžini 18km s šibkim tokom in ima en naraven dotok ter dotok iztoka iz čistilne naprave. Po postavitvi čistilne naprave se je kvaliteta vodotoka močno izboljšala, za več kot en kakovostni razred.



Grafikon 4: Spreminjanje kakovosti vode v kanalu Nordkanal (Vir: Christoph brepols, 2011)

4.6.3 Vpliv Glessen MBR na potok Glessner

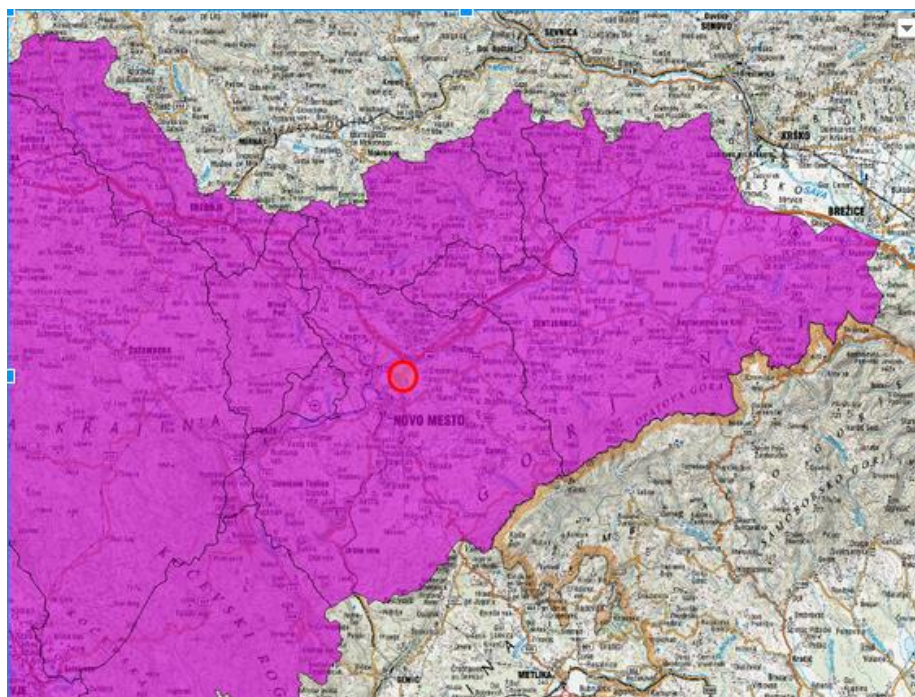
Kakovost vode v potoku je bila dobra že pred postavitvijo čistilne naprave. Poglavitni razlog za postavitev je bil izboljšanje varovanja podtalnice, katera se napaja iz bližnjega močvirja. Že prejšnja čistilna naprava je zadovoljevala vse pogoje neoporečnosti iztočne vode, tako da sprememba v kvaliteti ni zanana, kar pomeni da MBR izpolnjuje pričakovanja.

5 Predstavitev komunalne čistilne naprave z MBR v Novem mestu

5.1 Opis območja čistilne naprave

Čistilna naprava Novo mesto zavzema širše območje ob reki Krki, tako je za okolje zelo pomembno učinkovito čiščenje odpadnih voda, katera nastajajo na tem območju. Naselja, ki so zajeta v čistilno napravo so: Novo mesto, Črmošnjice, Stopiče, Dolnja Težka voda, Dolž, Gabrje, Gornja Težka voda, Hribi pri Orehku, Hrušica, Jugorje, Mala Ciklava, Mali Slatnik, Plemberk, Sela, Sevnno, Smolenja vas, Stopiče, Šentjošt, Verdin, Vrhe, Zajčji Vrh, Brična vas, Stranska vas. Poleg samih naselij je na območju tudi industrija. Tako so na čistilno napravo priključene industrijske naprave: Krka d.d., KZ Krka z.o.o., Revoz d.d., Splošna bolnišnica Novo mesto, Ursa Slovenija d.o.o.

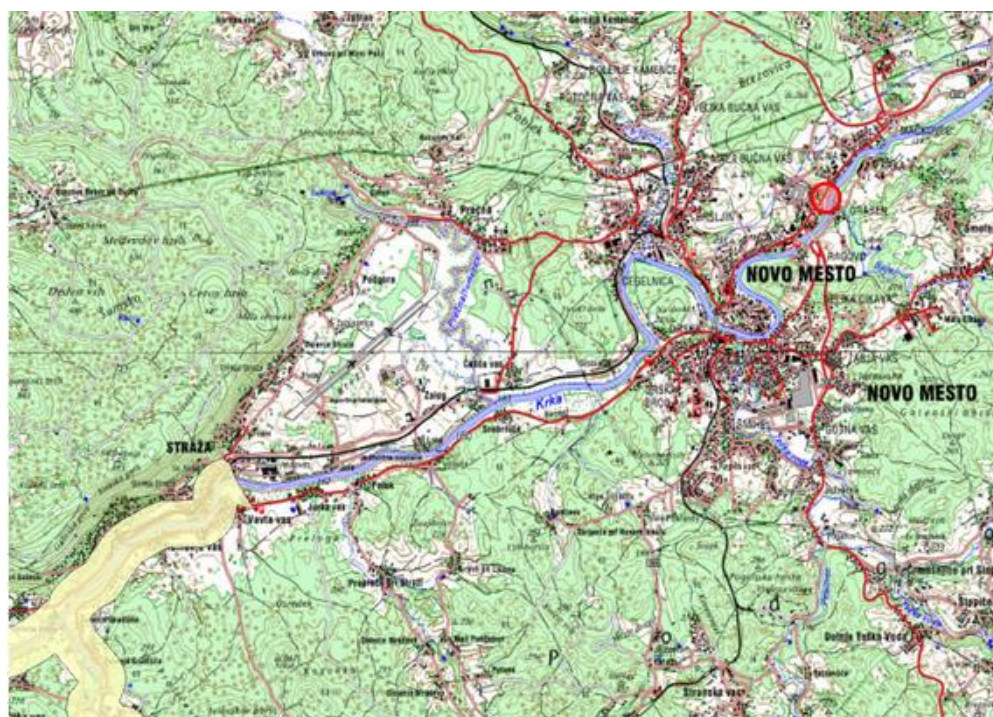
Ob reki Krki se pojavlja posebno območje evtrofikacije, poleg tega pa gre tudi za območje kopalnih voda. V tem primeru je potrebno čiščenje opravljati bolj kvalitetno, saj so zahteve za izpust iz čistilne naprave veliko strožje.



Slika 14: Pregledna karta občutljivega območja zaradi evtrofikacije: vijoličasto obarvano prispevno območje; zahteve za terciarno čiščenje (Vir: Komunala Novo mesto 2014)



Slika 15: Pregledna karta občutljivega območja zaradi kopalnih voda, modro obravano prispevno območje; zahteve za terciarno čiščenje. (Vir: komunala Novo mesto 2014)



Slika 16: Pregledna karta občutljivega območja zaradi kopalnih voda: rumeno obarvano prispevno območje; mikrobiološke zahteve. (Vir: Komunala Novo mesto 2014).

5.1.2 Opis predhodne čistilne naprave

Na območju Novega mesta je bila leta 1974 projektirana centralna čistilna naprava, zgrajena je bila leta 1979, zmogljivost naprave je bila 45000 PE, očiščena voda se je nato izlivala v reko Krko. Naprava je bila tehnološko zastarela s tem so se pojavljali visoki stroški vzdrževanja. Poleg same zastarelosti objekta, so bili tudi zakonsko določeni izpusti BPK, KPK, NH₄N, N_{tot}, P_{tot}, velikokrat preseženi. Zaradi naprave se je občasno pojavljal smrad delovanje pa je spremljal hrup. Naprava je bila tako potrebna temeljite obnove, saj ni izpolnjevala delovnih zahtev. Iz preglednice 7 je razvidno da so določene vrednosti snovi bile preseženem. Z uvedbo nove uredbe bi s strožjimi kriteriji še težje izpolnjevali zahteve čiščenja.

Preglednica 7: Zahteve zakonodaje, številke označene z rdečo so presežene vrednosti (Vir: Igor Ilar, 2013)

	Meje do 2010	Doseženo 2010	Meje po uredbi
KPK mg/l	120	126	110
BPK ₅ mg/l	20	22	20
Neraztopljene snovi mg/l	35	12,4	35
Amonijev N mg/l	10	27,38	10
Celotni N mg/l	/	38,7	15
Celotni P mg/l	/	5,43	2

Obremenitve čistilne naprave:

1. Hidravlična obremenitev

- 1.54 mil. m³ odpadnih vod, povprečno 4.291 m³/dan
- 33 % industrijske odpadne vode (ustanove in podjetja)
- 3,3 % odp. vod iz greznic in izcednih vod iz odlagališča Leskovec
- ostalo so prispevala gospodinjstva

2. Biološka in kemična obremenitev

- 1.789 kg BPK₅ / dan
- 3.986 kg KPK / dan
- 317 kg celotnega N / dan
- 50 kg celotnega fosforja / dan

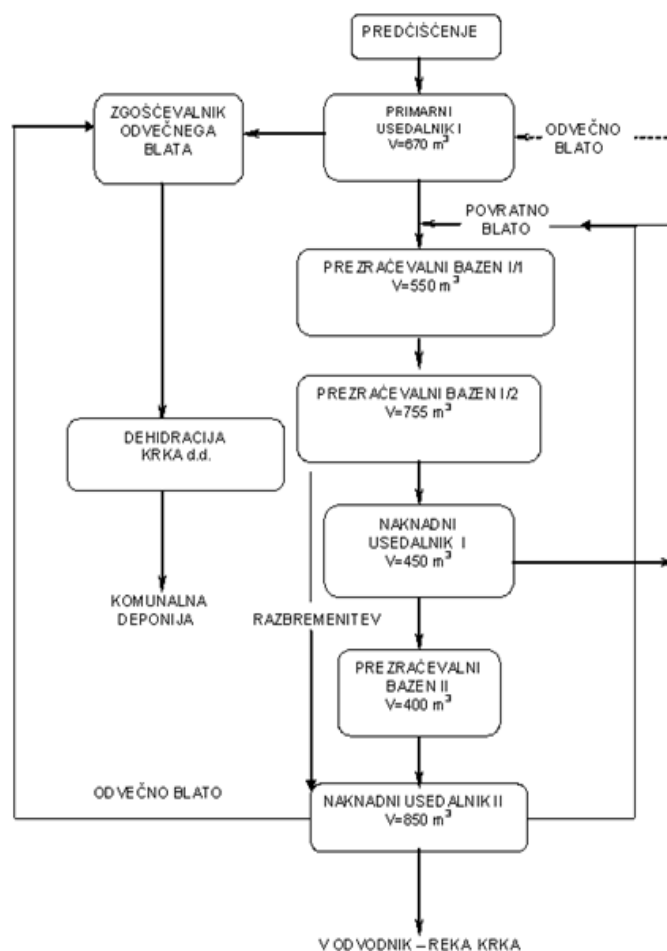
Primarno čiščenje na čistilni napravi je predstavljalo mehansko čiščenje odpadne vode z rotamat sitom. Iz vode se je tako izločilo delce večje od 5mm naložljene delce se je občasno stisnilo in transportiralo

skupaj z zajetimi maščobami v kontejner kamor so se transportirale tudi zajete količine peska. Odpadna voda očiščena trdnih delcev, maščob in peska je tekla v primarni usedalnik.

Sekundarno čiščenje je predstavljalo biološko čiščenje z aktivnim blatom in naknadnim usedanjem. Odpadna voda je iz primarnega usedalnika tekla v ozračevalni bazen I in nato v ozračevalni bazen II. V ozračevalnem bazenu je potekal vnos kisika s pomočjo stisnjenega zraka preko membranskih vpihovalcev.

V naknadnem usedalniku I se je usedalo aktivno blato, odvečno blato se je vračalo na začetek primarnega usedalnika, prečiščena voda pa je preko preliva odtekala v reko Krko ali v nadaljnje čiščenje v ozračevalni bazen II.

Odvečno blato se je iz naknadnega usedalnika črpalo v zgoščevalnik in naprej na dehidracijo v tovarno zdravil Krka d.d., Novo mesto. Dehidrirano blato se je potem vozilo na komunalno deponijo



Slika 17: Shematski prikaz čistilne naprave v Novem mestu (Vir Komunala Novo mesto 2014)

5.2 Načrtovanje nove čistilne naprave

Osnovne smernice so bile postavljene tako da bi odpravili vse trenutne pomanjkljivosti obstoječe čistilne naprave:

- Sodelovanje lokalne skupnosti.
- Integracija čistilne naprave v okolico.
- Očiščena odpadna voda mora biti v skladu z zakonodajo.
- Gradnja bo potekala v fazah.
- Vsa potrebna oprema za neodvisno delovanje.
- Popolna aerobna stabilizacija blata – minimalna produkcija viška blata (starost blata več kot 25 dni).
- Čiščenje vsega zraka (brez neprijetnih vonjav).
- Vkopani prostori (minimalen nivo hrupa).

5.2.1 Financiranje in izvedba projekta

Projekt je bil izveden v sklopu evropskega projekta odvajanja in čiščenja odpadnih voda v porečju reke Krke in hidravlične izboljšave kanalizacijskega sistema ter čistilne naprave Novo mesto.

Prva faza izgradnje je zajemala Centralno čistilno napravo Novo mesto in primarni kanal Ločna. V drugi fazi je bilo planirano urediti kanal Kandija, črpališče Kandija, zadrževalni bazen deževnih voda Težka Voda, Zadrževalni bazen Deževnih voda Šmihel 17-18, zadrževalni bazen deževnih voda Šmihel 18, zadrževalni bazen Gotna vas in črpališče Bršljan.

Financiranje prve faze je bilo ocenjeno na vrednost 9,94 mil .

Struktura financiranja je bila sestavljena iz:

- Kohezijski sklad EU 4,84 mil €
- Proračun RS 0,85 mil €
- Mestna občina Novo mesto 4,25 mil €

Pogodbena vrednost projekta je znašala 8,3 mil € (7.1 mil € za centralno čistilno napravo in 1.2 mil € za kanal pred centralno čistilno napravo)

5.2.2 Priprava dokumentacije

Investitor projekta je bila Mestna občina Novo mesto nosilec izdelave projekta SPINA d.o.o., ostali v izdelavi projekta so bili še Comteh d.o.o., Telem d.o.o., Toplota d.o.o., Inštitut za vode Ljubljana, ter ZRMK d.o.o.

Časovni rok za izdelavo dokumentacije je bil od maja do avgusta 2007, gradbeno dovoljenje so pridobili novembra 2007. Vloga za pridobitev sredstev je bila podana novembra 2007, septembra 2008 je bila pridobljena odločba o dodelitvi sredstev. Pogodba za izvedbo je bila podpisana junija 2011.

5.2.3 Razlogi za uporabo MBR sistema

Za izgradnjo čistilne naprave z membranskim bioreaktorjem so se odločili zaradi boljšega izkoristka prostora, saj načeloma uporaba membranskega bioreaktorja napram konvencionalnim čistilnim bazenom prihrani 30% površine. Pomemben dejavnik odločitve je bil tudi visok učinek čiščenja odpadnih vod, saj gre za občutljivo območje koplanih vod ter velike možnosti evtrofikacije. Z vgradnjo membranskega bioreaktorja so dosegli nižjo proizvodnjo blata, s čimer se tudi znižajo stroški ravnanja z blatom. Čistilna naprava ima sedaj večjo zanesljivost in fleksibilnost delovanja, kar izboljšuje tudi vse rezultate na izpustih. Investicijski stroški za izgradnjo konvencionalne čistilne naprave bi bili višji, saj bi bila potrebna tudi sredstva za povečanje tlorisov. Sami obratovalni stroški pa so primerljivi z običajno čistilno napravo.

5.2.4 Tehnološka izhodišča za načrtovanje

1. Hidravlična obremenitev

- 2,5 mil. m³ odpadnih vod/leto,
- povprečno 7.300 m³/dan

2. Biološka in kemična obremenitev

- 3.300 kg BPK5 / dan
- 6.600 kg KPK / dan
- 605 kg celotnega N / dan
- 110 kg celotnega fosforja / dan

Preglednica 8: Izhodiščni parametri dimenzioniranja (Vir: Egon Batič, 2016)

Priključna vrednost	55000	PE
Sposobnost sprejema grezničnih vsebin	30	m ³ /dan
Količina vod $Q_{\max}$	704,00	m ³ /dan
Sušni dotok Q_{TW}	428,90	m ³ /dan
Tuje vode skupaj $Q_{\max}$	406,00	m ³ /dan
BPK ₅ dnevna količina	3300,00	kg/dan
KPK dnevna količina	6600,00	kg/dan
Dušik dnevna količina TKN	605,00	kg/dan
Fosfor dnevna količina P	110,00	kg/dan
TSS dnevna količina	3850,00	kg/dan

Preglednica 9: Zahtevani iztočni parametri (Vir: Egon Batič, 2016)

	Vrednosti	Enote
TSS	35	mg/l
BPK ₅	20	mgO ₂ /l
KPK	110	mgO ₂ /l
N-NH ₄	10	mgN/l
N _{tot}	15	mg/l
P	2	mg/l
Učinek čiščenja N _{tot}	70	%
Učinek čiščenja cel. P	80	%
Skupne koloformne bakterije	10000	Število v 100ml
Koloformne bakterije fekalnega izvora	2000	Število v 100ml
Streptokoki fekalnega izvora	400	Število v 100ml

5.3 Nova čistilna naprava z MBR sistemom

Komunalna čistilna naprava Novo mesto je po obnovi biološka čistilna naprava z aktivnim blatom in membranskim biološkim reaktorjem, ki poleg sekundarnega čiščenja zagotavlja tudi terciarno čiščenje. Obsega mehansko predčiščenje katerega sestavljajo v prvem delu dve liniji kompaktnih naprav za odstranjevanje peska, maščob in delcev večjih od 1 cm, v nadaljevanju pa sta še dve fini siti, ki odstranujeta vse delce večje od 1,5 mm.

Biološko čiščenje zajema dve liniji po 5 reaktorjev, s skupnim volumnom vseh bazenov 6500 m³. Biološki liniji sta sestavljeni iz serije anoksičnih ter aerobnih con v naslednjem zaporedju: anoksična cona; aerobna cona 1; swing cona (bodisi aerobna, bodisi anoksična); anoksična cona 2; aerobna cona 2.

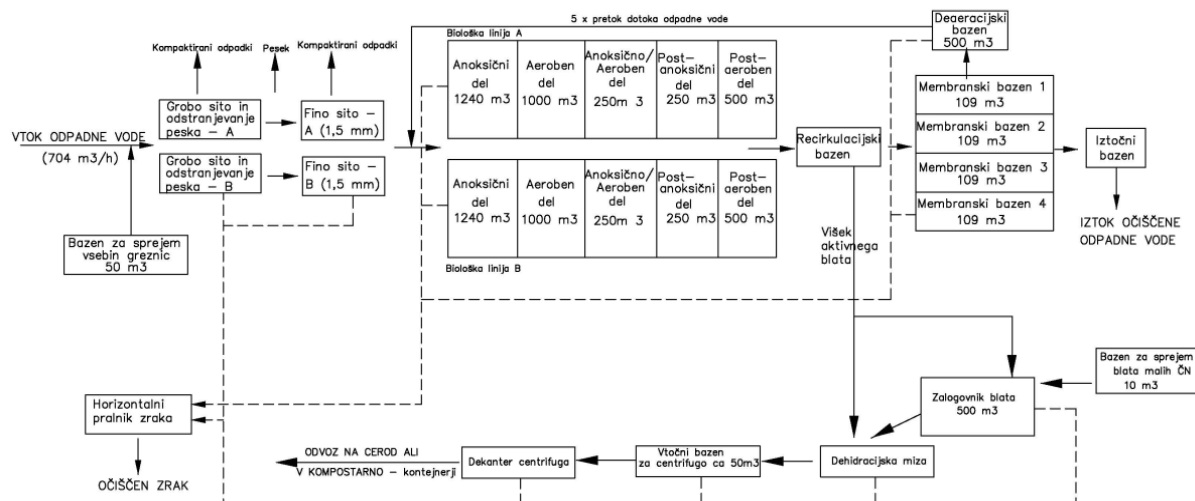
Recikel se avtomatsko regulira do 6 x pretoka s turbo črpalkami vsi bazeni so pokriti tako da ne prihaja do širjenja smradu.

Odstranjevanje fosforja se dosega z doziranjem železa v obliki železovega klorida (FeCl₃).

Membransko filtracijo sestavljajo 4 linije z vgrajenimi 4 kasetami skupne površine membran 20.350 m². Pretok se giblje okoli 16,5 l/m²/uro, za najboljšo energetsko učinkovitost ter podtlak od 0,05–0,15 bar. Skupna delovna zmogljivost je 800 m³/h, ob ročno nastavljeni zmogljivosti je pretok 1.300 m³/h.

Blato z vsebnostjo suhe snovi pribl. 1 % se prečrpa v zalogovnik. Potem sledi predobdelava na odcejalni mizi kjer se zgosti na 3–5 % suhe snovi, z obdelavo na centrifugi se zgosti na 20–25 % SS. Dehidrirano blato se nato v kontejnerjih odvaža na odlagališče nenevarnih odpadkov, kjer ga po postopku mešanja s pepelom lahko uporabijo za prekrivanje deponije.

Čiščenje zraka iz vseh prostorov, kjer se zadržuje oz. nastaja neprijeten vonj se izvaja z izsesavanjem v kemijski pralnik zraka z zmogljivostjo 21.000 m³/h.



Slika 18: Shematski prikaz čistilne naprave v Novem mestu po rekonstrukciji (Vir: Egon Batoč, 2016)

Preglednica 10: Mejne vrednosti in rezultati prvih meritev

	Meje po uredbi	Rezultati dotok	Rezultati iztok
KPK mg/l	110	862	15
BPK ₅ mg/l	20	396	1
Neraztopljene snovi mg/l	35	/	0,7
Amonijev N mg/l	10	0,0	0,0
Celotni N mg/l	15	62	3,9
Celotni P mg/l	2	11,58	1,08
Skupne koloformne bakt. V 100 ml	/	/	0
Fekal. Koloformne bakt. V 100 ml	/	/	0
Motnost	/	/	0,05

Preglednica 11: Stroški obratovanja primerjava 1-6 2011:2013(Vir: Igor Ilar)

	2011	2013	enote
Električna energija	297220	888452	kWh
Količina odvečnega blata s TSS med 20-25%	1820	870	t
Opravljenе delovne ure operaterjev CČN	2093	1573	ure
Kemikalije			
FeCl ₃	/	24800	kg
NaOCl	/	2000	kg
C ₆ H ₈ O ₇	/	0	kg
H ₂ O ₂	/	250	kg
DK-DOX smell	/	300	kg
H ₂ SO ₄	/	200	kg



Slika 19: Moderna membranska čistilna naprava v Novem mestu (Vir: Egon Batič, 2016)

6 ZAKLJUČEK

Membranski bioreaktorji so še vedno novost na področju čiščenja odpadnih voda. Čeprav se kot zelo uspešni čistilni sistemi v industrijskih obratih pojavljajo že več desetletij, še vedno nimajo popolnega zaupanja načrtovalcev komunalnih čistilnih naprav.

En glavnih razlogov so zagotovo nekoliko višji stroški investicije ter stroški, ki se pojavijo ob zamenjavi membran. Z napredkom v kakovosti in odpornosti membran imajo te čedalje večjo življenjsko dobo, tako da se tudi ta strošek zmanjšuje. Prav tako se pojavlja vse več primerov kjer je postavitve čistilne naprave z MBR edina rešitev, saj prihaja zaradi večje osveščenosti in varovanja okolja do strožjih zahtev glede izpustov v vodotoke.

V preteklosti so se pojavljale čistilne naprave z MBR le v manjših oblikah in še te so bile bolj poskusne oz. študijske narave. Sedaj pa se postavlja čedalje večje sisteme, kateri srkbijo za čiščenje odpadne vode velikih mest. Primer čistilne naprave na Nordkanalu je bila še ne tako dolgo nazaj z 80000PE ena največjih na svetu. Sedaj se ravno zaključuje projekt nadgradnje Štokholmske osrednje čistilne naprave z MBR sistemom katera bo imela pretok $36000\text{m}^3/\text{h}$ (Angie HansenGE Power & Water, 2015). To samo nakazuje da so sistemi MBR popolnoma enakovredni obstoječim konvencionalnim čistilnim napravam in se kosajo tudi z največjimi zahtevami.

Nemški primer res lepo ponazarja kako uvesti novosti ter jih z vsakim sistemom dodatno izpopolniti in prilagoditi za čim boljšo učinkovitost. Prva naprava, ki so jo postavili je bila še pilotna in študijske narave, čeravno je oskrbovala 9000PE, kar je za naše razmere veliko. Pri MBR je ena od prednosti tudi to, da so od prizvajalca do proizvajalca zelo različni in s tem prilagodljivi za vsakršno potrebo. Glede na potrebne karakteristike iztoka se lahko čistilno napravo prilagodi, da svoje delo opravlja čim bolj optimalno.

Membranski sistemi so tako za manjše čistilne naprave že dobro dodelani in izpopolnjeni. V Sloveniji imamo potrebo predvsem po manjših čistilnih napravah, zaradi neokrnjene narave in vodnega bogatstva bi morali biti pripravljeni sprejeti tudi nove izzive in se večkrat odločati za MBR sisteme.

Primer čistilne naprave v Novem mestu prikazuje celo več kot so pričakovanja vgradnje membranskega bioreaktorja. Poleg neprimerljivo boljše kakovosti vode na iztoku, so dosegli s postavitvijo MBR nižje investicijske stroške, prav tako pa se jim to obrestuje pri obratovanju naprave, saj so tudi ti stroški nižji kot so bili s predhodno zastarelo opremo.

Čistilna naprava v Novem mestu je še novost glede katere bi morala biti javnost širše osveščena ter tako imela možnost izbire. Še vedno se večinoma gradi konvencionalne čistilne naprave katere lahko tudi

dosegajo zelo dobre rezultate pri čiščenju odpadnih voda, vendar jih membranski bioreaktorji še vedno prekašajo.

Sistem kot je membranski bioreaktor nima sposobnosti le čiščenja odpadne vode na visoko kakovost, ampak ima možnost prilagajanja potrebi čistilne naprave. Od konvencionalnih bazenov so MBR bolj prilagodljivi na ekstremne razmere in imajo sposobnost tudi pri večjih pretokih zagotavljati enak učinek čiščenja. Poleg tega se z membranami lahko kontrolira proizvodnjo blata, katero je pri čiščenju še vedno glaven odpadek. Primer novomeške čistilne naprave je tudi tu pokazal rešitev, saj je mogoče blato zelo dobro uporabiti za prekrivanje deponije komunalnih odpadkov.

7 LITERATURA

Paul Smith, John G. Scott. 2005. Dictionary of Water and Waste Management. Second edition. London. IWA Publishing, Alliance House: str. 130 - 143.

C.P. Leslie Grady, et al. 2011. Biological Wastewater Treatment. Third Edition. Boca Raton. Tylor and Francis Group, LLC: str. 921 – 923.

D.G. Rao, et al. 2013. Wastewater Treatment: Advanced Process and Technologies. Boca Raton. Tylor and Francis Group, LLC: str. 283 - 311.

Syed R. Qasim. 1994. Wastewater Treatment Plants: Planing, Design and Operation. Basel. Technomic Publishing AG: str. 303 – 326.

Paola Foladori, et al. 2010. Sludge Reducition Technologies in Wastewater Treatment Plants. London. IWA Publusing, Alliance House: str. 162 - 164, 269 - 275.

Frank R. Spellman. 2013. Water & Wastewater Infrastructure: energy efficiency and sustainabilty. Boca Raton. Tylor and Francis Group, LLC: str. 270 - 307

Udo Wiesmann, et al. 2007. Fundamentals of Biological Wastewater Treatment. 1st reprint. Winheim. WILEY-VCH Verlah GmbH & Co. KgaA: str. 293 – 311.

Susumu Kawamura. 2000. Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities. Second Edition. Canada. John Wiley & Sons, Inc. str. 265 - 292.

A.C. van Haandel, J.G.M. van der Lubbe. 2012. Handbook of Biological Wastewater Treatment: Design and Opimisation of Activated Sludge System. Second Edition. London. IWA Publishing, Alliance House: str. 319-352, 657.

Mara duncan, Horan, N.J. 2003. Handbook of water and wastewater microbiology. London. Academic Press An Imprint of Elsevier: str.122 – 123, 343, 483.

Jurate Virkutyte, et al. 2010. Treatment of Micropolutants in Water and Wastewater. London. IWA Publishing, Alliance House: str. 220 - 269.

Tom Stephenson, et al. 2000. Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment. London. IWA Publishing, Alliance House: str. 113 – 177.

Christoph Brepols. 2011. Operating Large Scale Membrane Bioreactors for Municipal Wastewater Treatment. London. IWA Publishing, Alliance House: str. 10 - 127.

Asano, T., Burton, F., Leverenz, H..2007. Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications. New York, McGraw-Hill Professional: str. 356.

Marjan Zajc 2013. Čiščenje odpadnih voda. Agencija Republike Slovenije za okolje. 27.03.2013.

Igor Ilar, Membransko biološki reaktor čistilne naprave Novo Mesto. September 2013.

Egon Batič, Centralna čistilna naprava Novo mesto. Januar 2016.

Thomas Buer. 2007. Membranverfahren in der kommunalen Abwasser – behandlung, Oakville, ZENON Membrane Solutions: str. 205 - 228.

Johannes Pinnekamp, Membrane Technology for Waste Water Treatment. Mannheim, FiW Verlag: str. 317 - 349 str.