

19.12.2019

## **TURUN SEUDUN PUHDISTAMO OY**

Jätevedenpuhdistuksen energiatehokkuuden dynaaminen prosessimallinnus

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.

Copyright © Pöyry Finland Oy

<b>1</b>	<b>JOHDANTO .....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>TYÖN TAVOITTEET.....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>PROSESSIMALLI.....</b>	<b>3</b>
3.1	Ilmastus ja hapensiirto .....	3
3.2	Pumppaus .....	6
3.3	Hapensiirron ja -kulutuksen arviointi .....	7
<b>4</b>	<b>VERTAILUN PERUSTEET .....</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>TARKASTELLUT OHJAUSTAVAT.....</b>	<b>8</b>
5.1	V0: Perinteinen happi-ilmamäärä –kaskadisäätö .....	8
5.2	V1: Kakolanmäen nykyinen ammoniumtyyppiohjaus .....	8
5.3	V2: Vaihtoehtoinen ammoniumtyyppiohjaus .....	8
5.4	V3: Vakiohappiohjaus.....	8
5.5	V4: Vakio ilmamäärään perustuva ohjaus .....	8
5.6	V5: Kierrätyksen ohjaus.....	8
5.7	V6: Esiselkeytyksen ohjaus.....	9
<b>6</b>	<b>TULOSTEN TARKASTELU.....</b>	<b>10</b>
6.1	Ilmastuksen energiankulutus .....	10
6.2	Pumppauksen energiankulutus .....	11
6.3	Lähtevän veden laatu .....	12
6.4	Kokonaistaloudellisuus .....	15
<b>7</b>	<b>JOHTOPÄÄTÖKSET .....</b>	<b>18</b>

## 1 JOHDANTO

Energiatehokkuuden kehittäminen suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla on tärkeää, sillä energiankäytön tehostamisella on mahdollista paitsi vähentää puhdistamon käyttökustannuksia, myös edistää kestäväää ja ympäristöystävällisempää toimintaa. Erilaisten energiatehokkuutta edistävien toimenpiteiden lisäksi tarvitaan myös dokumentoitua tietoa eri menetelmien, kuten ilmastuksen tai pumppauksen ohjauksen energiatehokkuutta edistävästä vaikutuksista. Tällä hetkellä dokumentoitua tietoa eri ohjaustapojen vaikutuksista laitosten energiatehokkuuteen ei juurikaan ole saatavilla tai kerätty. Lisäksi energiatehokkuustoimien vaikutusten dokumentointi on puhdistamoilla erittäin haastavaa, sillä energiankulutuksen mittaustarkkuus rajautuu yleensä vain muutamaaan erilliseen prosessiyksikköön tai koko laitoksen kattavaan sähkönkulutuksen seurantaan. Tämän lisäksi eri ohjaustapojen vaikutuksia tulisi verrata hyvin samankaltaisissa prosessiolosuhteissa, mikä on jatkuvasti muuttuvissa puhdistusprosessien olosuhteissa haastavaa. Näin ollen mallintaminen tarjoaa tähän erinomaisen työkalun, sillä mallinnuksen avulla saadaan tietoa energiankulutuksesta yksittäisten laitekokonaisuuksien osalta vertailukelpoisissa prosessiolosuhteissa.

Tässä työssä Turun seudun puhdistamo Oy:n nykyistä prosessimallia hyödynnetään energiatehokkuuden mallinnukseen ja optimointiin. Työn tarkoituksena on testata mallilla erilaisia ilmastuksen ohjaustapoja ja dokumentoida ja vertailla niiden vaikutuksia puhdistamon energiatehokkuuteen. Suomessa on julkaistu hyvin vähän energiatehokkuuden mallintamiseen liittyviä töitä ja useimmiten mallinnusprojektit on toteutettu kalibroimattomilla malleilla. Tässä työssä tehtävä tarkastelu toteutetaan kalibroidulla puhdistamomallilla, jonka vuoksi tulosten luotettavuus on hyvällä tasolla ja tarjoaa siten uutta tietoa energiatehokkuuden kehittämiseen puhdistamoilla.

## 2 TYÖN TAVOITTEET

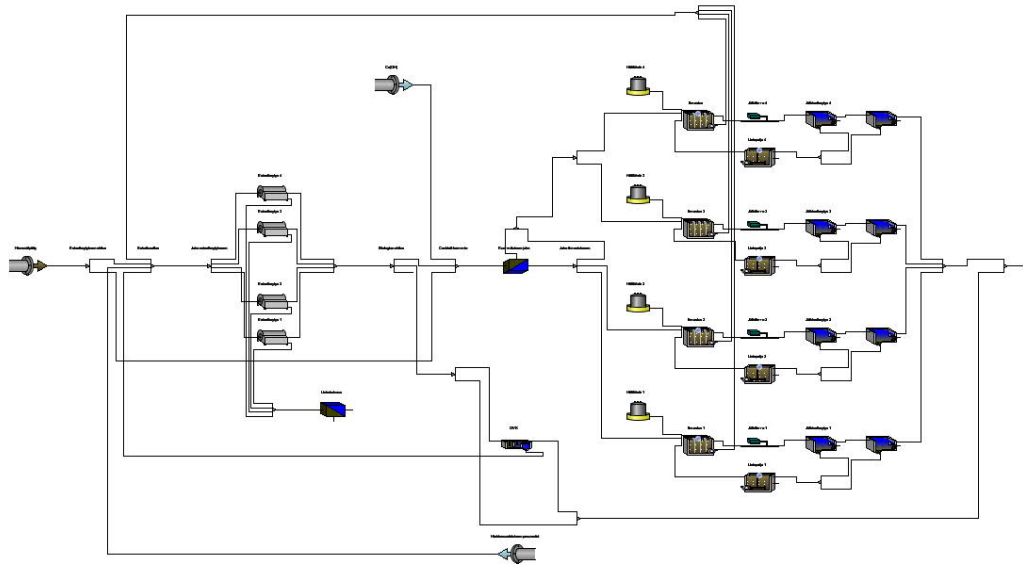
Hankkeen tavoitteena on tuottaa vertailukelpoista ja yksityiskohtaista tietoa eri ilmastuksen ohjaustapojen vaikutuksesta jätevedenpuhdistamon energiankulutukseen. Lisäksi työssä arvioidaan eri ohjaustapojen optimaalisuutta jätevedenpuhdistamon dynaamisissa prosessiolosuhteissa ja näin ollen työssä analysoidaan ohjaustapojen muutokset laitoksen toimintaan (esim. käsitellyn jäteveden laatu, prosessin ohjausasetukset, lietteen tuotanto) sekä mahdolliset riskit.

Työn tavoitteen on tunnistaa ohjaustavat, joilla on eniten energiansäästöpotentiaalia laitoksilla sekä tuottaa tietoa tunnistettujen energiansäästötoimien sovellettavuudesta muilla puhdistamoilla.

## 3 PROSESSIMALLI

### 3.1 Tausta

Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolle on laadittu vuonna 2015 mekaanisen, kemiallisen ja biologisen puhdistusprosessin käsittävä dynaaminen prosessimalli (Kuva 3-1). Kakolanmäen jätevedenpuhdistamo on kattavasti instrumentoitu ja prosessista on saatavilla korkealaatuista jatkuvatoimisten mittausten sekä analyysitulosten tietoja. Tämän vuoksi mallin kalibrointi ja siten mallin luotettavuus on erinomaisella tasolla. Mallia on lisäksi jatkokehitetty keväällä 2017 lisäämällä ammoniumtyypiperusteinen ilmastuksen ohjaustapa, joka on laitoksella nykyään käytössä kaikissa neljässä ilmastuslinjassa. Vuosien aikana mallia on hyödynnetty laitoksella mm. prosessin optimointiin, kuten esiselkeytyksen ohjaamiseen sekä ilmastuksen ajotapojen testaamiseen.



**Kuva 3-1 Laitosmallin lay-out, joka käsittää esiselkeytyksen, vedenjaon, ilmastuksen, jälkiselkeytyksen ja ohitusvesien käsittelyn**

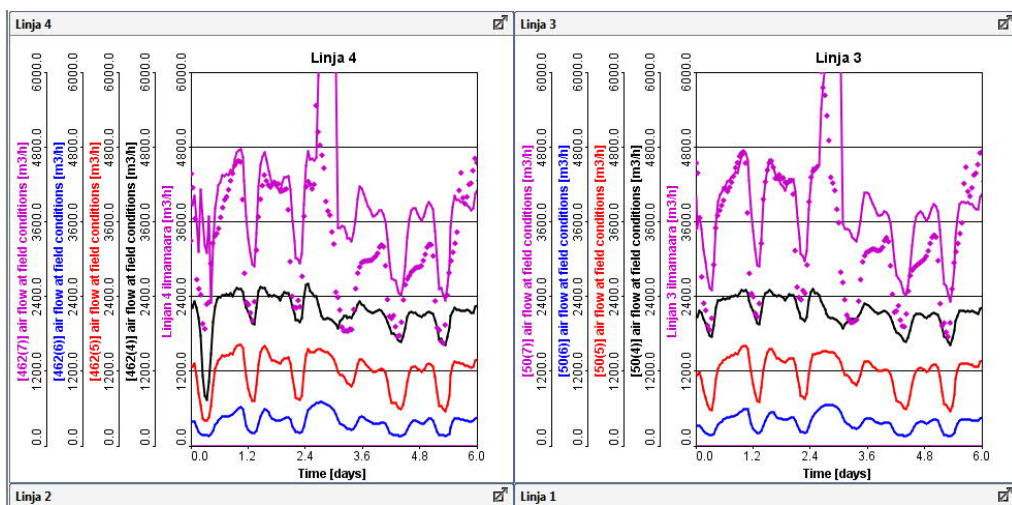
### 3.2 Ilmastus ja hapensiirto

Työn aluksi prosessimallin ilmastuksen ja hapensiirron oikeatoiminen kuvaus tarkastettiin. Alkuperäisessä prosessimallissa ilmastuksen kalibrointi on rajoittunut liukoisen hapen pitoisuuden kalibrointiin. Tässä työssä tarkasteltiin lisäksi, että mitattu ja mallinnettu ilmamäärä vastaavat toisiaan, jotta hapensiirron mallinnus olisi mahdollisimman täsmällistä. Näin voidaan osaltaan varmistaa, että mallin simuloima ilmastuksen energiankulutus vastaisi laitoksen todellista mitattua ilmastuksen energiankulutusta.

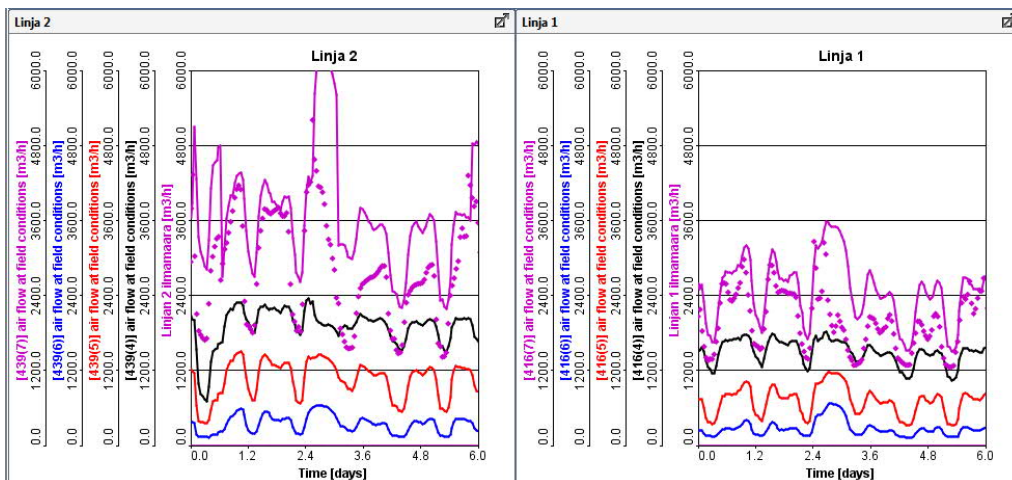
Ilmastusilman määrä oli lähtötiedoissa esitetty kokonaisilmamääränä linjakohtaisesti, joten ilmamäärän kalibrointi perustuu mallissa linjakohtaisen ilmamäärän kalibrointiin lohko-kohtaisen ilmastuksen sijasta. Mitattu ja mallinnettu ilmamäärä linjoilla 3 ja 4 sekä linjoilla 1 ja 2 on esitetty Kuvassa Kuva 3-2 ja Kuvassa Kuva 3-3. Mallinnustulosten perusteella mitattu ja mallinnettu ilmamäärä vastaavat hyvin toisiaan. Mallinnusjakson

kolmannen päivän kohdalla ilmastusilman mallinnettu kulutus on suurempaa kuin todellisuudessa mitattu, mikä selittyy tuohon ajanjaksoon ajoittuneella suurella virtaamapiikillä, joka näkyy mallissa myös mm. ammoniumtypen nousuna lähtevässä vedessä. Virtaamapiikin täsmällinen simulointi on haastavaa, sillä tulevan veden koostumus muuttuu merkittävästi vesimäärien kasvaessa. Tämän lisäksi virtaamapiikki voi aiheuttaa veden laatuun, kuten kuormitukseen ja alfa-arvoihin hetkellisiä muutoksia, jotka näkyvät eroina simuloitujen ja mitattujen ilmastusilmamäärien välillä.

Hapensiirron kalibrointi perustuu ilmastusaltaan syvyyden ja tilavuuden lisäksi hapensiirron tehokkuuden (SOTE) sekä veden laatua kuvaavan kertoimen kalibrointiin (alfa-arvo). Veden alfa-arvojen määrittäminen ilmastusaltaan eri kohdista analyttisesti on hyvin työlästä, joten mallinnuksessa käytetyt alfa-arvot on arvioitu kirjallisuuden perusteella.



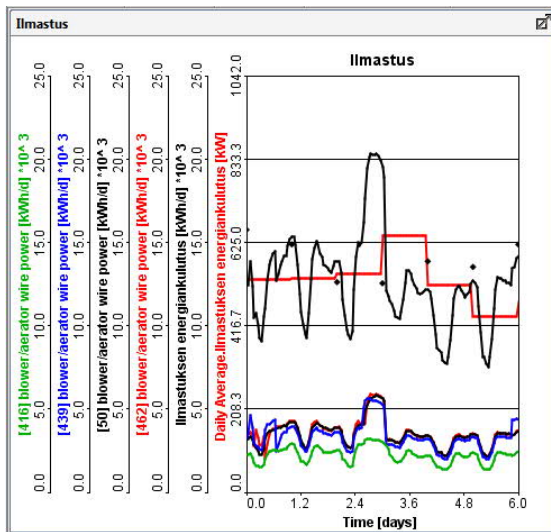
**Kuva 3-2 Mitattu ja mallinnettu laitoksen kokonaisilmastusilma linjoilla 4 (vasemmalla) ja 3 (oikealla) esitettyä magentan värillä sekä lohkoittaiset ilmamäärät lohkoissa 4 (mustalla), 5 (punaisella) ja 6 (sinisellä)**



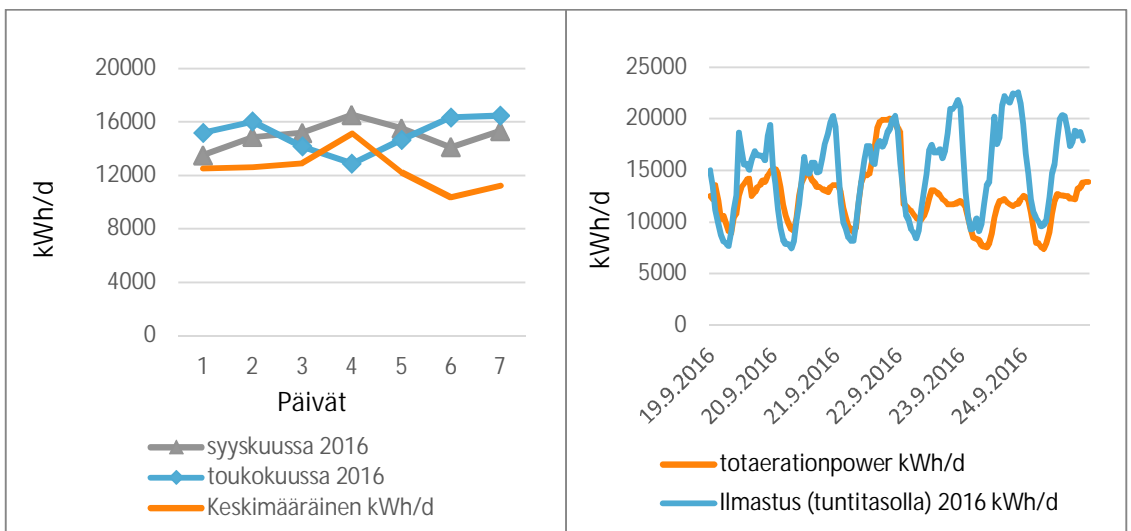
**Kuva 3-3 Mitattu ja mallinnettu laitoksen kokonaisilmastusilma linjoilla 2 (vasemmalla) ja 1 (oikealla) esitettyä magentan värillä sekä lohkoittaiset ilmamäärät lohkoissa 4 (mustalla), 5 (punaisella) ja 6 (sinisellä)**

Hapensiirron kalibroinnin jälkeen työssä tarkasteltiin ilmastuksen energiankulutuksen kalibrointi. Työssä käytettiin energiankulutuksen osalta lähtötietoina vuoden 2016 energiankulutustietoja, koska mallin kalibrointijaksolla vuonna 2015 automaatiojärjestelmästä saatu ilmastuskompressorien energiankulutustieto on todettu virheelliseksi. Ilmastuskompressorien keskimääräinen energiankulutus oli laitoksella vuonna 2016 keskimäärin 15 000 kWh/d. Mallin kalibrointijakso ajoittui vuonna 2015 syyskuulle ja vastaavana ajankohtana vuonna 2016 (15.- 22.9.2016) ilmastuksen energiankulutus oli keskimäärin 13 900 kWh/d.

Mitattu ja mallinnettu ilmastuksen kokonaisenergiankulutus on esitetty Kuvassa Kuva 3-4. Kuvasta nähdään, että ilmastuksen energiankulutus on sekä mallissa että todellisuudessa samaa suuruusluokkaa. Mitattu energiankulutus on esitetty kuvassa päiväkeskiarvona pisteinä.



**Kuva 3-4 Ilmastuskompressorien mallinnettu kokonaisenergiankulutus kaikilla linjoilla (mustalla) sekä vuoden 2016 toteutunut energiankulutus (mustat pisteet), päiväkeskiarvona esitetty kompressorien mallinnettu kokonaisenergiankulutus (punaisella) sekä linjakohtaiset energiankulutustiedot**



**Kuva 3-5 Kompressorien päivätason energiankulutuksen tarkastelu (vasemmalla), jossa sinisellä ja harmaalla esitetty mitattu energiankulutus touko- ja syyskuussa 2016 sekä oranssilla mallinnettu keskimääräinen energiankulutus kalibrointijaksolla, sekä (oikealla)**

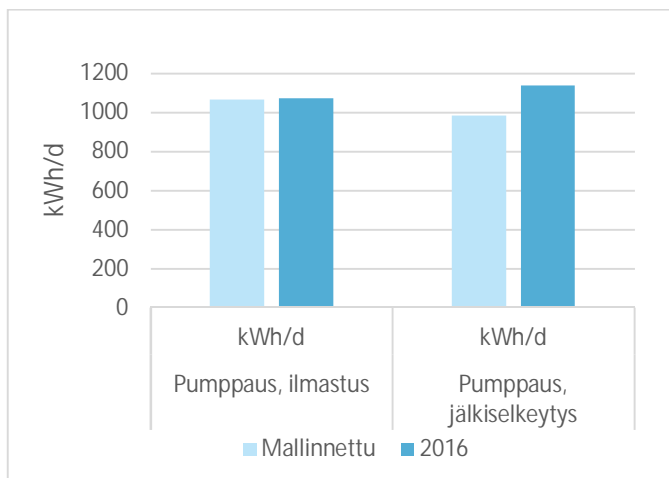
**kompressorien tuntitason energiankulutuksen tarkastelu, jossa sinisellä esitetty mitattu tuntitason energiankulutus vuonna 2016 sekä oranssilla mallinnettu energiankulutus kalibrointijaksolla**

Kuvassa Kuva 3-5 vasemmalla on esitetty kompressorien energiankulutuksen tarkempi tarkastelu, jossa on verrattu mallinnusjakson keskimääräistä energiankulutusta laitoksella mitattuun energiankulutukseen sekä syyskuussa 2016 että toukokuussa 2016. Lisäksi Kuvassa Kuva 3-5 oikealla on esitetty tuntitason vertailu laitoksella mitatun ja mallinnetun kompressorien energiankulutuksen osalta. Tuntitason vertailussa on huomioitava, että mitattu ja mallinnettu energiankulutus ovat eri vuosilta, joka selittää sen, että mitattu ja mallinnettu energiankulutus eivät täysin täsmää viikon loppupuolella. Tuloksista kuitenkin nähdään, että mallilla voidaan simuloida ilmastuksen energiankulutusta tämän projektin vaatimalla tarkkuustasolla, sillä energiankulutuksen suuruusluokka sekä vaihtelu vastaavat sekä mallissa että todellisuudessa toisiaan.

### 3.3 Pumppaus

Tässä työssä pumppauksen energiankulutuksen osalta tarkasteltiin ilmastuksen nitraattikierrätyksen pumppausta sekä jälkiselkeytyksestä ilmastukseen johdettavaa palautuslietepumppausta. Malliin lisättiin tiedot pumppujen nostokorkeuksista sekä tehoista. Nitraattikierrätyksen pumppujen ja palautuslietteen pumppujen hyötysuhteeksi oletettiin 0,6 perustuen pumppujen tyypillisiin hyötysuhteisiin sekä Kakolanmäen puhdistamon suunnitelmiin.

Pumppujen mallinnetun energiankulutuksen tietoja verrattiin laitoksen toteutuneeseen pumppauksen energiankulutukseen vuonna 2016 (Kuva 3-6). Toteutuneiden energiankulutustietojen mukaan ilmastuksen nitraattikierrätyksen sekä palautuslietepumppauksen keskimääräinen energiankulutus on ollut hyvin samaa luokkaa, vaikka nitraattikierrätyksen nostokorkeus on huomattavasti pienempi. Tämä selittyy sillä, että vesimäärät nitraattikierrätyksessä ovat noin kaksi ja puoli kertaa suuremmat kuin palautuslietepumppauksessa. Kuvassa Kuva 3-6 nähdään, että mitattu ja mallinnettu energiankulutus vastaavat hyvin toisiaan sekä nitraatti- että palautuslietepumppauksen osalta.



**Kuva 3-6 Mitattu ja mallinnettu pumppauksen energiankulutus mallinnusjaksolla 2015 sekä vuoden 2016 keskiarvona**

### 3.4 Hapensiirron ja -kulutuksen arviointi

Prosessin toiminnan ja mallissa tarkasteltavien ohjaustapojen kannalta on keskeistä, että aktiivilietteen bakteerimassa saa tarpeeksi liukoista happea bakteeritoiminnan kannalta oikeaan aikaan. Hapenkulutus ja -tarve vaihtelee tulevan jäteveden laadun mukaisesti ja hapenkulutus on korkeimmillaan typen ja orgaanisen kuorman kuormituspiikkien aikaan.

Mallilla voidaan tarkastella dynaamisesti aktiivilieteprosessin teoreettista hapenkulutusta, jota ei laitoksilla sellaisenaan voida seurata (Oxygen Uptake Rate). Lisäksi mallilla voidaan laskea teoreettinen hapensiirrontehokkuus, joka kuvaa sitä kuinka ilmastusilman happi siirtyy bakteereille hyödynnettävään liukoiseen muotoon. Näin ollen hyvin kalibroitu malli voi antaa tarkkaa ja sovellettavissa olevaa tietoa eri ilmastustapojen optimaalisuudesta verrattuna tulevaan kuormaan ja aktiivilieteprosessin hapentarpeeseen. Tällä on osaltaan vaikutusta myös eri ohjaustavoilla saavutettavaan puhdistustulokseen.

Tässä kuitenkin on huomioitava, että hapenkulutusnopeus ei täysin kuvaa samaa asiaa kuin hapentarve. Hapenkulutusnopeus siis kuvaa sitä millaisella vauhdilla bakteerimassa hyödyntää saatavilla olevaa happea ja hapenkulutusnopeus kasvaa osittain hapensiirron kasvaessa. Sitä vastoin hapentarve on stoikiometrinen ja riippuu vain kuormituksesta ja biomassasta.

## 4 VERTAILUN PERUSTEET

Työssä tarkastellut ohjaustavat valittiin siten, että niillä olisi mahdollisimman suuri relevanssi sekä tarkasteltavalle laitokselle että yleisesti Suomen eri puhdistamoille. Vertailun lähtötilanteena (baseline) on käytetty mallin kalibrointiajan (15.-22.9.2015) ohjaustapaa, joka on perinteinen happi-ilmamäärä kaskadisäätö. Tämä ohjaustapa on esitetty kappaleessa 5.1.

Vertailussa käytettiin samaa laitosmallia (lay-out) sekä samaa tulevan veden laatua (input) kaikissa tarkasteluissa. Lisäksi kaikki muut prosessinohjaukseen vaikuttavat tekijät pidettiin samoina eri simulointien aikana, jotta vertailu perustuisi puhtaasti energiankulutukseen ja saavutettuun puhdistustulokseen. Tulevan veden laatu ja simuloinnit perustuvat kalibrointiajan kuormitukseen ja prosessitietoihin 15.-22.9.2015.

Ohjaustapojen välisessä vertailussa huomioitiin tässä työssä lähtevän veden laatu sekä kokonaisenergiankulutus. Lähtevän veden laatua arvioitiin kokonaistypen ja ammoniumtypen perusteella. Vertailussa ei siis tarkasteltu erikseen lähtevää orgaanista- tai kiintoainekuormaa. Tarkastelun lähtökohtana kuitenkin on, että laitokselta lähtevän veden laadun tulee täyttää ympäristöluvan mukaiset vaatimukset.

Ilmastuksen energiankulutuksen osalta tarkasteltiin kompressorien, nitraattikierrätyksen ja palautuslietepumppauksen energiankulutusta sekä näiden yhteistä kokonaisenergiankulutusta. Kompressorien ja pumppujen ohjausten optimointia, kuten kompressoriryhmän yksittäisten laitteiden päälle- ja poiskytkentöjä tai laitteiden optimaalisella toiminta-alueella pysymistä, ei tarkasteltu tässä työssä.

## 5 TARKASTELLUT OHJAUSTAVAT

### 5.1 V0: Perinteinen happi-ilmamäärä –kaskadisäätö

Vaihtoehdossa tarkasteltiin perinteistä happi-ilmamäärä-kaskadisäätöä seuraavilla liukoisen hapen asetusarvoilla:

Linja 1:

- 1. ilmastettu lohko 1,2 mg/L
- 2. ilmastettu lohko 0,9 mg/L
- 3. ilmastettu lohko 0,5 mg/L

Linjat 2 - 4:

- 1. ilmastettu lohko 2,5 mg/L
- 2. ilmastettu lohko 2,0 mg/L
- 3. ilmastettu lohko 0,6 mg/L

Tämä ilmastuksen ohjaustapa on ollut laitoksella käytössä mallin kalibroinnin aikaan ja sitä käytettiin tässä työssä vertailun lähtötilanteena.

### 5.2 V1: Kakolanmäen nykyinen ammoniumtyyppiohjaus

Vaihtoehdossa tarkasteltiin Kakolanmäen jätevedenpuhdistamolla nykyisin käytössä olevaa ammoniumtyypen pitoisuuteen perustuvaa ohjaustapaa. Ohjaustapa toteutettiin laitoksen nykyisillä asetusarvoilla. Tässä ohjaustavassa ilmastuksen ohjaus tapahtuu lohkoista 5.

### 5.3 V2: Vaihtoehtoinen ammoniumtyyppiohjaus

Tässä vaihtoehdossa tarkasteltiin samalla periaatteella toimivaa ammoniumtyyppiohjaukseen perustuvaa ohjaustapaa kuin vaihtoehdossa V1. Tässä vaihtoehdossa ohjaustapaa säättävä ammoniumtyypen mittaus asetettiin mallissa lohkoon 4, kun alkuperäisessä ohjaustavassa prosessin ohjaus on tapahtunut lohkoista 5. Lisäksi ohjaustavan asetusarvoja muokattiin. Nämä arvot valittiin siten, että lähtevän veden laatu säilyy lähes samana kuin vaihtoehdossa V1.

### 5.4 V3: Vakiohappiohjaus

Tässä vaihtoehdossa tarkasteltiin vakiohappipitoisuuteen perustuvaa ohjausta, jossa happipitoisuus on kaikissa lohkoissa ja kaikilla linjoilla sama (2 mg/l). Happipitoisuuden ohjaus perustuu happi-ilmamäärä kaskadisäätöön.

### 5.5 V4: Vakio ilmamäärään perustuva ohjaus

Tässä vaihtoehdossa tarkasteltiin vakio ilmamäärään perustuvaa ohjausta. Ilmamäärä asetettiin vuorokausikeskiarvona yhtä suureksi kuin vaihtoehdossa V0 kulutettu ilmamäärä.

### 5.6 V5: Kierrätyksen ohjaus

Tässä tarkasteltiin sisäisen kierrätyksen ja palautuslietteen erilaista jakaumaa siten, että kokonaiskierrätysaste säilyi samana. Ilmastuksen ohjaus toteutettiin lähtötilanteen V0

mukaisesti. Tavoitteena on selvittää tämän vaikutusta energiankulutukseen, sekä miten erilainen jakauma vaikuttaa varsinaisen biologisen prosessin tehokkuuteen. Tässä ohjaustavassa palautussuhde oli 80 % ja kokonaiskierrätysaste 445 %. Alkuperäisessä vaihtoehdossa V0 palautussuhde oli 120 % ja sisäisen kierrätyksen suhde 325 %.

## **5.7 V6: Esiselkeytyksen ohjaus**

Tässä vaihtoehdossa tarkasteltiin esiselkeytyksen ohituksen vaikutusta laitoksen energiankulutukseen. Ilmastuksen ohjaus toteutettiin lähtötilanteen V0 mukaisesti. Vaihtoehdossa tarkasteltiin tilannetta, jossa esiselkeytyksen ohitus on 0 %. Vertailuna tähän käytetään vaihtoehtoa V0, jossa esiselkeytyksen ohitus on noin 30 %, mikä vastaa hyvin Kakolanmäen laitoksen aikaisempaa suositeltua maksimiohitusta. Nykyisin ohitukseen on johdettu noin 10 % virtaamasta.

## 6 TULOSTEN TARKASTELU

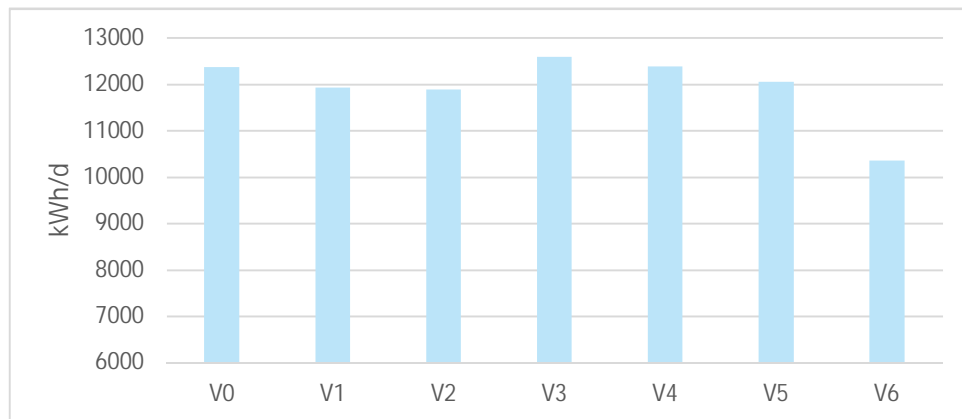
### 6.1 Ilmastuksen energiankulutus

Tarkasteltujen vaihtoehtojen keskimääräinen ilmastuksen energiankulutus on esitetty Kuvassa Kuva 6-1. Tässä ilmastuksen energiankulutuksella siis tarkoitetaan teoreettista kompressorien energiankulutusta. Pumpppaukseen liittyvä energiankulutus sekä kokonaistaloudellisuus on esitetty alakappaleissa 6.2 ja 6.4.

Kuvassa Kuva 6-1 esitetyissä tuloksista nähdään, että ilmastuksen energiankulutus on pienin vaihtoehdossa V6, jossa esiselkeytystä ei ohitettu lainkaan. Tämä johtuu suurimmaksi osaksi siitä, että ilmastukseen tuleva kuorma pienenee ja vastaavasti hapenkulutus ja ilmastustarve laskee.

Seuraavaksi pienin energiankulutus saavutettiin vaihtoehdoissa V1 ja V2, joissa molemmissa tarkasteltiin ammoniumtyyppipitoisuuden perustuvia ohjaustapoja. Näiden ohjaustapojen etuna on, että ilmastus tapahtuu mahdollisimman oikea-aikaisesti suhteessa kuormitukseen ja näin ollen myös vältetään turhaa ilmastusta.

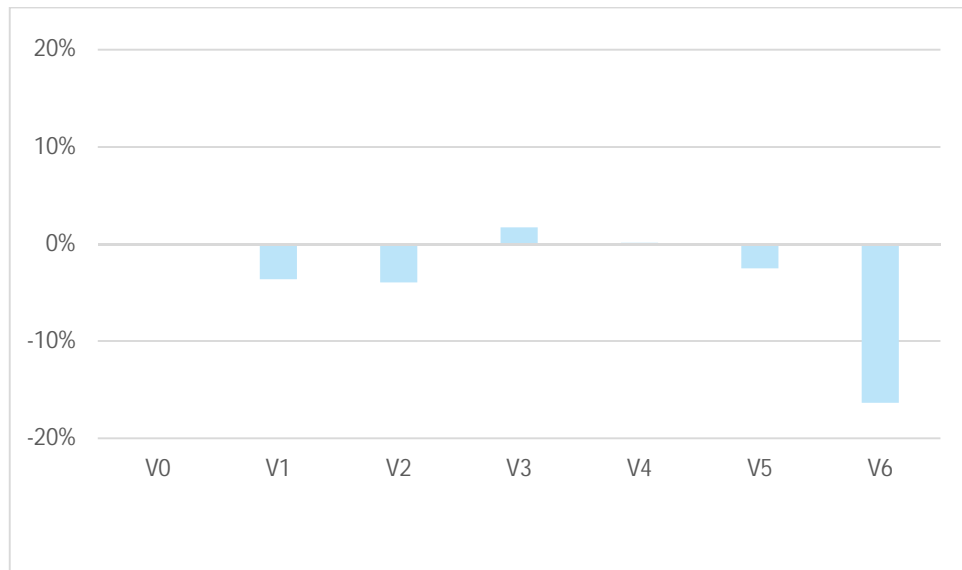
Suurin energiankulutus on vakiohappipitoisuuden perustuvassa ohjaustavassa V3. Tässä ohjaustavassa liukoisen hapen tavoitepitoisuutta ei optimoida ammoniumtyypin perusteella, minkä vuoksi lohkoja voidaan ajoittain ilmastaa ylimäärin prosessin todelliseen hapentarpeeseen nähden. Lisäksi tässä ilmastuksen ohjaustavassa ei huomioida lohkokohtaisia kuormituseroja, sillä vakiona säilyvä tavoitehappipitoisuus on kaikissa lohkoissa sama.



**Kuva 6-1 Ilmastuksen energiankulutus eri vaihtoehdoissa (keskiarvo mallinujaksolta)**

Kuvassa Kuva 6-2 on esitetty tarkasteltujen vaihtoehtojen energiankulutus suhteessa vaihtoehtoon V0. Vaihtoehtoisella ohjaustavalla V6, jossa esiselkeytystä ei ohiteta lainkaan, voidaan saavuttaa simuloinnin tulosten perusteella noin 16 % säästö ilmastuksen energiankulutuksessa. Tuloksia tarkastellessa tulee huomioida, että vaihtoehdon V6 esikäsittelyn reduktiot on oletettu samoiksi kuin kalibrointitilanteen V0 reduktiot. Todellisuudessa esikäsittelyn reduktiot olisivat 100 % esikäsittelyasteella todennäköisesti hieman erilaiset ja siten tulokset vaihtoehdon V6 ovat suuntaa-antavia, mutta eivät täysin täsmällisiä. Käytetyssä esiselkeytyksen mallissa esiselkeytys leikkaa jäteveden kiinteiden fraktioiden pitoisuuksia saman verran kaikissa olosuhteissa, eli esimerkiksi esiselkeytyksen pintakuorma ja viipymä eivät vaikuta reduktioasteisiin. Todellisuudessa esiselkeytyksen reduktioaste todennäköisesti hieman pienenee virtaaman kasvaessa, joten nollaohituksella esiselkeytyksestä lähtevän jäteveden

konsentraatit ovat hieman korkeampia kuin lähtötilanteessa V0 käytetyllä noin 30 % ohituksella.



**Kuva 6-2 Ilmastuksen energiankulutus eri vaihtoehtoissa verrattuna lähtötilanteeseen V0**

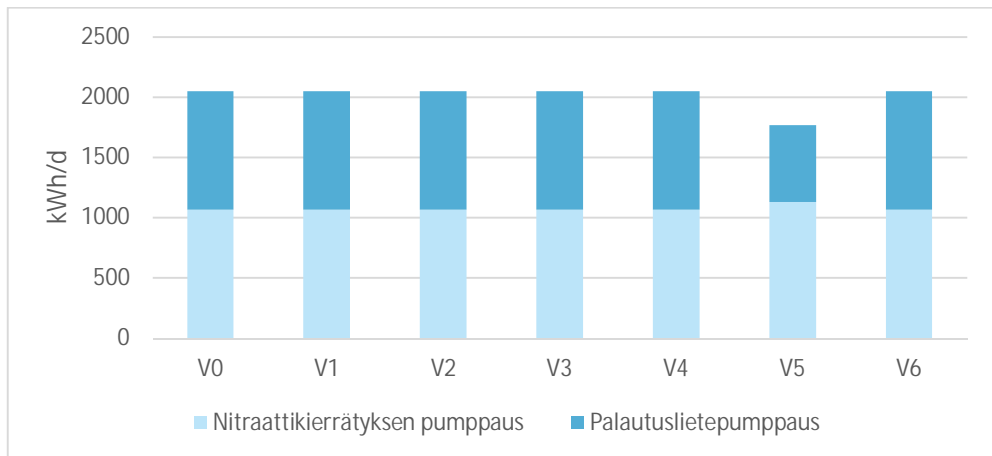
Merkittävin havainto tuloksista kuitenkin on, että ilmastuksen ohjaustavan optimoinnilla voidaan saavuttaa simulointien perusteella suurimmillaan muutamasta noin viiden prosentin säästö energiankulutuksessa. Sillä, ohitetaanko esiselkeytystä vai ei, on huomattavasti suurempi vaikutus ilmastuksen energiankulutukseen kuin ilmastuksen ohjaustavalla. Ilmastuksen energiankulutus on laitoksilla suurin yksittäinen energiaa kuluttava prosessiyksikkö, joten toisaalta myös muutaman prosentin säästöillä voidaan kuitenkin saavuttaa taloudellisia hyötyjä.

Simuloinnin tuloksiin vaikuttaa merkittävästi osaltaan myös, että tarkastelussa vertailuun käytetty vaihtoehto V0 on oikein toteutettuna ja viritettynä jo itsessään energiatehokas ilmastuksen ohjaustapa.

## 6.2 Pumppauksen energiankulutus

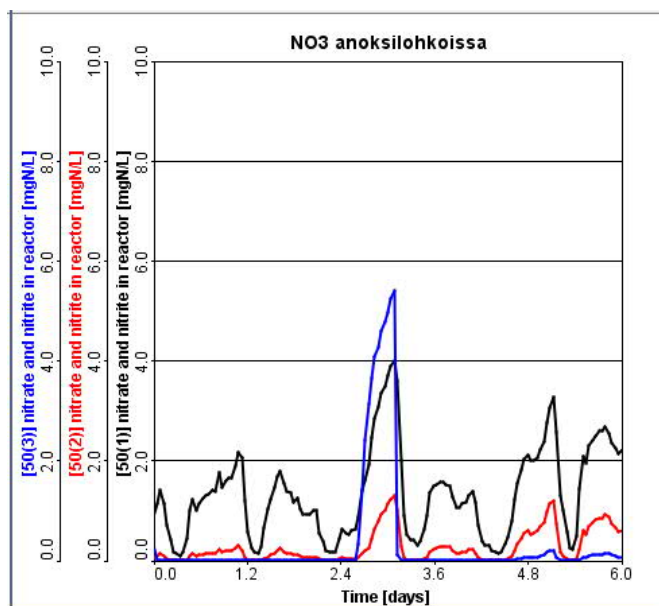
Pumppauksen energiankulutus eri vaihtoehtoissa on esitetty Kuvassa Kuva 6-3. Kuvasta nähdään, että pumppauksen kokonaisenergiankulutus on ollut n. 14 % pienempi ohjaustavassa V5 verrattuna muihin tarkasteltuihin vaihtoehtoihin. Ohjaustavassa V5 palautuslietteen pumppauksen osuutta laskettiin ja vastaavasti nitraattikierrätyksen osuutta nostettiin siten, että kokonaiskierrätysaste säilyi samana. Näin ollen vaihtoehdossa V5 nitraattikierrätyksen energiankulutus nousi noin 5 % kun vastaavasti palautuslietepumppauksen energiankulutus laski noin 35 %. Muissa vaihtoehtoissa pumppauksen määriin ei tehty muutoksia, joten tulokset ovat näiden simulointien osalta samat.

Pumppauksen energiankulutuksen lisäksi vaihtoehdossa V5 ilmastuksen kiintoainepitoisuus (MLSS) laski kaikilla linjoilla keskimäärin noin 7 %, mikä osaltaan myös selittää vaihtoehdon pienemmän ilmastuksen energiankulutuksen.



**Kuva 6-3 Pumpkauksen energiankulutus, vaalean sinisellä esitetty sisäisen nitraattikierrätyksen pumppaus ja tumman sinisellä esitetty palautuslietteen pumppaus (keskiarvo mallinnusjaksolta)**

Kuvassa Kuva 6-4 on esitetty linjan 3 anoksilohkojen nitriitti- ja nitraattipitoisuus lohkoissa 1-3. Laitoksella kalibroinnin aikaan käytössä ollut kokonaiskierrätysaste 445 % on melko suuri. Simulointitulosten mukaan tällä kierrätysasteella ilmastuksen viimeisen anoksilohkon nitriitti- ja nitraattipitoisuus on käytännössä 0 mg/L (Kuva 6-4), joka viittaa siihen, että todellisuudessa laitoksen nitraattikierrätysastetta voidaan vieläkin silti ainakin hieman nostaa, mikäli kokonaistypenpoistoa halutaan lisätä.

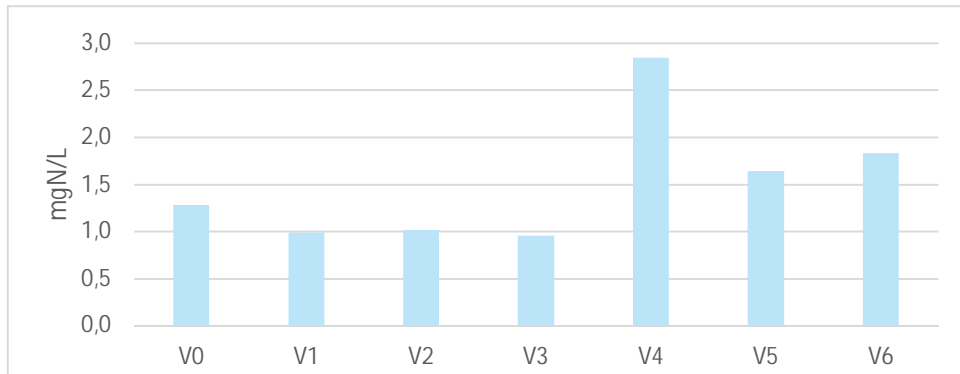


**Kuva 6-4 Nitraatin ja nitriitin summa linjan 3 anoksisissa lohkoissa 1-3, lohko 1 esitetty mustalla, lohko 2 esitetty punaisella ja lohko 3 esitetty sinisellä**

### 6.3 Lähtevän veden laatu

Simulointien yhteydessä tarkasteltiin energiankulutuksen lisäksi myös lähtevän veden laatua. Tarkastelussa huomioitiin lähtevän veden laadun osalta sekä ammoniumtyppi että kokonaistyyppi. Sitä vastoin lähtevän veden orgaanista- tai kiintoainekuormaa ei tässä selvityksessä tarkasteltu.

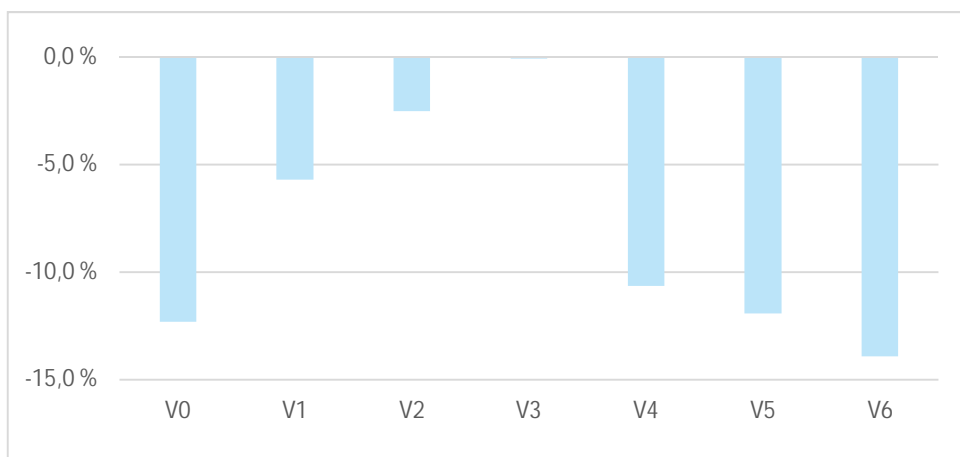
Kuvassa Kuva 6-5 on esitetty lähtevän veden ammoniumtyppipitoisuus eri vaihtoehdoissa. Tuloksista nähdään, että matalin lähtevän veden ammoniumtyppipitoisuus saavutetaan vaihtoehdossa V3, jossa simuloitiin vakiona säilyvää tavoitehappipitoisuutta kaikissa lohkoissa (2 mg/L). Seuraavaksi matalimmat tulokset saavutettiin vaihtoehdoissa V1 ja V2, joissa tarkasteltiin ammoniumtyppipitoisuuteen perustuvaa ohjaustapaa. Vaihtoehdoissa V4-V6 lähtevän veden ammoniumtyppipitoisuus nousi verrattuna lähtötilanteeseen V0.



**Kuva 6-5 Ammoniumtyppipitoisuus (NH<sub>4</sub>-N) lähtevässä jätevedessä (keskiarvo mallinujaksolta)**

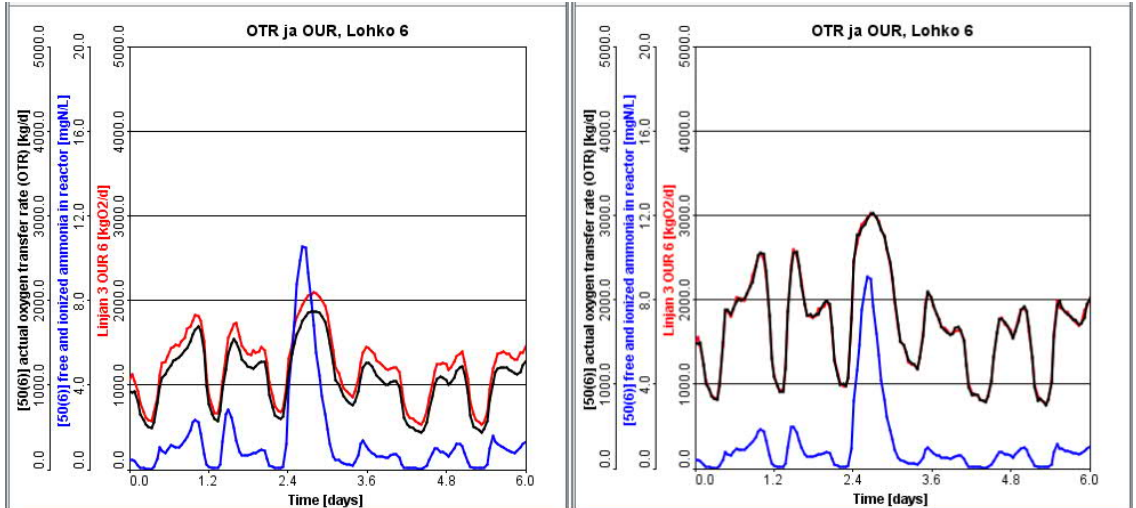
Vaihtoehdossa V4, jossa saavutettiin heikoin tulos ammoniumtypen osalta, laitoksen ilmastus perustui vakiona säilyvään ilmamäärään, jonka vuoksi ilmastusilman määrä ja sitä kautta liukoisen hapen pitoisuus ei vaihdellut optimaalisesti tulevan kuorman mukaan. Näin ollen happea kului ylimäärin matalien kuormien aikaan ja vastaavasti tuotettu ilmamäärä ei riittänyt saavuttamaan riittävää happitasoa vuorokausittaisten kuormituspiikkien aikaan.

Vaihtoehdossa V3 saavutettiin oletettavasti matalampi ammoniumtyppitulokset muihin vaihtoehtoihin V0-V2 verrattuna osittain sen vuoksi, että happipitoisuus oli nitrifioivien bakteerien kannalta myös viimeisessä ilmastetussa lohkoissa tarpeeksi korkea eri ilmastuslinjoilla. Kuvassa Kuva 6-6 on esitetty linjan 3 viimeisessä ilmastetussa lohkoissa laskennallinen hapenkulutusnopeus (Oxygen Uptake Rate) verrattuna hapensiirtoon (Oxygen Transfer Rate). Negatiivinen arvo kertoo, että happea siirtyy teoreettisesti liian vähän tai hitaasti verrattuna siihen kuinka nopeasti happea laskennallisesti kulutettaisiin.



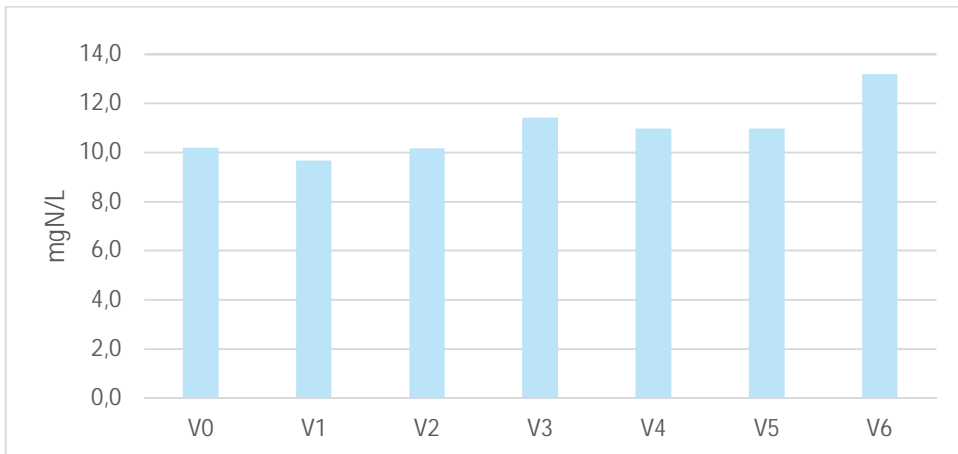
**Kuva 6-6 Laskennallinen teoreettinen hapenkulutusnopeus (Oxygen Uptake Rate) verrattuna hapensiirtoon (Oxygen Transfer Rate)**

Kuva 6-7 on esitetty lähtötilanteen V0 ja vaihtoehdon V3 hapensiirtonopeus sekä hapenkulutusnopeus linjan 3 viimeisessä ilmastetussa lohkoissa. Tuloksista nähdään, että hapensiirtonopeus ja hapenkulutuksen nopeus vastaavat toisiaan vaihtoehdossa V3, kun vastaavasti lähtötilanteessa V0 hapenkulutuksen nopeus on suurempi kuin hapensiirron nopeus.



**Kuva 6-7 Vaihtoehtojen V0 (vasemmalla) sekä V3 (oikealla) simuloitujen hapensiirtonopeudet (mustalla), hapenkulutusnopeudet (punaisella) ja ammoniumtyypin pitoisuudet**

Ammoniumtyypin lisäksi simulointien osalta tarkasteltiin myös lähtevän veden kokonaistyyppipitoisuutta, joka on esitetty Kuvassa Kuva 6-8. Tarkastelluista vaihtoehdoista matalin lähtevän veden kokonaistyyppipitoisuus saavutettiin vaihtoehdossa V1, jossa tarkasteltiin laitoksella nykyisin käytössä olevaa ammoniumtyypin pitoisuuteen perustuvaa ohjaustapaa. Seuraavaksi matalimmat pitoisuudet saavutettiin vaihtoehdossa V2 sekä lähtötilanteessa V0. Sitä vastoin vaihtoehdoissa V3-V6 lähtevän veden kokonaistyyppipitoisuus nousi verrattuna lähtötilanteeseen V0.



**Kuva 6-8 Kokonaistyyppipitoisuus ( $N_{Tot}$ ) lähtevässä jätevedessä**

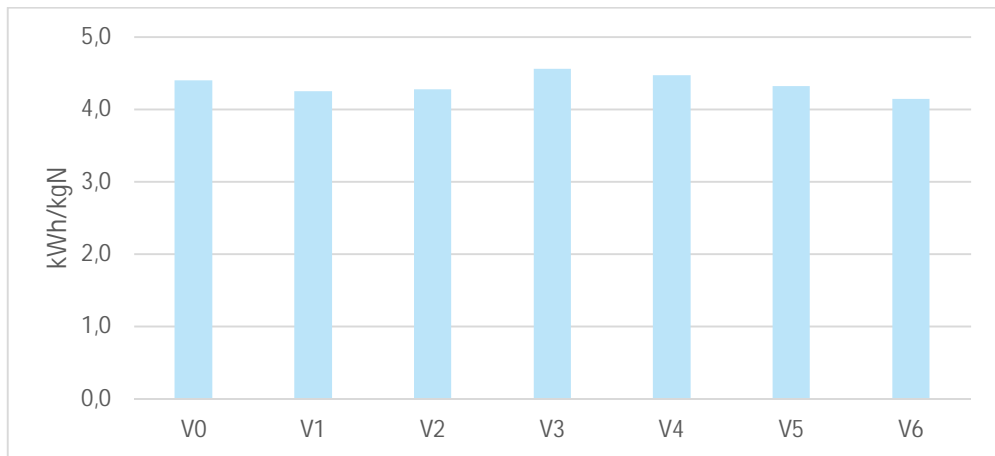
Suurin kokonaistyyppipitoisuus lähtevässä vedessä oli simulointien perusteella vaihtoehdossa V6, jossa laitoksen esiselkeytystä ei ohitettu lainkaan. Esiselkeytyksen ohittamisesta luopuminen eli kaiken tulevan jäteveden ohjaaminen esiselkeytyksen kautta laski aktiivilietteen kiintoainepitoisuutta verrattuna lähtötilanteeseen V0. Esiselkeytyksen ohituksesta luopuminen tarkoittaa myös pienempää orgaanista kuormaa anoksilohkoihin. Pienemmän orgaanisen kuorman vuoksi denitrifikaatio ei toimi yhtä tehokkaasti kuin muissa tarkastelluissa vaihtoehdoissa, jolloin ohjaustavalla V6 ei saavuteta yhtä hyvää lähtevän veden kokonaistyyppitulosta. Myös assimilatiolla poistuvan typen määrä on pienempi kuin muissa tarkastelluissa vaihtoehdoissa, koska aktiivilietteen tuotanto vähenee pienemmän BOD- ja kiintoainekuorman vuoksi.

Vaihtoehdon V3 suurempaa lähtevän veden kokonaistyyppitulosta selittää osittain nitraattikierrätyksen mukana kulkeutuva liukoinen happi, joka päätyy anoksilohkojen alkuun ja heikentää denitrifikaatiota. Vaihtoehdossa V3 lohkon 6 tavoitehappipitoisuus on 2 mg/L, joka on yli kaksi kertaa suurempi kuin lähtötilanteessa V0. Simulointien perusteella kulkeutuva liukoisen hapen määrä on matala, mutta kuitenkin noin kymmenen kertaa suurempi kuin lähtötilanteessa V0.

#### **6.4 Kokonaistaloudellisuus**

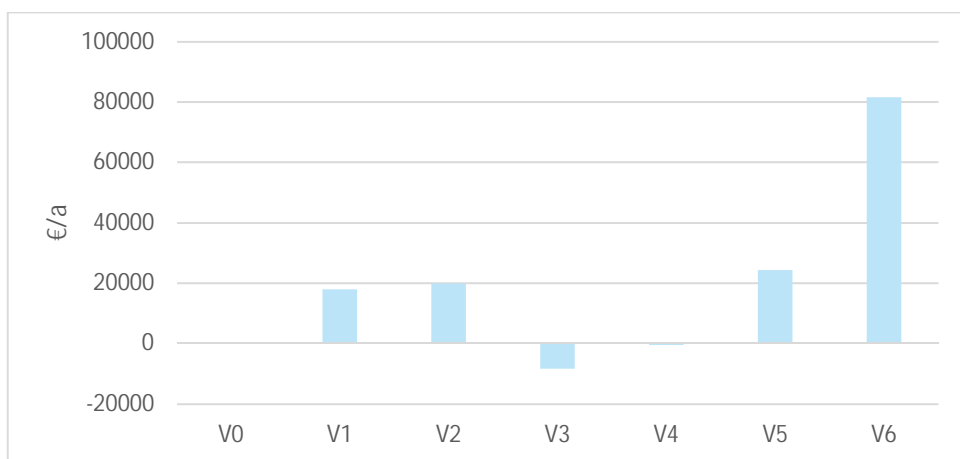
Tarkasteltavien ohjaustapojen arvioinnissa on huomioitava eri vaihtoehtojen kokonaistaloudellisuus. Tämä siis käytännössä tarkoittaa, että laitoksen kannalta ei esimerkiksi ole järkevää pyrkiä mahdollisimman pieneen energiankulutukseen lähtevän veden laadun kustannuksella tai vastaavasti mahdollisimman hyvään lähtevän veden laatuun energiankulutuksesta välittämättä.

Kokonaistaloudellisuuden arviointia varten tarkastelussa laskettiin eri vaihtoehtojen poistettu typpikilomäärä kilowattituntia kohden. Laskennan tulokset on esitetty Kuvassa Kuva 6-9. Tuloksista nähdään, että vaihtoehdolla V6 saavutetaan suurin poistettu typpimäärä, joskin tässä on otettava huomioon, että vaihtoehdossa V6 esiselkeytyksen toiminta ei todennäköisesti täysin vastaa sitä kuinka selkeytys oikeasti toimisi, jos kaikki tuleva vesi johdettaisiin selkeytyksen läpi. Seuraavaksi suurimmat typpimäärät saadaan poistettua ohjaustavoilla V1 ja V2, joissa ohjaus perustuu ammoniumtyppipitoisuuteen ilmastuksessa.



**Kuva 6-9 Poistettua typpikiloa kohti tarvittu energiankulutus eri vaihtoehdoissa laskettuna**

Kokonaistaloudellisuuden lisäksi arvioitiin, kuinka suuret rahamääräiset säästöt laitoksella voitaisiin saavuttaa vuositasolla, mikäli tässä esitetyt ohjaustavat otettaisiin käyttöön laitoksella. Laskennalliset säästöt on esitetty Kuvassa Kuva 6-10 ja laskennassa sähkönhintana on käytetty 0,11 €/kWh.



**Kuva 6-10 Laskennallinen taloudellinen säästö, mikäli ohjaustapa otetaan käyttöön laitoksella**

Tuloksista nähdään, että vaikka simulointitulosten mukaan prosentuaaliset muutokset energiankulutuksessa ovat vain muutamien prosenttien luokkaa, vuositasolla niillä on kuitenkin taloudellista merkitystä. Laskennan perusteella suurimmat vuosittaiset säästöt voitaisiin saavuttaa esiselkeytyksen ohituksen pienentämisellä, joka vastaisi vuosittain noin 80 000 euron säästöä. Tämä kuitenkin voisi johtaa siihen, että ilmastuksessa olisi tarvetta lisähiilelle, mikä taas nostaisi kustannuksia laitoksella.

Seuraavaksi suurin säästöpotentiaali nähdään olevan kierrätyksen optimoinnissa. Tässä työssä palautussuhde laskettiin 80 % tasoon eli suurin piirtein suositeltavalle alarajalle. Tällä ohjaustavalla optimoidaan lietteen laskeutuvuus, mutta palautusta tulee lisätä tilanteissa joissa virtaaman tiedetään kohta kasvavan, esim. sateen tullessa. Tällä pyritään estämään, että jälkiselkeytyksen lietepatja ei ole liian ylhäällä piikkivirtaaman koittaessa. Taloudellisena säästönä, tällä ohjaustavan muutoksella saavutettaisiin laskennallisesti jopa yli 20 000 €/vuosittainen säästö.

Tämän lisäksi taloudellisia säästöjä lähtötilanteeseen V0 verrattuna voitaisiin saavuttaa myös ammoniumtyppipitoisuuden perustuvalla ohjauksella vaihtoehdoissa V1 ja V2, joka vastaa lähes 20 000 €vuosittaista säästöä.

## JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä tarkasteltiin aktiivilieteprosessin ohjaustapojen vaikutusta Turun seudun puhdistamo Oy:n Kakolanmäen jätevedenpuhdistamon ilmastuksen kokonaisenergiankulutukseen.

Yhteenvetona voidaan todeta, että työssä havaitut vaikutukset energiankulutukseen eri ohjaustavoilla olivat prosentuaalisesti melko pieniä. Merkittävin selittävä tekijä on, että suurin osa ilmastuksen energiankulutuksesta on sellaista hapenkulutusta, johon ei ohjauksella voi vaikuttaa, siis käytännössä BOD:n ja ammoniumtypen hapettamiseen ja biomassan endogeenihengitykseen kuuluva happi. Näin ollen energiatehokas ilmastus pyrkiikin välttämään turhaa ilmastusta ja tehokkuus perustuu ilman oikea-aikaiseen syöttämiseen.

Käytännössä tämä tarkoittaa energiansäästöjen dokumentoinnin kannalta, että dynamisessa puhdistamoympäristössä energiansäästötoimenpiteiden vaikutusta laitoksen kokonaisenergiankulutukseen voi olla vaikea havaita. Tästä huolimatta tuloksista myös nähdään, että säästötoimenpiteillä on taloudellista vaikutusta, sillä jopa muutaman prosentin energiansäästötoimilla muodostuu jonkin verran taloudellisia säästöjä, johtuen etenkin ilmastuksen suuresta kokonaisenergiankulutuksesta.

Tarkastelun perusteella Kakolanmäen puhdistamolla voidaan suositella tarkistamaan ilmastuksen kierrätystä, jota simulointitulosten valossa olisi mahdollista laskea heikentämättä merkittävästi lähtevän veden laatua. Palautussuhdetta jälkiselkeytyksestä voitaisiin laskea, kunhan suhde ei laske alle 80 % tasoon. Lisäksi palautussuhdetta tulee nostaa ylemmäs korkeampien virtaamatilanteiden aikaan. Palautuksen kierrätysasteen pienentämisellä uskotaan olevan noin 10 000 – 20 000 € säästöt vuosittain riippuen saavutettavasta kokonaiskierrätysasteesta.

Tarkastelun perusteella merkittävimmät energiansäästöt voidaan saavuttaa esiselkeytyksen ohituksen pienentämisellä, joka vähentää biologiaan kohdistuvaa kuormitusta ja sitä kautta hapen kulutusta. Tässä tulee kuitenkin huomioida, että mikäli kaikki vesi johdetaan esiselkeytykseen, tämä saattaa todellisuudessa johtaa lisähiilen tarpeeseen anoksilohkoissa. Mallinnustulosten perusteella lisähiilelle ei kuitenkaan ollut tarvetta, sillä lähtevän veden typpikuorma pysyi lupaehtojen rajoissa.

Palautuslietteen kierrätysasteen sekä esiselkeytyksen ohitusmäärien tarkastamisen lisäksi tarkastelluista ilmastuksen ohjaustavoista yleisesti lupaavimpina voidaan pitää ammoniumtyppipitoisuuteen perustuvia ohjaustapoja, jolla mahdollistetaan mahdollisimman oikea-aikainen ja riittävä ilmastus sekä toisaalta vältetään ylimääräistä ilmastusta. Tämä ilmastuksen ohjaustapa on kuitenkin Kakolanmäen puhdistamolla jo käytössä, joten tämän tarkastelun perusteella ilmastuksen ohjauksen osalta laitoksella ei välttämättä voida enää saavuttaa merkittäviä säästöjä.