

LAPPEENRANNAN LÄMPÖVOIMA OY
Jätevedenkäsittelyn kalvotekniikoiden esiselvitys

Copyright © Pöyry Finland Oy

Kaikki oikeudet pidätetään Tätä asiakirjaa tai osaa siitä ei saa kopioida tai jäljentää missään muodossa ilman Pöyry Finland Oy:n antamaa kirjallista lupaa.

Sisäinen tarkistussivu

Asiakas Lappeenrannan Lämpövoima Oy
Otsikko Jätevedenkäsittelyn kalvotekniikoiden esiselvitys
Projekti
Vaihe

Työnumero 16WWE1737

Luokitus
Piirustus/arkistointi/sarjanro.

Tiedoston nimi 16WWE1737_Esiselvitys_FINAL.doc
Tiedoston sijainti
Järjestelmä Microsoft Word 11.0

Ulkoinen jakelu
Sisäinen jakelu

Contribution
Vastaava yksikkö

Revisio

Alkuperäinen

Dokumentin pvm

Laatija/asema/allekirj.

KNS / Johtava asiantuntija

Tarkistuspvm

Tarkistanut/asema/allekirj.

JHSA / Osastopäällikkö

A

Dokumentin pvm

Laatija/asema/allekirj.

Tarkistuspvm

Tarkistanut/asema/allekirj.

B

Dokumentin pvm

Laatija/asema/allekirj.

Tarkistuspvm

Tarkistanut/asema/allekirj.

Muuttunut edellisestä revisiosta

Sisältö

1	JOHDANTO	2
2	LÄHTÖTIEDOT	2
3	JÄTEVEDEN KÄSITTELYN VAATIMUKSET	2
4	TEHOSTETUT KÄSITTELYMENETELMÄT	3
4.1	Yleistä	3
4.2	Kalvobioreaktori (MBR)	4
4.2.1	Prosessikuvaus	4
4.2.2	Saavutettava puhdistustulos	7
4.2.3	Operointi, riskit ja kustannustekijät	7
4.2.4	Referenssit	8
4.3	Tertiäärinen ultrasuodatus	9
4.4	Käänteisosmoosi	9
4.4.1	Prosessikuvaus	9
4.4.2	Saavutettava puhdistustulos	11
4.4.3	Operointi, riskit ja kustannustekijät	11
4.4.4	Referenssit	11
4.5	Tehostettu perinteinen tertiäärikäsittely	13
4.5.1	Prosessikuvaus	13
4.5.2	Saavutettava puhdistustulos	14
4.5.3	Operointi, riskit ja kustannustekijät	15
4.5.4	Referenssit	15
5	KÄSITTELYVAIHTOEHTOJEN VERTAILU	16
5.1	Puhdistetun veden laatu	16
5.1.1	Fosforinpoisto	17
5.1.2	Muut laatuparametrit	18
5.2	Toteutus ja operointi	18
5.3	Investointi- ja käyttökustannukset	19
5.4	Johtopäätökset ja konsultin suositus	21
6	YHTEENVETO	23
7	KIRJALLISUUSVIITTEET	24

1 JOHDANTO

Lappeenrannan Toikansuon jätevedenpuhdistamolle on haettu uutta ympäristölupaa vuonna 2006. Ympäristölupa myönnettiin vuonna 2007 ja luvassa kiellettiin nykyisen purkuvesistön, Rakkolanjoen jatkokäyttö. Ympäristöluvasta on valitettu hallinto-oikeuteen ja korkeimpaan hallinto-oikeuteen, mutta muutosta purkupaikkapäätökseen ei ole saatu. Pääasiallisena vaihtoehtona jätevesien käsittelylle tulevaisuudessa on rakentaa uusi jätevedenpuhdistamo ja johtaa puhdistetut jätevedet n. 40 km pituisia siirtoviemäriä pitkin Vuokseen.

Vuoden 2011 syksyllä on tehty valtuustoaloite, jonka mukaan hankkeessa tulisi tarkastella mahdollisuus käsitellä jätevedet kalvotekniikan avulla niin hyvään laatuun, että ne voitaisiin johtaa joko Rakkolanjokeen tai Saimaaseen. Aiheesta käydyssä julkisessa keskustelussa on mainittu puhdistaminen ”juomavesitasoon”.

Tässä työssä selvitetään kyseeseen tulevien kalvotekniikoiden sekä eräiden vaihtoehtoisten tekniikoiden toimintaperiaatteet ja toteutustapa, arvioidaan näillä tekniikoilla saavutettava puhdistustulos sekä arvioidaan toteutuksen investointi- ja käyttökustannukset.

2 LÄHTÖTIEDOT

Lähtötietoina on käytetty seuraavia dokumentteja:

- Ympäristölupahakemus, Lappeenrannan kaupunki 15.12.2006
- Ympäristölupahakemuksen liitteet 1.6 – 1.8 (Suunnittelukeskus Oy)
 - Jätevesien käsittelyn ratkaisumallit, osaraportti 1 28.4.2004
 - Jätevesien käsittelyn ratkaisumallit. Esisuunnitelma, osaraportti 2 6.7.2004
 - Jätevesien käsittelyn ratkaisumallit, osaraportti 3. Yleissuunnitelma 3.9.2004
- Ympäristölupapäätös 134/07/2, Itä-Suomen ympäristölupavirasto 28.11.2007
- Vaasan hallinto-oikeuden päätös 09/0344/1, 5.11.2009
- Korkeimman hallinto-oikeuden päätös 3832/1/09, 4.1.2011
- Kokous Uudenmaan aluehallintoviraston tiloissa 12.10.2011 (tilaaja, konsultti, Ari Kangas / Länsi-Suomen aluehallintovirasto)
- Laitetoimittajien budjettitarjoukset

3 JÄTEVEDEN KÄSITTELYN VAATIMUKSET

Lappeenrannan kaupunki on ympäristölupahakemuksessaan esittänyt uuden jätevedenpuhdistamon lupaehdoiksi seuraavaa:

- $BOD_{7,ATU} \leq 10 \text{ mg/l}$, puhdistusteho $\geq 90 \%$
- $COD_{Cr} \leq 70 \text{ mg/l}$, puhdistusteho $\geq 80 \%$
- Kiintoaine $\leq 15 \text{ mg/l}$, puhdistusteho $\geq 90 \%$
- Kokonaistyyppi puhdistusteho $\geq 70 \%$, kun prosessilämpötila $\geq 12 \text{ }^\circ\text{C}$
- Kokonaisfosfori $\leq 0,3 \text{ mg/l}$, puhdistusteho $\geq 90 \%$

Kaikki muut paitsi kokonaistyyppien lupaehto on esitetty laskettavaksi neljännesvuosikeskiarvoina.

Itä-Suomen ympäristölupavirasto hylkäsi hakemuksen. Vaasan hallinto-oikeus piti hylkäävän päätöksen voimassa, mutta pidensi nykyisen ympäristöluvan voimassaoloaikaa sekä uuden lupahakemuksen jättöaikaa. Korkein hallinto-oikeus poisti lupamääräyksistä kokonaan typenpoistovaatimukset, mutta jätti muilta osin aiemmat ratkaisut voimaan. Lappeenrannan kaupunki oli valituksessaan KHO:een esittänyt fosforinpoiston lupaehdon tiukentamista 0,1 mg/l:aan. KHO katsoi, että luvan edellytykset on tullut ratkaista hakemuksessa ilmoitettujen arvojen perusteella ja että muut aiempien ratkaisujen perusteet huomioiden kaupungin esityksellä fosforin lupaehdon tiukentamiseksi ”ei yksin ole asiassa sellaista merkitystä, että valitus tulisi tältä osin hyväksyä”.

Luparatkaisun perusteluissa viitataan ympäristövaikutusten arvioinnin liitteenä olleisiin vesistömallitarkasteluihin. Niiden mukaan fosfori on purkuvesistön rehevyyteen ensisijaisesti vaikuttava ravinne, ja käsitellyn jäteveden kokonaisfosforipitoisuuden tulisi olla enintään 0,1 mg/l, jotta jätevesillä ei olisi merkittävää vaikutusta purkuvesistön rehevyyteen. Lupapäätöksessä esitetään varsin selväsanaisesti, että hakemuksen hylkäämisen keskeinen peruste on se, että suunnitellulla puhdistamoratkaisulla ei voida taata em. vaatimuksen jatkuvaa täyttymistä. Näin siitä huolimatta, että ao. pitoisuus voidaan osan aikaa saavuttaa ja suurimman osan aikaa käsitellyn jäteveden fosforipitoisuus olisi 0,2 mg/l tai vähemmän.

Typen osalta lupapäätöksessä todetaan, että sen poisto on tarpeen ja että nykyisellä Toikansuon puhdistamolla ympärivuotinen typenpoisto ei ole mahdollista. Muita jäteveden laatuparametreja ei mainita luparatkaisun perusteluissa. Kuten yllä todettiin, KHO poisti omassa ratkaisussaan typenpoistovaatimuksen.

Luparatkaisussa esitetään, että hakemuksen mukaisella tavalla käsitellyt jätevedet voitaisiin johtaa Saimaaseen tai Vuokseen. Tilaaja ei pidä Saimaata vartenotettavana vaihtoehtona lähinnä imagosyistä. Vuokseen johtaminen taas tulee erittäin kalliiksi siirtoviemärin rakentamiskustannusten takia.

Tähän selvitykseen on valittu tekniikoita, joilla yhdistettynä perinteisempiin yksikköprosesseihin (esim. aktiivilieteprosessi) pystytään laitetoimittajien ilmoituksen mukaan saavuttamaan selvästi parempi käsitellyn jäteveden laatu kuin tilaajan esittämissä lupaehdoissa. Erityistä huomiota on kiinnitetty fosforinpoistoon. Lisäksi on oletettu, että jätevesi hygienisoidaan UV-käsittelyllä, kuten tilaajan esittämässä puhdistamoratkaisussa, mikäli tehostettu prosessi ei itsessään takaa hyvää hygieenistä laatua.

4 TEHOSTETUT KÄSITTELYMENETELMÄT

4.1 Yleistä

Pääasiallinen huomio kohdistetaan kalvotekniikoihin. Näitä ovat yleisesti tekniikat, joissa kemiallis-biologisesti puhdistettu jätevesi johdetaan paineella läpäisevän tai puoliläpäisevän kalvon läpi. Biomassa ja vedessä jäljellä olevat epäpuhtaudet jäävät kalvon pinnalle. Useimmat kalvotekniikat pystyvät poistamaan kiintoaineen käytännössä kokonaan ja mikrobit joko hyvin tai kokonaan. Eri kalvotekniikoiden erotuskyky on kuvattu alla (Kuva 4.1).

Suodatus- prosessi	ST mikroskooppi		Pyyhkäisyelektroni- mikroskooppi		Optinen mikroskooppi		Paljain silmin havaittava	
	Ionit		Molekyylit		Makro- molekyylit		Mikro- partikkelit	
	0.001 μm		0.01 μm		0.1 μm		1.0 μm	
	100 μm		1000 μm					
Aineiden kokoluokat	Liuenneet suolat		Kolloidit		Suspendoitunut kiintoaine			
			Virukset		Bakteerit		Rantahiekka	
					Giardia Cyst		Hiukset	
					Parasiitit			
	Käänteis- osmoosi		Ultra- suodatus		Mikro- suuodatus		Partikkelisuodatin	
	Nano- suodatus							

Kuva 4.1. Eri kalvotekniikoiden huokoskoot ja erotuskyvyt

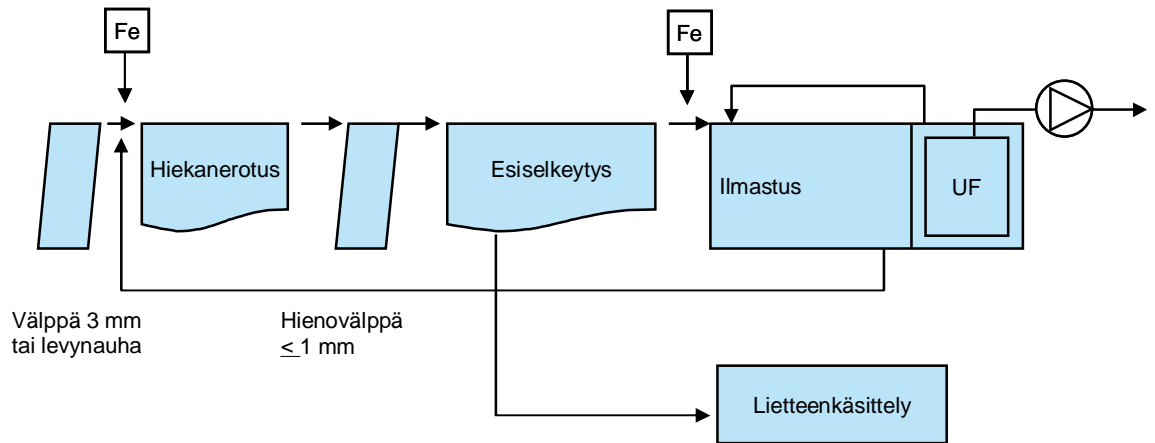
Kalvotekniikoiden lisäksi tarkastellaan ylimääräisellä kemiallis-fysikaalisella käsittelyportaalla tehostettua perinteistä tertiäärikäsittelyä.

4.2 Kalvobioreaktori (MBR)

4.2.1 Prosessikuvaus

MBR- eli kalvobioreaktoriprosessi on perinteisen aktiivilieteprosessin ja kalvotekniikan yhdistelmä. MBR-prosessissa liete erotaan vedestä kalvosuodatuksen avulla, eikä vaakaselkeytystä siten tarvita. Jäteveden orgaaninen aines ja typpi poistetaan biologisesti ja fosfori yleensä kemiallisella rinnakkaissaostuksella, kuten tavanomaisessakin aktiivilieteprosessissa. MBR-prosessiin voidaan yhdistää myös biologinen fosforinpoisto. MBR-prosessissa käytetään tyypillisesti korkeampaa lieteikää ja lietepitoisuutta kuin tavanomaisessa aktiivilieteprosessissa. Lietteen laskeutuvuusominaisuuksilla ei ole kalvosuodatuksen käytön vuoksi merkitystä.

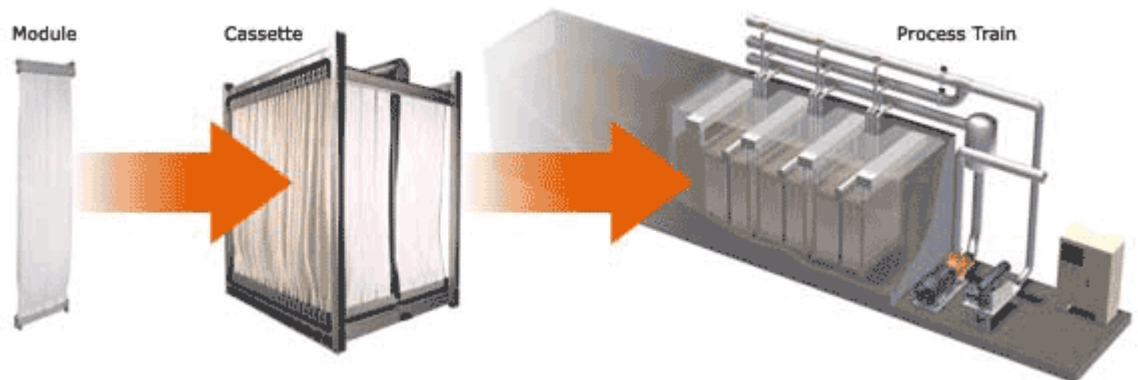
MBR-prosessin kalvosuodatusyksikkö voidaan asentaa joko suoraan aktiivilietevaltaaseen tai erilliseen altaaseen omaksi yksikökseen. Jos aktiivilietevallassa rakennetaan hydraulisesti oikealla tavalla, suoraan altaaseen asennetussa MBR-ratkaisussa ei tarvita palautuslietepumppausta. Typenpoisto voi kuitenkin vaatia nitraattikierrätyspumppauksen. Erillisessä altaassa oleva MBR vaatii voimakkaan palautuspumppauksen (400 – 500 % tulovirtaamasta) pumppuineen, putkistoineen ja instrumentointineen, mikä lisää investointikustannuksia. Typenpoistolaitoksessa palautuspumppaus toimii samalla nitraattikierrätyksenä. Erilleen asennetun kalvosuodatusyksikön etuina ovat mm. käyttö- ja kunnossapitotöiden helppo ja joustava toteutettavuus, tasainen tulokuorma ja -virtaama sekä kalvojen vähäisempi tukkeutuminen. Haluttu lietepitoisuus ylläpidetään ylijäämälietepumppauksella. Prosessin lohkokaavio on esitetty alla (Kuva 4.2).



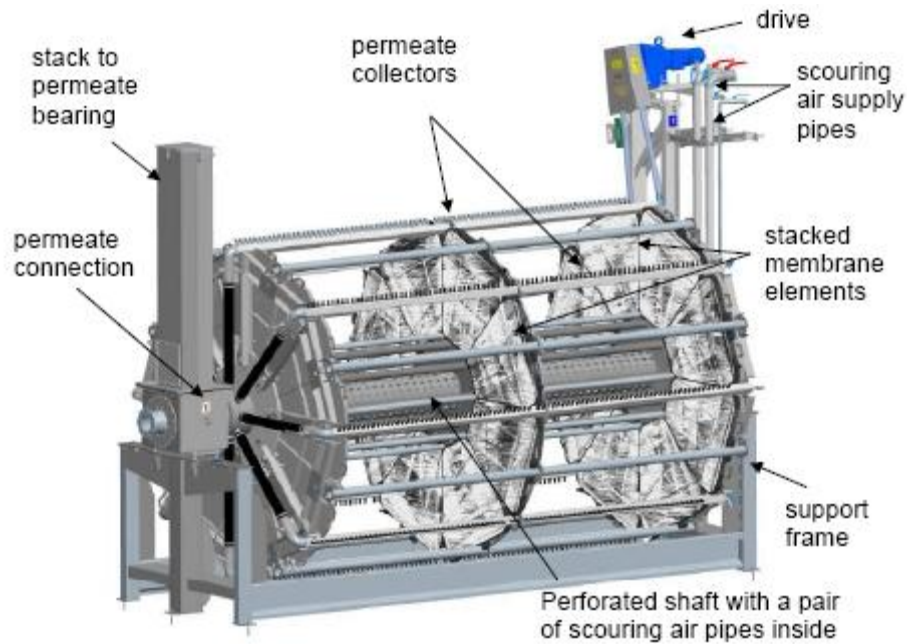
Kuva 4.2. Lohkoaavio: MBR-prosessi

Kalvosuodatusyksikön erotusteho riippuu käytettävien kalvojen huokoskoosta. Huokoskoko valitaan suodoksen eli permeaatin laatuvaatimusten perusteella. Yhdyskuntajätevesien MBR-prosesseissa käytetään tavallisesti ultrasuodatusta, jonka erotuskyky riittää poistamaan vedestä kiintoaineen ja bakteerien lisäksi valtaosan jäteveden kolloidimuotoisesta aineksesta ja viruksista. Ultrasuodattimien huokoskoko on 0,001-0,1 μm .

MBR-prosessissa käytetään yleensä joko onttokuitu- tai tasomaisia kalvotyyppejä. Onttokuitukalvon halkaisija on 1-2 mm ja kalvomoduli koostuu ylä- ja alapäistään kiinnitetystä usean kalvon nipusta (Kuva 4.3). Taajuusmuuttajilla varustetut permeaattipumput yhdistetään kalvomoduleihin kiinteiden imuputkien avulla. Vesi suodattuu putkimaisen onttokuitukalvon ulkopuolelta sisäpuolelle permeaattipumpuilla aikaansaadun alipaineen avulla. Tasomaisten kalvojen moduulissa kalvotävyt sijoitetaan noin 10 mm:n etäisyydelle toisistaan ja vesi virtaa kalvojen välissä tasopinnan suuntaisesti. Tasomaisten kalvojen moduuleissa käytetään joskus myös pyöriä kalvotävyjä (Kuva 4.4). Suodatus toteutetaan alipaineen avulla myös tasomaisia kalvoja käytettäessä.



Kuva 4.3. Onttokuitukalvomoduulit ja niiden sijoitus prosessiin (Zenon ZeeWeed 500).



Kuva 4.4. Pyörivä, tasomainen kalvomuoduri (Huber VRM®).

Kalvosuodatusmoduulit varustetaan virtaussuuntaan nähden kohtisuoralla karkeakuplailmastuksella. Ilmastaminen pitää kalvot jatkuvassa liikkeessä ja vähentää siten kalvojen tukkeutumista. Ilmastuksella varmistetaan lisäksi aerobisten olosuhteiden säilyminen kalvojen väleissä. Ilmastuksessa käytetyt ilmamäärät ovat tavallisesti noin 0,3-0,5 Nm³/m²h ontokuitukalvomuodureissa ja 0,5-0,9 Nm³/m²h tasomaisten kalvojen moduuleissa. Kalvovyksiköillä on oma, aktiivilietteen ilmastuksesta erillinen ilmastusjärjestelmänsä kompressoreineen, putkistoineen ja ilmastimineen.

Kalvosuodatusprosessin tärkeimpiä parametreja ovat vuo eli suodatetun veden virtaama kalvopinta-alaa kohden (l/m²h) ja kalvon läpäisyyn tarvittava paine-ero (TMP eli transmembrane pressure). Kalvon suorituskykyä kuvataan permeabiliteetillä eli läpäisykyvyllä (l/m²hbar), joka lasketaan jakamalla vuo läpäisyyn vaaditulla paine-erolla. Kalvosuodatusyksikköä ajetaan täyden mittakaavan MBR-laitoksilla tavallisesti ylläpitämällä suodatuksessa tasainen vuo. Tällöin suodatuksessa tarvittava paine-ero vaihtelee kalvon läpäisykyvyn muuttuessa. MBR-prosessien ultrasuodatuksen vuot ovat tavallisesti tasoa 10-30 l/m²h ja käytetyt paine-erot tasoa 0,20-0,35 bar . Käytetty vuo on tyypillisesti korkeampi ontokuitukalvoilla kuin tasomaisilla kalvoilla.

Kalvon läpäisevyyteen vaikuttaa kalvon huokoskoon lisäksi useat käsiteltävän veden laatuun ja aktiivilietteprosessissa vallitseviin olosuhteisiin liittyvät tekijät. Kalvosuodatusprosessin käytön kannalta optimaalinen vuo voidaan määrittää täsmällisesti vasta käyttökokemusten perusteella. Optimaalista vuota suuremmilla vuon arvoilla kalvojen tukkeutuminen lisääntyy eksponentiaalisesti, tarvittava paine-ero nousee ja kalvojen pesuvälit lyhenevät. Kalvon tukkeutumisenopeuteen vaikuttavat vuon ohella merkittävästi mm. esikäsitteilyn tehokkuus, aktiivilietteprosessin MLSS-pitoisuus sekä kalvomuodulissa ylläpidetty happipitoisuus. Kalvojen läpäisevyys heikkenee voimakkaasti käsiteltävän veden lämpötilan laskiessa, kun veden viskositeetti nousee. Kalvosuodatuslaitoksilla on havaittu ongelmien lisääntyvän merkittävästi lämpötilan laskiessa alle 8 °C:een.

Kalvot pestään säännöllisesti vastavirtapesuna joko permeaattia tai kemikaaleja käyttämällä. Permeaatilla tehtäviä pesuja ohjataan yleensä kalvomoduulin TMP-mittauksella. Vastavirtahuuhtelu käynnistyy automaattisesti, kun kalvon läpäisyyn tarvittava paine-ero saavuttaa määritetyn tason. Suodatusjakson tavanomainen pituus on 300-500 s ja vastavirtahuuhtelun pituus noin 20-50 s. Kalvojen kemikaalipesuissa käytetään mm. sitruunahappoa, suolahappoa, natriumhypokloriittia, natriumhydroksidia sekä vetyperoksidia. Kemikaalipesut suoritetaan laitokohtaisen pesuohjelman mukaisesti. Tyypillisesti kemikaaleja käytetään noin viikoittain tehtävissä automaattisissa huoltopesuissa sekä tehostetuissa vuosipesuissa. Eri laitoksilla käytetyt pesusyklit vaihtelevat huomattavasti.

Kalvosuodatustekniikat vaativat yhdyskuntajäteveden käsittelyssä aina tehokkaan esikäsittelyn. Tyypillisesti MBR-prosessin esikäsittelyyn tarvitaan tehokkaan hiekan- ja rasvanerotuksen lisäksi hienovälppäys tai –siivilöinti. Onttokuitukalvoja käytettäessä välppäyksen rakoväli on yleensä noin 0,5-1 mm ja tasomaisia kalvoja käytettäessä noin 3 mm. Joillakin MBR-laitoksilla siivilöidään myös osa palautuslietevirtaamasta.

Monilla MBR-laitoksilla on virtaaman tasausallas, joka helpottaa tasaisen suodatusvirtaaman ylläpitämistä ja siten lisää kalvojen käyttöikää. Tasaustilavuus voidaan toteuttaa myös varaamalla ilmastusaltaaseen tilaa vedenpinnan vaihtelulle.

4.2.2 Saavutettava puhdistustulos

Ultrasuodatuksen kiintoainereduktio on käytännössä lähes 100 %. Kiintoaineen mukana MBR-prosessissa saadaan poistettua tehokkaasti myös orgaanisesti sitoutuneet typpi- ja fosforifraktiot sekä valtaosa veden biologisesta hapenkulutuksesta. Permeaatin kiintoainepitoisuus on tavallisesti alle 1 mg/l ja biologisen hapenkulutuksen konsentraatio alle 5 mg/l. Liuenneessa muodossa olevia aineita ultrasuodatus ei poista. Saavutettava typpireduktio riippuu lähinnä prosessin biologisen osan toiminnasta, jäteveden BOD/N -suhteesta ja mahdollisen ulkoisen hiilenlähteen määrästä. MBR-tyypenpoistolaitoksilta lähtevä kokonaistyyppi on tyypillisesti välillä 2 – 10 mgN/l.

Fosforireduktio riippuu MBR-vaihetta edeltävän saostuksen ja biologisen fosforinpoiston tehokkuudesta. Täyden mittakaavan MBR-prosesseissa saavutetut kokonaisfosforipitoisuudet ovat tasoa 0,15 – 0,3 mg P/l. Alle 0,1 mg P/l:n fosforipitoisuuksia on raportoitu lähinnä pilot-mittakaavan koeajoista. (Liu ym. 2011). Kalvot poistavat kiintoaineeseen sitoutuneen fosforin käytännössä täysin, joten jäännösfosfori koostuu liukoisista fosforijakeista. Biologisen prosessin toiminta taas vaatii tietyn liukoisen fosforin minimitason, jollaisena pidetään yleisesti 0,1 – 0,2 mgP/l.

4.2.3 Operointi, riskit ja kustannustekijät

MBR-yksikön toiminta on suurimman osan aikaa täysin automaattista. Henkilökunnan panosta tarvitaan lähinnä n. kerran vuodessa tapahtuvassa tehostetussa pesussa, jolloin kalvot nostetaan altaista puhdistusta varten.

Yhdyskuntajäteveden puhdistuksessa käytetyt MBR-prosessin lietepitoisuudet ovat tasoa 6-15 g MLSS/l ja lieteiät tasoa 15-60 d. Tavallisesti prosesseja ajetaan alle 10 g

MLSS/l:n lietepitoisuuksilla, koska korkea lietekonsentraatio vähentää ilmastuksen energiatehokkuutta.

Kokemusten perusteella MBR-prosessin käytön ongelmat aiheutuvat yleisimmin kalvojen tukkeutumisesta, johon on useimmiten syynä esikäsitteilyn toimintahäiriöt. Tiheät välipäät ja siivilät tukkeutuvat helposti. Muita käyttöhäiriöiden aiheuttajia ovat kalvojen tukkeutuminen ja rikkoutuminen sekä ilman kertyminen imupuolen putkistoon. Putkistossa oleva ilma lisää kalvosuodatusyksikön energiankulutusta ja heikentää vastavirtahuuhtelun tehoa. Suomen oloissa on huomioitava erityisesti, että kalvojen läpäisevyys heikkenee voimakkaasti käsiteltävän veden lämpötilan laskiessa, kun veden viskositeetti nousee. Kalvosuodatuslaitoksilla on havaittu ongelmien lisääntyvän merkittävästi lämpötilan laskiessa alle 8 °C:een. Teoreettisesti pahin riski, joka ei tiettävästi ole millään laitoksella toteutunut, voi olla permeaattipumppauksen täydellinen pysähtyminen laitevian tai sähkökatkon vuoksi. Tässä tilanteessa biologinen käsittely joudutaan kokonaan ohittamaan, jolloin lähtevän jäteveden laatu heikkenee merkittävästi.

MBR-prosessin investointikustannukset ovat tavallisesti jonkin verran matalammat kuin perinteisessä aktiivilieteprosessissa. Tarvittava ilmastustilavuus on pienempi eikä jälkiselkeytystä ja mahdollista tertiäärisuodatusta tarvita. Toisaalta kalvovyksiköt on Suomen oloissa sijoitettava katettuun, lämpimään tilaan. Kattaminen, mahdollinen tasausallas ja kalvovyksiköiden oma ilmastusjärjestelmä tasoittavat investointikustannusten eroa perinteiseen aktiivilieteprosessiin.

MBR-prosessin käyttökustannukset ovat noin kaksinkertaiset tavanomaiseen aktiivilieteprosessiin verrattuna. Merkittävimmät kustannustekijät ovat energiankulutus, pesukemikaalien käyttö sekä kalvojen uusiminen. Kalvojen odotettu käyttöikä on nykyisen käsityksen mukaan 7-10 vuotta. Tilastotietoa kalvojen käyttöiästä on vähän, koska useimmat laitokset ovat olleet käytössä alle 10 vuotta. MBR-prosessin energiankulutus on n. kaksinkertainen perinteiseen aktiivilieteprosessiin nähden. Raportoidut MBR-prosessien energiankulutukset ovat tasoa 0,9-1,6 kWh/m³. (Mauer ym. 2011) Suurin osa, tavallisesti noin 80 %, ultrasuodatuksen energiankulutuksesta aiheutuu kalvomoduulien ilmastamisesta.

4.2.4

Referenssit

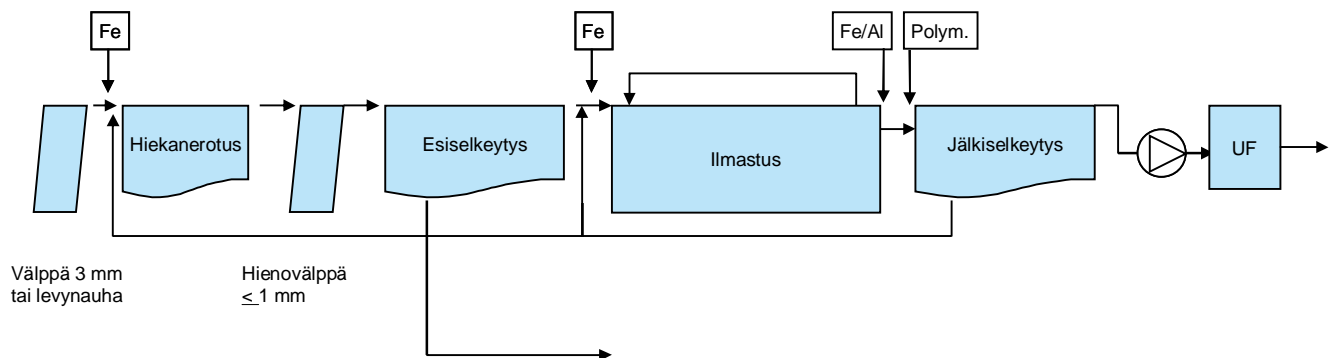
Yhdyskuntajäteveden MBR-laitoksia on jo Euroopassa lähes 200 kpl. Länsi-Euroopassa on toiminnassa useita 2000-luvulla rakennettuja keskikokoisia tai suuria MBR-laitoksia, esim. Kaarst Saksassa (48 000 m³/d), Varsseveld Hollannissa (18 000 m³/d) sekä Swanage (13 000 m³/d), Lowestoft (14 000 m³/d) ja Buxton (11 000 m³/d) Isossa-Britanniassa. (Melin ym. 2006) Pariisin La Moréen MBR-laitos (50 000 m³/d) on rakenteilla ja otetaan käyttöön vuonna 2012. Suomessa ei toistaiseksi ole suuria yhdyskuntajäteveden puhdistamiseen tehtyjä MBR-laitoksia. Viikinmäen jätevedenpuhdistamolla Helsingissä on tehty onnistuneita pilot-koeeajoja MBR-tekniikalla. Kalvotekniikoiden laitteita valmistavat mm. Zenon, Norit ja Kubota. Valmistajien suomalaisia edustajia ovat mm. Aquaflo Oy, Hydropress Huber Ab, Hyxo Oy sekä Sarlin Oy.

MBR-prosesseja käytetään tyypillisesti silloin, kun laitoksen käytettävissä oleva pinta-ala on vähäinen ja ympäristövaikutusten on oltava erityisen vähäiset. Monet

kalvolaitokset sijaitsevat keskellä asutusta, eikä niitä päällisin puolin tunnista jätevedenpuhdistamoiksi.

4.3 Tertiäärinen ultrasuodatus

Kalvosuodatusyksiköt voidaan sijoittaa myös perinteisen jälkiselkeytyksen jälkeen, jolloin ne käytännössä korvaavat perinteiset tertiäärikäsittelymenetelmät kuten hiekkasuodatuksen. Tällaisessa ratkaisussa vesi pumpataan kalvojen läpi ylipaineella. Kalvot ovat samantyyppisiä ja niiden erotuskyky pitkälti samanlaista kuin MBR-prosessissa. Prosessin lohkokaavio on esitetty alla (Kuva 4.5).



Kuva 4.5. Lohkokaavio: ultrasuodatus jälkiselkeytyksen jälkeen

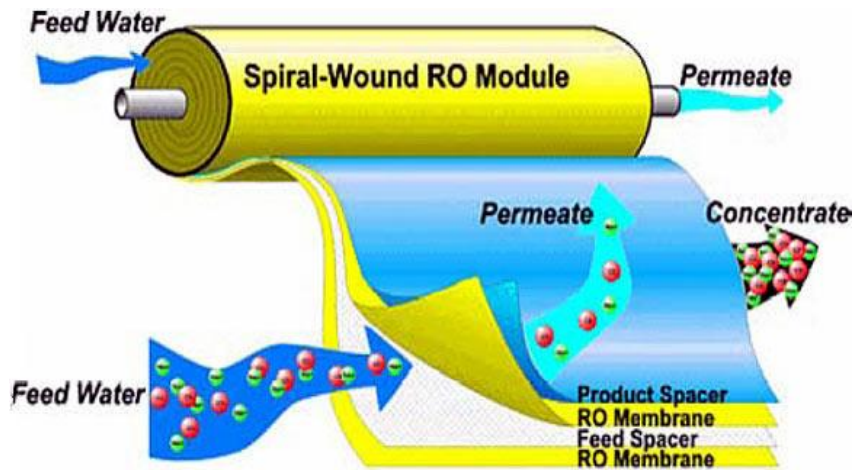
Tällä toteutustavalla voidaan päästä hieman alhaisempiin fosforipitoisuuksiin kuin MBR-ratkaisussa, koska biologian ja kalvoyksikön välissä olevassa jälkiselkeyttimessä voidaan toteuttaa fosforin jälkisaostus ja tehostaa kiintoaineen erottumista polymeerillä.

Menetelmän investointikustannukset ovat korkeammat kuin perinteisellä aktiivilieteprosessilla ja MBR-laitoksella, koska aktiivilieteprosessi ja jälkiselkeytyks on mitoitettava jokseenkin samankokoisiksi kuin ilman kalvosuodatusta. Kalvojen Käyttökustannukset ovat MBR-laitosta matalammat, koska kalvoja ei ilmasteta, niiden käyttöikä on pidempi ja kemikaalien kulutus on vähäisempää. Viikinmäen jätevedenpuhdistamolla Helsingissä on tehty onnistuneita pilot-koearjoja tertiäärisellä UF-tekniikalla.

4.4 Käänteisosmoosi

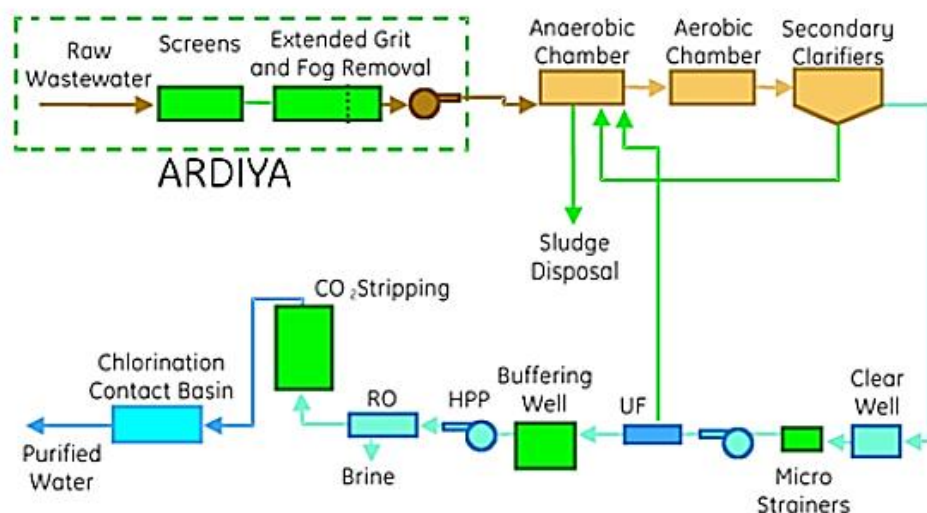
4.4.1 Prosessikuvaus

Käänteisosmoosi (RO) on kalvotekniikan yksi muoto, jolla poistetaan epäpuhtauksia veden paineen avulla. Luonnollisessa osmoosissa puoliläpäisevä kalvo päästää veden läpi, mutta ei suoloja, ja vesi virtaa solun sisälle tai ulos sen mukaan, kummalla puolella liuos on väkevämpää, kun liuosten pitoisuudet pyrkivät tasoittumaan. Käänteisosmoosissa vesi saadaan virtaamaan puoliläpäisevän kalvon läpi paineen avulla. Orgaanisessa kalvossa on suunnilleen vesimolekyylin kokoisia reikiä, joten veden epäpuhtaudet (isommat molekyylit) jäävät kalvon toiselle puolelle vesimolekyylin mennessä kalvon läpi. Paineen on oltava paljon suurempi kuin luonnolliseen suuntaan kulkevan osmoosin paineen. Kalvomoduulin toimintaperiaate on esitetty alla (Kuva 4.6).



Kuva 4.6. Käänteisosmoosin kalvomoduulin toimintaperiaate.

Käänteisosmoosin esikäsittelyksi soveltuu mikro-suodatus, ultrasuodatus tai muu vastaavantasoinen tertiäärikäsittely. Ennen käänteisosmoosia pH alennetaan n. 6:een esimerkiksi rikkihapolla ja sopivalla vedenpehmentäjällä tai antiskalantilla, millä estetään karbonaattien ja sulfaattien saostuminen kalvoille. Tämä pidentää kalvojen käyttöikää. Usein käsiteltävään veteen lisätään myös klooria, jolla ehkäistään mikrobien kasvaminen RO-kalvojen pinnalla. Tarvittava paine vaihtelee 2-17 baarin välillä tämäntyyppisten vesien puhdistuksessa (suolanpoistossa merivedestä tarvitaan huomattavasti suurempi paine). Tarvittava paine riippuu veden epäpuhtauksien määrästä ja lämpötilasta: mitä likaisempaa ja kylmempää vettä, sitä suurempi paine tarvitaan. Useimmissa referenssilaitoksissa käänteisosmoosi tapahtuu kolmessa vaiheessa, jolloin edellisen vaiheen residuaali siirtyy seuraavaan vaiheeseen. Tällöin käsittelyyn tulevasta vedestä n. 85 % saadaan menemään paineella kalvojen läpi, loput vedestä jää rejektilietevedeksi. Esimerkki käänteisosmoosilaitoksen lohkokaaviosta on esitetty alla (Kuva 4.7).



Kuva 4.7. Lohkokaavio: käänteisosmoosi jäteveden tertiäärikäsittelynä (Al-Sulaibiya, Kuwait).

4.4.2 Saavutettava puhdistustulos

Käänteisosmoosi poistaa vedestä lähes kaikki mineraalit, suolat ja orgaaniset aineet sekä kaikki mikrobit, joten sen jälkeen vesi on puhtaudeltaan lähes tislattun veden tasoista.

Käänteisosmoosia käytetään esim. teollisuuden prosessivesien valmistusyksiköissä, kun prosessiin tarvitaan erittäin puhdasta vettä, sekä juomaveden valmistukseen merivedestä. Jäteveden käsittelyssä käänteisosmoosi käy lähinnä tertiäärikäsittelyn jälkeiseksi käsittelyksi, koska käänteisosmoosi on kustannustehokkain melko laimeille vesille. Käänteisosmoosilla käsiteltyä jätevettä voidaan jälkikemikalointuna toimittaa suoraan jakeluverkkoon tai imeyttää tekopohjavedeksi. Jälkikemikalointina tehdään tavallisesti kovuuden säätö verkoston suojaamiseksi, varmistava desinfiointi sekä mahdollisen klooriresiduaalin luominen verkostossa tapahtuvan mikrobikasvun ehkäisemiseksi.

4.4.3 Operointi, riskit ja kustannustekijät

Käänteisosmoosin etuja ovat erinomainen puhdistustehokkuus, laitteistojen helppo suunnittelu ja käyttö, pienet huoltovaatimukset ja moduulimuoto. Lisäksi käänteisosmoosi poistaa samanaikaisesti sekä orgaanisia että epäorgaanisia aineita tehokkaasti.

Käänteisosmoosin ylivoimaisesti suurin haitta on se, että käsittelyyn tulevasta vedestä n. 10–20 % muodostuu ylijäämalietevedeksi. Tämä rejektiliete sisältää runsaasti mineraaleja ja suoloja, joten sitä ei voi kierrättää biologiseen prosessiin. Useimmissa käänteisosmoosia hyödyntävissä jätevedenpuhdistamoissa rejekti johdetaan purkuvesistöön. Jos tämä ei ole mahdollista, rejekti on käsiteltävä erillisessä prosessissa.

Käänteisosmoosin kustannukset muodostuvat pääasiassa korkeista energiakustannuksista sekä tarvittavista esikäsitteilyistä. Korkeat paineet ja peräkkäiset käsittelyvaiheet vaativat korkeatasoisia materiaaleja ja instrumentointia, jotka osaltaan lisäävät investointikustannuksia. Kalvojen kestoikä riippuu prosessin optimoinnista, tarvittavasta paineesta ja tulevan veden laadusta. Tutkimissamme referenssilaitoksissa kalvot uusitaan noin viiden vuoden välein.

4.4.4 Referenssit

Orange County Groundwater Replenishment System

Yksi maailman suurimpia ja moderneimpia kunnallisen jäteveden käsittelyn käänteisosmoosilaitoksia on Orange County Groundwater Replenishment System (OC GWRS, Kalifornia, U.S., Kuva 4.8). Se aloitti toimintansa 2008 alussa ja sen käsittelykapasiteetti on 364 000 m³/d. Perinteisen biologis-kemiallisen käsittelyn jälkeen vesi ohjataan jätevedenpuhdistamolta GWRS:iin, jossa tehdään mikrosuodatus, käänteisosmoosi sekä UV- ja vetyperoksidikäsitteily. UV- ja vetyperoksidikäsitteilyn tarkoitus on lähinnä haihtuvien orgaanisten yhdisteiden hajotus sekä mikrobien täydellisen tuhoutumisen varmistaminen. Tämän jälkeen vesi pumpataan tekopohjavedeksi estämään meriveden tunkeutumista pohjaveteen. Prosessista syntyy erilaisia lietteitä lähes 90 000 m³/d, josta mikrosuodatuksesta syntynyt liete (n. 40 000

m^3/d) voidaan palauttaa jätevedenpuhdistamolle ja käänteisosmoosin lietteet (lähes $50\,000\ \text{m}^3/\text{d}$) joudutaan pumppaamaan mereen.



Kuva 4.8. Käänteisosmoosimoduuleja Orange Countyn laitoksella.

West Basin Municipal Water District

West Basin Municipal Water District (Etelä-Kalifornia, U.S.) omistaa Yhdysvaltain ensimmäisen käänteisosmoosilaitoksen (valmistunut 1999) kunnallisten jätevesien käsittelyyn. Prosessi on Orange Countyn tapaan mikrosuodatus, käänteisosmoosi sekä UV- ja vetyperoksidikäsittely. Laitos on tuotteistanut puhdistamansa jäteveden. Sitä myydään prosessin eri vaiheista otettuna teollisuuden prosessi- ja boilerivesiksi, kasteluun sekä tekopohjavedeksi estämään meriveden tunkeutumista pohjaveteen.

Vuosina 2007–2010 kierrätysvettä on myyty $100\,000\ \text{m}^3/\text{d}$, josta pohjavedeksi vajaa kolmannes. Kierrätysvesien myyntihinnat vaihtelivat välillä $0,30\text{--}0,74\ \text{€m}^3$.

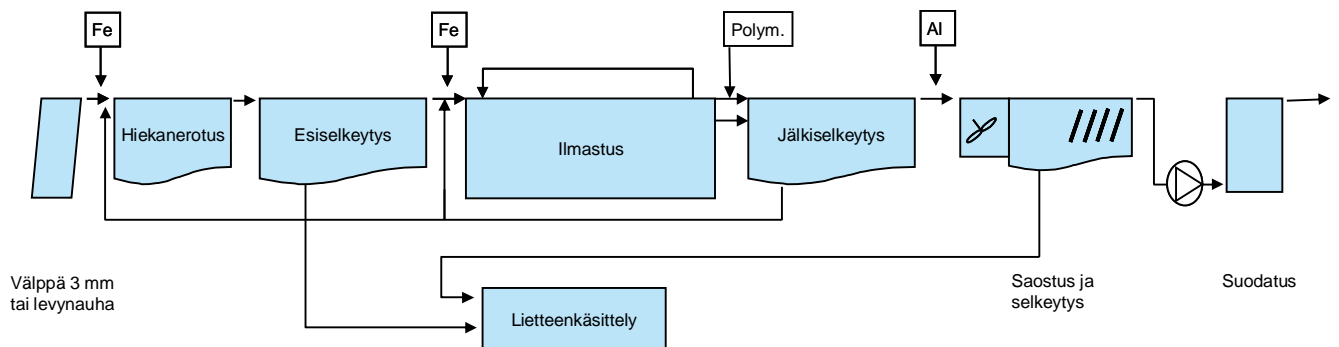
Al-Sulaibiya

Maaailman suurin kunnallisten jätevesien käänteisosmoosilaitos on Al-Sulaibiya Kuwaitissa. Se käsittelee jätevettä $500\,000\ \text{m}^3/\text{d}$ eli yli puolet Kuwaitin jätevesistä. Perinteisen biologis-kemiallisen käsittelyn jälkeen tertiäärikäsittelyn mitoituskapasiteetin ($425\,000\ \text{m}^3/\text{d}$) ylittävä vesimäärä pumpataan mereen. Loput käsitellään hiekkasuodatuksella, ultrasuodatuksella sekä käänteisosmoosilla. Hiekkasuodatuksen ja ultrasuodatuksen huuhteluviedet ohjataan takaisin prosessin alkuun. Käänteisosmoosiin tulevasta vedestä 15 % jää rejektilieteviedeksi joka pumpataan tertiäärikäsittelyn ohitusvesien mukana mereen. Käänteisosmoosilla käsiteltyä vettä käytetään ruuantuotannon kastelutarpeisiin.

4.5 Tehostettu perinteinen tertiäärikäsittely

4.5.1 Prosessikuvaus

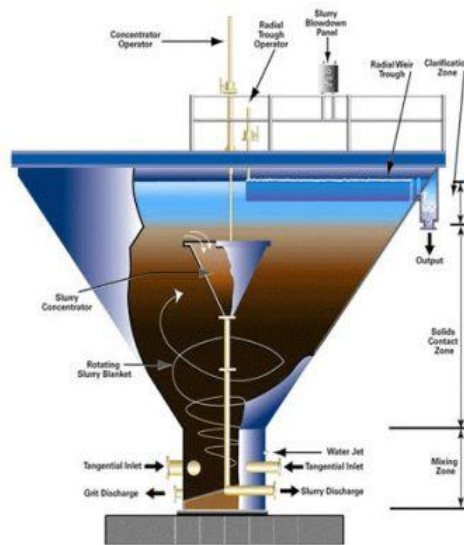
Kalvotekniikoiden ohella myös perinteisemmillä puhdistustekniikoilla on saavutettu erinomaisia fosforinpoistutuloksia. Yksivaiheista tertiäärikäsittelyä voidaan tehostaa lisäämällä sen eteen tai jälkeen ylimääräinen kemiallis-fysikaalinen käsittelyvaihe. Tällä ylimääräisellä vaiheella tehostetaan jäljellä olevan liukoisen reaktiivisen ja ei-reaktiivisen fosforin saostumista antamalla kemikaalille lisää kontaktipintaa ja -aikaa. Esimerkki tällaisen toteutuksen lohkokaaviosta on esitetty alla (Kuva 4.9).



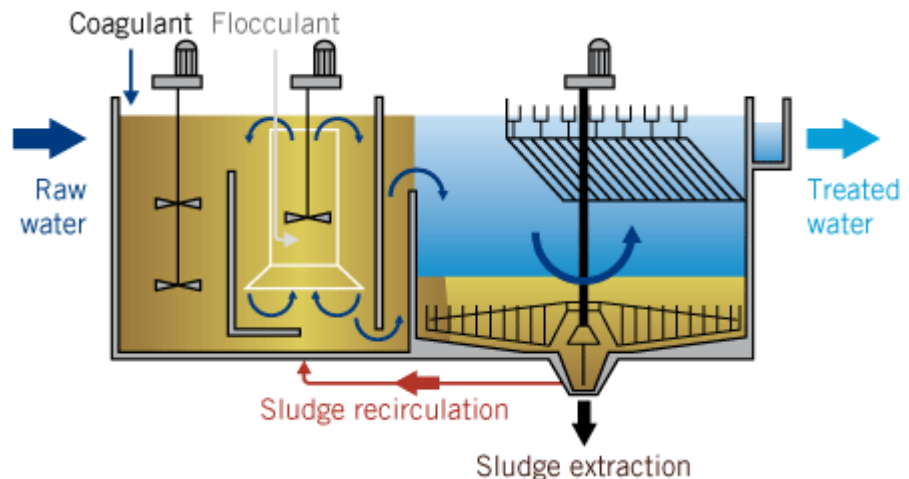
Kuva 4.9. Prosessikaavio: tehostettu perinteinen tertiäärikäsittely.

Saostus toteutetaan tavallisesti alumiinipohjaisilla kemikaaleilla (esim. alumiinisulfaatti, polyalumiinikloridi), joiden optimi-pH on korkeampi ja liukoisuustulo matalampi kuin rautasuoloilla. Toteutus sisältää kemikaalin syötön ja pikasekoituksen, hämmennyksen tai muun flokinmuodostusvaiheen sekä kiintoaineen erotuksen selkeytyksellä tai suodatuksella. Selkeytykseen on useita vaihtoehtoisia ratkaisuja: perinteinen painovoimainen selkeytyks tai erilaiset tehostetut ratkaisut, esim. lamelli- tai putkiselkeyttimet, joilla selkeytyspinta-alaa voidaan pienentää jopa kymmenesosaan perinteisestä (Kuva 4.10 ja Kuva 4.11). Kemikalointi- ja flokkausvaihe voivat olla erillisinä yksiköinä tai integroituna tehostettuun selkeytykseen. Tämän jälkeen viimeisenä vaiheena on yleensä vielä erillinen suodatus, joka voi olla kemikaloitu tai puhtaasti fysikaalinen prosessi, joko perinteinen panostoiminen tai uudempi jatkuvatoiminen ratkaisu. Prosessikokonaisuus on pitkälti samanlainen kuin juomavedenkäsittelylaitoksilla.

Saostuksessa syntyvät lietteet johdetaan yleensä joko prosessin alkuun tai suoraan lietteenkäsittelyyn, jossa ne käsitellään samoissa yksiköissä muun laitoksella syntyvän lietteen kanssa.



Kuva 4.10. ClariCone® -selkeytin.



Kuva 4.11. Densadeg®, integroitu saostus ja selkeytys.

4.5.2 Saavutettava puhdistustulos

Tehostetulla tertiärisaostuksella on mahdollista päästä pysyvästi alle 0,1 mg/l:n fosforipitoisuuksiin. Yhdysvalloissa tehtyjen tutkimusten mukaan kahdeksalla täyden mittakaavan laitoksella saavutetut lähtevän fosforin kuukausikeskiarvot olivat korkeintaan 0,1 mg/l (US EPA, 2007; Bott *et al*, 2011). Joukossa oli kolme yli 100 000 AVL:n laitosta. Neljällä pienemmällä laitoksella (AVL 6 000 – 30 000) korkein kuukausikeskiarvo oli alle 0,05 mg/l. Kolmivuotisessa seurannassa kuudella laitoksella 95 % analyysiarvoista oli alle 0,2 mg/l ja kahdella alle 0,05 mg/l, joten hyvä fosforinpoistotulos oli jatkuvaa, eivätkä prosessihäiriöt aiheuttaneet tulosten pitkäaikaista heikentymistä.

Tyypillinen keskimääräinen puhdistustulos suurilla laitoksilla oli: kiintoaine < 2 mg/l, BOD₅ < 2 mg/l ja fosfori < 0,07 mg/l. Alla olevassa taulukossa (Taulukko 4.1) on esitetty erällä yhdysvaltalaisilla laitoksilla saavutettuja fosforinpoistotuloksia.

Taulukko 4.1. Fosforinpoistotuloksia yhdysvaltalaisilla jätevedenpuhdistamoilla (Bott et al, 2011)

Table 6. Total Phosphorus Daily Data TPS Concentrations (mg/L) From Plants.

Plant	Process Code ^a	TP (mg/L)/Averaging Period ^b	Permit	3.84% (14d)	50%	95%	3.84%/50%	95%/50%
Iowa Hill, CO	2-3C _{Al} -3F	0.05/A		0.004	0.012	0.045	0.33	3.8
Blue Plains, DC	1C _{F_r} -2C _{F_r} -3C _M -3F	0.18/A		0.005	0.070	0.180	0.07	2.6
Pinery, CO	2BC _F -3C _{Al} F	0.05/M		0.013	0.023	0.045	0.58	2.0
F. Wayne Hill, GA	1-2BC _{Al} -3C _{F_r} -3UF	0.13/M		0.020	0.040	0.110	0.50	2.8
Rock Creek, OR	1C _{Al} -2-3C _{Al} -3F	0.10/MM		0.025	0.065	0.210	0.38	3.2
ASA, VA	1C _{F_r} -2C _M C _{F_r} -3C _{Al} -3F	0.18/M		0.025	0.050	0.120	0.50	2.4
Cauley Creek, GA	2BC _{F_r} -3UF	0.13/M		0.040	0.080	0.160	0.50	2.0
Clark County, NV	1C _{F_r} -2B-3C _{Al} -3F	0.14/M		0.045	0.081	0.201	0.55	2.5
Kalispell, MT	1-2B _{C_{Al}} -3F	1.0/M		0.050	0.100	0.230	0.50	2.3
Kelowna, BC	1-2B _{C_{Al}} C _F -3F	0.25/A		0.090	0.150	0.324	0.60	2.2

Note: a. See Chapter 3 for explanation. b. A = Annual, M = Monthly, MM = Monthly Median; Permit limits are shown only as an indication of the requirement under which the plant operates. Permits requirements varies – for example Rock Creek operates under a monthly median permit; DC Water operates under an annual limit

4.5.3 Operointi, riskit ja kustannustekijät

Tehostetun tertiäärikäsittelyn operointi ei olennaisesti poikkea perinteisen jätevedenpuhdistamon ajosta. Kemikalointi vaatii optimointia ja tarkkaa seuranta. Parhaan kemikaalityypin ja annostuksen valinta on aina laitospohjainen ja riippuu jäteveden laadusta ja tertiäärikäsittelyä edeltävien prosessiyksiköiden toiminnasta. Tehostetut, kompaktit saostus-selkeytysratkaisut ovat tavallisesti patentoituja, ja niillä voi olla omia erityisiä kunnossapitovaatimuksiaan.

Merkittävimmi ongelmi on käytännön prosessiajossa havaittu tulokuormituksen vaihtelu ja siihen liittyvä tertiäärikäsittelyä edeltävien prosessiyksiköiden toiminnan vaihtelu. Ne vaikeuttavat kemikaaliannostuksen ohjausta sekä optimaalisen pH-alueen ylläpitoa.

Ylimääräinen prosessiyksikkö lisää luonnollisesti puhdistamon investointikustannuksia. Merkittävin käyttökustannustekijä on kemikaalikulutuksen kasvaminen, vähäisempiä tekijöitä lietemäärän kasvu sekä rakenteiden ja laitteiden kunnossapitokulut. Operoitaessa hyvin alhaisilla fosforipitoisuuksilla kemikaalin ja poistettavan fosforin suhde on korkeampi kuin väkevämmillä vesillä, ja annostuksessa on oltava varmuusvaraa biologisesta prosessista tulevan veden pitoisuuden vaihtelulle.

4.5.4 Referenssit

Yhdysvalloissa on kymmeniä jätevedenpuhdistamoja, joiden lupaehtot ovat vastaanottavan vesistön herkkyyden takia erityisen tiukat (0,05 – 0,2 mg/l). Tässä esitellään yksi suuri ja yksi pienempi laitos, jotka toimivat talvisaikaan kylmissä olosuhteissa.

Rock Creek Advanced Wastewater Treatment Plant (Oregon, USA)

Laitoksen mitoitusteho on n. 150 000 m³/d. Purkuvesistö on pienehkö joki, johon kohdistuu korkea ravinnekuormitus eri lähteistä. Puhdistamon fosforilupaehto on 0,1

mgP/l kuukausittaisena mediaanina laskettuna. Lupaehto on voimassa toukokuusta lokakuuhun.

Laitoksella on perinteinen esikäsitely, esiselkeytys ja aktiivilieteprosessi. Fosforia esisaostetaan esiselkeytyksessä alumiinilla. Aktiivilieteprosessin jälkeen tapahtuu jälkisaostus alumiinisuoloilla ja polymeerillä, prosessina flokkaus, selkeytys ja suodatus. Osa tertiäriselkeyttimistä on perinteistä mallia, osa tehostettua ClariCone® -mallia. Loppusuodatus tapahtuu kaksikerrossuodattimilla.

Saavutetut fosforinpoistotulokset ovat kuukausikeskiarvoina 0,05 – 0,09 mg/l ja 95 % yksittäisistä arvoista on ollut alle 0,21 mg/l. Vuosikeskiarvo on 0,07 mg/l. Laitoksella on havaittu, että alle 0,1 mg/l:n tuloksen saavuttamiseen tarvittava Al/P -moolisuhde tertiärisaostuksessa on 5 – 7. Tämä merkitsee suhteellisesti viisinkertaista kemikaaliannostusta verrattuna tyypilliseen esisaostuksen annostukseen. Puhdistamon aktiivilieteprosessia ollaan saneeraamassa biologiseen fosforinpoistoon, jonka odotetaan vähentävän saostuskemikaalin kokonaiskulutusta.

Farmer's Korner Wastewater Treatment Plant (Colorado, USA)

Laitoksen mitoitusvirtaama on n. 12 000 m³/d. Purkuvesistö on tekojärvi, josta otetaan Denverin suurkaupunkialueen raakavesi. Fosforin lupaehto on 0,5 mg/l.

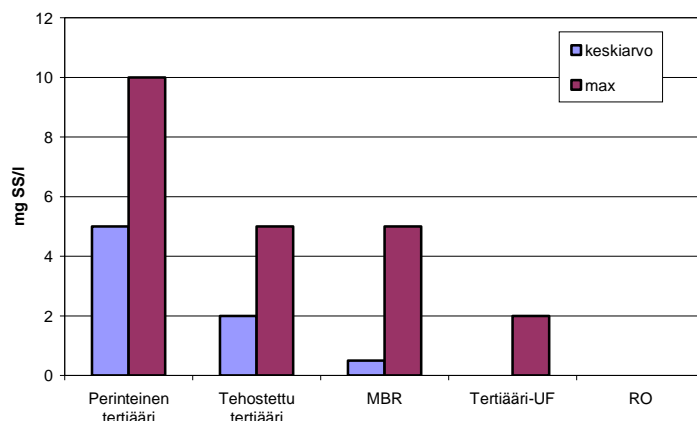
Prosessina on perinteinen esikäsitely ilman esiselkeytystä, biologinen ravinteidenpoisto aktiivilieteprosessilla, kemikalointi ja selkeytys putkiselkeyttimillä sekä kaksikerrossuodatus. Saostuskemikaalia (alumiini) syötetään vain tertiärikäsittelyyn.

Saavutetut fosforinpoistotulokset ovat kuukausikeskiarvoina 0,002 – 0,036 mg/l, ja vuosikeskiarvo on 0,007 mg/l. Tämä laitos toimii siis esimerkkinä äärimmäisen hyvästä fosforinpoistotuloksesta.

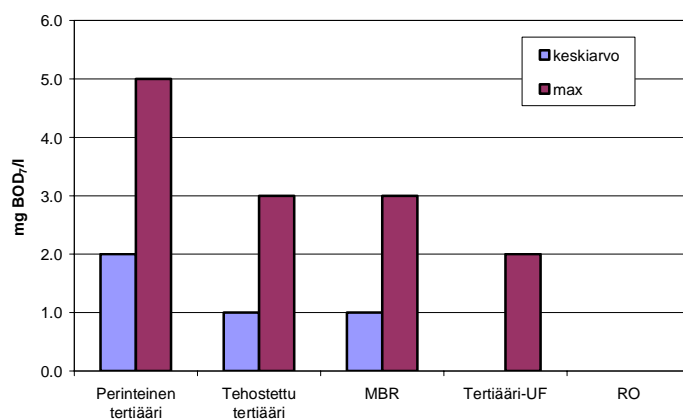
5 KÄSITTELYVAIHTOEHTOJEN VERTAILU

5.1 Puhdistetun veden laatu

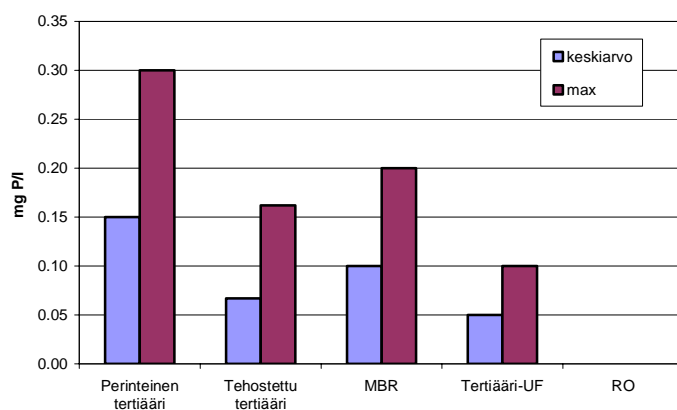
Alla on vertailtu tarkastelluilla menetelmillä tuotettavan puhdistetun jäteveden tyypillisiä laatuarvoja (Kuva 5.1 - Kuva 5.3).



Kuva 5.1. Tarkastelluilla menetelmillä saavutettavat tyypilliset kiintoainepitoisuudet



Kuva 5.2. Tarkastelluilla menetelmillä saavutettavat tyypilliset BOD₇-pitoisuudet



Kuva 5.3 Tarkastelluilla menetelmillä saavutettavat tyypilliset kokonaisfosforipitoisuudet

5.1.1 Fosforinpoisto

Kaikilla tarkastelluilla tekniikoilla, kuin myös perinteisellä yksivaiheisella tertiäärikäsittelyllä, voidaan saavuttaa parhaimmillaan alle 0,1 mg/l:n fosforipitoisuus

käsitellyssä jätevedessä. Tekniikat eroavat toisistaan tuloksen pysyvyyden ja mahdollisten takuuarvojen suhteen.

- Perinteisellä tertiäärikäsittelyllä ei voida poikkeustilanteet mukaan lukien taata jatkuvaa alle 0,2 mg/l:n tulosta, joten näiden ratkaisujen takuuarvona pidetään yleensä 0,3 mg/l
- MBR-tekniikalle on asetettu 0,2 mg/l:n lupaehtoja, jotka tekniikka myös kykenee jatkuvassa ajossa täyttämään. Alhaisempi pitoisuus voidaan saavuttaa, jos hyväksytään riski biologisen prosessin fosforirajoitteisuudesta. Jos ultrasuodatus toteutetaan jälkiselkeytyksen jälkeen, 0,1 mg/l voidaan saavuttaa jatkuvasti. Tällöin kuitenkin menetetään MBR:n mahdollistama investointisäästö biologisen prosessin mitoituksessa.
- Käänteisosmoosilla saadaan aikaan juomavesilaatuista, lähes molekyylärisesti puhdasta vettä. Erotetut ravinteet ja suolat sisältävä jäteluosi on käsiteltävä erikseen, mikä lisää kustannuksia
- Tehostetulla perinteisellä tertiäärikäsittelyllä on saavutettu alle 0,1 mg/l:n fosforipitoisuus jopa 95 % ajasta. Eri toteutuksissa on kuitenkin suuri vaihteluväli: 95 %:n arvon on todettu vaihtelevan laitokselta toiselle välillä 0,05 – 0,32 mg/l

5.1.2 Muut laatuparametrit

Kiintoaine voidaan poistaa kaikilla kalvotekniikoilla määritysrajan alittavaan tasoon. Perinteisillä menetelmillä jäädään yleensä välille 1 – 5 mg/l. BOD:n poiston tehokkuus riippuu kiintoaineen poiston lisäksi siitä, tuleeko liukoista, hitaasti hajoavaa BOD:tä läpi aktiivilieteprosessista. Tyypeä poistavan tai nitrifioivan aktiivilieteprosessin pitkä viipymä yleensä takaa liukoisen BOD:n täydellisen hajoamisen.

Tyypenpoistoteho riippuu enemmän aktiivilieteprosessin ajosta ja siihen tulevan jäteveden laadusta kuin tertiäärikäsittelystä. Kiintoaineen poistoa tehostamalla lähtevän kokonaistypen tasoa voidaan tyypillisesti laskea esim. tasolta 10 mg/l tasolle 7 – 8 mg/l. Lappeenrannassa odotettavissa oleva konsentraatio on n. 7 mg/l, jos kaikki kiintoaineeseen sitoutunut tyyppi poistetaan tertiäärikäsittelyssä ja aktiivilieteprosessissa päästään 85 % tyypenpoistotehoon (500 % kokonaiskierrätys).

Ultrasuodatus poistaa mikrobeja tehokkaasti, mutta esim. tietyt virukset pääsevät ainakin osittain kalvon läpi. Jos jätevesi halutaan hygienisoida täysin, kaikki muut vaihtoehdot paitsi käänteisosmoosi vaativat jälkidesinfioinnin (esim. UV-käsittely).

5.2 Toteutus ja operointi

Kaikkien vaihtoehtojen toteutusta tarkastellaan tilaajan ohjeen mukaisesti oletuksella, että rakennetaan kokonaan uusi jätevedenpuhdistamo, eikä tehostamistekniikoita soviteta nykyiseen Toikansuon jätevedenpuhdistamoon. Kaikki esitetyt tekniikat kuitenkin soveltuvat myös olemassa olevan laitoksen tehostamiseen.

MBR vie vaihtoehtoista vähiten tilaa, tehostettuun tertiäärikäsittelyyn perustuva ratkaisu eniten. Kaikki kalvosuodatusyksiköt (MBR, tertiäärinen ultrasuodatus, käänteisosmoosi esikäsittelyineen) on sijoitettava lämmitettyyn tilaan. Perinteistä tertiäärikäsittelyä tehostava saostus-selkeytysvaihe voidaan toteuttaa ainakin

selkeytyksen osalta kattamattomana, mikäli käytetään perinteistä selkeytystä. Kompakti, integroitu saostus-selkeytysratkaisu on käytännössä katettava.

Kalvolaitosten operointi tapahtuu täysin automaattisesti. Henkilökunnan on huolehdittava lähinnä huolto-ohjelman mukaisista kalvojen vuosipesuista ja normaalista pumppujen ym. laitteiden kunnossapidosta ja pesukemikaalien riittävydestä. MBR-prosessin energiatehokkuuden ja kalvojen läpäisevyyden optimointi vaatii aktiivilieteprosessin lieteiän ja mahdollisen virtaaman tasauksen optimointia. Tehostetussa tertiäärikäsitelyssä vaaditaan enemmän henkilökunnan aktiivista työpanosta kuin muissa vaihtoehdoissa, lähinnä kemikaalien syötön valvonnassa ja säädössä sekä useamman prosessiyksikön huollossa ja valvonnassa.

Kaikkien menetelmien voidaan katsoa soveltuvan Suomen olosuhteisiin. Merkittävin ilmastoriski on kalvojen läpäisykyvyn huononeminen kylmillä vesillä. Kalvotoimittajat pitävät nykyään 8 °C minimirajana, jonka alapuolella läpäisykyky huononee merkittävästi. Suomalainen jätevesi ei poikkea laadultaan esim. keskieuropalaisesta jätevedestä siinä määrin, että sillä olisi tertiäärikäsitelyn kannalta olennaista merkitystä.

Kemikaalikustannuksia voidaan vähentää ja fosforinpoistoa osittain tehostaa kaikissa vaihtoehdoissa toteuttamalla aktiivilieteprosessissa tehostettu biologinen fosforinpoisto. Tämä kuitenkin lisäisi aktiivilieteprosessin ja lietteenkäsittelyn investointikustannuksia jonkin verran.

5.3 Investointi- ja käyttökustannukset

Tarkasteltujen prosessivaihtoehtojen arvioidut investointi- ja käyttökustannukset on esitetty alla (Taulukko 5.1). Vertailukustannus on laskettu arvioitujen investointikustannusten ja 20 vuoden käyttökustannusten summalle. Käyttökustannusten nykyarvon laskennassa on käytetty 6 %:n diskonttokorkoa (inflaatio + oletettu markkinakorko).

Kustannusarviot sisältävät koko jätevedenpuhdistamon. Kaikissa vaihtoehdoissa käänteisosmoosia lukuun ottamatta on oletettu, että lähtevä jätevesi desinfioidaan UV-käsittelyllä. Siltä osin kuin laitoskokonaisuuteen sisältyy vuoden 2004 yleissuunnitelman mukaisia yksikköprosesseja, on käytetty ao. yleissuunnitelman mukaisia kustannusarvioita tarkistettuina tämän päivän hintatasoon. Nollavaihtoehto eli ”Perinteinen tertiääri” tarkoittaa vuoden 2004 yleissuunnitelman mukaista laitoskokonaisuutta. Kustannusarviot eivät sisällä siirtoviemäreitä.

Taulukko 5.1. Laitosvaihtoehtojen arvioidut investointi- ja käyttökustannukset (koko jätevedenpuhdistamo)

Kustannuslaji	Yksikkö	Perinteinen tertiääri	Tehostettu tertiääri	MBR	Tertiääri-UF	Käänteis-osmoosi ¹⁾
Investointikustannukset	MEUR	34.8	35.7	33.1	40.7	42.4
Käyttökustannukset	MEUR/a	2.4	2.6	3.1	2.8	4.1
	EUR/m ³	0.30	0.32	0.38	0.35	0.52
Käyttökustannusten suhteellinen nousu ²⁾	%	0 %	9 %	29 %	18 %	75 %
Käyttökustannusten nykyarvo ³⁾	MEUR	27.2	29.7	35.1	32.2	47.5
Vertailukustannus	MEUR	62.0	65.4	68.2	72.9	89.9

¹⁾Ei sisällä rejektiliuoksen käsittelyn kustannuksia

²⁾Verrattuna perinteiseen ratkaisuun

³⁾Tarkastelu aika 20 a, korkokanta 6 %

Kustannusvertailun perusteella voidaan todeta, että tehostettu perinteinen tertiäärikäsittely on kokonais- ja käyttökustannuksiltaan edullisin vaihtoehto. MBR-laitos on edullisin investointi – jopa edullisempi kuin perinteinen prosessi – mutta korkeat käyttökustannukset syövät edun pois. Tertiäärinen ultrasuodatus on kokonaiskustannuksiltaan lähellä MBR:ää.

Käänteisosmoosi on odotetusti kallein vaihtoehto. On huomattava, että kustannusarvio ei sisällä rejektin käsittelyä, jonka vaikutus kokonaiskustannuksiin voi olla useita miljoonia euroja. Rejektien käsittelyn kustannusarvio vaatisi erillisen prosessivertailun, jota ei tämän työn puitteissa voida tehdä. Toteutetuissa ratkaisussa rejekti yleensä johdetaan mereen. Lappeenrannan tapauksessa rejektin purkuvesistönä ei voitaisi käyttää ainakaan Rakkolanjokea.

Vaihtoehtojen eroja voidaan havainnollistaa myös laskemalla hinta fosforinpoiston tehostamiselle verrattuna perinteiseen prosessiratkaisuun. Alla on esitetty, paljonko kukin vaihtoehto tehostaa fosforinpoistoa ja kuinka paljon ylimääräinen poistettu fosforikilo maksaa (Taulukko 5.2). Fosforikilon hinta on laskettu jakamalla prosessivaihtoehtojen ja perinteisen tertiäärikäsittelyn vertailukustannusten erotus vesistöön menevien fosforikuormien erotuksella.

Taulukko 5.2. Fosforinpoiston tehostamisen kustannukset fosforikiloa kohti

Muuttuja	Yksikkö	Perinteinen tertiääri	Tehostettu tertiääri	MBR	Tertiääri-UF	Käänteis-osmoosi**
Vertailukustannus	MEUR	62.0	65.4	68.2	72.9	89.9
P _{KOK} -pitoisuus vesistöön, keskimäärin	mg/l	0.15	0.07	0.10	0.05	0
Fosforikuorma vesistöön	kgP/20 a	24 090	10 760	16 060	8 030	0
Fosforinpoiston tehostuminen ¹⁾	kgP/20 a	0	13 330	8 030	16 060	24 090
Poistetun extra-fosforikilon hinta	EUR/kgP	-	256	772	680	1159

¹⁾verrattuna perinteiseen tertiäärikäsittelyyn

Näin tarkasteltuna voidaan todeta, että perinteisellä prosessiratkaisulla puhdistettuun jäteveeteen jäävän fosforikilon poistaminen on edullisinta tehostetulla fysikaalis-kemiallisella käsittelyllä. Tertiäärinen ultrasuodatus on tässä tarkastelussa MBR:ää

edullisempi vaihtoehto, koska jälkisuodatuksessa liukoinen fosfori voidaan saostaa biologisen prosessin minimitarpeen alapuolelle.

Lopullisiin kustannuksiin vaikuttaa merkittävästi se, mille virtaamalle perinteistä puhdistustekniikkaa tehostavat prosessiyksiköt lopulta mitoitetaan. Jos esim. vaaditaan, että kaikki jätevesi on joka tilanteessa käsiteltävä tehostetusti, investointikustannus voi olla useita miljoonia kalliimpi kuin ratkaisussa, jossa kaikkein korkeimmat virtaamat ohjataan osittain tertiäärikäsittelyn ohi.

5.4 Johtopäätökset ja konsultin suositus

Ympäristölupapäätöksen perusteluissa mainittu vesistöön laskettavan fosforin yläraja 0,1 mgP/l voidaan saavuttaa jatkuvassa ajossa (kuukausikeskiarvo tai yli 95 % ajasta) fysikaalis-kemiallisella lisävaiheella tehostetulla perinteisellä tertiäärikäsittelyllä, tertiäärisellä UV-suodatuksella ja käänteisosmoosikäsittelyllä.

Kalvobioreaktorilla (MBR) ei biologisen käsittelyn rajoitusten vuoksi voida taata jatkuvaa alle 0,1 mg/l:n fosforitulosta, vaikka kalvojen erotuskyky itsessään mahdollistaa paljon alhaisempienkin pitoisuuksien saavuttamisen.

Kaikki em. tekniikat soveltuvat Suomen olosuhteisiin, joskin kalvoratkaisujen kustannustehokkuus huononee huomattavasti lähestyttäessä +8 °C:n prosessilämpötilaa.

Ratkaisut voidaan toteuttaa joko täysin uuteen jätevedenpuhdistamoon tai saneerattavaan ja laajennettavaan vanhaan laitokseen.

Juomavesitasoista vettä tuottava käänteisosmoosi ei Lappeenrannassa ole käytännössä järkevä vaihtoehto, koska prosessin tuottama rejktivesi pitäisi käsitellä erikseen. Ratkaisu on myös selvästi kalliimpi kuin muut vaihtoehdot.

Fosforinpoiston tehostaminen on edullisinta toteuttaa tehostamalla perinteistä tertiäärikäsittelyä ylimääräisellä kemiallisen saostuksen ja selkeytyksen tai suodatuksen yhdistelmällä. Seuraavaksi edullisin mahdollisuus on perinteisen biologisen käsittelyn perään toteutettava, jälkisaostuksella tehostettu tertiäärinen ultrasuodatus, joka korvaa perinteisen tertiäärikäsittelyn.

Tertiäärisellä ultrasuodatuksella päästään todennäköisesti alhaisempiin lähtevän jäteveden pitoisuuksiin ja puhdistustuloksen voidaan odottaa vaihtelevan vähemmän kuin tehostetulla perinteisellä käsittelyllä.

Tertiäärisellä ultrasuodatuksella tehostettu jätevedenpuhdistamo on investointi- ja käyttökustannuksiltaan 10 – 15 % kalliimpi vaihtoehto kuin tehostetulla perinteisellä tertiäärikäsittelyllä varustettu laitos. Fosforinpoiston tehostaminen perinteisellä tertiäärikäsittelyllä saavutettavasta tasosta on poistettua fosforikiloa kohden 2 – 3 kertaa kalliimpaa tertiäärisellä ultrasuodatuksella kuin tehostetulla perinteisellä tertiäärikäsittelyllä.

Vuoden 2004 yleissuunnitelman mukaisen jätevedenpuhdistamon ja Vuokseen johtavan siirtoviemärin kokonaisinvestointi olisi tällä tietoa yhteensä suuruusluokkaa 75 – 80 miljoonaa euroa. Käänteisosmoosia lukuun ottamatta kaikkien tässä selvityksessä

tarkasteltujen laitosvaihtoehtojen koko elinkaarikustannus 20 vuoden ajalta (investointi- ja käyttökustannukset) on arvioitu em. summaa alhaisemmaksi. Voidaan siis todeta, että tämän selvityksen perusteella erittäin tehokkaan jätevedenpuhdistuksen toteuttaminen ja jätevesien johtaminen Rakkolanjokeen on edullisempi vaihtoehto kuin jätevesien johtaminen Vuokseen.

Konsultti suosittelee, että selvitystä jatketaan esim. tertiäärisen ultrasuodatuksen ja tehostetun perinteisen tertiäärikäsitteilyn pilot-koearjoilla, em. vaihtoehtojen tarkennetulla prosessivertailulla ja laatimalla paremmaksi todetulle vaihtoehdolle esi- tai yleissuunnitelma. Työhön voidaan sisällyttää myös vierailuja referenssilaitoksilla. Oman ja asiakkaidemme kokemuksen mukaan pilot-koearjoilla ja laitoskäynneillä saadaan parasta ja tuoreinta ensi käden tietoa prosessien käytännön ajosta, tulosten pysyvyydestä, riskitekijöistä ja suunnittelussa huomioitavista seikoista. Vierailujen käytännön järjestelyt hoituvat mutkattomasti kaikkialla maailmassa Pöyryn paikallistoimijoiden kautta. Avustamme mielellämme myös pilot-koearjojen suunnittelussa ja koelaitteistojen hankinnassa.

6

YHTEENVETO

Tässä selvityksessä tarkasteltiin kalvotekniikoiden sekä eräiden vaihtoehtoisten tekniikoiden soveltuvuutta Lappeenrannan jätevesien käsittelyyn. Tarkastelun tavoitteena oli määrittää prosessit, joilla jäteveden puhdistusta voitaisiin tehostaa siten, että purkuvesistönä voitaisiin käyttää Rakkolanjokea.

Tarkastellut tekniikat olivat kalvobioreaktori (MBR), tertiäärinen ultrasuodatus, käänteisosmoosi ja tehostettu perinteinen tertiäärikäsittely.

Kaikki tarkastellut tekniikat soveltuvat Suomen olosuhteisiin. Kaikki tekniikat edellyttävät prosessiyksiköiden ainakin osittaista kattamista. Ratkaisut voidaan toteuttaa joko täysin uuteen jätevedenpuhdistamoon tai saneerattavaan ja laajennettavaan vanhaan laitokseen. Kustannusarvioiden oletus oli uusi jätevedenpuhdistamo.

Kaikista tarkastelluista tekniikoista on runsaasti sovelluksia ja vähintään kymmenen vuoden käyttöhistoria esim. Keski-Euroopassa, Britanniassa, Lähi-Idässä ja Yhdysvalloissa. Osa kohteista toimii Etelä-Suomea vastaavissa lämpötilaolosuhteissa. Prosessien ajo on pitkälle automatisoitua. Ratkaisevia toiminnallisia tekijöitä ovat edeltävien yksikköprosessien, erityisesti esikäsittelyn toiminta sekä jäteveden määrä- ja lämpötilavaihtelut.

Ympäristölupapäätöksen perusteluissa mainittu ja kaupungin lupavalituksessaan ehdottama vesistöön laskettavan fosforin yläraja 0,1 mgP/l voidaan alittaa jatkuvassa ajossa (kuukausikeskiarvo tai yli 95 % ajasta) fysikaalis-kemiallisella lisävaiheella tehostetulla perinteisellä tertiäärikäsittelyllä, tertiäärisellä UV-suodatuksella ja käänteisosmoosikäsittelyllä.

Juomavesitasoista vettä saadaan ainoastaan käänteisosmoosilla. Tämä tekniikka ei ole suositeltava vaihtoehto, koska se tuottaa erilliskäsittelyä vaativaa jäteliöntä, se on kustannuksiltaan selvästi kallein vaihtoehto, ja muillakin tekniikoilla päästään erittäin hyvään lopputuotteen laatuun.

Tertiäärinen ultrasuodatus on investointi- ja käyttökustannuksiltaan 10 – 15 % kalliimpi vaihtoehto kuin tehostettu perinteinen tertiäärikäsittely, mutta tuottaa tasalaatuisempaa ja puhtaampaa vettä. Fosforinpoiston tehostaminen perinteisellä tertiäärikäsittelyllä saavutettavasta tasosta on poistettua fosforikiloa kohden 1,5 – 2 kertaa kalliimpaa tertiäärisellä ultrasuodatuksella kuin tehostetulla perinteisellä tertiäärikäsittelyllä.

Tehostetun jätevedenpuhdistamon arvioidut investointikustannukset ovat valitusta tekniikasta riippuen 35 – 42 miljoonaa euroa ja käyttökustannukset 2,5 – 4 miljoonaa EUR/vuosi (0,3 – 0,5 EUR/m³). Selvityksen perusteella erittäin tehokkaan jätevedenpuhdistuksen toteuttaminen ja jätevesien johtaminen Rakkolanjokeen on edullisempi vaihtoehto kuin jätevesien johtaminen Vuokseen.

Konsultti suosittelee kahden lupaavimmaksi havaitun vaihtoehdon tarkentamista pilot-koeajoilla, laitosvierailuilla ja muilla jatkoselvityksillä.

KIRJALLISUUSVIITTEET

Aleisa, E, Al-Shayji K.A, Al-Jarallah, R. 2011. Residential wastewaters treatment system in Kuwait. 2011 2nd international conference on environmental science and technology. IPCBEE vol 6(2011), IACSIT Press Singapore.

Alhumoud, J. M, Al-Humaidi, H, Al-Ghusain, I.M, Alhumoud, A. M, Cost/Benefit Evaluation Of Sulaibiya Wastewater Treatment Plant In Kuwait. International Business & Economics Research Journal – February 2010 Volume 9, Number 2.

Ang, W.S, Tiraferri, A, Chen, K.L, Elimelech, M. 2011. Fouling and cleaning of RO membranes fouled by mixtures of organic foulants simulating wastewater effluent. Journal of Membrane Science 376 (2011) 196–206

Bartels, C, Franks, R, Andes, K. 2010. Operational Performance and Optimization of RO Wastewater Treatment Plants. Hydranautics Technical Paper.

Bott, C., Parker, D., Jimenez, J., Miller, M., Neethling, J.B. WEF/WERF study of BNR plants achieving very low N & P limits: evaluation of technology performance and process reliability. Proceedings of the 11th IWA specialized conference on design, operation and economics of large wastewater treatment plants, 4-8 Sept 2011, Budapest, Hungary.

Franks, R, Bartels, C, Mehul, P. 2011. Demonstrating Improved RO Membrane Performance When Reclaiming Secondary Municipal Waste. Hydranautics Technical Paper

Lazarova, V, Gallego, S, Garcia Molina, V. 2008. Problems of operation and main reasons for failure of membranes in tertiary treatment systems. Water Science & Technology 63.10, 2010

Liu, W., Hu, Z., Walker, R. L., Dold, P. L. Enhanced nutrient removal MBR system with chemical addition for low effluent TP. Water Science & Technology 64.6, 2011.

Mauer, C., Simsheuser, C., Seitter, J., Beier, S., Pinnekamp, J Energy consumption and optimization of full-scale municipal membrane bioreactors – A comparison with conventional activated sludge systems. Manuscript, IWA Conferences, 2011.

Orange County GRWS. 2008. Executive Summary of GWRS Annual Report.

Orange County GRWS. 2010. Press Kit. Facts and figures. 18 s.

Shahalam, A.M. 2009. Treatment of Nitrogen and Phosphorus in Brine of RO Process Refining Effluent of Biological-Processes Treating Municipal Wastewater. European Journal of Scientific Research. ISSN 1450-216X Vol.28 No.4 (2009), pp.514-521 57.11

West Basin Municipal Water District. 2010. Comprehensive Annual Financial Report, Fiscal Year Ended June 30, 2010.

USEPA (United States Environmental Protection Agency). Advanced wastewater treatment to achieve low concentration of phosphorus. EPA 910-R-07-002, Office of water and watersheds, 2007.