

# LEVIEN KASVATUS JÄTEVEDENPUHDISTAMOLLA

Valon määrän vaikutus levien kasvuun jään alla jälkikosteikossa

## Tiivistelmä

Tekijä(t) Aaltonen, Elina	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK Sivumäärä 66	Valmistumisaika Syksy 2019
Työn nimi <b>Levien kasvatusta jätevedenpuhdistamolla</b> Valon määrän vaikutus levien kasvuun jään alla jälkikosteikossa		
Tutkinto Ympäristönsuojelutekniikka, Insinööri (AMK)		
Tiivistelmä <p>Talvella valonpuute on kosteikossa merkittävin mikrolevien kasvua rajoittava tekijä. Lumen ja jään ansiosta auringonvalon saanti estyy. Lisäksi levien kasvua rajoittaa lämpötila, kun veden pinta viilenee lähelle +0 °C. Helsingin yliopisto aloitti kokeen keväällä 2018 Lammin jätevedenpuhdistamon jälkikosteikolla asentamalla jään alle LED-valoja. AIKO-hankkeen tavoitteena oli tehostaa levätuotantoa keinovalon avulla kosteikossa, joka vastaanottaa puhdistettua jätevettä Lammin jätevedenpuhdistamolta. Tulokset olivat lupaavia, joten koe päätettiin toistaa asentamalla valot uudelleen jään alle marraskuussa 2018.</p> <p>Levätuotantoa tarkasteltiin kenttä- ja laboratoriokokeiden avulla keväällä 2019. Jälkikosteikolla kasvatuspullot asetettiin jään alle LED-valojen vaikutusalueelle ja vertailualueelle, jossa LED-valoja ei ollut. Leväkasvua tarkasteltiin seuraamalla fotosynteesissä syntyvän liukoisen hapen (DO) pitoisuuden lisääntymistä. Lisäksi levätuotantoa seurattiin pH-luvun muutosten ja kasviplanktonmääritysten avulla. Kenttäkokeen aikana seurattiin myös ravinnepitoisuuksien muutoksia. Laboratoriossa valonmäärän vaikutusta leväkasvuun arvioitiin rinnakkaisien kokeiden avulla kasvatuslämpötilassa +5 - 9 °C pimeässä ja valotasolla 1 - 4 valointensiteeteissä 6 - 89 µmol/m<sup>2</sup>/s.</p> <p>Liukoisen hapen (DO) pitoisuuden kokonaisnettotuotanto oli toisen laboratoriokokeen aikana keskimäärin 23,7 mg/l valotasolla 2 (25 µmol/m<sup>2</sup>/s). Kasviplanktonin tuorebiomassan kokonaistuotanto oli ensimmäisessä laboratoriokokeessa valotasolla 3 (60 µmol/m<sup>2</sup>/s) keskimäärin 64,9 mg/l. LED-alueella, kasvatusten DO-pitoisuuden kokonaisnettotuotanto oli LED-alueen näytevedessä keskimäärin 1,42 mg/l ja kasviplanktonin tuorebiomassan kokonaistuotanto oli vertailualueen näytevedessä keskimäärin 12,1 mg/l. LED-alueella hapen ja leväbiomassan tuotanto oli voimakkaampaa kuin vertailualueella. Vaikka levätuotanto kasvatuksissa oli vähäistä, leväbiomassa kasvoi olosuhteisiin nähden merkittävästi. LED-valot tarjoavat hyvän vaihtoehdon tehostaa levän kasvua ja ravinteiden poistoa talviaikana. Menetelmää kannattaa hyödyntää jatkossakin. Laajamittainen käyttöönotto edellyttäisi jatkotutkimuksia ja taloudellisen kannattavuuden arvioimista.</p>		
Asiasanat Mikrolevä, kasviplankton, fotosynteesi, jätevedenpuhdistus, LED-valo, kosteikko, talvikausi, ravinteiden poisto, ravinnekierrätys		

## Abstract

Author(s) Aaltonen, Elina	Type of publication Bachelor's thesis	Published Autumn 2019
	Number of pages 66	
Title of publication <b>Cultivation of algae in the wastewater treatment plant</b> Effect of light intensity in algae growth under ice in the wetland		
Name of Degree Bachelor of Environmental engineering		
Abstract  <p>Low light intensity is the most important limiting factor in the growth of microalgae in the boreal wetland during winter time. The amount of light is limited by ice and snow. Temperature of water is close to +0 °C in winter, a factor which may also limit the growth of algae. The aim of the AIKO-experiment, started in 2018 by the University of Helsinki, was to support the growth of algae by installing LED-lights under the ice in a wetland receiving treated wastewater from the Lammi wastewater treatment plant. The results were promising to continue the experiment by reinstalling LED-lights in the end of November 2019.</p> <p>In this thesis, algae production was examined through experiments in the field and laboratory in winter 2019. Cultivation bottles were placed under the ice in the LED-area and in the reference area without LED-lights in the wetland. Algae growth was monitored by measuring the increase of dissolved oxygen (DO) levels produced via photosynthesis. In addition, production was followed by observing the changes in the pH levels and determining the fresh biomass of phytoplankton using a microscope. Changes in nutrient concentrations were also monitored in the field experiment. The effect of light on the growth of algae was studied with parallel experiments at a temperature range of +5 - 9 ° C, in the dark and light levels between 1 - 4, light intensity from 6 to 89 <math>\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}</math> in the laboratory.</p> <p>At the light level 2 (25 <math>\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}</math>), the average of total DO production was 23.7 mg/l during the second experiment. In the first experiment, the average of total algal fresh biomass was 64.9 mg/l in the light level 3 (60 <math>\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}</math>). In the LED-area cultivation, the average of total DO production in the sample water taken from the LED-area was 1.42 mg/l and the average of total algal fresh biomass in the sample water taken from the reference area was 12.1 mg/l. The results proved that DO production and fresh algal biomass increased in the LED-area relative to the control one, though changes in the production were minor. Fresh biomass of algae increased substantially in the wetland. The LED-lights provide an option to intensify algae growth and nutrient removal in winter. However large-scale implementation of the method will require further research and assessment of financial profitability.</p>		
Keywords Algae, phytoplankton, photosynthesis, waste water treatment, LED- light, wetland, winter season, nutrient removal, nutrient recycling		

## SANASTO

### LYHENTEET

#### ATP

Adensiinitrifosfaatti, runsasenerginen yhdiste, jota viherhiukkaset tuottavat fotosynteesin valoreaktioissa

#### DO

Liennut happi, tulee englannin kielen sanoista Dissolved Oxygen

#### LL

LED-alueelta otettu näytevesi, jota inkuboitii LED-alueella

#### LV

LED-alueelta otettu näytevesi, jota inkuboitii vertailualueella

#### NADPH

Nikotiiniamidiadeniininukleotidifosfaatti, runsasenerginen yhdiste, jota viherhiukkaset tuottavat fotosynteesin valoreaktiossa

#### PSII

Fotosynteesireaktion mahdollistava viherhiukkasessa sijaitseva proteiineista koostuva valoreaktiokompleksi II (valoa keräävä antenni), jossa tapahtuu molekyylien virittymistä, ja josta viritysendergia siirtyy reaktiokeskukselle elektroninsiirtoreaktioiden käynnistymiseksi (Photosystem II, valoreaktio II -kompleksi)

#### VV

Vertailualueelta otettu näytevesi, jota inkuboitii vertailualueella

#### VL

Vertailualueelta otettu näytevesi, jota inkuboitii LED-alueella

### KÄSITTEET

#### AIKO

Työ- ja elinkeinoministerin rahoittama hanke: Alueelliset Innovatiiviset Ko-keilut

#### Eutrofinen

Rehevyyssluokituksen mukaisesti runsasravinteinen vesistö, kun kasviplanktonin tuorebiomassa on 2,5 - 10 mg/l

#### Fotoautotrofinen

Eliö, joka kykenee yhteyttämään käyttäen valoa energianlähteenä ja hiilidioksidia hiilenlähteenä

#### Fotosynteettisesti aktiivisen fotonivuon tiheys

Näkyvän valon (400 - 700 nm) fotonien lukumäärä pinta-ala- ja aikayksikköä kohti ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ), jossa  $1 \text{ mol} = 6,022 \cdot 10^{23}$  fotonia

#### Heterotrofinen

Eliö, joka käyttää orgaanisia hiiliyhdisteitä energianlähteenä

#### Hypereutrofinen

Rehevyyssluokituksen mukaisesti erittäin runsasravinteinen vesistö, kun kasviplanktonin tuorebiomassa on  $> 10 \text{ mg/l}$

Inkubointi Kasvatuksen tai reaktion tapahtuminen valvotuissa olosuhteissa

#### Mesotrofinen

Rehevyyssluokituksen mukaisesti keskiravinteinen vesistö, kun kasviplanktonin tuorebiomassa on  $1,5 - 2,5 \text{ mg/l}$

#### Miksotrofinen

Eliö, joka kykenee yhteyttämään käyttäen valoa energianlähteenä ja hiilidioksidia hiilenlähteenä, mutta tarpeen vaatiessa kykenee käyttämään energianlähteenä myös orgaanisia hiiliyhdisteitä

#### N-SINK Life

EU:n rahoittama hanke, jonka tavoitteena oli poistaa jäteveden aiheuttamia typpipäästöjä, (Reduction of Waste Water Nitrogen Load: Demonstrations and Modelling)

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	IHMISTOIMINNAN VAIKUTUKSET PINTAVESIIN .....	3
2.1	Pintavesien tila ja ravinnepäästöt vesistöön.....	3
2.2	Rehevöityminen.....	3
2.3	Yhdyskuntajätevedet .....	4
3	KOSTEIKOT IHMISEN PALVELUKSESSA .....	6
3.1	Rakennetut kosteikot ja lammikot jäteveden puhdistajana .....	6
3.2	Kosteikoissa tapahtuvia toimintoja .....	7
3.3	Kosteikko eri vuodenaikoina .....	8
4	LEVIEN KASVUUN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ.....	10
4.1	Levien ominaisuudet.....	10
4.2	Yhteyttäminen.....	10
4.2.1	Valon määrän ja laadun vaikutus yhteyttämiseen .....	11
4.2.2	Yhteyttäminen vedessä ja hiilidioksidin merkitys.....	12
4.3	Kasviplanktonin perustuotantoon vaikuttavat muut tekijät .....	13
5	RAVINTEIDEN KIERRÄTYS LEVIEN AVULLA.....	14
5.1	Levien ravinteiden pidätys .....	14
5.2	Ravinteiden kierrätys .....	15
6	KOEJÄRJESTELYT JA MENETELMÄT.....	16
6.1	Kokeen suorituspaikka.....	16
6.2	Kokeiden kuvaus .....	17
6.3	Menetelmien kuvaus.....	18
6.4	Työn kulku .....	22
7	TULOKSET.....	25
7.1	Laboratoriokokeet.....	25
7.2	Koe Lammin jätevedenpuhdistamon jälkikosteikolla jään alla .....	31
8	TULOSTEN TARKASTELU .....	38
8.1	Levätuotanto laboratoriokokeissa .....	38
8.2	Levätuotanto LED-alueella ja vertailualueella .....	40
8.3	Eläinplanktonmääritykset kaikissa kokeissa.....	42
9	YHTEENVETO .....	43
	LÄHTEET .....	45
	LIITTEET .....	50

## 1 JOHDANTO

Tällä hetkellä fosfori poistetaan lähes kokonaan (>90 %) puhdistuslaitosten prosesseissa. Typeä on kyetty puhdistamaan noin 66 %:n tehokkuudella. (Suomen ympäristökeskus 2018c.) Fosforin ja typen poisto aiheuttaa monia kustannuksia jätevedenpuhdistamoilla. Kustannuksia kertyy investoinneista, kemikaalien käytöstä, energian käytöstä ja muista käyttökustannuksista. (Laitinen, Nieminen, Saarinen & Toivikko 2014, 57 - 58.) Nykyiset jätevedenpuhdistuslaitokset poistavat ravinteita kierrätyksen kannalta epäedullisiin muotoihin. Jätevedet sisältävät suuria määriä ravinteita, joita voidaan hyödyntää levien kasvatuksen avulla. Levät kasvavat hyvin monenlaisissa jätevesissä. Levämassa ja sen sitomat ravinteet on mahdollista ottaa talteen ja käyttää esimerkiksi maatalouden lannoitteena. (Huotari 2019.)

Huotarin (2019) mukaan auringonvalo mahdollistaa kesäisin runsaan leväkasvun Lammin jätevedenpuhdistamon jälkikosteikossa ja ravinteita pidättyy leviin tehokkaasti, mutta talvella lumi ja jää estävät valon pääsyn kosteikkoveteen (Leponiemi 2019). Aiemmin Lammin jätevedenpuhdistamon jälkikosteikon leväkasvua ja ravinteiden sitoutumista tutkittiin EU:n rahoittamassa N-SINK Life -hankkeessa. Tutkimuksessa todettiin, että talvella ravinteiden sitoutuminen on vähäistä valonpuutteen rajoittaessa yhteyttämistä ja leväkasvua. Leväkasvun ja ravinteiden pidättymisen tehostamista päätettiin tutkia talviolosuhteissa keinotekoisesti lisävalon avulla. (Arvola 2018.)

Helsingin yliopiston Lammin biologinen asema aloitti Lammin jätevedenpuhdistamon jälkikosteikolla keväällä 2018 AIKO-rahoituksen avulla kokeilun, jonka tavoitteena oli tutkia, voisiko levän kasvua tehostaa talvikautena jään alle asennettujen LED-valojen avulla. Koe suoritettiin keväällä 2018 maaliskuun puolesta välistä huhtikuun puoleen väliin. Levän kasvua tutkittiin liuenneen hapen ja klorofylli-pigmentin pitoisuutta seuraamalla. LED-valojen asennus pystyttiin toteuttamaan jään alle niin, että yhteyttämiselle kelpaavan valon määrää saatiin lisättyä. Tulosten perusteella valaistun alueen ja vertailualueen levän kasvussa ei ollut eroja. Koe toteutettiin vasta maaliskuun puolesta välistä alkaen, jolloin luonnonvalon määrä lisääntyi myös vertailualueella. Oletuksena oli, että alhaiseen valoon tottuneet levät eivät ehtineet sopeutua lisävalon tuomiin muutoksiin, joten koe päätettiin toistaa asentamalla valot aikaisemmin. Lisäksi valaistulla alueella eläinplanktonin määrä kasvoi nopeasti, mikä todennäköisesti vähensi leväkasvua eläinplanktonin käyttäessä ravintonaan kasviplanktonia. Kokeen tulokset olivat kuitenkin lupaavia, joten koetta päätettiin jatkaa. Tavoitteena on kehittää uudenlainen jätevesien puhdistusmenetelmä käyttäen pintavesien omia ekosysteemipalveluita hyväksi. (Arvola 2018.)

Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Helsingin yliopiston Lammin biologinen asema. LED-valot asennettiin syksyllä 2018 marraskuun lopussa Lammin jätevedenpuhdistamon jälkikosteikolle jään alle. Oletuksena oli, että levät ehtivät sopeutumaan lisävalon tuomiin muutoksiin aikaisemman asentamisajankohdan vuoksi verrattuna edelliseen kokeiluun. Valon määrän vaikutusta leväkasvuun testattiin kolmen kokeen avulla laboratorion kasvatushuoneessa lämpötilassa +5 - 9 °C. Kasvatushuoneeseen asetettiin kasvatuspulloja neljälle eri valointensiteettitasolle, ja pimeälle vertailutasolle. Lisäksi valon vaikutusta leväkasvuun testattiin suljettujen pullokasvatusten avulla kosteikossa jään alla keväällä 2019 helmikuun lopusta maaliskuulle. Laboratoriossa kasvua verrattiin eri valotasolle sijoitettujen kasvatuspullojen ja pimeiden vertailupullojen kesken. Kosteikolla LED-alueen leväkasvua verrattiin alueeseen, jossa lisävaloa ei ollut saatavilla. Kasvatuskokeissa käytettiin sitä kasviplanktonyhteisöä ja niitä ravinne- sekä hiilidioksidipitoisuuksia, joita kosteikon vedessä näytteenottohetkellä oli. Kokeissa leväkasvua seurattiin pääasiassa yhteyttämisen seurauksena muodostuvan liukoisen hapen pitoisuuden kasvua seuraamalla. Lisäksi tuloksia tarkasteltiin pH-luvun nousun, kasviplanktonmääritysten ja kentäkokeessa myös ravinteiden kulutuksen avulla.

Työn teoriaosuudessa käsitellään ravinnepäästöjen vaikutuksia pintavesiin, kosteikossa tapahtuvia toimintoja, valon merkitystä levän kasvussa, levän kasvuun vaikuttavia muita tekijöitä, ravinteiden pidättymistä leviin ja ravinteiden kierrätystä levien avulla. Kokeellisessa osuudessa kerrotaan työssä käytetyt menetelmät ja analyysit. Tuloksia verrattiin keskenään, aikaisempiin jälkikosteikolla tehtyihin määrittäisiin ja muihin tutkimustuloksiin.



## 2 IHMISTOIMINNAN VAIKUTUKSET PINTAVESIIN

### 2.1 Pintavesien tila ja ravinnepäästöt vesistöön

Ympäristöviranomaiset seuraavat pintavesien ekologista tilaa Suomessa (Suomen ympäristökeskus 2017). Vuonna 2013 Suomessa selvitettiin pintavesien ekologinen tila perustuen vuoden 2006 ja 2012 välisiin seurantatuloksiin (Suomen ympäristökeskus 2018a). Luokituksen mukaisesti 85 % järvipinta-alasta oli hyvässä tai erinomaisessa kunnossa, ja vedenlaatu oli pysynyt muuttumattomana. Järivialasta 13 % oli tyydyttävässä ja 1 % välttävissä tai huonossa kunnossa. Huonommassa tilassa olevat järvet ovat enimmäkseen pieniä tai keskikokoisia ja sijaitsevat suurimmaksi osaksi Länsi- ja Etelä-Suomen maatalousalueilla. Erinomaiseksi tai hyväksi luokiteltiin 64 % jokipituudesta, tyydyttäväksi 23 %, välttäväksi 9 % ja huonoksi 2 %. (Luonnontila 2014.) Rannikkovesistä erinomaisessa tai hyvässä kunnossa on 25 % ja 75 % on hyvää heikommassa tilassa (Suomen ympäristökeskus 2018a).

Suomen vesistöön pääsee fosforia ja typpeä hajakuormituksena ja pistemäisenä kuormituksena. Hajakuormitus koostuu maataloudesta, haja-asutuksesta ja metsätaloudesta. Pistekuormitusta aiheuttaa massa- ja paperiteollisuus, muu teollisuus, yhdyskunnat, kalankasvatus, turkistarhaus ja turvetuotanto. Kaikista ravinnepäästölähteistä vuonna 2016 ravinnekuormitusta aiheutui eniten maataloudesta, jossa typen osuus oli 48,9 % ja fosforin osuus 59,2 %. Yhdyskuntien jätevesien mukana typpeä pääsi vesistöihin 10 748 t/a ja fosforia 161 t/a, joiden osuus kaikkien päästölähteiden kuormituksesta oli typen osalta 17,4 % ja fosforin osalta 5,3 %. Ihmistoiminnan aikaansaama ravinnekuormitus oli lähes puolet suurempi kuin luonnonhuhutoumasta aiheutunut ravinnekuormitus. (Suomen ympäristökeskus 2019.)

### 2.2 Rehevöityminen

Järven rehevöityminen on tila, jossa ihmistoiminnan aiheuttamat ravinnepäästöt kertyvät vesistöön aiheuttaen tuotannon kasvusta johtuvaa pysyvää heikkenemistä veden laadussa (Niinimäki & Penttinen 2010, 90; Sammalkorpi & Sarvilinna 2010, 11). Rehevöityminen näyttäytyy järven ekologisen tilan heikentymisenä, ranta- ja vesikasvillisuuden sekä planktonlevien, etenkin sinilevien, määrän kasvuna. Rehevissä järvissä viihtyvien kasvi- ja eläinlajien lisääntyessä muut lajit katoavat ja järven lajistokoostumuksesta tulee yksipuolista. (Sammalkorpi & Sarvilinna 2010, 11 - 12.) Tehokkain keino ehkäistä rehevöitymistä on estää typen ja fosforin pääsyä vesistöihin. Levät tarvitsevat kasvuunsa ravinteita tiettyssä suhteessa. Minimiravinteeksi kutsutaan sitä ravinnettä, joka kussakin vesistöissä

säätelee leväkasvua. Jos jotakin ravinnetta ei ole saatavilla tarpeeksi maksimaalista leväkasvua ajatellen, ravinteesta tulee minimiravinne. Fosfori on makeissa vesissä usein minimiravinne, ja Suomessa onkin pääasiassa keskitytty vähentämään fosforin pääsyä vesistöön. Rehevien vesien osalta on huomattu myös typen olevan joissain tapauksissa minimiravinne. (Pietiläinen & Räike 1999, 7.)

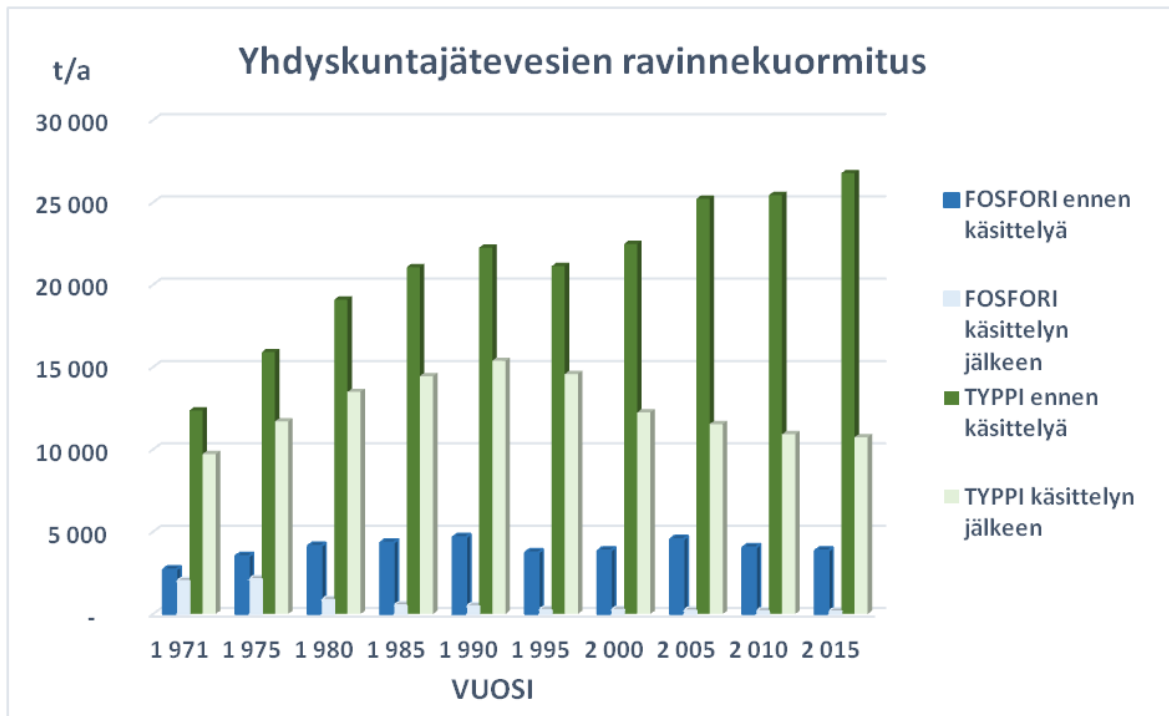
### 2.3 Yhdyskuntajätevedet

Suomen väestöstä suurin osa (85,4 %) asuu yhdyskuntajätevesidirektiivin mukaisesti viemäröidyillä taajama-alueilla. Jätevettä kertyy taajamissa keskimäärin 0,5 miljardia kuutiometriä vuodessa. Jätevesistä puhdistetaan kiinteitä aineita, eloperäistä ainesta ja ravinteita. Puhdistuksen yhteydessä jätevedestä poistuu lisäksi tehokkaasti bakteereita ja taudinaiheuttajia. Yhdyskuntajätevesiasetus määrittää jätevedenpuhdistamoiden puhdistusteholle ja tarkkailulle minimivaatimukset kokoluokkien mukaisesti. Ympäristönsuojelulaki velvoittaa kaikkien yli 100 AVL:n puhdistamoiden hakevan ympäristöluvan, jossa jätevesien käsittelyvaatimukset määritetään. Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskukset (ELY) valvovat ympäristölupaehdojen toteutumista puhdistamoissa. (Suomen ympäristökeskus 2018c.)

*Asukasvastineluku (AVL) on biologisesti hajoavien epäpuhtauksien mittayksikkö, joka vastaa yhden henkilön vuorokaudessa tuottamaa keskimääräistä kuormitusta (Suomen ympäristökeskus 2015b).*

Jätevedenpuhdistamoiden ja viemäreiden rakentamisen jälkeen yhdyskuntien jätevesien aiheuttamat päästöt vesistöihin ovat laskeneet huomattavasti. Jätevedenpuhdistamot pystyvät poistamaan yli 95 % orgaanisesta aineesta ja fosforista. Vuonna 2017 typen puhdistuksessa saavutettiin noin 66 %:n tehokkuus. Jätevedenpuhdistamoille tuleva typpikuorma on kasvanut muun muassa taajamaväestön lisääntyessä, mikä on kasvattanut typen poistotehon parantamisen tarvetta. Tällä hetkellä puhdistetun veden typpipäästöt vesistöihin ovat samoissa lukemissa kuin 1970-luvulla (kuvio 1). (Suomen ympäristökeskus 2018c.)

Suomessa vesihuollon huolenaiheiksi tulevaisuudessa voivat muodostua noin 1500 vesihuoltolaitoksen hajanainen alueellinen sijoittuminen, vanhat rakenteet, heikko taloudellinen tila, puutteelliset henkilöstöresurssit, ääri-ilmiöiden lisääntyminen säätiloissa ja omistajaohjauksen ongelmat (Vasama 2017). Tulevaisuudessa vesihuoltoa tulee kehittää lisäämällä resursseja, tutkimus-, kehitys- ja yhteistyötä sekä uudenlaista teknologiaa. Bio- ja kiertotalouskäytäntöjä sovelletaan jatkossa myös vesihuollossa. (Suomen ympäristökeskus 2018b.)



Kuvio 1. Yhdyskuntajätevesien ravinnekuormitukset vuodesta 1971 vuoteen 2015 (Suomen ympäristökeskus 2018c)

### 3 KOSTEIKOT IHMISEN PALVELUKSESSA

#### 3.1 Rakennetut kosteikot ja lammikot jäteveden puhdistajana

Kosteikoksi kutsutaan vesialuetta, joka on vuoden ympäri veden peitossa ja sijaitsee maaston painanteessa, ojan tai muun vesistön rantavyöhykkeellä (Suomen ympäristökeskus 2015b; Länsi-Uudenmaan vesi- ja ympäristö ry 2019). Kosteikoilla on myös tavallisesti kosteikoille ominaista kasvillisuutta (Suomen ympäristökeskus 2015b). Kosteikkoalueita on muodostunut luonnostaan rantojen lähelle, muun muassa rantaruohikkoina ja soina, tai ne voivat olla rakennettuja (Länsi-Uudenmaan vesi- ja ympäristö ry 2019).

Kosteikkoja ja erilaisia jälkikäsittelykenttiä on tutkittu monissa maissa jo pitkään (Gran, Jormola, Koskiahho, Maijala, Mikkola-Roos, Puumala, Puustinen, Riihimäki, Rätty & Sammalkorpi 2001, 15). Kosteikkoja rakennetaan nykyään vesiensuojelullisista syistä pääasiassa valumavesien puhdistustarkoituksessa, sitomaan ravinteita ja kiintoainesta ja sitä kautta ehkäisemään vesistöjen rehevöitymistä (Suomen ympäristökeskus 2015b). Vaikka Suomessa kosteikkojen rakentamisen hyödyt on ymmärretty maatalouden valumavesien puhdistuksessa ja kosteikkoja on rakennettu jo yli tuhat, yhdyskuntajätevesien puhdistamiseen kosteikkoja tai altaita ei ole juurikaan rakennettu (Uusheimo 2019, 22).

Suomessa on aikoinaan perustettu lammikkopuhdistamoita ja imeytyskenttiä ensisijaisena menetelmänä puhdistaa jätevesiä. Lammikkopuhdistamoista luovuttiin, koska niiden puhdistuskapasiteetti jäi riittämättömäksi, etenkin talvikautena kylmissä maissa. Lammin jätevedenpuhdistamon jälkikosteikon lisäksi, Suomessa on vain muutama kosteikko, jota käytetään jätevesien jälkikäsittelyyn. (Ruponen 2018, 11.) Monessa pohjoisessa maassa, kuten Kanadassa, Ruotsissa ja Norjassa, kosteikkoja käytetään jätevesien jälkikäsittelyyn, eikä ensisijaisena menetelmänä kylmien olosuhteiden vuoksi. Rakennetuissa kosteikoissa jäteveden puhdistus tapahtuu pääasiassa luonnostaan tapahtuvien mekaanisten, biologisten ja kemiallisten prosessien kautta. Kosteikot ovat yleensä edullisia sekä helppoja rakentaa ja ylläpitää, eivätkä ne kuluta yhtä paljon energiaa kuin jätevedenpuhdistuslaitokset. Rakennettujen kosteikkojen puhdistustehokkuutta voidaan parantaa pumppaamalla, ilmastuksella, säätämällä virtausta ja muiden keinojen avulla. (Arola 2012, 13 - 15.)

Kosteikot jaetaan kolmeen pääryhmään, jotka ovat vapaan vesipinnan kosteikko tai avovesikosteikko (FWS Free Water Surface), vaakatasoisen maanalaisen virtauksen kosteikko (HSSF Horizontal Subsurface Flow) ja pystysuoran virtauksen kosteikko (VF Vertical Flow). Avovesikosteikossa veden virtaaminen on usein hidasta. (Arola 2012, 16.) Avovesikosteikkoja voidaan luokitella myös kasvillisuuden perusteella. Lammin jäteveden-

puhdistamon jälkikosteikkoa voidaan kutsua avovesikosteikoksi, josta suuremman vesikasvillisuuden peitossa on vähemmän kuin 1/5 pinta-alasta. (Ruponen 2018, 7.)

### 3.2 Kosteikoissa tapahtuvia toimintoja

Tärkeimmät kosteikossa tapahtuvat toiminnot ovat kiintoaineen sedimentoituminen, ravinteiden sitoutuminen kiintoainekseen ja kasvillisuuteen, denitrifikaatio sekä muut mikrobiologiset tapahtumat. Veden kulun hidastuminen ja riittävä viipymä kosteikossa on hyvän puhdistustuloksen kannalta oleellista. (Gran ym. 2001, 7.) Tärkeimmät kosteikoissa tapahtuvat ravinteiden kierrot ovat hiilen-, typen-, rikin- ja fosforin kierto. Näistä suurinta roolia esittää hiilen kierto, sillä se on yleisin alkuaine kaikissa organismeissa. (van der Valk 2006, 123.)

Veden happi esiintyy liuenneena kaasuna ja vesimolekyyleissä. Happea liukenee veteen ilmasta ja yhteyttämisen kautta (Niinimäki & Penttinen 2014, 11). Happea liukenee enemmän kylmään veteen niin, että happipitoisuus on 14,2 mg/l lämpötilassa 0 °C ja lämpötilassa +25 °C happipitoisuus on 8,1 mg/l. Hapen kyllästysarvo ilmoitetaan prosentteina, ja se kertoo kuinka paljon happea on liuenneena verrattuna hapen teoreettiseen pitoisuuteen tietyssä lämpötilassa. Jos esimerkiksi lämpötilassa +25 °C veden happipitoisuus on 7,0 mg/l, pitoisuus jaetaan teoreettisella pitoisuudella, joka on 8,1 mg/l ja kerrotaan sadalla. (Heinonen, Kettunen & Mäkelä 2008, 20 - 21.) Tehokas yhteyttäminen voi nostaa hapen kyllästysasteen (saturaation) yli sataan prosenttiin (Niinimäki & Penttinen 2014, 11). Kosteikkojen pohjaan muodostuu usein hapettomat olosuhteet, koska hapen liukeneminen veteen on hidasta. Lisäksi happea kuluu vesistöissä eloperäisen aineen hajotustoimintaan ja eliöiden soluhengitykseen, etenkin lämpimässä vedessä soluhengityksen kasvaessa. (Gran ym. 2001, 16; Scholz 2006, 95; Niinimäki & Penttinen 2014, 11.)

#### **Fosforin kierto**

Fosfori esiintyy vedessä levien käytössä olevana fosfaattifosforina ( $\text{PO}_4\text{-P}$ ), tai fosfori voi olla sitoutuneena yhdisteissä raudan, alumiinin ja kalsiumin kanssa. Lisäksi fosforia on sitoutuneena leviin, saveen ja pohjasedimenttiin. Fosforia pääsee vesistöihin maaperästä huuhtouman mukana. Maaperän lannoitteiden fosfaatit ovat kuitenkin niukkaliukoisia, eikä huuhtoutuminen ole kovin nopeaa. Pesuaineiden liukoiset polyfosfaatit kuormittivat vesistöjä ennen nykyisiä jätevedenkäsittelymenetelmiä. (Niinimäki & Penttinen 2014, 13 - 14.) Aura ym. (2006) toteaa, että osa valumisvesien mukana tulevasta kiinteiden hiukkasten fosforista on etenkin hapettomissa olosuhteissa levien käytettävissä, joten sen merkitys kuormittajana on suuri (Niinimäki & Penttinen 2014, 14). Fosforin liukenemista sedimentistä ja sitä kautta sisäistä kuormitusta voi tapahtua etenkin hapettomissa olosuhteissa ja

pH-luvun noustessa. Korkea rautapitoisuus vedessä auttaa fosforin sitoutumisessa, koska rauta muodostaa fosforin kanssa hapettavissa olosuhteissa ferrifosfaatteja ja ferrihydroksidifosfaattikomplekseja. Fosforia sitoutuu myös alumiinin läsnä ollessa. (Niinimäki & Penttinen 2014, 14 - 16.) Typpi ja fosfori poistuu ja sitoutuu käänteisissä olosuhteissa. Denitrifikaatiota tapahtuu hapettomassa ympäristössä, mikä edesauttaa fosforin vapautumista (Gran ym. 2001, 11).

### **Typen kierto**

Vedessä typpeä on liuenneena, liukenemattomana, orgaanisina seoksellisina yhdisteinä, liuenneina epäorgaanisina yhdisteinä ja vapaana typpenä. Epäorgaaniset typpiyhdisteet, kuten nitraatti ja ammonium, ovat levien hyödynnettävissä. Kokonaistyyppi ilmoittaa veden sisältämän typen kokonaismäärän. Kasvit ja eläimet käyttävät typpeä proteiinien ja nukleiinihappojen muodostamiseen. (Niinimäki & Penttinen 2014, 17.) Typpi kiertää vesistössä erilaisten prosessien, kuten typen sidonnan, nitrifikaation, denitrifikaation ja typen mineralisaation avulla. Typen sidonnassa bakteerit ja sinilevät muodostavat kaasumaisesta tyypistä ammoniumtyypeä. (Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry 2013; Niinimäki & Penttinen 2014, 18.) Nitrifikaatiossa nitrifikaatiobakteerit muodostavat hapellisissa olosuhteissa ammoniumtyypestä nitriittejä ja nitraatteja. Denitrifikaatiossa tietyt bakteerit hajottavat hapettomassa vedessä ja sedimentissä nitraatteja ja nitriittejä typpikaasuksi. Typen mineralisaatiossa mikrobit hajottavat kuolleiden eliöiden hajoamistuotteena syntyvää ammoniakia ammoniumtyypeksi uudelleen käytettäväksi. (Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry 2013.) Denitrifikaation kannalta suotuisat olosuhteet saavutetaan, jos vesi viipyy kosteikossa tarpeeksi pitkään ja kosteikossa on tarpeeksi hapetonta vettä, jonka pH on välillä 6,5 - 8,0. Denitrifikaatio tehostuu lämpötilan noustessa. (Gran ym. 2001, 9, 16; Scholz 2006, 95.)

### **3.3 Kosteikko eri vuodenaikoina**

Kevään täyskierron aikana veden lämpötila on noin +4 °C. Vesimassan sekoittuminen mahdollistaa happipitoisen pintaveden kulkeutumisen pohjalle. Talvella pohjalle kertyy runsaasti ravinteita hajotustoiminnasta, ja keväällä ravinteet leviävät valoisaan pintakerrokseen, jossa yhteyttäminen kiihtyy. Keväisin etenkin kylmässä vedessä viihtyvät piilevät lisääntyvät. Kesällä ylimmän vesikerroksen tiheys pienenee, kun aurinko lämmittää pintavettä ja veden sekoittuminen vähenee. Matalissa kosteikoissa tuuli sekoittaa vesimassaa pohjaan asti kesäisinkin. Tuotanto saavuttaa syksyisin toisen kasvupyrähdysen, kun vesi taas sekoittuu sen viilentyessä. Talvella jääpeitteen muodostuttua lämpötila pinnassa on lähellä nollaa ja nousee lämpötilaan +4 °C syvemmälle mentäessä. Talvisin jään ja lumen ansiosta valon pääsy estyy, tuotanto ja sen muodostama hapentulo lakkaa. Vesimassaan

ei myöskään pääse liukenemaan happea ilmasta. Hajotustoiminta jatkuu, mutta hidastuu kylmän veden ansiosta, mikä vähentää hapen kulutusta. Rehevissä vesistöissä vähentynekin hajotustoiminta voi aiheuttaa happikatoa. (Niinimäki & Penttinen 2010, 23 - 27.)

## 4 LEVIEN KASVUUN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ

### 4.1 Levien ominaisuudet

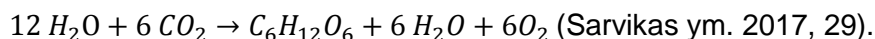
Kasviplanktonlevät ovat aitotumallisia, yksi- tai monisoluisia eliöitä, joiden solujen läpimitta vaihtelee usein 0,01 ja 0,04 mm:n välillä (Niinimäki & Penttinen 2010, 44; Niinimäki & Penttinen 2014, 28). Levät ovat kirjava ryhmä eliöitä, joilla on pitkä evoluutiohistoria. Levien taksonominen luokittelu perustuu pääasiassa ulkoisiin piirteisiin ja elintapoihin. (Niinimäki & Penttinen 2014, 28.) Useat levät esiintyvät yhdyskuntina, kuten solurykelminä, pitkinä nauhoina, rihmastoina tai kiekkomaisina levyinä. Eri kasviplanktonit viihtyvät eri tyyppisissä vesistöissä, joten ryhmittelyä on tehty myös sen mukaan, esiintyvätkö ne rehevissä vai karuissa vesistöissä. (Niinimäki & Penttinen 2010, 44.) Levät ovat herkkiä ympärillään tapahtuville muutoksille, joten veden fysikaaliset ja kemialliset tekijät vaikuttavat niiden esiintymiseen. Levien passiivista kulkeutumista vedessä kutsutaan keijumiseksi, ja useilla lajeilla on keijumista helpottavia piirteitä. Levät ovat fotoautotrofisia, heterotrofisia tai miksotrofisia. Fotoautotrofiset lajit pystyvät yhteyttämään. Heterotrofiset lajit tarvitsevat solun ulkopuolelta otettavia orgaanisia yhdisteitä elintoimintoihinsa. Miksotrofiset lajit voivat yhteyttää ja ottaa solun ulkopuolelta orgaanisia yhdisteitä, esimerkiksi bakteerisoluja kasvuunsa. (Tikkanen 1986, 8 - 10.)

### 4.2 Yhteyttäminen

Elämän maapallolla mahdollistaa viherkasvien viherhiukkaset (kloroplastit), joiden lehtivihreä (klorofylli) absorboi valoa, jota viherhiukkanen käyttää energianlähteenään fotosynteesissä (Sarvikas, Suorsa, Rintamäki, Vapaavuori, Aro & Tyystjärvi 2017, 35; Solunetti 2019). Fotosynteesissä valoenergiaa tarvitaan vesimolekyylin hajoamiseen hapeksi, elektroneiksi ja protoneiksi. Vesimolekyylien hajotessa elektronit vapautuvat fotosynteesireaktioiden tarpeeseen. Happea tuottavien organismien fotosynteesin ensimmäisessä vaiheessa tapahtuu valoreaktioita neljässä erillisessä proteiinikompleksissa. Proteiinikomplekseista PSI ja PSII ovat valoreaktiokomplekseja, jotka vastaanottavat valoa, ja joita kutsutaan myös valoa vastaanottaviksi antenniksi. Viritysendergia siirtyy valoreaktiokompleksista reaktiokeskukseen, jossa tapahtuu elektroninsiirtoreaktioita. Valoreaktioissa tuotteina muodostuu paljon adensiinitrifosfaattia (ATP) ja nikotiiniamidiadeniininidinukleotidifosfaattia (NADPH), jotka sisältävät suuren määrän energiaa. (Sarvikas ym. 2017, 29, 71.) Yhteyttäminen toisessa vaiheessa ATP- ja NADPH-molekyyleihin varastoitunut energia mahdollistaa hiilihydraattien valmistuksen hiilidioksidista hiilensidontareaktioissa (Sarvikas ym. 2017, 29; Solunetti 2019). Hiilensidontareaktiot ovat erilaisia entsyymireaktioita, jossa entsyyminä toimivat jokaiselle reaktiolle tarvittavat valkuaisaineet (proteiinit). Fotosyntee-



sissä sivutuotteena vapautuu happea ja lopputuotteena syntyy glukoosia eli rypälesokeria. Fotosynteesissä syntyviä yhdisteitä eliöt käyttävät aineenvaihdunnassa ja muiden yhdisteiden valmistuksessa. (Niinimäki & Penttinen 2010, 14 - 15; Sarvikas ym. 2017, 29 - 30.) Fotosynteesin reaktioyhtälö on seuraavanlainen:



#### 4.2.1 Valon määrän ja laadun vaikutus yhteyttämiseen

Levän biomassan kasvu on riippuvainen monesta tekijästä, muun muassa yhteyttämiseen soveltuvan valon määrästä. Kasvien ja levien fotosynteesille käyttökelpoisen sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus on näkyvän valon alueella eli 400 - 700 nm. Punainen ja sininen valo absorboituu fotosynteesipigmentteihin paremmin kuin vihreä tai keltainen valo. Auringon säteilyenergiasta noin puolet on näkyvän valon alueella. Suomessa auringonvaloa saadaan vuodessa 700 - 800 tuntia ja näkyvää valoa tulee Suomeen 50 - 60 W/m<sup>2</sup>. Pilvettömänä päivänä fotosynteettisesti aktiivisen fotonivuon tiheys on noin 2000 μmol/m<sup>2</sup>/s. Valon määrään vaikuttavat pilvet, varjot, vuorokaudenaikojen vaihtelut ja auringonvalon tulokulma. Näiden muuttujien vuoksi viherhiukkasten saama valomäärä keskiarvona on alle kymmenen prosenttia auringon säteilyn maksimiarvosta. (Sarvikas ym. 2017, 51 - 52, 62 - 63, 219.) Vesikasvien valonsaantiin vaikuttaa lisäksi veden syvyys, sameus ja väriominaisuudet (Sarvikas ym. 2017, 187; Tulonen 2019).

Fotosynteesissä noin neljäsosa viherhiukkasessa sijaitsevan valoreaktiokeskuksen energiasta muuttuu kemialliseksi energiaksi ja suurin osa lämmöksi. Elektroninsiirrot ovat nopeita, ja valokemiallisten reaktioiden yhteydessä tapahtuu myös muita viritystiloja hajottavia tapahtumia. Hämärässä suurin osa valokemiallisten reaktioiden viritystiloista purkautuu, jolloin yhteyttäminen vähenee. Evoluutiossa viherhiukkaset ovat kehittyneet hyödyntämään mahdollisimman tehokkaasti valoa. Kasvit, levät ja fotosynteettiset bakteerit kykenevät yhteyttämään himmeässäkin valossa, ja siten fotosynteesin maksimikyky tavoitetaan jo kohtuullisessa valon määrässä. Hämärässä valossa yhteyttäminen, kasvu ja kasvin lisääntyminen hidastuu. (Sarvikas ym. 2017, 62 - 63, 73, 188.) Osa levälajeista kykenee sopeutumaan vähäisempään valointensiteettiin suurentamalla valoa vastaanottavan kompleksin kokoa. Toiset levälajeista taas sopeutuu valomuutokseen lisäämällä valoa vastaanottavien reaktiokeskusten lukumäärää. (Moore, Suggett, Hickman, Kim, Tweddle, Sharples, Geider & Holligan 2006, 937.) Lumen ja jään aikana talvella merkittävin levien kasvua rajoittava tekijä on valon vähäisyys (Tikkanen 1986, 10).

Fotosynteesinopeuteen vaikuttaa yhteyttämisen valoreaktiot ja hiilensidontareaktiot. Valon määrä vaikuttaa valoreaktioiden toimintaan hämärässä ja kohtuullisessa valossa. Kirk-

kaassa valossa yhteyttämisnopeuteen vaikuttaa hiilensidontareaktioiden toimintakyky. Liiallisen valon proteiinikomplekseja vaurioittava vaikutus taas heikentää fotosynteesitehoa. Valomäärän lisäksi valomäärän vaihtelu aiheuttaa leville stressiä, minkä johdosta leväsolun kasvu voi hidastua. Fotoinhibitio on prosessi, jossa valo vaurioittaa yhteyttämislaitteistoa. Fotoinhibitiossa hapen tuotto pysähtyy ja sen jälkeen elektronin siirto. Yhteyttämisprosessin yhteydessä toimii fotoinhibition korjausmekanismi, jota kutsutaan PSII:n korjauskierroksi. PSII on reaktiokeskus, joka sitoo valoa. Jos PSII:n korjauskierro ei olisi käytössä taukoamatta, yksi pilvetön kesäpäivä lopettaisi yhteyttämisprosessin kokonaan. Yhteyttämislaitteiston vaurioituminen ei ole riippuvainen valovoimakkuudesta, vaikka jotkin tutkijat ovat esittäneet himmeän valon aiheuttavan fotonia kohti enemmän vahinkoa kuin kirkkaan valon. (Sarvikas ym. 2017, 73, 116, 188, 195 - 196, 226.)

Fotosynteesin valovastekäyrä mittaa yhteyttämisnopeutta suhteessa valon kirkkauteen. Valovastekäyrän yhteyttämistä voidaan mitata hiilidioksidin yhteyttämisnopeuden, hapen tuotannon tai klorofyllin fluoresenssin avulla. Yhteyttämisprosessin suurinta tuotantokykyä kutsutaan maksimikapasiteetiksi. Maksimikapasiteetti kuvaa tilaa, jossa yhteyttäminen saturoituu eli saavuttaa kyllästysasteen valon suhteen, ja perustuotannon määrä saavuttaa maksimin. Maksimikapasiteettiin vaikuttaa ympäristötekijät, lajit ja yksilöt. Maksimikapasiteetti mitataan olosuhteissa, jossa lämpötila, hiilidioksidipitoisuus, valovoimakkuus, ravinteiden saatavuus ja veden määrä ovat suotuisia. (Sarvikas ym. 2017, 116, 188.)

#### 4.2.2 Yhteyttäminen vedessä ja hiilidioksidin merkitys

Fotosynteesissä tuotetut ATP ja NADPH sisältävät paljon energiaa, jonka avulla hiilidioksidi muunnetaan hiilensidontareaktioiden kautta kasveille ja eläimille välttämättömiksi orgaanisiksi hiiliketjuiksi. Vedessä kasveilla ja levillä on saatavilla vähemmän hiilidioksidia kuin maakasveilla. Vuonna 2017 ilmakehässä oli 0,039 % hiilidioksidia. Osa ilmakehän hiilidioksidista liukenee vesistöihin. Vedessä osa hiilidioksidista jää liukoiseksi kaasuksi, osa muuttuu bikarbonaatiksi ja karbonaatiksi. Mitä emäksisempää vesi on, sitä enemmän muodostuu bikarbonaattia ja karbonaattia. Luonnonvesien pH:n ollessa hieman yli 7, bikarbonaattina on yli puolet veden hiilestä. Hiilidioksidia liukenee kylmään veteen enemmän kuin lämpimään. Kylmässä vedessä hapen ja hiilidioksidin suhde on sopivin yhteyttämiselle. Vedessä elävällä kasvukunnalla on monia ratkaisuja yhteyttämiseen hiilidioksidipitoisuuden ollessa vähäinen. Monet vedessä elävät kasvit pystyvät konsentroimaan hiilidioksidia. Yksi esimerkki tästä on soluseinän hiilihappoanhydraasi, jossa kasvisolun keräämät protonit ovat tehneet soluseinästä happaman, minkä ansiosta bikarbonaatti muuttuu soluseinässä hiilidioksidiksi. Hiilidioksidin määrä vaihtelee vuorokaudessa sen ollessa päivällä alhainen fotosynteesin hiilidioksidikulutuksen myötä, mutta yöllä pitoisuus nousee,

kun soluhengityksen tuotteena veteen vapautuu hiilidioksidia. (Sarvikas ym. 2017, 29, 97, 112 - 113, 115.)

#### 4.3 Kasviplanktonin perustuotantoon vaikuttavat muut tekijät

Perustuotanto kuvaa ilmiötä, jossa uutta orgaanista ainetta muodostuu fotosynteesin kautta (Niinimäki & Penttinen 2010, 15). Tuottajat sitovat ja varastoivat 9 % tuottajaan kohdistuvasta auringon säteilyenergiasta ja bruttoperustuotannoksi kutsutaan kaikkien ekosysteemin tuottajien kiinnittämää energiamäärää. Kasvit käyttävät elintoimintoihinsa osan bruttoperustuotannon energiasta, joten nettoperustuotanto saadaan vähentämällä kasvien käyttämä osuus energiamäärästä. Nettoperustuotannon energiamäärä on noin 5 % kasviin kohdistuvasta valon määrästä. Tavallisesti bruttoperustuotanto määritetään sitoutuneen orgaanisen hiilen avulla. (Niinimäki & Penttinen 2014, 7.) Fotosynteesi tuottaa happea tietyssä suhteessa hiilidioksidin sitoutumiseen nähden, joten mitä enemmän hiilidioksidia sitoutuu perustuotannossa, sitä nopeammin happipitoisuus vedessä nousee (Heinonen, Kettunen & Mäkelä 2008, 20 - 21).

Kasvit muuttavat suurimman osan fotosynteesissä tuottamastaan glukoosista omiin tarpeisiinsa rakenneaineiksi, mihin kasvit tarvitsevat vähintään kahtakymmentä erilaista mineraalia. Lisäksi glukoosin muuttamiseen solun sisällä hiilidioksidiksi ja vedeksi tarvitaan happea. Tätä toimintoa kutsutaan soluhengitykseksi. Maksimaalisen kasvun rajoittava tekijä voi olla jokin mineraalin puute, jos sitä on vähemmän kuin tuotetun glukoosin muuttamiseen tarvitaan. Vesistöissä kemiallisten ravinteiden saanti vaikuttaa eniten tuotantoon. Levillä on merkittävä rooli vesistöjen perustuotannossa, mikä voi olla jopa moninkertainen muiden vesikasvien tuotantoon verrattuna. (Niinimäki & Penttinen 2010, 16, 45.)

Yhteyttämisen seurauksena hiilidioksidista muodostuva hiilihappo vedessä vähenee, mikä lisää veden emäksisyyttä (Sarvikas ym. 2017, 228). Useimpien levien kasvun kannalta optimaalinen pH-alue on 8,2 - 8,7, ja siksi levän viljelyssä, jos pH nousee liian korkeaksi, levän kasvu rajoittuu. pH voidaan pitää suotuisana lisäämällä hiilidioksidia. (Lavens & Sorgeles 1996.) Lämpötilan merkitys kasviplanktonin kasvussa ei ole niin oleellinen kuin valon. Tosin osa levälajeista on sopeutunut elämään viileissä vesissä, kun taas toiset suosivat lämpimiä. Useat kasviplanktonilajit kuitenkin suosivat lämpimiä olosuhteita. (Tikkanen 1986, 8 - 10.) Kosteikossa leväkasvun haasteita ovat kasviplanktonia ravinnokseen käyttävät muut eliöt ja ympäristöolosuhteet (Sarvikas ym. 2017, 228).

## 5 RAVINTEIDEN KIERRÄTYS LEVIEN AVULLA

### 5.1 Levien ravinteiden pidätys

Typen ja fosforin ihanteellinen painosuhte tuotantoa ajatellen on 7:1, jossa gramma fosforia aiheuttaa seitsemän gramman typen tarpeen (Niinimäki & Penttinen 2010, 15 - 16). Tämän painosuhteen on oletettu toimivan myös levien tuotannossa (Pietiläinen & Räike 1999, 8). Redfield (1985) päätteli, että meren kasviplanktonin solujen sisältämä ihanteellinen C:N:P ravinesuhde mooleina solujen sisällä on 106:16:1. Kahlert (1998) arvioi, että makean veden mikrobit, sinilevät ja levät sisältäisivät ravinteita suhteessa 158:18:1. (Francoeur, Rier & Whorley 2013, 46 - 47.)

Fosforia kasvit tarvitsevat energia-aineenvaihdunnassaan, ja fosforin saanti onkin yksi tärkeimmistä tekijöistä ATP:n muodostuksessa, josta solut saavat tarvitsemansa energian. Fosforin puute rajoittaa kasvua merkittävästi. Levät käyttävät kasvuunsa pääasiassa liukoista fosfaattifosforia, jonka määrää vedessä säätelee kokonaisfosforin pitoisuus. Fosfaattifosforin pitoisuus vähenee kasvukaudella, jolloin levät ja vesikasvit sitovat sen käyttöönsä. Fosforin osuus kasvisolujen kuivapainosta on tavallisesti 0,5 - 2 %. Fosfaattifosforin lisäksi osa valumisvesien kiinteistä fosforihiukkasista on hapettomissa olosuhteissa leville käyttökelpoista. Veden pH:n nousu lisää fosforin liukenemistä, joten fosforia saattaa vapautua sedimentistä veteen runsaan leväkasvun nostaessa veden pH:ta. (Niinimäki & Penttinen 2014, 13 - 14.) Useissa tutkimuksissa on todettu levien sitovan tehokkaasti epäorgaanista typpeä ja fosforia. Tulokset ravinteiden pidättymisestä leviin ovat vaihdelleet tutkimusten välillä. Tulosten perusteella typen osalta on päästy vähintään 50 %:n puhdistustulokseen ja fosforin poistuminen on vaihdellut 85 %:sta lähemmäs 100 %:iin. (Abdel-Raoufa, Al-Homaidanb & Ibraheemb 2012.)

Ruonen (2018, 45 - 48) tutki pro gradu -tutkielmassaan ravinteiden pidättymistä Lammin jätevedenpuhdistamon jälkikosteikkoon ja ravinteiden sitoutumista leviin. Tulosten perusteella sulan veden aikaan vuonna 2015 jälkikosteikko pidätti typpeä keskimäärin 62 %, ja jätevedenpuhdistamolta tulevaa fosforia pidättyi jälkikosteikkoon 10 %. Ravinteita pidättyi keväällä vähemmän kuin kesällä ja syksyllä, muutoin kuin kokonaisfosforin osalta. Puhdistetun jäteveden mukana tulevien ravinteiden johdosta, levän määrä oli jälkikosteikolla niin runsasta, että se voidaan luokitella hypereutrofiseksi. Kevään kasvupyrahdyksen jälkeen kasviplanktonin määrä romahti, mikä johti vähäiseen ravinteiden pidättymiseen, ja heinäkuussa, kun levämäärä oli suurinta, puhdistamolta lähtevästä fosfaattifosforista sitoutui jälkikosteikkoon 98 %.

## 5.2 Ravinteiden kierrätys

Mikrolevien sitomien ravinteiden avulla on mahdollista ottaa typpi ja fosfori leväbiomassan kautta uudelleen kierrätettäväksi esimerkiksi lannoitteiden raaka-aineena. Leväbiomassaa on mahdollista myös tuottaa energiaksi tai käyttää eläinten rehuna. Samalla ravinteiden kuormittava vaikutus vesistöissä vähenee. Levää voidaan kasvattaa monenlaisissa jätevesissä. (Huotari 2019.) Levän tuottaminen ravinnoksi ihmisille jätevesissä edellyttäisi tarkempia tutkimuksia, sillä jätevedet sisältävät haitta-aineita, esimerkiksi raskasmetalleita (Abdel-Raoufa ym. 2012; Leponiemi 2019). Monet mikrolevälajit pystyvät sitomaan merkittäviä pitoisuuksia myrkyllisiä raskasmetalli-ioneja vesistä (Abdel-Raoufa ym. 2012).

Tällä hetkellä lannoitteiksi louhittavan fosforin arvioidaan loppuvan maailmasta noin 50 vuodessa. Typpilannoitteiden valmistukseen taas käytetään kaksi prosenttia maailman energiankulutuksesta. Yhdyskuntien ja teollisuuden jätevesien ravinnevarat puhdistetaan nykyään jätevedenpuhdistuslaitosten prosesseissa, jotka kuluttavat paljon energiaa ja kemikaaleja. Ravinteet vapautuvat kaasuna ilmaan tai saostetaan kasvien kannalta käyttökelvottomaan muotoon. (Huotari 2019.) Lammin jätevedenpuhdistuslaitoksella leväkasvun kannalta tärkeä fosfori poistuu suurimmaksi osaksi puhdistamon prosesseissa, joten kosteikkoon fosforia päätyy niukasti. Ylimääräisen fosforin voisi puhdistaa vasta kosteikosta lähtevästä vedestä, jolloin levät voisivat sitoa fosforia tehokkaammin ja ravinteita saataisiin kierrätettyä enemmän. (Keski-Häme 2019.)

Jotta ravinteet eivät pääsisi kosteikoista johdettavien vesien mukana vastaanottaviin vesistöihin levien hajoamisen tai kulkeutumisen seurauksena, levien kerääminen kosteikoista olisi välttämätöntä (Abdel-Raoufa ym. 2012). Haasteena tällä hetkellä on levien kerääminen ja jalostaminen tehokkaasti hyötykäyttöön kosteikosta (Keski-Häme 2019). Lannoitteet ovat hinnaltaan edullisia, joten olisi kehitettävä taloudellisesti kannattavia ratkaisuja. Tällä hetkellä tehokasta keräysteknologiaa vasta kehitetään yhteistyössä yritysten kanssa. (Pantsu 2018; Keski-Häme 2019.) Paras ratkaisu olisi saada levät kasvamaan mahdollisimman lähellä kohteita, joissa jätevettä kertyy. Olisi myöskin taloudellisesti edullisempaa ja kestävämpää välttää pitkiä kuljetuksia levän ravinteiden jakelussa. (Leponiemi 2019.)

## 6 KOEJÄRJESTELYT JA MENETELMÄT

### 6.1 Kokeen suorituspaikka

Lammin jätevedenpuhdistamo sijaitsee noin kilometrin etäisyydellä Lammin keskustasta Ormajärven rannalla. Ormajärvi kuuluu Ormajärven–Untulanharjun Natura 2000 alueeseen, joka on luontotyypeiltään arvokas. Ormajärveä kuormittaa hajakuormituksen lisäksi pääasiassa vain Lammin jätevedenpuhdistamon jätevedet. Ormajärvi on luokiteltu lievästi reheväksi järviyypiltään ja vedenlaadultaan hyväksi. Lammin jätevedenpuhdistamolta johdetut jätevedet vaikuttavat Ormajärven tilaan heikentämällä syvänteen happitilannetta ja hygieniaa, sekä nostamalla hieman ravinnepitoisuuksia. (Aluehallintovirasto 2014.)

Lammin jätevedenpuhdistamo on rakennettu 1972 ja sitä on laajennettu vuosina 1986 ja 2000. Lammin jätevedenpuhdistamon sijaintiin on vaikuttanut läheisen meijerin toiminta, jonka jätevesien käsittelyssä jätevedenpuhdistamo on tehnyt yhteistyötä. Meijerin toiminta on loppunut vuonna 2001. Lammin jätevedenpuhdistamolle tulee käsiteltäväksi 2 300 ihmisen talousvedet ja 300 m<sup>3</sup>/kk sako- ja umpikaivolietteitä. (Aluehallintovirasto 2014.)

Lammin jätevedenpuhdistamo on aktiivilietelaitos, joka toimii kaksilinjaisesti rinnakkaissa-ostuksella, ja se on mitoitettu ottamaan vastaan jätevettä 3360 m<sup>3</sup>/vrk, mutta tavallisesti laitokselle tulee jätevettä 890 m<sup>3</sup>/vrk. (HS-Vesi 2019.) Selkeytysaltaiden lisäksi puhdistusta tehostaa kaksi 600 m<sup>2</sup> kokoista jälkiselkeytysallasta ja neljän hehtaarin jälkikosteikko, joiden läpi vesi kulkeutuu ennen kuin puhdistettu jätevesi päätyy Ormajärveen (Aluehallintovirasto 2014; HS-Vesi 2019). Jälkikäsitteilylammikoiden ja jälkikosteikon ansiosta kiintoaineen, fosforin ja typen poistoa on kyetty parantamaan. Lammin jätevedenpuhdistamo on puhdistanut jätevettä asetettujen vaatimusten mukaisesti. (Aluehallintovirasto 2014.)

Lammin jätevedenpuhdistamon vuonna 2014 voimaan tullut ympäristölupa on asettanut puhdistukselle vaatimuksen vuosikeskiarvona, että ammoniumtyppeä saa olla enintään 4 mg/l, jossa poistotehon on oltava vähintään 90 %. Lisäksi ympäristölupa asettaa seuraavat näytekohtaiset vaatimukset:

- BOD<sub>7</sub>-luku ≤ 10 mg/l
- fosfori ≤ 10 mg/l ja reduktiot vähintään 92 %
- COD<sub>Cr</sub> < 125 mg/l ja poistoteho vähintään 75 %
- kiintoainepitoisuus < 35 mg/l ja poistoteho vähintään 90 %. (HS-Vesi 2019.)

## 6.2 Kokeiden kuvaus

LED-valot asennettiin Lammin jätevedenpuhdistamon jälkikosteikolle (kuva 1) jään alle syksyllä 2018 marraskuun lopussa. LED-valoja oli 10 kappaletta, ja ne oli sijoitettu noin 2 m:n etäisyydelle toisistaan kohtisuoraan pohjasta ylöspäin. Valot olivat Bridgeluxin valmistamia laajaspektrisiä LED-valoja, joissa punaisen aallonpituuden alue oli korostettu. Teho oli säädetty noin 120 W jokaisessa valaisimessa.



Kuva 1. LED-valot Lammin jätevedenpuhdistamon jälkikosteikossa (Huotari 2018)

Valon vaikutusta fotosynteesiin testattiin talvella 2019 kolmen kasvatuskokeen avulla kylmässä vedessä Lammin biologisen aseman laboratoriossa ja kenttäkokeen avulla kosteikolla jään alla. Kasvatuspulloista mitattiin liukoisen hapen pitoisuuden, hapen kyllästysprosentin ja pH:n muutosta, minkä perusteella levien kasvua tarkasteltiin. Vertailukohtana laboratoriossa tehdyissä kokeissa toimi pimeät pullo, joissa yhteyttämistä ei päässyt tapahtumaan valon puutteen vuoksi. Kentällä tehdyissä kokeissa happipitoisuuden muutoksia verrattiin alueeseen, jossa lisävaloa ei ollut saatavilla. Lisäksi kokeiden yhteydessä otettiin kasvi- ja eläinplanktonnäytteet, jotka määritettiin mikroskoopilla. Kokeissa mitattiin lisäksi valointensiteetit ja kentällä tapahtuvan kokeen yhteydessä seurattiin myös ravinte- pitoisuuksien muutosta kasvatuspulloissa. Bakteerien aiheuttamia happipitoisuuden muutoksia ei otettu kokeissa huomioon. Kokeissa ei myöskään laskettu valon taittumista pullojen lasi- ja muovipinnan läpi, eikä vedessä tapahtuvaa valon vaimenemista.

### 6.3 Menetelmien kuvaus

#### Perustuotannon ja liukoisen hapen mittaaminen

Kokeissa sovellettiin Gaardnerin ja Granin kehittämää valoisa- ja pimeäpullomenetelmää, jossa seurataan kasviplanktonyhteisön perustuotannossa syntyvän hapen pitoisuuden muutoksia (Reynolds 2006, 101). Valoisissa pulloissa hapen muutoksiin vaikuttaa perustuotanto ja soluhengitys. Pimeissä pulloissa tapahtuu vain soluhengitystä. Kasvatuksen jälkeen verrataan happipitoisuutta alkutilanteeseen ja valoisien ja pimeiden pullojen välillä. Valoisa- ja pullomenetelmässä virhettä aiheuttaa monet tekijät. Menetelmässä ajatellaan hengityksen olevan yhtä suurta valossa ja pimeässä, vaikka todellisuudessa valossa kasvien soluhengitys kasvaa. (Wetzel & Likens 2000, 222 - 224.) Pullokasvatus ei täysin vastaa luonnollista tilaa, sillä kasviplankton ei pääse vaeltamaan pulloissa. Lisäksi ravinteita on saatavilla rajoitetusti ja pulloissa saattaa tapahtua raskasmetallien liukenemistä, mikä voi estää tuotantoa. (Turunen 2011, 6.) Leväkasvun sitoutuneen hiilen osuus (mg C/l) laskettiin kertomalla kasvatusten liukoisen hapen pitoisuuden (DO) nettotuotanto (mg/l) fotosynteesin kaavan avulla, jossa painosuhde on  $12 \text{ mg C}/32 \text{ mg O}_2 = 0,375$  (Wetzel & Likens 2000, 223).

Laboratoriossa suoritetuissa kasvatuskokeissa ja kenttämittausten yhteydessä liukoinen happi (DO mg/l), happiprosentti (DO %) ja lämpötila (°C) mitattiin YSI ProODO Digital Professional sarjan kenttämittarilla. ProODO -mittarin toiminta perustuu optiseen luminesenssi-anturiteknologiaan, jonka mittausalue on laaja 0 - 500 %, erottelukyky on 0,1 % ja tarkkuus  $\pm 0,1 \text{ mg/l}$  (GWM Engineering 2019). Luminesenssimittarit mittaavat aikaa, joka valonsäteellä kestää kulkea valonlähteestä edestakaisin luminesenssikalvolle. Aika, jonka valonsäde käyttää matkaan, on riippuvainen liuenneen hapen määrästä nesteessä. (HyXo Oy 2019.)

Kentälle asennettujen pullojen liukoinen happi määritettiin jodometrisesti käyttäen EN 25813:1992 -standardia, joka on täysin yhteneväinen ISO 5813:1983 -standardin kanssa. Määrittäminen tunnetaan myös ns. Winklerin menetelmänä. Näytteeseen lisätään mangaani(II)hydroksidia, joka saostuu ja reagoi liuenneen hapen kanssa (kuva 2). Näyte tehdään alkaliseksi, joka sisältää jodidia. Näytteen liuennut happi hapettaa mangaanihydroksidisakan. Näyte tehdään happamaksi, jolloin sakka liukenee ja mangaani muuttuu kahden arvoiseksi. Samalla vapautuu jodia vastaava ekvivalenttimäärä kuin liuennutta happea on näytteessä. Jodin pitoisuus määritetään titraamalla se natriumtiosulfaatilla. (EN 25813 1992, 2.) Titraaminen suoritettiin Metler toLED-o pl53 -titraattorilla. Tulosten käsittely tapahtui LabX-ohjelmalla.





Kuva 2. Liukoisen hapen määrittämisessä käytetty jodometrinen menetelmä

Happipitoisuutta seurattiin lisäksi jatkuvatoimisilla automaattisilla jälkilammikkoon asennetuilla PME mini DOT -happiantureilla. Tulokset käsiteltiin miniDOT plot -ohjelmaa käyttäen. Anturit mittaavat liuoksen hapen pitoisuutta ja lämpötilaa 10 minuutin välein. Happianturin mittaustekniikka perustuu optiseen fluoresenssimenetelmään. Happianturi mittaa liuennutta happea tarkkuudella +/- 5 % ja lämpötilaa tarkkuudella +/- 0,1 °C. Happiprosenttia mitataan alueella 0 - 150 %, jossa kyllästystarkkuus on +/- 10 µmol/l. (PME 2019.)

### Veden pH ja valo-olosuhteet

Kokeiden aikana leväkasvua arvioitiin myös seuraamalla pH:n nousua. Kokeissa pH:n muutoksia mitattiin käyttäen Thermo Scientific Orion kannettavaa pH -mittaria. Valointensiteetti ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) mitattiin laboratorioskokeissa ja kenttämittausten yhteydessä Li-1000 Datalogger Li-Cor -mittaria käyttäen.

### Kasvi- ja eläinplanktonmääritykset

Jokaisen kokeen kasvatuksissa, näytevedestä suodatettiin ensin suurempi eläinplankton 25 µm:n haavin läpi. Eläinplankton kerättiin haavista aina suodatuksen jälkeen 200 ml:n ruskeisiin lasipulloihin ja säilöttiin happamalla Lugolin liuoksella. Eläinplankton määritettiin mikroskooppisesti laskemalla tiheydet kpl/l. Suodatettu näytevesi, jota oli kokeesta riippu-

en yhteensä 20 litrasta 40 litraan sekoitettiin, jonka jälkeen siitä otettiin alkutilanteen määrittämiseksi kasviplanktonnäyte. Lopputilanteessa kasvatuspullot sekoitettiin ja eri valotasojen rinnakkaisista kasvatuspulloista otettiin kasviplanktonin kokoomanäytteet. Kasviplanktonnäytettä kerättiin noin 150 ml ruskeisiin 200 ml:n lasipulloihin, joihin lisättiin happanta Lugolin liuosta. Kasviplanktonnäytettä laitettiin 50 ml sylinteriin 7 - 50 ml riippuen näyteveden sisältämästä levätiheydestä. Kasviplanktonnäyte laimennettiin vedellä niin, että sylinteri täyttyi, jos näytevesi ei riittänyt täyttämään sylinteriä. Näytteet laskeutettiin sylinterissä noin 24 tunnin ajan. Eläinplankton laskeutettiin 12 ml sylinterissä noin 24 tunnin ajan. Kasvi- ja eläinplankton näytteet määritettiin Olympus-merkkisellä käänteismikroskoopilla. Tunnistetut ja tunnistamattomat kasviplanktonit laskettiin kymmeneltä näkökentältä 40X -objektiivilla. Eläinplanktonit laskettiin keskimäärin 20 näkökentältä 20X -objektiivilla.

Kasviplanktonilajit laskettiin ensin kaavan 1 mukaisesti, josta saatiin kerroin kpl/l. Kertoimen avulla laskettiin kasviplanktonin tuorebiomassa yksikkötiheyksien perusteella. Kasviplanktonbiomassan laskennassa käytettiin apuna kasviplanktonrekisterin lajikohtaista tilavuustaulukkoa (Suomen ympäristökeskus 2015a). Tilavuustaulukot voivat helposti aiheuttaa virhettä biomassalaskuissa, sillä saman lajin yksilöiden koko voi vaihdella ympäristöolosuhteista riippuen suurestikin (Tikkanen 1986, 25). Hiilen osuus kasviplanktonin tuorebiomassasta laskettiin Suomen ympäristökeskuksen ohjeen mukaan, jossa kasviplanktonin tuorebiomassa kerrotaan laskettujen hiilikertoimien mukaan seuraavilla hiilibiomassa kertoimilla: Sinilevät = 0,22, Piilevät = 0,11, Viherlevät = 0,16, muut kasviplanktoniryhmät = 0,11 (Suomen ympäristökeskus 2016). Eläinplanktoneista laskettiin ainoastaan kertoimet (kpl/l) ja suhteutettiin tilavuus haavin läpi kulkeneen veden määrään.

Kaava 1. Kertoimen määrittäminen (Tikkanen 1986, 24)

$$\frac{a}{b} * c * \frac{d}{e} = kpl/l \quad (1)$$

a = kyvetin pohjan pinta-ala (mm<sup>2</sup>)

b = laskettujen näkökenttien yhteispinta-ala (mm<sup>2</sup>)

c = laskennassa saatu lajin kappalelukumäärä

d = vesimäärä, johon näyte suhteutetaan (ml)

e = kyvetissä laskeutettu näytevesimäärä (ml)

## Ravinnemääritykset

Laboratoriohenkilökunta suoritti ravinnemääritykset Thermo Scientific Gallery Plus diskreettilaitteella. Ammoniumtyypen määrittämiseen käytetään laboratoriossa SFS-EN ISO 11732 -standardimäärityksestä muokattua spektrofotometristä salisylaattimenetelmää. Näyte suodatetaan ennen määrittystä. Menettelyssä emäksinen natrium aiheuttaa hydrolyysireaktion, jossa syntyy hypokloriitti-ioneja. Ammoniakki ja hypokloriitti-ionit reagoivat ja muodostavat monoklooriamiinia. Sininen yhdiste muodostuu, kun monoklooriamiini ja salisylaatti-ionit reagoivat natriumin toimiessa katalysaattorina nitroprussidissa pH:n ollessa noin 12,6. Sinisen yhdisteen absorbanssi mitataan spektrofotometrisesti 660 nm:n aallonpituudella. (Ilola 2019.)

Fosfaattifosfori määritetään laboratoriossa ISO/DIS 15681-2 (FIA and CFA)-Part2 -standardista muokatulla menetelmällä. Näytteet suodatetaan ennen määrittystä. Menettelyssä ortofosfaatti-ioni muodostaa ammoniummolybdaatin ja antimoni-kaliumtartaarin kanssa antimoni-12-fosforimolybdeenihappoa happamissa olosuhteissa. Tämä pelkistetään askorbiinihapolla siniseksi kolloidiseksi kompleksiyhdisteeksi. Kompleksiyhdisteen absorbanssi on verrannollinen ortofosfaattipitoisuuden kanssa ja se mitataan spektrofotometrisesti aallonpituudella 880 nm. Kokonaisfosforin määrittäminen on periaatteeltaan sama kuin fosfaattifosforin, mutta näytettä ei suodateta ja näyte tehdään happamaksi peroksidisulfaatin kanssa autoklaavissa. (Ilola 2019.)

Nitraatti- ja nitriittityypen summan määrittämiseen käytetään Lammin biologisen aseman laboratoriossa SFS –EN ISO 13395 -standardista muokattua menetelmää CFA- ja FIA-tekniikalla. Näyte suodatetaan ennen määrittystä. Hydratsiinimenetelmää käytetään suuriin (yli 500 mg/l) pitoisuuksiin ja vanadiinimenetelmää pieniin (alle 500 µg/l) pitoisuuksiin. Hydratsiinimenettelyssä nitraatti pelkistetään nitriitiksi emäksisissä olosuhteissa hydratsiinilla. Happamissa olosuhteissa sulfaniiliamidi ja N-1-naftyylietyleenidiamiinidihydrokloridi reagoivat nitriitti-ionien kanssa ja syntyy vaaleanpunainen atsoväri. Värillinen liuos mitataan spektrofotometrisesti aallonpituudella 540 nm. Lammin biologinen asema käyttää kokonaistypen määrittämiseen SFS-EN ISO 11905-1 -standardista muokattua menetelmää. Näytteeseen lisätään natriumhydroksidia ja boorihappoa. Näyte autoklavoidaan alkalisen peroksidisulfaatin kanssa. Muuten periaate menetelmässä on sama kuin nitraatti-nitriittityypen summan määrittämisessä. (Ilola 2019.)

## 6.4 Työn kulku

### **Kasvatuskokeet laboratoriossa**

Ensimmäinen laboratoriossa tapahtuva kasvatuskoe suoritettiin 4.2 - 14.2.2019 välisenä aikana (9 vrk). Tarkoituksena oli tarkastella kasvunopeutta eri valotasolla niillä leväyhteisöillä, ravinnepitoisuuksilla ja kasvutekijöillä, mitä kosteikossa oli näytteenottohetkellä. Lämmin jätevedenpuhdistamon jälkikosteikolta, alueelta, johon oli asennettu LED-valoja, mitattiin aluksi pinta- ja pohjavedestä YSI-kenttämittarilla liukoinen happi, lämpötila ja happiprosentti. Lisäksi otettiin Limnos-vedennoutimella kannellisiin ämpäreihin yhteensä 23 litraa näytevedettä pintavedestä. Näytevedestä suodatettiin eläinplankton 25 µm:n haavin läpi, jonka jälkeen eläinplanktonnäyte kerättiin haavista 200 ml:n ruskeaan lasipulloon ja säilöttiin Lugolin liuoksella (noin 0,5 ml 200 ml kohti). Lisäksi alkutilanteen määrittämiseksi otettiin kasviplanktonnäyte suodatetusta vedestä 200 ml:n ruskeaan lasipulloon, joka säilöttiin Lugolin liuoksella.

Suodatettu näytevesi sekoitettiin ja jaettiin tasaisesti 2 litran pulloihin. Kasvatuspulloja oli kaksi rinnakkaista kullekin valotasolle. Näyteveden alkuhappitilanne ja pH mitattiin YSI-mittarilla ja Thermo Scientific Orionin kannettavalla pH-mittarilla. Kylmähuoneeseen asetettiin lisäloisteputkivalot ja lämpötila säädettiin +5 °C. Lämpötila ei täysin vastannut kosteikon olosuhteita talvella. Laiteteknisistä syistä johtuen inkubointilämpötila oli +5 °C. Kannelliset pulloasetettiin neljälle valotasolle, eli neljän eri valointensiteetin päähän kohdevalosta ja vertailupullo peitettiin niin, ettei valoa päässyt pulloihin lainkaan (kuva 3). Kasvatuspulloja sekoitettiin päivittäin. Kasvatuspulloista mitattiin kahden tai kolmen vuorokauden välein liukoisen hapen pitoisuus, happiprosentti, lämpötila ja pH. Kokeen loputtua kasvatuspulloista otettiin kasviplanktonnäytteet.



Kuva 3. Kasvatuskokeet laboratoriossa, kasvatukset eri valotasolla

Toinen kasvatuskoe laboratoriossa suoritettiin 27.2 - 7.3.2019 välisenä aikana (7 vrk). Koe suoritettiin muuten samalla tavalla kuin ensimmäinen kasvatuskoe, mutta rinnakkaisia kasvatuspulloja oli kolme. Näytevettä kerättiin ämpäreillä kosteikkoaltaan pintavedestä yhteensä 40 litraa valaistulta alueelta. Kolmas kasvatuskoe laboratoriossa suoritettiin aikavälillä 11.3 - 18.3.2019 (7 vrk). Koe suoritettiin muuten samalla tavalla kuin toinen kasvatuskoe, mutta liukoinen happi, happiprosentti, lämpötila ja pH mitattiin kasvatuspulloista päivittäin. Kasvi- ja eläinplanktonnäytteet mikroskoipoitiin ensimmäisen ja kolmannen kokeen alku- ja lopputilanteista.

### **Lammin jätevedenpuhdistamon jälkikosteikolla suoritettu koe**

Koe Lammin jätevedenpuhdistamon jälkikosteikolla suoritettiin 27.2 - 18.3.2019 välisenä aikana. Jäähän tehtiin avannot LED-alueelle ja vertailualueelle, jossa LED-valoja ei ollut. Avannoista mitattiin pinta- ja pohjaveden liukoinen happi, lämpötila ja happiprosentti YSI-kenttämittarilla. Lisäksi mitattiin LiCor-mittarilla valointensiteetit jään alta molemmista avannoista. Kokeessa käytettiin jodometrisen hapen määrittämiseen tarkoitettuja hiostulpalisia 100 ml:n Winkler pulloja, kolme rinnakkaista happi- ja pH-pulloa jokaista määrittämistä varten, josta määritettiin kaksi rinnakkaista tulosta, lisäksi muutama varapullo. Kenttäkoe kesti 19 vrk, näytteenottoa oli yhteensä kuusi ja inkuboitavia pulloja yhteensä

noin 124 kpl. Näytettä otettiin pintavedestä LED-alueelta ja vertailualueelta erillisiin saavihin 20 litraa kummaltakin alueelta. Näytevesi suodatettiin 25 µm:n haavin läpi eläinplanktonin suodattamiseksi. Eläinplanktonnäytteet otettiin haavista ja kasviplanktonnäytteet otettiin suodatetusta vedestä ja säilöttiin Lugolin liuoksella.

Saavissa vesi sekoitettiin ja jaettiin tasaisesti 100 ml:n hiostulpallisiin lasipulloihin, joiden korkit sidottiin foliolla ja kuminauhoilla. LED-alueelta ja vertailualueelta otettiin kolme pulloa pH:n määrittystä ja kolme pulloa hapen titrausta varten alkutilanteen määrittämiseksi. Näytepullot asetettiin neljään erilliseen koriin (kuva 4). Koejärjestelyssä LED-alueelta otettua vettä inkuboitiin sekä LED-alueella (LL) että vertailualueella (LV), jossa lisävaloa ei ollut. Samoin vertailualueelta otettua vettä inkuboitiin vertailualueella (VV) ja LED-alueella (VL). Näytepulloista seurattiin hapen pitoisuuden muutosta, sekä pH:n muutosta. Koreista otettiin satunnaisesti näytepulloja kolme rinnakkaista kutakin analyysiä varten kolmen tai neljän vuorokauden välein. Avannot pidettiin peitettynä Styrox-levyillä. Happi määritettiin jodometrisesti titraamalla EN 25813:1992 standardin ohjeen mukaisesti. pH mitattiin Thermo Scientific Orion kannettavalla pH-mittarilla. Ravinteet pulloista määritettiin kokeen alussa, keskellä ja lopussa. Vesinäytteet koottiin ravinnemäärityksiin pH-pulloista ja jäljelle jääneistä vesinäytteistä määritettiin pH. Kasviplankton näytteet koottiin myös lopuksi jakamalla näytevettä pH-pulloista. Happiantureita oli asennettu LED-valojen asentamisen yhteydessä marraskuussa sekä valaistulle alueelle että kahdelle vertailualueelle. Happianturit asennettiin uudelleen kentälle Winkler-pullojen asentamisen yhteydessä.



Kuva 4. Jälkikosteikolle asetetut kasvatuspullot koreissa jään alla

## 7 TULOKSET

### 7.1 Laboratoriokokeet

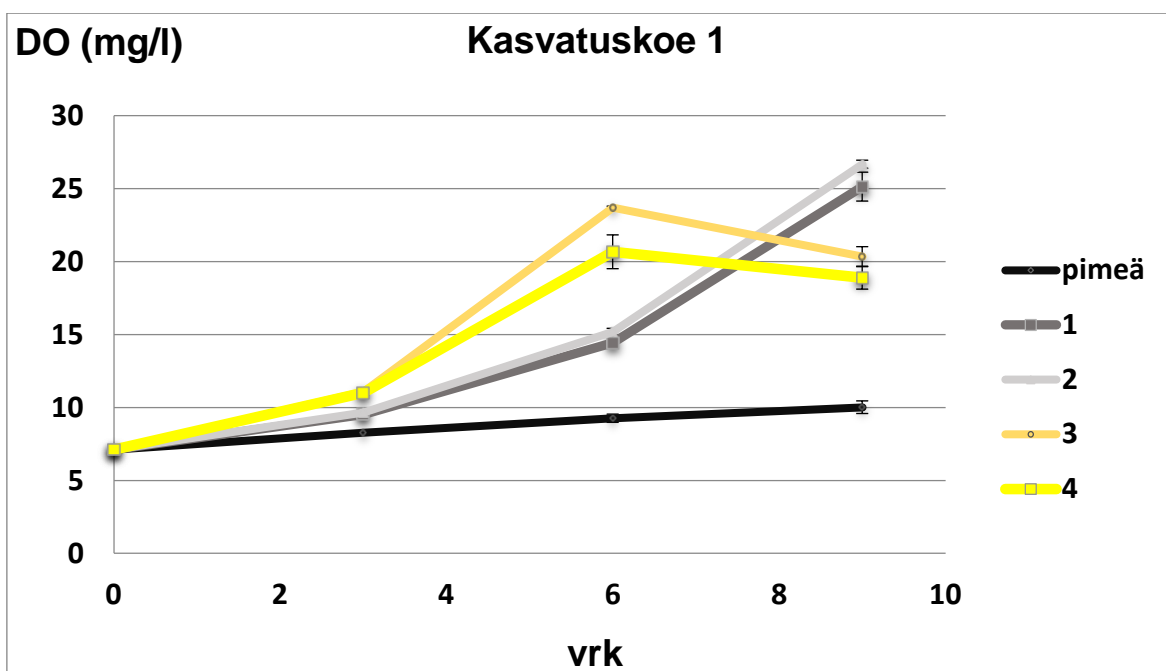
Lämpötilat vaihtelivat kasvatuskokeiden aikana välillä +5 - 9 °C. Lämpötilan vaihtelulla oli jonkin verran vaikutusta fotosynteesin hapentuotantoon kokeiden aikana ( $p = 0,206$  ja  $r^2 = 0,042$ ) (liite 1, kuvio 1). Laboratoriokokeiden alkutilanteessa kasvatusten lämpötilat ja hapen pitoisuudet olivat hieman nousseet näyteveden käsittelyn yhteydessä verrattuna jälkikosteikon olosuhteisiin kenttämittauksissa (liite 1, taulukko 1 - 4). Taulukossa 1 on esitetty laboratoriokokeiden 1 - 3 valointensiteetit eri valotasoilla.

Taulukko 1. Valointensiteetit eri valotasoilla laboratoriokokeissa 1 - 3

Valotaso	Valointensiteetti ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )		
	Koe 1	Koe 2	Koe 3
1	7	7	6
2	26	25	22
3	61	42	29
4	89	81	52

#### Koe 1

Ensimmäisessä kasvatuskokeessa DO-pitoisuus oli alkutilanteessa 7,1 mg/l (kuvio 2). Pitoisuus kasvoi voimakkaasti valotasoilla 3 ja 4 kolmannen ja kuudennen vuorokauden välillä (12,6 ja 9,7 mg/l). Valotasoilla 1 ja 2 levät kasvoivat alussa hitaammin ja hapen tuotanto nousi voimakkaimmin kuudennesta vuorokaudesta yhdeksään vuorokauteen (10,7 ja 12,5 mg/l). DO-pitoisuus kasvoi kokeen aikana suurimmaksi valotasoilla 1 ja 2 (18,0 ja 19,6 mg/l). Leväkasvussa näkyy selkeä viiveaika, ennen kiihtyvää kasvua. Pimeissä pulloissa DO-pitoisuus nousi kokeen aikana 2,9 mg/l.

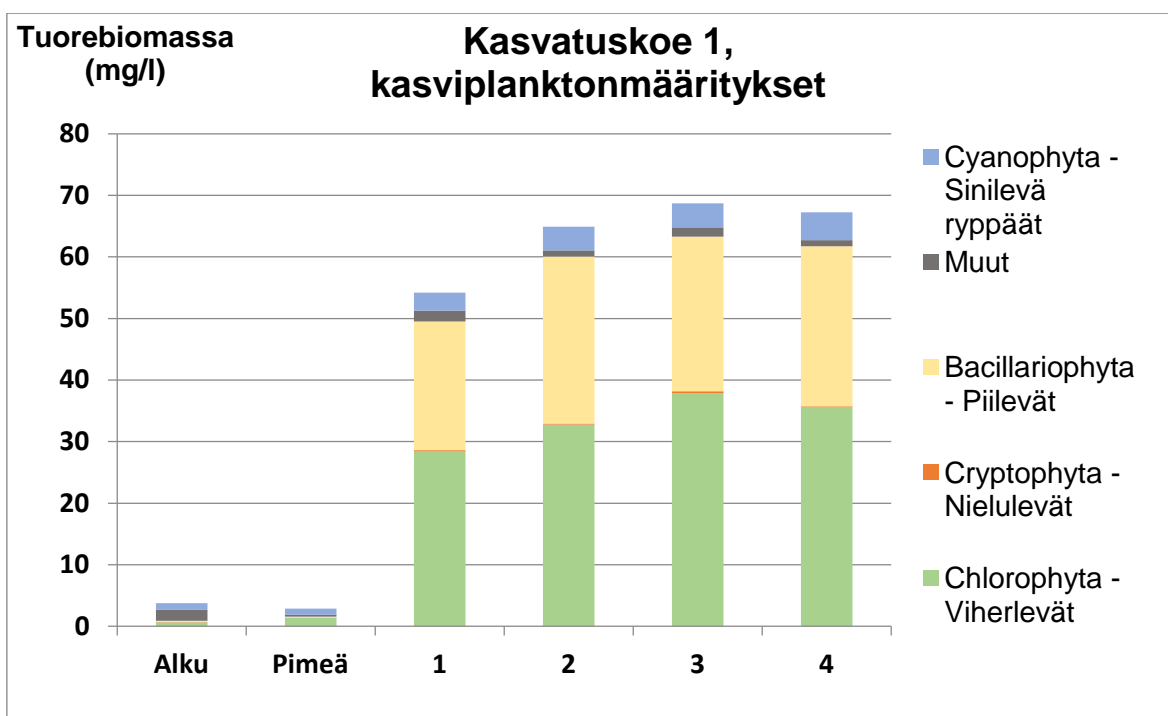


Kuvio 2. Liukoisen hapen pitoisuuden (mg/l) keskiarvo ja keskihajonta (9 vrk) kasvatuksen aikana pimeässä ja neljällä valotasolla kokeessa 1

Alkutilanteessa ensimmäisen kasvatuskokeen näyteveden pH-luku oli 7,2 (liite 2, kuvio 1). Valotasolla 3 ja 4, kasvatusten pH-luku nousi nopeasti yli yhdeksään kolmannen ja kuudennen vuorokauden aikana. Valotasolla 1 ja 2, kasvatusten pH-luku nousi nopeasti yli yhdeksään kuudennen ja kahdeksannen vuorokauden välillä. Pimeissä vertailupulloissa pH pysyi lähes samalla tasolla. Hapen kyllästysarvot Lammin jätevedenpuhdistamon jälkikosteikolla ennen ensimmäisen kasvatuskokeen näytteenottoa 4.2.2019 olivat pintavedessä 14,5 % ja puolen metrin syvyydessä 2,5 %. Hapen kyllästysarvo oli ensimmäisen kylmähuonekokeen alussa 61,9 % ja kyllästysarvo oli suurin kokeen lopussa valotasolla 1, jossa arvo oli 205,8 %. (liite 2, kuvio 2).

Kaikissa kasvatuskokeissa dominoivat viher- ja piilevät (kuvio 3). Lisäksi sinileviä oli yksittäisinä ja pienempinä rihmoina runsaasti jo lähtötilanteessa ja kasvatusten lopussa sinilevät muodostivat suurempia ryppäitä. Tunnistamattomien levien joukossa oli monia piileviä ja kaikissa kasvatuksissa myös *Mallomonas*-suvun kultaleviä. (Tikkanen 1986.) Lisäksi kasvatuksissa esiintyi jonkun verran ripsieläimiä (liite 2, taulukko 1). Ensimmäisen kasvatuskokeen alkutilanteessa 5.2.2019, kasviplanktonin tuorebiomassa oli yhteensä 3,8 mg/l (kuvio 3), mikä vastaa eutrofisen vesistön tasoa (Tikkanen 1986, 11). Kokeen aikana kasviplanktonin tuorebiomassa laski pimeissä pulloissa 0,9 mg/l. Kasviplanktonin tuorebiomassa kasvoi eniten kokeen aikana valotasolla 3 (64,9 mg/l) ja vähiten valotasolla 1 (50,4 mg/l).





Kuvio 3. Kasviplanktonin tuorebiomassa (mg/l) ja määräsuhteet alku- ja lopputilanteessa pimeässä ja neljällä valotasolla kokeessa 1 (9 vrk)

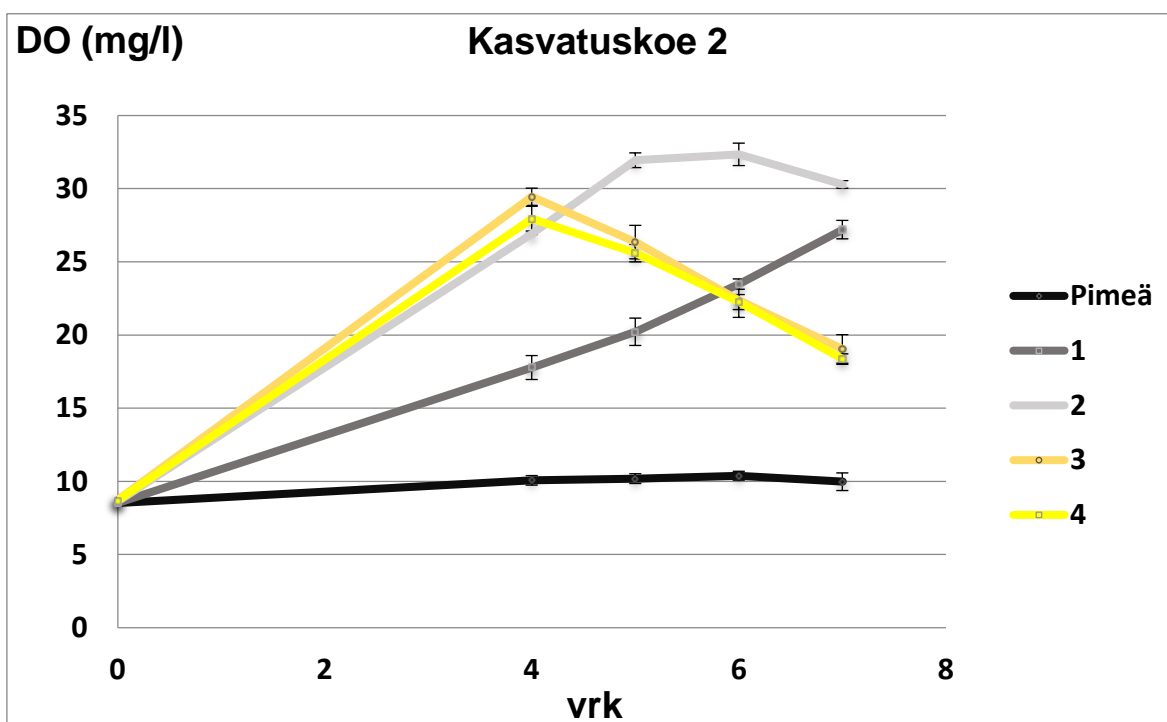
Työssä käytettyjen menetelmien vertailun helpottamiseksi, hapen tuotannolle ja kasviplanktonin tuorebiomassalle laskettiin lisäksi kokonaistuotanto sitoutuneen hiilen määrän avulla (taulukko 2). Valotasoilla 3 ja 4, DO-tuotannon perusteella laskettu hiilibiomassan tuotanto kokeen aikana oli pienempi, koska hapentuotanto lähti laskuun ennen kokeen loppumista.

Taulukko 2. Hapen tuotanto, kasviplanktonin tuorebiomassan tuotanto ja sitoutuneen hiilen avulla laskettu hiilibiomassan tuotanto molemmille menetelmille kokeessa 1 (9 vrk)

Kasvatuskoe 1					
Valotaso	Valointensiteetti	DO	Tuorebiomassa	C (DO)	C (biomassa)
	$\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$	mg/l	mg/l	mg C/l	mg C/l
pimeä		2,91	-0,93	1,09	-0,08
1	7	18,03	50,41	6,77	7,13
2	26	19,57	61,10	7,34	8,63
3	61	13,23	64,94	4,96	9,32
4	89	11,79	63,47	4,42	9,11

## Koe 2

Toisen kokeen alkutilanteessa DO-pitoisuus oli 8,6 mg/l (kuvio 4). Toinen mittaus tehtiin vasta neljän vuorokauden päästä aloituksesta, jolloin valotasolla 3 ja 4 levät lähtivät todennäköisesti kasvuun aikaisemmin ja kääntyivät laskuun mahdollisesti jo ennen neljättä vuorokautta. Valotasolla 3 ja 4, DO-pitoisuus nousi nopeasti neljän ensimmäisen vuorokauden aikana (20,7 mg/l ja 19,3 mg/l). Myös valotasolla 2 DO-pitoisuus nousi voimakkaasti samalla aikajaksolla (18,3 mg/l). Valotasolla 1 DO-pitoisuus nousi tasaisesti kokeen aikana (18,7 mg/l). Pimeässä DO-pitoisuus nousi kokeen aikana 1,5 mg/l.

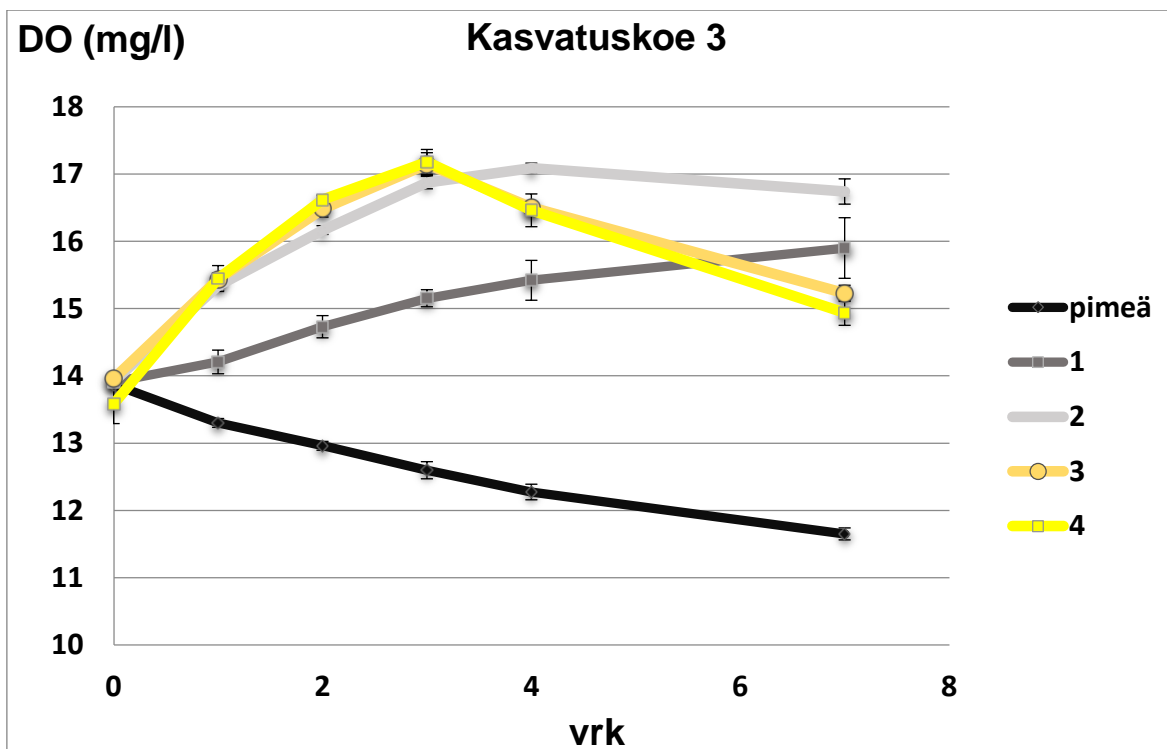


Kuvio 4. Liukoisen hapen pitoisuuden (mg/l) keskiarvo ja keskihajonta (7 vrk) kasvatuksen aikana pimeässä ja neljällä valotasolla kokeessa 2

Toisen kokeen kasvatuksissa (liite 2, kuvio 3) pH oli alussa 7,3. Seuraavan kerran pH mitattiin neljännen vuorokauden päästä aloituksesta, jolloin valotasolla 4 pH oli 9,7 ja 9,8 valotasolla 3. Neljännen vuorokauden kohdalla valotasolla 2 pH oli 9,4. Valotasolla 1 pH nousi tasaisesti kokeen aikana lukuun 9,5. Pimeässä pH pysyi samalla tasolla. Hapen kyllästysarvo Lammin jätevedenpuhdistamon jälkikosteikolla ennen toisen kasvatuskokeen näytteenottoa 27.2.2019 oli pintavedessä 42,1 % ja puolen metrin syvyydessä 13,2 %. Hapen kyllästysarvo oli toisen kokeen alussa 69,4 % ja kasvoi kokeen aikana valotasolla 2 arvoon 256,2 % (liite 2, kuvio 4). Toisen kasvatuskokeen levätiheys oli niin suurta, että laskenta mikroskooppisesti jätettiin suorittamatta. Silmämääräisesti tarkasteltuna valitsevat levälajit ja tiheysuhteet olivat samat kuin ensimmäisessä ja kolmannessa kasvatuskokeessa.

### Koe 3

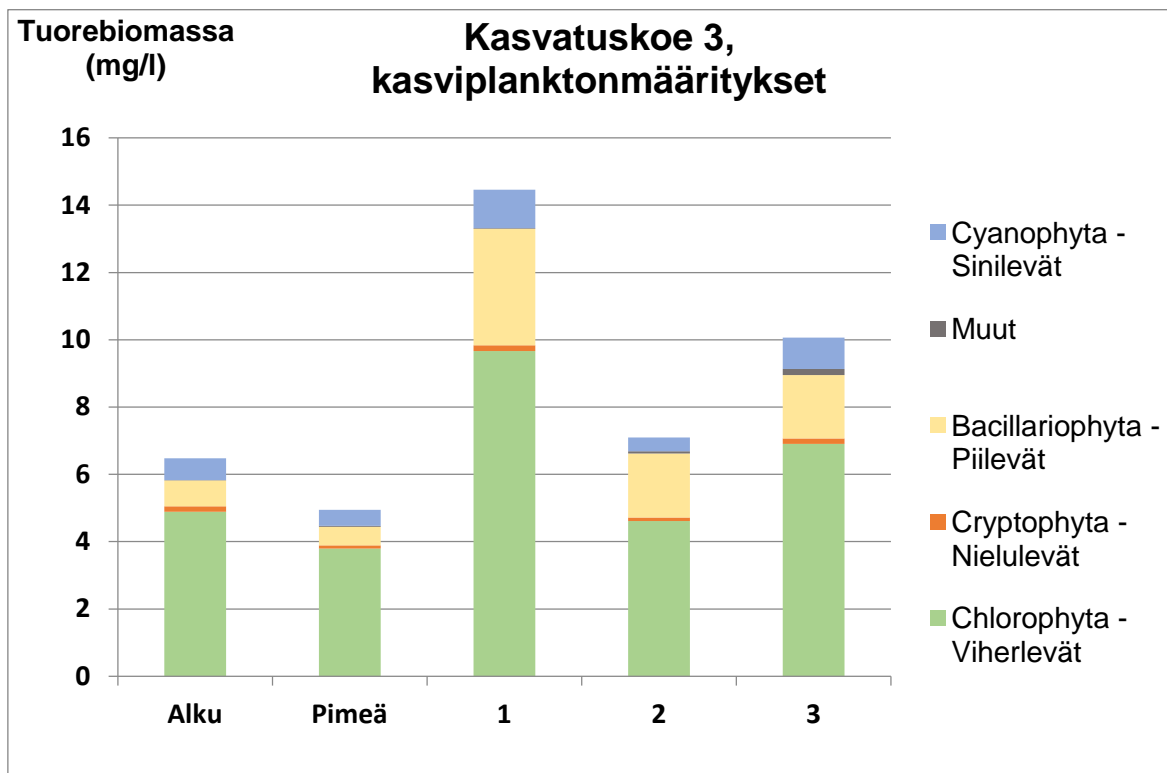
Kolmannessa kasvatuskokeessa (kuvio 5) mittaukset suoritettiin päivittäin. Kasvatusten alkuhappipitoisuus, joka oli 13,8 mg/l, oli huomattavasti suurempi kuin muiden kasvatuskokeiden alkutilanteessa. Kokeessa 3, valotasolla 3 ja 4 DO-pitoisuus nousi kolmen ensimmäisen vuorokauden aikana nopeasti (3,2 ja 3,6 mg/l). Valotasolla 2 DO-pitoisuus nousi neljän vuorokauden aikana 3,2 mg/l ja valotasolla 1 kokeen aikana 2,0 mg/l. Pimeässä DO-pitoisuus laski kokeen aikana 2,2 mg/l.



Kuvio 5. Liukoisen hapen pitoisuuden (mg/l) keskiarvo ja keskihajonta (7 vrk) kasvatuksen aikana pimeässä ja neljällä valotasolla kokeessa 3

Kolmannessa kasvatuskokeessa pH-luku oli alkutilanteessa 7,7 (Liite 2, kuvio 5). Ensimmäisen vuorokauden aikana pH oli noussut jo yli yhdeksään valotasolla 3 ja 4 (9,2 ja 9,1). pH nousi kokeen aikana lukuun 10,3 valotasolla 3. pH nousi eniten kokeen aikana valotasolla 3 ja 4, jossa muutokset olivat 2,4 ja 2,6. pH nousi kokeen aikana voimakkaasti myös valotasolla 1 ja 2 (2,1 ja 2,4). Pimeässä pH laski kokeen aikana, jossa muutos oli 0,1. Lammin jätevedenpuhdistamon jälkikosteikolla pintaveden kyllästysarvo 11.3.2019 oli 108,9 % ja lähellä pohjaa 112,1 %. Kolmannen kokeen alussa hapen kyllästysarvo oli 103,9 % ja suurin arvo kokeen aikana oli 138,6 % (liite 2, kuvio 6). Kolmannen kasvatuskokeen alkutilanteessa kasviplanktonin tuorebiomassa oli 6,5 mg/l (kuvio 6). Kasviplanktonin biomassa oli kokeen aikana kasvanut voimakkaimmin valotasolla 1 (8,0 mg/l). Valotasolla 2 ja 3 kasviplanktonin biomassa oli kasvanut kokeen aikana 0,6 mg/l ja 3,6 mg/l.

Kokeen lopussa kasviplanktonin biomassa oli laskenut pimeissä kasvatuspulloissa yhteensä keskimäärin 1,5 mg/l (Liite 2, taulukko 2).



Kuvio 6. Kasviplanktonin tuorebiomassa (mg/l) ja määrasuhteet alku- ja lopputilanteessa pimeässä ja kolmella valotasolla (6, 22 ja 40  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) kokeessa 3 (7 vrk)

Kaikkien kokeiden alkutilanteessa, ennen kasvatusta, näytevedestä poistettiin suurempi eläinplankton 25  $\mu\text{m}$ :n haavin läpi. Haavista laskeutetut eläinplanktonnäytteet mikroskoipoitiin ja laskettiin tiheydet. Eläinplanktonin määrä lisääntyi kasvatuskokeiden aikana Lammin jätevedenpuhdistamon jälkikosteikossa LED-alueella (liite 2, taulukko 3, kuvio 7). Ensimmäisen laboratoriokokeen alkutilanteessa 5.2.2019 tunnistettujen eläinplanktonlajien tiheys oli 1 041 kpl/l (tunnistamattomat mukaan lukien 5 108 kpl/l). Tunnistettujen eläinplanktonlajien tiheys oli noussut LED-alueella 27.2.2010, jossa tiheys oli 4 022 kpl/l (tunnistamattomat mukaan lukien 6 907 kpl/l). Vertailualueella 27.2.2019 tunnistettujen eläinplanktonlajien tiheys oli hieman pienempi kuin LED-alueella (3 620 kpl/l) ja tunnistamattomat mukaan lukien hieman suurempi (8 023 kpl/l). Eläinplanktonin tiheys oli kokeiden aikana suurimmillaan LED-alueella 11.3.2019, jolloin tunnistettujen lajien tiheys oli 12 011 kpl/l (tunnistamattomat mukaan lukien 18 793 kpl/l). Pääasiassa näytteissä esiintyi ripsieläimiä (*Strombidium*, *Amphileptus* ja *Paramecium*) ja rataseläimiä (*Keratella* ja *Polyartha*) (Särkkä 1984). Eläinplankton näytteissä esiintyi lisäksi runsaasti leväryppäitä, *Pediastrum Boryanum* -viherleviä ja suuria piileviä (liite 2, taulukko 4). Taulukossa 3 on esi-

tetty hapentuotannolle ja kasviplanktonin tuorebiomassalle laskettu kokonaistuotanto sitoutuneen hiilen määrän avulla kokeessa 3.

Taulukko 3. Hapen tuotanto, kasviplanktonin tuorebiomassan tuotanto ja sitoutuneen hiilen avulla laskettu hiilibiomassan tuotanto molemmille menetelmille kokeessa 3 (7 vrk)

Kasvatuskoe 3					
Tuotanto					
Valotaso	Valointensiteetti	DO	Tuorebiomassa	C (DO)	C (biomassa)
	$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	$\text{mg}/\text{l}$	$\text{mg}/\text{l}$	$\text{mg C}/\text{l}$	$\text{mg C}/\text{l}$
pimeä		-2,22	-1,53	-0,83	-0,24
1	6	1,99	7,98	0,75	1,17
2	22	2,82	0,62	1,06	0,03
3	29 - 40	1,27	3,59	0,48	0,53
4	52	1,35		0,51	

## 7.2 Koe Lammin jätevedenpuhdistamon jälkikosteikolla jään alla

Lammin jätevedenpuhdistamon jälkikosteikolla jään alla suoritettuna, 19 vuorokautta kestäneen kokeen yhteydessä sääolosuhteet vaihtelivat aurinkoisesta pilviseen. Lunta oli jään päällä eri näytteenottopäivinä 0,5 - 1,0 cm (liite 3, taulukko 1). LED-alue oli lähellä jälkikosteikon rantaa, jonka läheisyydessä isot puut varjostivat aluetta aurinkoisella säällä. Vertailualue oli lähempänä Ormajärveä, eikä varjostusta tullut mistään suunnasta.

LiCor-valomittarilla saadut tulokset vaihtelivat eri päivinä epäjohdonmukaisesti. Keskimäärin LED-alueella ja pimeällä vertailualueella mitattu valointensiteetti vedessä oli  $30 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  kokeen aikana (liite 3, taulukko 2). LED-alueella mittausta ei voitu suorittaa niin, että lisävalo olisi osunut mitattavalle alueelle ilman ympäristöstä aiheutuneita häiriötekijöitä, kuten ympäristön valo-olosuhteita. Valointensiteetit vaihtelivat LED-alueella välillä 10,9 -  $62,8 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  ja vertailualueella 14,7 -  $72 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ .

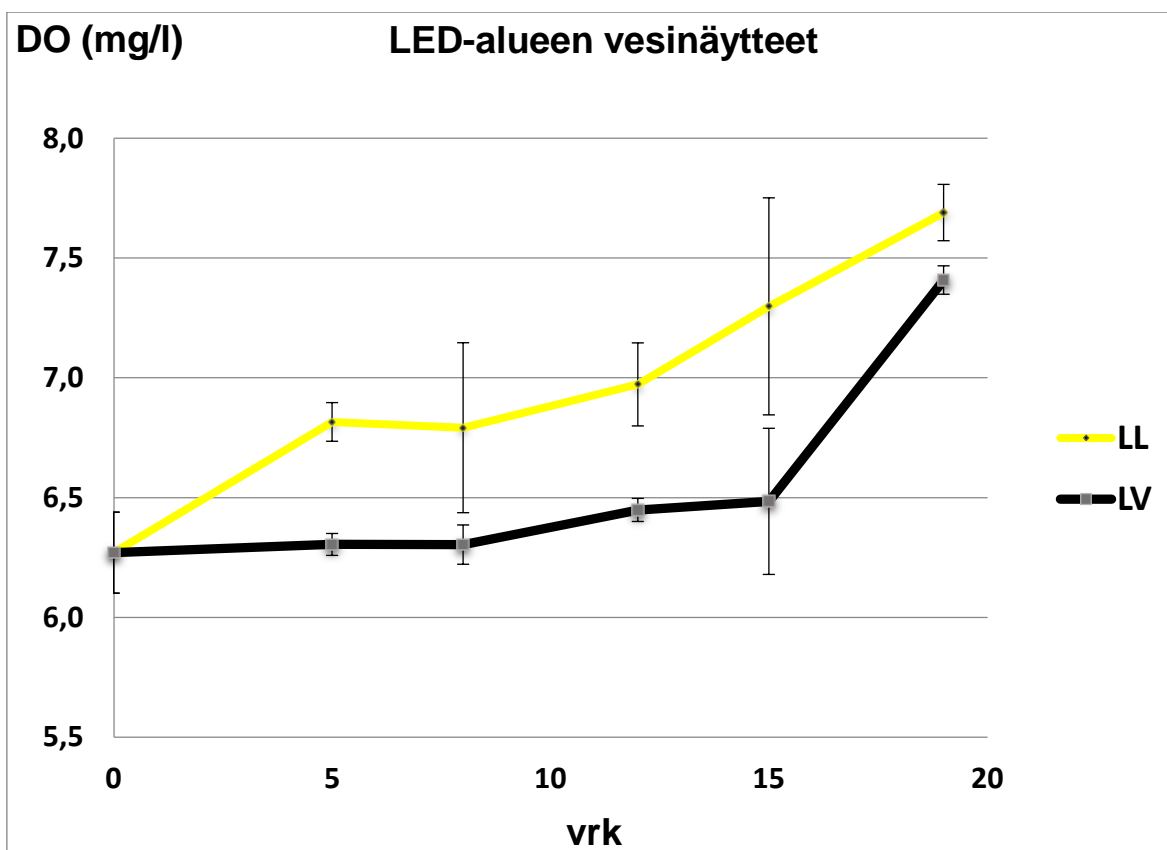
Lämpötila vaihteli pintavedessä YSI-mittarilla mitattuna LED-alueella välillä  $+0,4 - 1,1 \text{ }^\circ\text{C}$  ja puolen metrin syvyydessä välillä  $+0,9 - 1,8 \text{ }^\circ\text{C}$  (liite 3, taulukko 3). Vertailualueella lämpötila vaihteli kokeen aikana pintavedessä välillä  $+0,4 - 1,4 \text{ }^\circ\text{C}$  ja puolen metrin syvyydes-

sä välillä +1,9 - 2,6 °C. Lämpötilat olivat hieman korkeammat vertailualueella, jonka syvyys on 1,5 m, kun LED-alueella, jonka syvyys on 0,85 m.

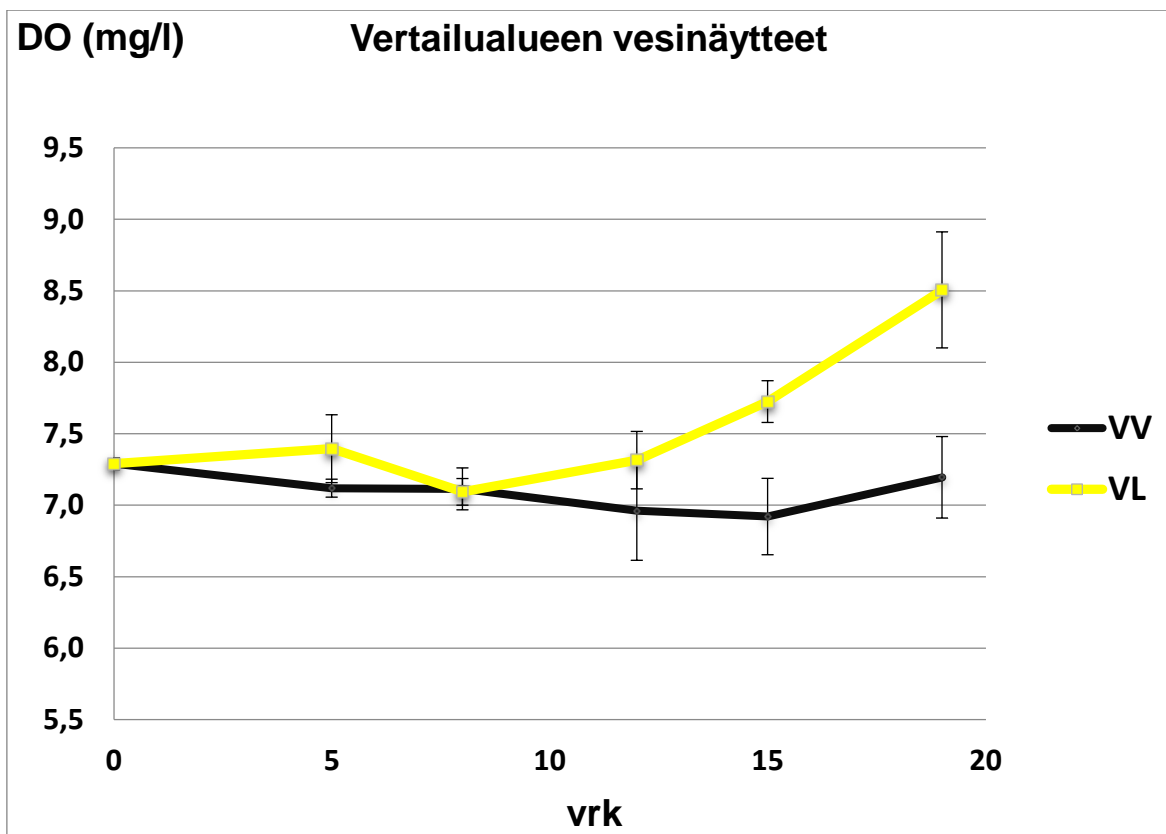
### Happipitoisuuden muutokset

YSI-kenttämittarilla mitattu DO-pitoisuus ennen näytteenottoa 27.2.2019 oli LED-alueella 6,07 mg/l ja vertailualueella 6,22 mg/l. Jodometrisesti määritettynä, suodatetun ja sekoitetun näyteveden DO-pitoisuus kasvatuspulloissa kokeen alkutilanteessa oli LED-alueen näytevedessä 6,27 mg/l (kuvio 7) ja vertailualueen näytevedessä 7,29 mg/l (kuvio 8).

DO-pitoisuus nousi 19 vuorokauden inkuboinnin aikana kasvatuksissa LL 1,42 mg/l ja kasvatuksissa LV 1,14 mg/l. Kokeen aikana DO-pitoisuus laski kasvatuksissa VV 0,09 mg/l ja nousi kasvatuksissa VL 1,22 mg/l. Nopeinta muutos oli kasvatuksissa LL vuorokausien 12 - 19 välillä, jolloin kasvu oli keskimäärin 0,72 mg/l (0,1 mg/l/vrk). DO-pitoisuuden nousu kasvatuksissa LV oli nopeinta vuorokausien 15 - 19 välillä, jolloin muutos oli 0,92 mg/l (0,23 mg/l/vrk). Kasvatuksissa VL vuorokausien 12 - 19 välillä pitoisuus nousi 1,19 mg/l (0,17 mg/l/vrk).



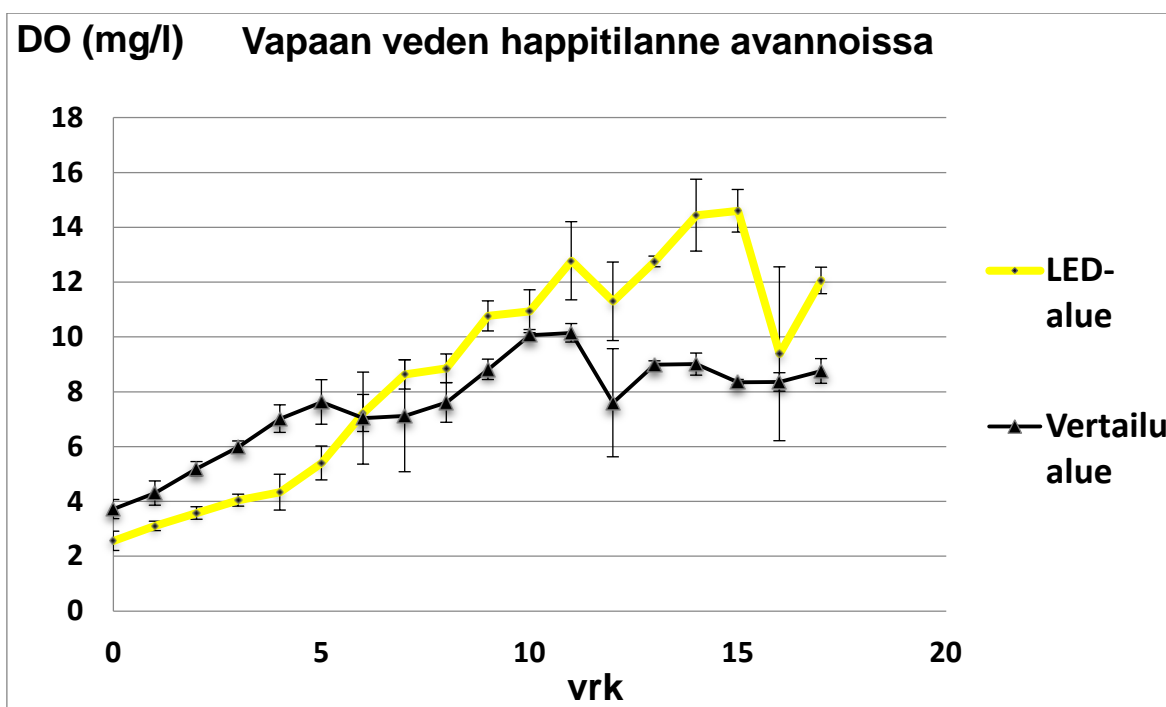
Kuvio 7. Koe jälkikosteikon jään alla; Liukoisen hapen pitoisuuden (mg/l) keskiarvo ja keskihajonta (19 vrk) kasvatuksen aikana LED-alueen näytevedessä



Kuvio 8. Koe jälkikosteikon jään alla; Liukoisen hapen pitoisuuden (mg/l) keskiarvo ja keskihajonta (19 vrk) kasvatuksen aikana vertailualueen näytevedessä

Happiantureiden mitaamat vapaan veden happipitoisuudet aikavälillä 5.12.2018 - 3.2.2019 eivät eronneet toisistaan LED-alueen ja vertailualueiden välillä (liite 3, kuvio 1). Kuviossa 9 on esitetty happiantureiden mitaamat hapen pitoisuudet keskiarvoina vuorokautta kohti avannoissa vapaassa vedessä LED-alueella ja vertailualueella noin 20:n senttimetrin päästä pohjasta kasvatuskokeen aikana. Hapen pitoisuus nousi 28.2.2019 - 17.3.2019 välisenä aikana LED-alueella 9,50 mg/l (0,56 mg/l/vrk) ja vertailualueella 5,04 mg/l (0,30 mg/l/vrk).

Avantojen hapen kyllästysarvot nousivat kokeen aikana YSI-kenttämittarilla mitattuna 27.2.2019 ja 18.3.2019 välisenä aikana LED-alueen avannon pintavedessä arvosta 42,1 % arvoon 106,8 % ja lähellä pohjaa arvosta 13,2 % arvoon 103 %. Vertailualueen avannossa hapen kyllästysarvo oli alkutilanteessa pintavedessä 43,0 % ja lopussa 122,5 % sekä lähellä pohjaa alkutilanteessa 26,4 % ja lopussa 96,5 % (liite 3, taulukko 4). Happiantureiden mitaamat hapen kyllästysarvot olivat kokeen alkutilanteessa 28.2.2019 ja kokeen lopputilanteessa 17.3.2019 LED-alueen pohjavedessä 18,5 % ja 86,8 % sekä vertailualueen pohjavedessä 27,5 % ja 64,60 %.



Kuvio 9. Koe jälkikosteikon jään alla; Happiantureiden mittaama liukoisen hapen pitoisuuden (mg/l) keskiarvo ja keskihajonta (17 vrk) kasvatuksen aikana avannoissa LED-alueella ja vertailualueella, 20 cm pohjasta

### pH:n muutokset

pH nousi kokeen aikana kasvatuksissa LL 0,1 yksikköä ja kasvatuksissa LV 0,04 yksikköä. Kasvatuksissa LV pH notkahti viiden ensimmäisen vuorokauden aikana (muutos - 0,26). Kasvatuksissa LL pH nousi kahdeksan vuorokauden aikana 0,13 yksikköä (liite 3, kuvio 2). Kasvatuksissa VL pH nousi ensimmäisten kahdeksan vuorokauden aikana 0,07 yksikköä ja kasvatuksissa VV 0,08 yksikköä. Kokeen aikana kasvatuksissa VL pH:n muutos oli 0,03 yksikköä ja kasvatuksissa VV pH pysyi samalla tasolla (liite 3, kuvio 3).

### Ravinteet

Ammoniumtyypeä kului eniten kokeen aikana kasvatuksissa LL, jossa vähenemä oli 83 µg/l (15,5 % alkupitoisuudesta) ja kasvatuksissa LV, jossa vähenemä oli 53 µg/l (9,9 % alkupitoisuudesta). Kasvatuksissa VL ammoniumtyypen vähenemä oli 26 µg/l (5,7 % alkutilanteesta) ja kasvatuksissa VV ammoniumtyppi lisääntyi 5 µg/l (1,1 % alkupitoisuudesta). Nitraatti- ja nitriittityppi lisääntyi kaikissa näytteissä kokeen aikana, josta kasvatuksissa LL 2,4 % ja LV 2,8 % alkupitoisuudesta. Kasvatuksissa VL nitraatti- ja nitriittityppi lisääntyi 8,5 % ja kasvatuksissa VV 6,7 % alkupitoisuudesta. Kokonaistyyppiä kului kokeen aikana kasvatuksissa LL 2,2 % ja kasvatuksissa LV 3,6 % alkupitoisuudesta. Kasvatuksissa VL kokonaistyyppiä kului 5,5 % ja kasvatuksissa VV 4,8 % alkupitoisuudesta.

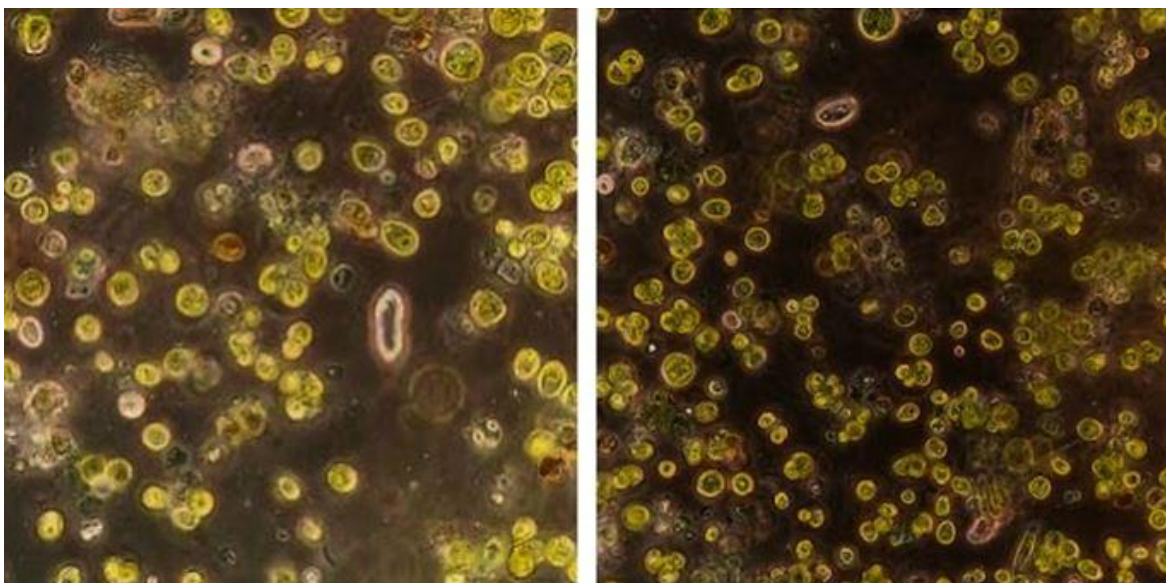


Fosfaattifosforia kului kokeen aikana kasvatuksissa LL 5,9 % ja kasvatuksissa LV fosfaattifosfori lisääntyi 14,5% alkupitoisuudesta. Kasvatuksissa VL fosfaattifosforia kului 5,2 % ja kasvatuksissa VV 0,5 % alkupitoisuudesta. Kokonaisfosfori väheni kokeen aikana kasvatuksissa LL 5,0 % ja kasvatuksissa LV 5,0 % alkupitoisuudesta. Kasvatuksissa VL kokonaisfosfori väheni 17,0 % ja kasvatuksissa VV 16,7 % alkupitoisuudesta (liite 3, taulukko 5).

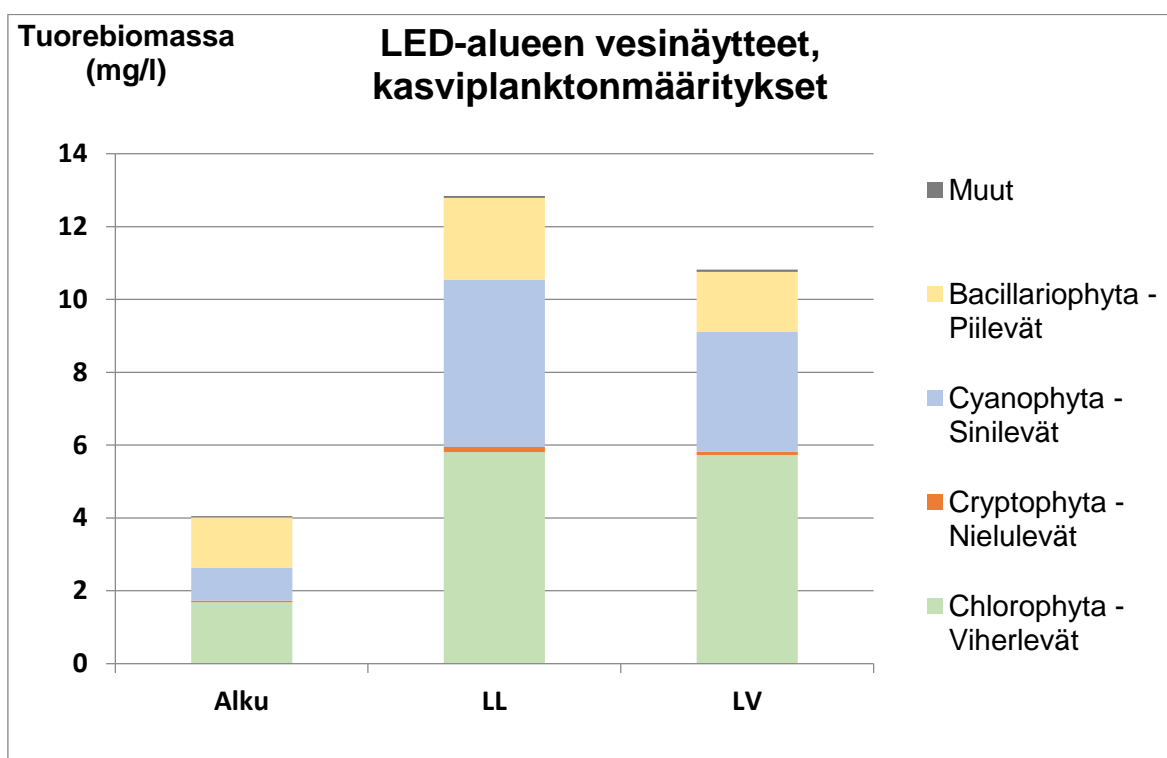
### **Kasviplanktonmääritykset**

Kasviplanktonin tuorebiomassa oli kosteikolla suoritetun kokeen alkutilanteessa 27.2.2019 LED-alueella 4,1 mg/l (eutrofinen) ja vertailualueella 2,1 mg/l (mesotrofinen) (liite 3, taulukko 6). Kasviplanktonin tuorebiomassan tuotanto oli kasvatuksissa LL (19 vrk) kokeen aikana 8,8 mg/l. Kokeen lopputilanteessa kasviplanktonin tuorebiomassa oli kasvatuksissa LL 12,8 mg/l (hypereutrofinen). Kasviplanktonin tuorebiomassan tuotanto oli kasvatuksissa LV (19 vrk) kokeen aikana 6,8 mg/l. Kokeen lopputilanteessa kasviplanktonin tuorebiomassa oli kasvatuksissa LV 10,8 mg/l (hypereutrofinen). Kasviplanktonin tuorebiomassan tuotanto oli kasvatuksissa VL (19vrk) kokeen aikana 12,1 mg/l ja tuorebiomassa kokeen lopputilanteessa 14,2 mg/l, mikä vastaa hypereutrofisen vesistön tasoa. Kasviplanktonin tuorebiomassan tuotanto oli kasvatuksissa VV (19vrk) kokeen aikana 4,8 mg/l. Kokeen lopputilanteessa kasviplanktonin tuorebiomassa oli kasvatuksissa VV 6,9 mg/l (eutrofinen). (Tikkanen 1986, 11.)

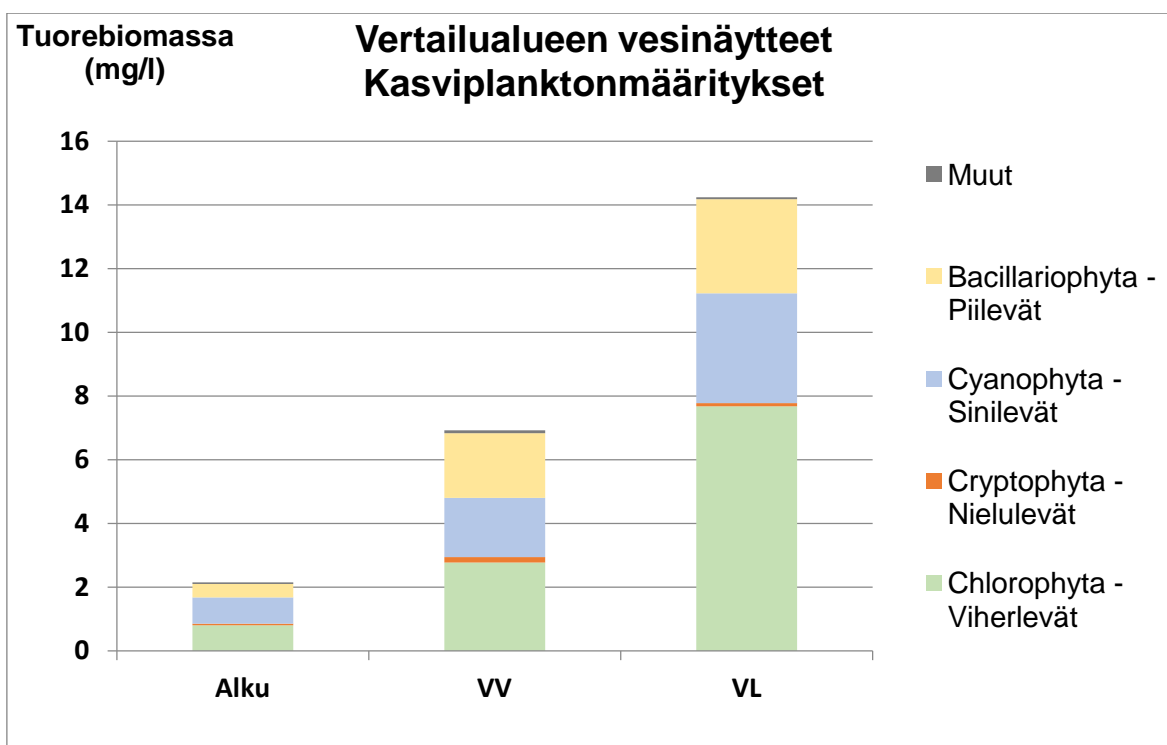
Kasviplanktonin biomassa koostui pääasiassa viherlevistä, piilevistä ja sinileväryppäistä (kuva 5, kuvat 10 ja 11). Eutrofisille vesille tyypillisiä kasviplanktonlajeja ovat kultalevät, nielulevät, sinilevät, *Chlorococcales*-lahkon viherlevät, etenkin *Scenedesmus*-suvun lajit, silmälevät ja panssarilevät. Näytteissä esiintyi eutrofiselle vesistölle ominaisista levälajeista nieluleviä, kultaleviä, sinileviä ja etenkin *Chlorococcales*-lahkon viherleviä. (Tikkanen 1986, 12 - 13.)



Kuva 5. Näytteissä esiintyneitä kasviplanktonlajeja



Kuvio 10. Koe jälkikosteikon jään alla; Kasviplanktonin tuorebiomassa mg/l ja määräsuhteet alku- ja lopputilanteessa LED-alueen näytevedessä (19 vrk)



Kuvio 11. Koe jälkikosteikon jään alla; Kasviplanktonin tuorebiomassa mg/l ja määräsuhteet alku- ja lopputilanteessa vertailualueen näytevedessä (19 vrk)

Jälkikosteikon jään alla suoritetun kokeen tuloksista laskettiin myös levätuotanto sitoutuneen hiilen määrän avulla DO-tuotannosta ja kasviplanktonmäärityksistä. Tuotannot on esitetty taulukossa 4. Kasviplanktonmäärityksistä laskettu kasviplanktonin hiilibiomassa oli huomattavasti suurempi kaikissa kasvatuksissa, kuin hapen tuotannosta laskettu kasviplanktonin hiilibiomassa.

Taulukko 4. Hapen tuotanto, kasviplanktonin tuorebiomassan tuotanto ja sitoutuneen hiilen avulla laskettu hiilibiomassan tuotanto molemmille menetelmille kasvatuskokeessa jälkikosteikon jään alla (19 vrk)

<b>Kasvatuskoe jälkikosteikon jään alla</b>				
	<b>DO</b>	<b>Tuorebiomassa</b>	<b>C (DO)</b>	<b>C (biomassa)</b>
<b>Kasvatukset</b>	mg/l	mg/l	mg C/l	mg C/l
LL	1,42	12,84	0,53	1,58
LV	1,14	10,82	0,43	1,21
VV	-0,09	6,93	-0,04	0,74
VL	1,22	14,24	0,46	1,96

## 8 TULOSTEN TARKASTELU

### 8.1 Levätuotanto laboratorikokeissa

Leväkasvatuksessa esiintyy yleensä viisi vaihetta, ensimmäisessä vaiheessa levien kasvussa tapahtuu pientä viivettä levien sopeutuessa fysiologisesti aineenvaihdunnan ja ympäristöolosuhteiden muutoksiin (Lavens & Sorgeles 1996). Ensimmäisessä kasvatuskokeessa oli selkeä viive ennen eksponentiaalista kasvun vaihetta. DO-pitoisuudet nousivat kokeen lopussa muita kasvatuksia suuremmaksi valotasoilla 1 ( $7 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) ja 2 ( $26 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ), jossa vähäisempi valointensiteetti saattoi pidentää viiveaikaa, jolloin levät ehtivät sopeutumaan kasvatolosuhteisiin paremmin kuin muilla valotasoilla.

Toisessa vaiheessa levä kasvaa kiihtyvällä nopeudella, kunnes kasvu saavuttaa maksimikasvunopeuden. Kun kasvu on saavuttanut maksiminopeuden, kasvu hidastuu. (Lavens & Sorgeles 1996.) Fotosynteesi kasvaa lineaarisesti valon määrän kasvaessa tilanteissa, joissa vain valo rajoittaa leväkasvua. Kun kasvu saavuttaa saturaatiopisteen, fotosynteesin tuotanto hidastuu, eikä valon määrä enää kiihdytä kasvua. Saturaatiopiste vaihtelee levälajien mukaan välillä  $90 - 250 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ . (Nieminen 2013, 6.) Hapen tuotannon muutokset kolmessa kokeessa laboratoriossa olivat keskenään samankaltaisia, jossa valointensiteetin ollessa välillä  $42 - 89 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , hapen tuotanto saavutti maksimimaalisen kasvun nopeammin kuin pienemmissä valointensiteeteissä. Lähes samaan hapen tuotannonopeuteen ylsivät toisen ja kolmannen kasvatusten osalta myös valointensiteeteissä  $22 - 25 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  kasvaneet levät.

Toisen kasvatuskokeen hapen tuotannon nousu oli lähes kaikissa kasvatuksissa yli kaksinkertainen eksponentiaalisen kasvun aikana verrattuna ensimmäiseen kokeeseen. Lisäksi pitoisuus kasvoi kaikissa kasvatuspulloissa nopeammin kuin ensimmäisessä kokeessa. Happipitoisuus oli toisen kokeen alussa suurempi kuin ensimmäisen kokeen alussa. Tämä voi johtua siitä, että avantojen teon yhteydessä pintaveteen on todennäköisesti ehtinyt liueta happea ennen toisen kasvatuskokeen näytteenottoa. Lisäksi kasviplanktonmääritysten perusteella levän määrä oli ehtinyt lähteä kasvuun jälkikosteikossa LED-alueella verrattuna helmikuun alkutilanteeseen. Myös kolmannessa kokeessa hapen pitoisuus oli selkeästi edellisten kokeiden alkupitoisuutta suurempi. Kolmas koe aloitettiin 11.3.2019, jolloin kasviplanktonmääritysten perusteella leväbiomassa oli noussut jo pitoisuuteen  $6,5 \text{ mg}/\text{l}$ . Koska kolmannessa kokeessa happipitoisuus oli jo alussa korkea, happimäärä lisääntyi nopeasti ensimmäisten päivien aikana valointensiteeteissä  $29 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  ja  $52 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , mutta kääntyi jo kolmannen päivän kohdalla laskuun. Hapen kyllästysarvot nousivat kaikissa kokeissa samassa suhteessa kokeiden aikana liukoisen hapen pitoi-

suuden nousun kanssa. Pimeiden pullojen hapen pitoisuudet ensimmäisessä ja toisessa kasvatuskokeessa olivat hieman nousseet, joten soluhengitystä oli kasvatuksissa mahdoton arvioida. Kolmannen kasvatuskokeen yhteydessä pimeiden pullojen hapen pitoisuus lähti voimakkaasti laskuun, mikä viittaa siihen, että leväntuotanto oli aktiivista jo ennen näytteenottoa, jolloin soluhengitys kulutti happea pimeissä pulloissa nopeasti.

Leväkasvua rajoittaa kasvatuksissa ravinteiden kuluminen, pH:n nousu, hiilidioksidin kuluminen tai muut kemialliset ja fysikaaliset tekijät. Neljännessä kasvun vaiheessa levän kasvu on tasaista rajoittavien tekijöiden vaikuttaessa kasvuun. Lopulta ravinteet kuluvat loppuun ja olosuhteet saavat solut hajoamaan. (Lavens & Sorgeles 1996.) pH:n muutokset olivat kokeissa hyvin yhteneväiset hapen muutosten kanssa. Kun pH nousi lähelle kymmentä, hapentuotanto hidastui, mikä viittaa hiilidioksidin kulumiseen.

Kun ravinteita on saatavilla tarpeeksi ja ympäristöolosuhteet ovat optimaaliset levän kasvun kannalta, valonpuute on tärkein fotosynteesiä rajoittava tekijä. Lämpötila voi rajoittaa kasvua, jos valoa ja ravinteita on tarpeeksi. (Eppley 1972, 1064.) Burnt & Lee (1970) huomasivat tutkimuksissaan, että valo rajoitti piilevien kasvua jään alla, joka oli peittynyt lumella, kun taas piilevien kasvu oli lämpötilarajoitteinen jään alla, jonka päällä ei ollut lunta (Eppley 1972, 1077). Leväkasvu aktivoituu usein lämpötilan noustessa +5 - 25 °C. Maksimikasvu vaihtelee levälajista riippuen välillä +25 - 40 °C (Reynolds 2006, 106). Kasviplanktonmäärittysten perusteella ensimmäisessä kokeessa kylmähuoneessa leväbiomassa kasvoi kaikilla valotasolla kokeen aikana 50 - 65 mg/l, mikä osoittaa selkeästi, että pienikin valomäärän nousu lisää leväntuotantoa huomattavasti veden lämpötilan ollessa +5 - 9 °C. Toisen kasvatuskokeen kasviplanktonmäärät olivat niin tiheitä, että voidaan arvioida kasvun olevan reilusti yli 65 mg/l (7 vrk) kokeen aikana. Kolmannessa kokeessa leväbiomassan kasvu jäi 0,1 - 8,0 mg/l välille. Lesutienė, Gorokhova, Stankevičienė, Bergman & Greenberg (2014) havaitsivat, että jo pieni valointensiteetin lisääminen voi nostaa levien perustuotantokykyä lämpötilassa +11,7 - 14,0 °C. Osa tutkimuksista on painottanut, että valo on tärkein rajoittava tekijä levän kasvussa. On myös havaittu, että ravinteet voivat toimia rajoittavana tekijänä, vaikka valointensiteetti olisi levälajille optimaalista tasoa alhaisempi.

Kasvatuskokeiden aikana laboratoriossa levämäärät kasvoivat nopeasti suurimmassa osassa kasvatuspulloista hypereutrofiselle tasolle, vaikka kasvatuskokeet olivat suhteellisen lyhyet, eikä maksimaalista leväkasvua pyritty ylläpitämään kasvatuspullojen olosuhteiden osalta (Tikkanen 1986, 11). Tarkoitus oli tarkastella leväntuotannon reagoimista äkilliseen valon lisääntymiseen alueella, jossa levät olivat jo ehtineet sopeutua LED-valoihin

kosteikossa. Laboratoriokokeissa virhettä on saattanut aiheutua jonkin verran etenkin mitausten yhteydessä, jolloin happea on saattanut liueta ilmasta kasvatuspulloihin.

### **Käytettyjen menetelmien vertaaminen toisiinsa**

Ensimmäisen kasvatuskokeen hapen tuotannon ja kasviplanktonlaskennan perusteella laskettu perustuotanto sitoutuneen hiilen määränä ilmoitettuna vastasi toisiaan valotasoilla 3 ja 4. Valotasoilla 1 ja 2, hapen tuotannosta laskettu kasviplanktonin hiilibiomassa oli pienempi kuin kasviplanktonmääritysten hiilibiomassa. Tämä voi johtua soluhengityksen suhteellisen osuuden lisääntymisestä verrattuna hapen tuotantoon kasvatuskokeiden loppupuolella, kun kasvu hidastui ja hapen tuotanto lähti laskuun. Lisäksi kasvatuksissa on voinut tapahtua hajotustoimintaa kokeen loppupuolella, mikä lisää hapen kulutusta (Gran ym. 2001, 16; Scholz 2006, 95; Niinimäki & Penttinen 2014, 11). Pimeässä kasviplanktonlaskennasta saatu kasviplanktonin hiilibiomassa oli pienempi kuin hapen tuotannosta laskettu kasviplanktonin hiilibiomassa, mikä voi viitata bakteeritoimintaan kasvatuksissa. Kasviplanktonin laskeminen mikroskoopilla ja tilavuustaulukon perusteella laskettu biomassa aiheuttaa myös jonkin verran virhettä keskimääräisten tilavuuksien arvioinnissa eri levälajeille (Tikkanen 1986, 25).

Kolmannessa kokeessa hapen tuotannosta ja kasviplanktonmäärityksistä laskettu kasviplanktonin hiilibiomassa erosi toisistaan valotasolla 2 ( $22 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ). Muiden valotasojen osalta kasviplanktonin hiilibiomassat vastasivat hyvin toisiaan. Kolmannessa kokeessa hapen tuotanto nousi nopeasti jo ensimmäisten vuorokausien aikana ja kääntyi pian laskuun kasvatuspullojen olosuhteiden rajoittaessa kasvua.

## **8.2 Levätuotanto LED-alueella ja vertailualueella**

Jälkikosteikolla jään alla suoritettuna kokeen yhteydessä levämäärä kasvoi (19 vrk) kokeen aikana hapen tuotannon perusteella eniten kasvatuksissa LL ja kasviplanktonmääritysten perusteella kasvatuksissa VL. Toiseksi eniten levämäärä kasvoi kokeen aikana hapen tuotannon perusteella kasvatuksissa VL ja kasviplanktonmääritysten perusteella kasvatuksissa LL. Levämäärä kasvoi sekä hapen tuotannon, että kasviplanktonmääritysten perusteella myös hyvin myös kasvatuksissa LV ja vähiten kasvatuksissa VV. Vertailualueella helmikuun lopussa ja maaliskuussa luonnonvalo lisääntyi, niin ettei varjostusta tullut mistään suunnasta. LED-alueen näytevedessä kasvaneet levät olivat todennäköisesti sopeutuneet lisävalon määrään, mikä saattoi auttaa leviä reagoimaan nopeammin luonnonvalon määrän lisääntymiseen vertailualueella.

Jälkikosteikolla suoritettuna kokeessa (19 vrk) hapen tuotannosta laskettu kasviplanktonin hiilibiomassan tuotanto oli noin kolme kertaa pienempi kaikissa kasvatuksissa verrattuna

kasviplanktonmäärittysten perusteella laskettuun kasviplanktonin hiilibiomassan tuotantoon. Soluhengitystä ei kokeen aikana arvioitu, joten todennäköisesti 100 ml:n pullokasvatuksissa levän kasvu on kuluttanut soluhengityksen kautta osan hapen tuotannosta.

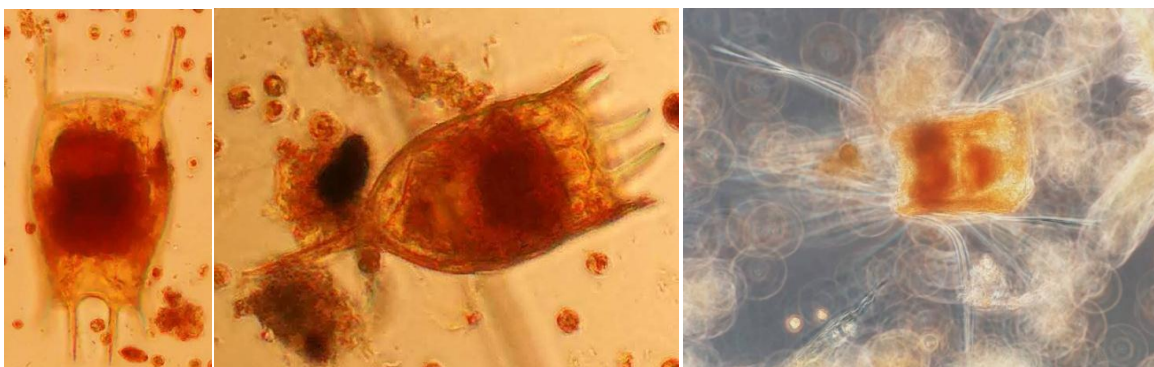
Ruponen (2018, 31) tutki pro gradu -tutkielmassaan Lammin puhdistamon jälkikosteikon leväkasvua, jossa elokuussa 2015 kokonaisleväbiomassa oli 520 mg C/m<sup>3</sup>. Mikroskooppisesti määritettynä leväbiomassa oli tämän työn tulosten perusteella helmikuun alussa LED-alueella 569 mg C/m<sup>3</sup>, helmikuun lopussa 629 mg C/m<sup>3</sup> ja vertailualueella helmikuun lopussa 367 mg C/m<sup>3</sup>. Ruposen (2018, 31) saamien tulosten perusteella biomassa oli syksyn 2015 aikana 1 400 mg C/m<sup>3</sup>. Leväkasvu tässä työssä kosteikossa jään alla (19 vrk) kasvatuksissa oli suurimmillaan happipitoisuuden perusteella 500 mg C/m<sup>3</sup> ja mikroskooppisesti määritettynä kasvatuksissa VL 1 900 mg C/m<sup>3</sup>, jossa kokonaisbiomassa oli kokeen lopussa 2 329 mg C/m<sup>3</sup>. Ruposen (2018, 31) saamien tulosten perusteella kasviplanktonin kokonaisbiomassa oli vuonna 2015 kevätpiikin aikana 3 150 mg C/m<sup>3</sup>. Tämän työn perusteella saadut tulokset osoittavat, että levätuotanto lisääntyy merkittävästi myös lämpötilan vaihdellessa 0,4 - 1,1 °C välillä, jos valoa on saatavilla riittävästi.

Tuloksia voivat vääristää monet virhettä aiheuttavat työvaiheet laskennassa, mikroskoipoinnissa ja näytteenotossa (Tikkanen 1986, 12 - 13). Virhettä on aiheutunut etenkin arvioidessa kasviplanktonilajien tilavuuksia tilavuustaulukon avulla. Lisäksi levätiheydet laskettiin ainoastaan kymmenen näkökentän perusteella, mikä vääristää helposti solumääriä ylöspäin. Tässä työssä virhettä aiheuttaneiden tekijöiden vuoksi kasviplanktonmäärittysten perusteella lasketut leväbiomassan kasvut voivat vääristää tuloksia ylöspäin verrattuna Ruposen (2018, 31) saamiin tuloksiin. Tämän työn kokeiden tulokset määriteltiin samoilla laskentamenetelmillä, joten ne ovat vertailukelpoisia keskenään.

Ravinnepitoisuuksien muutoksiin kasvatuspulloissa saattoi vaikuttaa monet tekijät. Ammoniumtyypeä kului kokeiden aikana hyvin, mutta nitraatti- ja nitriitipitoisuudet kasvoivat. Osa ammoniumtypestä kului todennäköisesti levien käyttäessä sitä kasvuunsa. On mahdollista, että kasvatuspulloissa tapahtui myös nitrifikaatiota, jossa bakteerit tuottavat ammoniumtypestä nitraatteja ja nitriittejä, mikä selittäisi ammoniumin kulumisen ja nitriittien ja nitraattien lisääntymisen kasvatuspulloissa (Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry 2013). Fosfaattifosfori lisääntyi kasvatuksissa LV huomattavasti. Tämä voi johtua leväbiomassan hajoamisesta, sillä happipitoisuus lähti nousuun vasta viidentoista vuorokauden kohdalla. On todennäköistä, että levät reagoivat äkilliseen ympäristönvaihdokseen ja valon vähenemiseen kokeen alkutilanteessa kasvatuksissa LV. Mikrobit hajottavat kuolleisiin eliöihin sitoutuneen fosforin takaisin levien käyttöön (Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry 2013).

### 8.3 Eläinplanktonmääritykset kaikissa kokeissa

Eläinplanktonin laskennassa virhettä aiheutui planktonitiheyden määrittämisessä, mikä perustui keskimäärin 20 näkökentän tuloksiin. Tunnistamattomien eläinplanktonlajien osalta virhettä todennäköisesti aiheutui enemmän. Eri näytteenottoaikoina LED-alueella tulosten perusteella tunnistettujen eläinplanktoneiden yhteismäärä kasvoi 10 970 kpl/l helmikuun alusta maaliskuun puoleen väliin. Eläinplanktonit ovat kuluttajia, joista toiset käyttävät ravinnokseen kasviplanktonia ja bakteereita, osa toisia eläinplanktonlajeja (Niinimäki ym. 2010, 54). LED-alueella tunnistettujen eläinplanktoneiden lukumäärä (4 022 kpl/l) oli hiukan suurempi kuin vertailualueella (3 620 kpl/l) (kuva 6). Näiden tulosten perusteella ei kuitenkaan ole mahdollista tarkastella eläinplanktonin laidunnuksen vaikutusta leväkasvuun LED-alueella. Tarkastelussa tulisi ottaa huomioon myös eläinplanktonia syövä muu eliöstö kosteikossa alueiden välillä.



Kuva 6. Näytteissä esiintyneitä rataseläimiä, jossa vasemmalla *Keratella quadrata*, keskellä *Keratella cochlearis* ja oikealla *Polyartha dolichoptera*

Monet ripsieläimet käyttävät ravinnokseen pienempiä leviä pikoplanktonista nanoplanktoniin eli kokoluokan 0,2 - 20 µm leviä (Zhang 2019). Kokeissa osa pienemmistä ripsieläimistä ei suodattunut eläinplanktonin mukana, vaan jäi kasvatuspulloihin. Ensimmäisen kokeen aikana kylmähuoneessa ripsieläinten biomassa kasvoi kaikissa kasvatuspulloissa välillä 0,1 - 0,6 mg/l. Kolmannessa kokeessa ripsieläinten määrä kasvoi kaikissa kasvatuspulloissa kokeen aikana välillä 0,0 - 0,03 mg/l. Jälkikosteikolla suoritetun kokeen aikana (19 vrk) ripsieläinten biomassa nousi kasvatuksissa LL 0,09 mg/l ja LV 0,03 mg/l. Ripsieläinten biomassa nousi kokeen aikana kasvatuksissa VV 0,11 mg/l ja VL 0,01 mg/l. Ripsieläinten lisääntyminen saattoi vaikuttaa kasvatuspullojen leväbiomassan kasvuun etenkin kasvatuksissa LL ja VV.



## 9 YHTEENVETO

Työssä tavoitteena oli tutkia lisävalon vaikutusta levän kasvuun talviolosuhteissa kylmässä vedessä, kun luonnonvalon saanti estyy jääpeitteen vuoksi vesistöissä. Valon vaikutusta levän kasvuun testattiin suljettujen kasvatuspullojen avulla laboratorion kasvatushuoneessa, jossa lämpötila vaihteli +5 - 9 °C välillä ja kosteikkovedessä jään alla, jossa lämpötila vaihteli pintavedessä +0,4 - 1,1 °C välillä.

Laboratoriokokeiden tulokset osoittivat, että vähäinenkin valon lisääminen nosti levätuotantoa huomattavasti. Hapen tuotannon ja pH-luvun muutokset osoittivat, että lisävalo nosti levätuotantoa nopeasti jo ensimmäisten vuorokausien aikana niissä näytevesissä, joiden leväyhteisö oli jo kosteikolla aloittanut tuotantonsa. Ensimmäinen laboratoriokoe, joka aloitettiin 5.2.2019, kävi kylmähuoneessa läpi muutaman vuorokauden viiveajan, ennen eksponentiaalisen kasvun vaihetta. Nopeinta levätuotanto oli kaikissa laboratoriokokeissa valointensiteeteissä 42 - 89  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ . Toisen ja kolmannen kokeen aikana, levätuotanto oli lähes yhtä nopeaa myös valointensiteeteissä 22 - 25  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ . Myös vähemmän valoa saaneiden kasvatusten leväbiomassa nousi kokeen lopussa hypereutrofiselle tasolle.

Kosteikolla jään alla suoritetun kokeen kasvatuksissa hapen tuotannon kasvut olivat vähäisiä, mutta tuloksissa eri alueiden ja näytevesien kesken oli kuitenkin selkeitä eroja. Vertailualueen kasvatuksissa, hapen tuotannon kasvu oli selkeästi vähäisempää kuin LED-alueella. Kasviplanktonmääritysten perusteella levätuotanto oli LED-alueen kasvatuksissa lähes kaksinkertaista verrattuna vertailualueen leväkasvuun ja biomassa nousi hypereutrofiselle tasolle. Levätuotanto kasvoi merkittävästi ottaen huomioon, että veden lämpötila oli kokeen aikana +0,4 - 1,1 °C.

Levätuotanto lisääntyi kosteikossa LED-alueella helmi- ja maaliskuun aikana myös vapaassa vedessä kasviplanktonnäytteiden perusteella. Tämä voi mahdollisesti nopeuttaa ja lisätä levätuotantoa myös kevätpiikin aikaan LED-alueella, jossa levät ovat jo ehtineet sopeutumaan lisävalon aiheuttamaan stressiin talven aikana. Toisen ja kolmannen laboratoriokokeen tulokset viittaavat siihen, että LED-valojen ansiosta levät pystyvät mahdollisesti reagoimaan lisääntyvään luonnonvalon määrään kevään aikana nopeammin, mikä voi nostaa levätuotantoa. Levät reagoivat lisävaloon nopeasti ensimmäisten vuorokausien aikana toisessa ja kolmannessa kokeessa, jossa myös liukoisen hapen alkupitoisuudet, sekä alkubiomassat olivat suuremmat.

Työssä virhettä aiheuttivat monet tekijät. Kosteikolla suoritetun kokeen yhteydessä soluhengityksen osuutta hapen tuotannossa ei arvioitu, sillä kasvatuspulloja oli rajoitettu mää-

rä, joten pimeät vertailunäytteet jätettiin kokonaan kokeesta pois. Lisäksi virhettä aiheutui jonkin verran ripsieläinten lisääntyessä kasvatuspulloissa kenttäkokeen aikana. Kasviplanktonmääritysten osalta menetelmällistä virhettä saattoi aiheutua lajien tunnistuksen ja biomassan arvioinnissa. Suhteet biomassan arvioinnissa kokeiden välillä säilyivät kuitenkin vertailukelpoisina toisiinsa nähden.

Tämän työn perusteella voidaan todeta, että LED-valojen asentaminen jään alle lisäsi huomattavasti levätuotantoa ja menetelmää kannattaa hyödyntää jatkossakin. Jotta menetelmää voitaisiin hyödyntää laajemmassa mittakaavassa, edellyttäisi se jatkotutkimuksia ja taloudellisen kannattavuuden arviointia. Olisi hyödyllistä tutkia myös, auttavatko LED-valot leviää hyödyntämään auringonvaloa tehokkaammin kevätpiikin aikana. Mikäli leväntuotanto runsastuisi nopeammin keväällä, ravinteet sitoutuisivat tehokkaammin leviin ja runsastunut leväbiomassa olisi helpompi kerätä kevään aikana talteen. Kokeen aikana LED-valot olivat asennusteknisistä syistä asetettu osoittamaan pohjasta ylöspäin. Jos olisi teknisesti mahdollista asentaa valot niin, että valokeila osoittaisi viistosti pohjasta ylöspäin tai samassa suunnassa vesipintaan nähden, valo kattaisi suuremman osan vesipinta-alasta. Tällöin suurempi osuus leväpinta-alasta pystyisi hyödyntämään valoa fotosynteesiin.

## LÄHTEET

### **Painetut lähteet**

EN 25813, 1992. Veden laatu. Liuenneen hapen määrittäminen. Jodometrinen menetelmä. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

Niinimäki, J. & Penttinen, K. 2014. Vesienhoidon ekologiaa: Ravintoverkkokunnostus. Helsinki: Books on Demand GmbH

Niinimäki, J. & Penttinen, K. 2010. Vesiensuojelun perusteet ja vesistöjen kunnostus. Opetushallitus. Tampere: Tampereen Yliopistopaino Oy.

Sarvikas, P., Suorsa, M., Rintamäki, E., Vapaavuori, E., Aro, E.-M. & Tyystjärvi, E. 2017. Fotosynteesi. Helsinki: Books on Demand GmbH.

Scholz, M. 2006. Wetland Systems to Control Urban Runoff. Amsterdam: Elsevier B.V.

Särkkä, J. 1984. Sisävesien eläinplanktonituntemuksen alkeita. 2. uusittu painos. Jyväskylä: Jyväskylän yliopiston biologian laitoksen opetusmonisteita.

Tikkanen, T. 1986. Kasviplanktonopas. Suomen luonnonsuojelun tuki Oy. Forssa: Forssan kirjapaino Oy.

Uusheimo, S. 2019. Mitigating Anthropogenic Nitrogen Loading with Constructed Wetlands in a Boreal Climate. Helsingin yliopisto. Väitöskirja. Helsinki: Unigrafia.

van der Valk, A. 2006. The Biology of Freshwater Wetlands. Biology of Habitats. Oxford New York: Oxford University Press.

Wetzel, R. G. & Likens, G. E. 2000. Limnological Analyses. Third edition. New York: Springer-Verlag.

### **Elektroniset lähteet**

Abdel-Raouf, N., Al-homaidan, A. A. & Ibraheem, I. B. M. 2012. Microalgae and Wastewater Treatment [viitattu 21.6.2019]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319562X12000332>

Aluehallintovirasto 2014. Lammin jätevedenpuhdistamon ympäristölupapäätöksen lupamääräysten tarkistaminen. Hämeenlinnan Seudun Vesi Oy [viitattu 23.6.2019]. Saatavissa: [https://www.avi.fi/documents/10191/1001691/esavi\\_paatos\\_88\\_2014\\_2-2014-06-11.pdf/7606beee-6edd-4412-b982-83f83b80e3ae](https://www.avi.fi/documents/10191/1001691/esavi_paatos_88_2014_2-2014-06-11.pdf/7606beee-6edd-4412-b982-83f83b80e3ae)

- Arola, M. 2012. Puhdistamon jälkeisen jätevedenkäsittelyn tehostaminen Taivalkosken jätevedenpuhdistamolla. Oulun yliopisto. Diplomityö [viitattu 19.6.2019]. Saatavissa: <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-201301231007.pdf>
- Eppley, R. 1972. Temperature and Phytoplankton Growth in the Sea. California: Institute of Marine Resources [viitattu 5.7.2019]. Saatavissa: <https://spo.nmfs.noaa.gov/sites/default/files/pdf-content/1972/704/eppley.pdf>
- Francoeur, S. N., Rier, S.T. & Whorley, S. B. 2013. Methods for Sampling and Analyzing Wetland Algae [viitattu 7.7.2019]. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/261723254\\_Methods\\_for\\_Sampling\\_and\\_Analyzing\\_Wetland\\_Algae](https://www.researchgate.net/publication/261723254_Methods_for_Sampling_and_Analyzing_Wetland_Algae)
- Gran, V., Jormola, J., Koskiaho, J., Maijala, T., Mikkola-Roos, M., Puumala, M., Puustinen, M., Riihimäki, J., Rätty, M. & Sammalkorpi, I. 2001. Maatalouden vesiensuojelukosteikot: VESIKOT-projektin loppuraportti. Suomen ympäristökeskus [viitattu 19.6.2019]. Saatavissa: [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40659/SY\\_499.pdf?sequence=1](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40659/SY_499.pdf?sequence=1)
- GWM-Engineering 2019. YSI ProODO Optinen liuenneen hapen mittari kenttäkäyttöön. Esite [viitattu 23.6.2019]. Saatavissa: [https://gwm-engineering.fi/files/8013/9021/8542/ESITE\\_ProODO\\_suomi1.pdf](https://gwm-engineering.fi/files/8013/9021/8542/ESITE_ProODO_suomi1.pdf)
- Heinonen, P., Kettunen, I. & Mäkelä, A. 2008. Vesistötietoa näytteenottajille. Suomen ympäristökeskus [viitattu 30.6.2019]. Saatavissa: [www.syke.fi/download/noname/%7BE0DFD624-57C6-4EA5-B7C6.../29616](http://www.syke.fi/download/noname/%7BE0DFD624-57C6-4EA5-B7C6.../29616)
- HS-Vesi 2019. Jätevesien käsittely. Lammin puhdistamo [viitattu 23.6.2019]. Saatavissa: <https://hsvesi.fi/vesi-ja-vesihuolto/jatevesien-kasittely/>
- Huotari, J. 2019. Jätevesien ravinteet kiertoon levien avulla. Uusiouutiset. Nro 28.1.2019. Uusioblogi [viitattu 22.6.2019]. Saatavissa: <https://www.uusiouutiset.fi/jatevesien-ravinteet-kiertoon-levien-avulla/>
- HyXo Oy. 2019. Liuenneen hapen mittaukset [viitattu 23.6.2019]. Saatavissa: <https://hyxo.fi/products/fi/ldo-p-70-24/>
- Keski-Häme 2019. Lammin kosteikkoallas poistaa jätevedestä tyypeä tehokkaasti talvellakin [viitattu 22.6.2019]. Saatavissa: <https://keski-hame.fi/pitajat/kosteikkoallas-poistaa-jatevedesta-tyypea-tehokkaasti-talvellakin-15275>
- Laitinen, J., Nieminen, J., Saarinen, R. & Toivikko, S. 2014. Yhdyskuntien jätevedenpuhdistamot. Paras käyttökelpoinen tekniikka (BAT). Suomen ympäristökeskus

[viitattu 7.7.2019]. Saatavissa:

[https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/43199/SY\\_3\\_2014.pdf?sequence=1](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/43199/SY_3_2014.pdf?sequence=1) 58 59

Lavens, P. & Sorgeles, P. 1996. Algal Production. University of Gent, Belgium [viitattu 23.6.2019]. Saatavissa:

<http://www.fao.org/3/w3732e/w3732e06.htm#2.3.%20Algal%20production>

Leponiemi, T. 2019. Ei, jään alle ei ole laskeutunut ufoja: nyt tutkitaan, voiko LED-valaistus vauhdittaa jätevedenpuhdistusta. Yle Uutiset. Nro 7.2.2019 [viitattu 23.6.2019]. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-10613852>

Lesutiené, J., Gorokhova, E., Stankevičienė, D., Bergman, E., & Greenberg, L. 2014. Light Increases Energy Transfer Efficiency in a Boreal Stream. US National Library of Medicine: National Institutes of Health [viitattu 9.7.2019]. Saatavissa:

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4239105/>

Luonnontila 2014. SV8 Sisävesien ekologinen tila [viitattu 19.6.2019]. Saatavissa:

<https://www.luonnontila.fi/fi/elinymparistot/sisavedet/sv8-sisavesien-ekologinen-tila>

Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry. 2013. Typen kierto [viitattu 19.6.2019].

Saatavissa: [http://www.pelastajarvi.fi/typen\\_kierto](http://www.pelastajarvi.fi/typen_kierto)

Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry. 2019. 10 kysymystä kosteikoista [viitattu 19.6.2019]. Saatavissa: [http://www.hiidenvesi.fi/fi/valuma-](http://www.hiidenvesi.fi/fi/valuma-alueen_kunnostus/kosteikot/10_kysymysta_kosteikoista)

[alueen\\_kunnostus/kosteikot/10\\_kysymysta\\_kosteikoista](http://www.hiidenvesi.fi/fi/valuma-alueen_kunnostus/kosteikot/10_kysymysta_kosteikoista)

Moore, C. M., Suggett, D. J., Hickman, A. E., Kim, Y.-N., Tweddle, J. F., Sharples, J., Geider, R. J. & Holligan, P. 2006. Phytoplankton Photoacclimation and Photoadaptation in Response to Environmental Gradients in a Shelf Sea. United Kingdom: Limnology and Oceanography 51: 936-949 [viitattu 5.7.2019]. Saatavissa:

<https://aslopubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.4319/lo.2006.51.2.0936>

Nieminen, M. 2013. Eräiden biopoltoainesovelluksiin käyttökelpoisten mikroleväkantojen fotosynteesin valo- ja lämpötilavasteet. Helsingin yliopisto. Pro Gradu [viitattu 5.7.2019]. Saatavissa:

[https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/144135/MarttaNieminen\\_progradu.pdf](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/144135/MarttaNieminen_progradu.pdf)

Pantsu, P. 2018. Levistä muka vain harmia? Tutkijat valjastivat ne putsamaan jätevesiä: "Virtsassa levä kasvaa iloisesti ja kerää ravinteita talteen". Yle Uutiset. Nro 23.8.2018 [viitattu 23.6.2019]. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-10360002>

Pietiläinen, O.-P. & Räike, A. 1999. Typpi ja fosfori Suomen sisävesien minimiravinteina. Suomen ympäristökeskus [viitattu 19.6.2019]. Saatavissa:

[https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/286178/SY\\_313.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/286178/SY_313.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

PME 2019. miniDOT® Logger Submersible Water Logger for Measuring Dissolved Oxygen [viitattu 23.6.2019]. Saatavissa: <https://www.pme.com/products/minidot>

Reynolds, C. S. 2006. Ecology of Phytoplankton. New York: Cambridge University Press [viitattu 5.7.2019]. Saatavissa: [http://www.jlakes.org/ch/book/Ecology-of-phytoplankton\\_2006.pdf](http://www.jlakes.org/ch/book/Ecology-of-phytoplankton_2006.pdf)

Sammalkorpi, I. & Sarvilinna A. 2010. Rehevöityneen järven kunnostus ja hoito. Suomen ympäristökeskus [viitattu 19.6.2019]. Saatavissa: [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38819/YO\\_2010\\_Rehevoityneen\\_jarven\\_kunnotus\\_ja\\_hoito.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38819/YO_2010_Rehevoityneen_jarven_kunnotus_ja_hoito.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Solunetti 2019. Fotosynteesi. Solubiologia [viitattu 21.6.2019]. Saatavissa: <http://www.solunetti.fi/fi/solubiologia/fotosynteesi2/2/>

Suomen ympäristökeskus 2015a. Kasviplanktonin tilavuudet. Kasviplanktonrekisterin lajitiedot [viitattu 29.6.2019]. Saatavissa: [https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Pintavesien\\_tila/Pintavesien\\_tilan\\_seuranta/Biologisten\\_seurantamenetelmien\\_ohjeet/Kasviplanktonin\\_tutkimusmenetelmat/Kasviplanktonin\\_tilavuudet](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Pintavesien_tila/Pintavesien_tilan_seuranta/Biologisten_seurantamenetelmien_ohjeet/Kasviplanktonin_tutkimusmenetelmat/Kasviplanktonin_tilavuudet)

Suomen ympäristökeskus 2015b. Monivaikuttiset kosteikot [viitattu 19.6.2019]. Saatavissa: [https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Vesien\\_kaytto/Maankuivatus\\_ja\\_ojitus/Luonnonmukainen\\_peruskuivatus/Monivaikuttiset\\_kosteikot](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Vesien_kaytto/Maankuivatus_ja_ojitus/Luonnonmukainen_peruskuivatus/Monivaikuttiset_kosteikot)

Suomen ympäristökeskus 2015c. Tietopaketti yhdyskuntajätevedenpuhdistamoista (jätevesineuvojille) [viitattu 25.6.2019]. Saatavissa: <https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B44DC4C38-D543-4BB8.../109532>

Suomen ympäristökeskus 2016. Kasviplanktonin tutkimusmenetelmät. Kasviplanktonin laskentamenetelmät [viitattu 5.7.2019]. Saatavissa: [https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Pintavesien\\_tila/Pintavesien\\_tilan\\_seuranta/Biologisten\\_seurantamenetelmien\\_ohjeet/Kasviplanktonin\\_tutkimusmenetelmat](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Pintavesien_tila/Pintavesien_tilan_seuranta/Biologisten_seurantamenetelmien_ohjeet/Kasviplanktonin_tutkimusmenetelmat)

Suomen ympäristökeskus 2017. Pintavesien tilan seuranta [viitattu 19.6.2019]. Saatavissa: [https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Pintavesien\\_tila/Pintavesien\\_tilan\\_seuranta?f=Hameen\\_ELYkeskus](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Pintavesien_tila/Pintavesien_tilan_seuranta?f=Hameen_ELYkeskus)

Suomen ympäristökeskus 2018a. Pienvesien ekologinen ja kemiallinen tila [viitattu 19.6.2019]. Saatavissa: [https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Pintavesien\\_tila](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Pintavesien_tila)

Suomen ympäristökeskus 2018b. Suuntaviivat ja parhaat käytännöt [viitattu 19.6.2019].  
Saatavissa: [https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat\\_ja\\_tilastot/Vesihuolto raportit/Yhdyskuntien\\_jatevesien\\_kuormitus\\_vesiin/Suunta\\_viiivat\\_ja\\_parhaat\\_kaytannot](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat_ja_tilastot/Vesihuolto raportit/Yhdyskuntien_jatevesien_kuormitus_vesiin/Suunta_viiivat_ja_parhaat_kaytannot)

Suomen ympäristökeskus 2018c. Yhdyskuntajätevesien kuormitus vesiin [viitattu 19.6.2019]. Saatavissa: [https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat\\_ja\\_tilastot/Vesihuolto raportit/Yhdyskuntien\\_jatevesien\\_kuormitus\\_vesiin](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat_ja_tilastot/Vesihuolto raportit/Yhdyskuntien_jatevesien_kuormitus_vesiin)

Suomen ympäristökeskus 2019. Vesistöjen kuormitus ja luonnon huuhtouma [viitattu 19.6.2019]. Saatavissa: [https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat\\_ja\\_tilastot/Vesistöjen\\_kuormitus\\_ja\\_luonnon\\_huuhtouma](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat_ja_tilastot/Vesistöjen_kuormitus_ja_luonnon_huuhtouma)

Vasama, K. 2017. Vesihuollon haasteet. Maa- ja metsätalousministeriö [viitattu 19.6.2019]. Saatavissa: [https://mmm.fi/vesi/vesihuolto\\_haasteet](https://mmm.fi/vesi/vesihuolto_haasteet)

Zhang, W. 2019. Planktonic Ciliate Project. Introduction [viitattu 7.7.2019]. Saatavissa: <http://ciliate.zooplankton.cn/>

### **Muut lähteet**

Huotari, J. 2019. Kuva: LED-valot Lammin jätevedenpuhdistamon jälkikosteikossa. Lammi: Helsingin yliopisto. Lammin biologinen asema.

Ilola, R. 2019. Ravinnemäärittysten menetelmät Lammin biologisella asemalla. Lammi: Helsingin yliopisto.

Ruponen, J. 2018. Hypereutrofinen puhdistamon jälkilammikko ja sen planktonyhteisö ravinteiden pidättäjänä. Helsingin yliopisto. Pro Gradu. Lammin biologinen asema.

Tulonen, T. 2019. Laboratoriokoordinaattori. Helsingin yliopisto. Lammin biologinen asema. Suullinen tiedonanto.

Turunen, S. 2011. Fotosynteesin valovastekäyrät järven perustuotannon mittauksessa: pulloinkubointien ja ns. vapaan veden menetelmän vertailu. Helsingin yliopisto. Pro Gradu. Lammin biologinen asema.

## LIITTEET

Liite 1. Kasvatusten lämpötilaolosuhteet laboratorikokeissa ja kentällä mitatut DO-pitoisuudet kasvatusten alkutilanteessa

Liite 2. Kasvatusten pH, DO-%, kasviplanktonin biomassat laboratorikokeissa ja eläinplanktonin tiheydet kasvatusten alussa

Liite 3. Koe jälkikosteikon jään alla; Kenttäolosuhteet, lämpötila avannoissa, YSI-mittarin ja happiantureiden antamat DO-pitoisuudet, pH-luvun keskiarvot, ravinnepitoisuudet ja kasviplanktonin tuorebiomassa



Liite 1. Kasvatusten lämpötilaolosuhteet laboratorioskokeissa ja kentällä mitatut DO-pitoisuudet kasvatusten alkutilanteessa

Taulukko 1. Lämpötilat ja hapen pitoisuudet kosteikkoaltaalla laboratorioskokeiden alkutilanteessa (LED\* = LED-alue, V\* = Vertailualue)

	4.2.2019		27.2.2019		11.3.2019	
	Koe 1 alku		Koe 2 alku		Koe 3 alku	
	°C	DO (mg/l)	°C	DO (mg/l)	°C	DO (mg/l)
LED* pinta	0,1	2,11	0,5	6,07	0,5	15,68
LED* 0,5 m	1,3	0,34	1,6	1,84	1,3	15,80
V* pinta			0,4	6,22	0,9	15,08
V* 0,5 m			2,2	3,63	2,4	12,78

Taulukko 2. YSI-mittarilla mitatut lämpötilat (°C keskiarvot) pimeässä ja neljällä valotasolla (1 = 7, 2 = 26, 3 = 61, 4 = 89  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) kokeessa 1

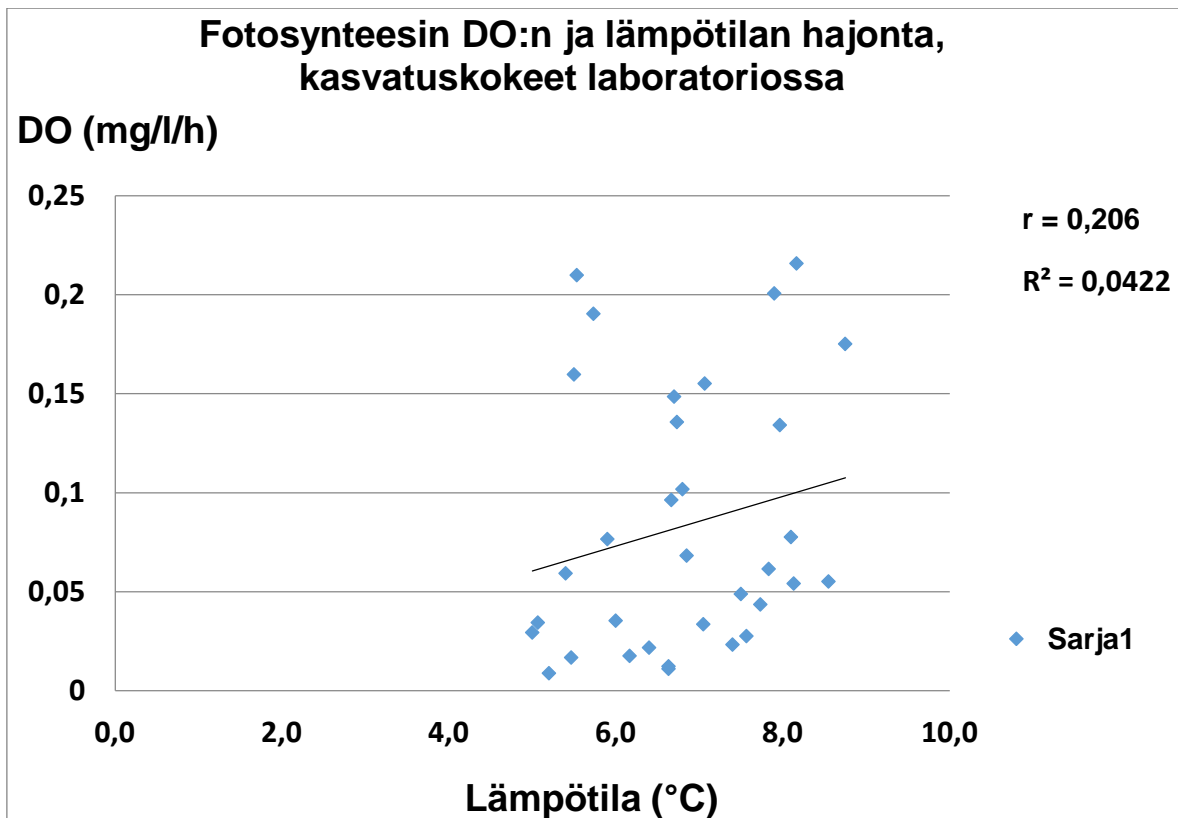
Lämpötilat (°C) kasvatuskoe 1				
vrk	0	3	6	9
Pimeä	8,9	5,6	5,8	6,2
1	8,9	7,1	6,9	6,7
2	8,9	6,0	5,9	5,5
3	8,9	8,6	8,8	8,5
4	8,9	8,1	8,0	7,8

Taulukko 3. YSI-mittarilla mitatut lämpötilat (°C keskiarvot) pimeässä ja neljällä valotasolla (1 = 7, 2 = 25, 3 = 42, 4 = 81  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) kokeessa 2

<b>Lämpötilat (°C) kasvatuskoe 2</b>						
<b>vrk</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	
Pimeä	6,1	5,8	5,7	5,5	6,2	
1	6,1	6,7	6,8	6,7	7,1	
2	5,7	5,7	5,5	5,5	5,6	
3	6,3	8,2	8,2	8,1	7,9	
4	6,2	7,9	8,1	7,7	7,8	

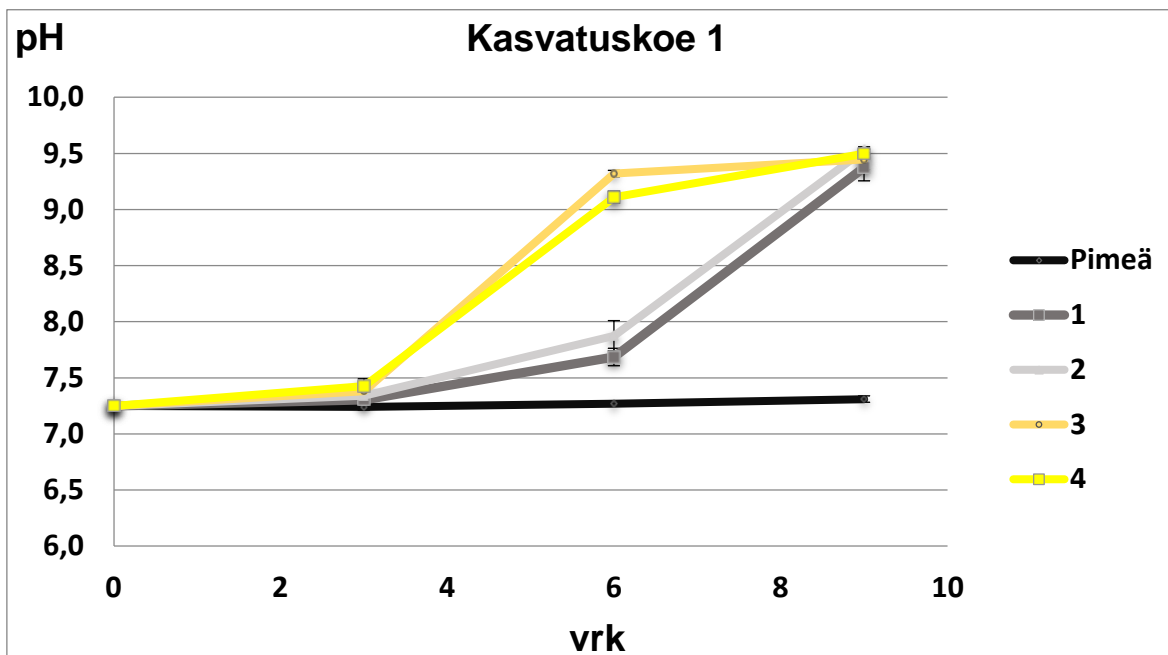
Taulukko 4. YSI-mittarilla mitatut lämpötilat (°C keskiarvot) pimeässä ja neljällä valotasolla (1 = 6, 2 = 22, 3 = 29, 4 = 52  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) kokeessa 3

<b>Lämpötilat (°C) kasvatuskoe 3</b>						
<b>vrk</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>7</b>
Pimeä	3,3	5,5	5,2	5,2	5,7	5,6
1	3,2	6,6	6,4	6,2	6,6	6,4
2	3,2	5,4	5,1	5,0	5,2	4,7
3	3,3	7,8	7,7	7,6	7,9	7,6
4	3,8	8,1	7,5	7,4	7,5	6,8

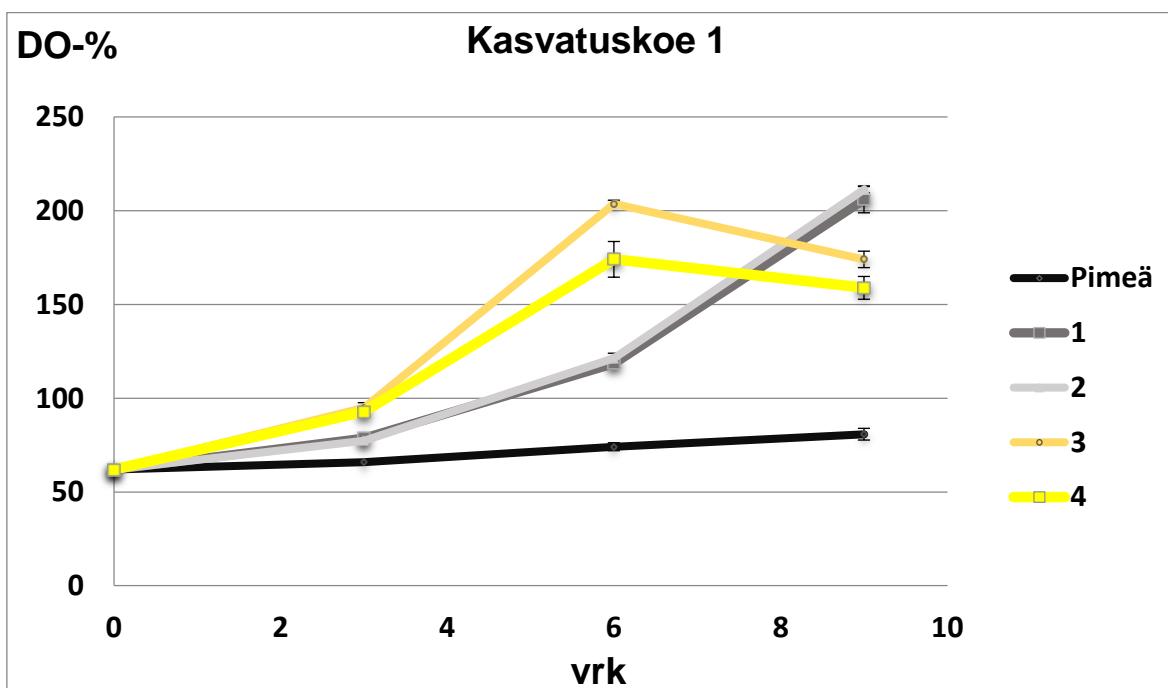


Kuvio 1. Lämpötilavaihteluiden vaikutus fotosynteesin hapentuotannon nopeuteen (mg/l/h) laboratorioskokeissa, kun kasvunopeus oli positiivinen

Liite 2. Kasvatusten pH, DO-%, kasviplanktonin tuorebiomassat laboratoriokeissa ja eläinplanktonin tiheydet kasvatusten alussa



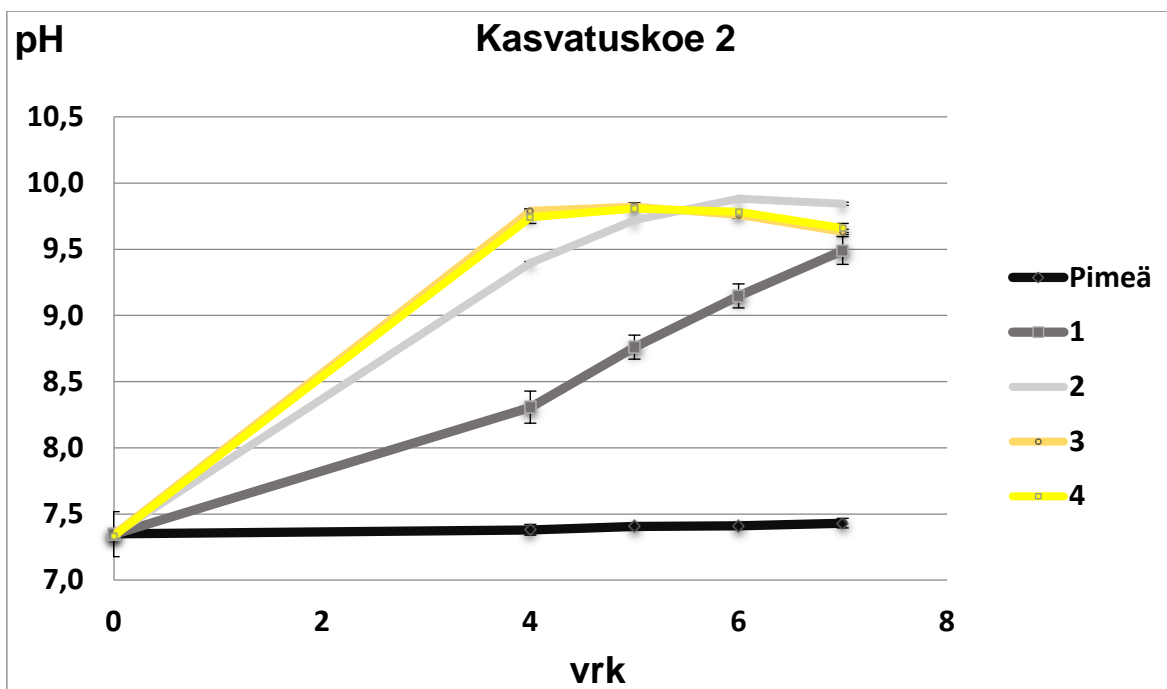
Kuvio 1. pH-luvun keskiarvo ja keskihajonta (9 vrk) kasvatuksen aikana pimeässä ja neljällä valotasolla (1 = 7, 2 = 26, 3 = 61, 4 = 89  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) kokeessa 1



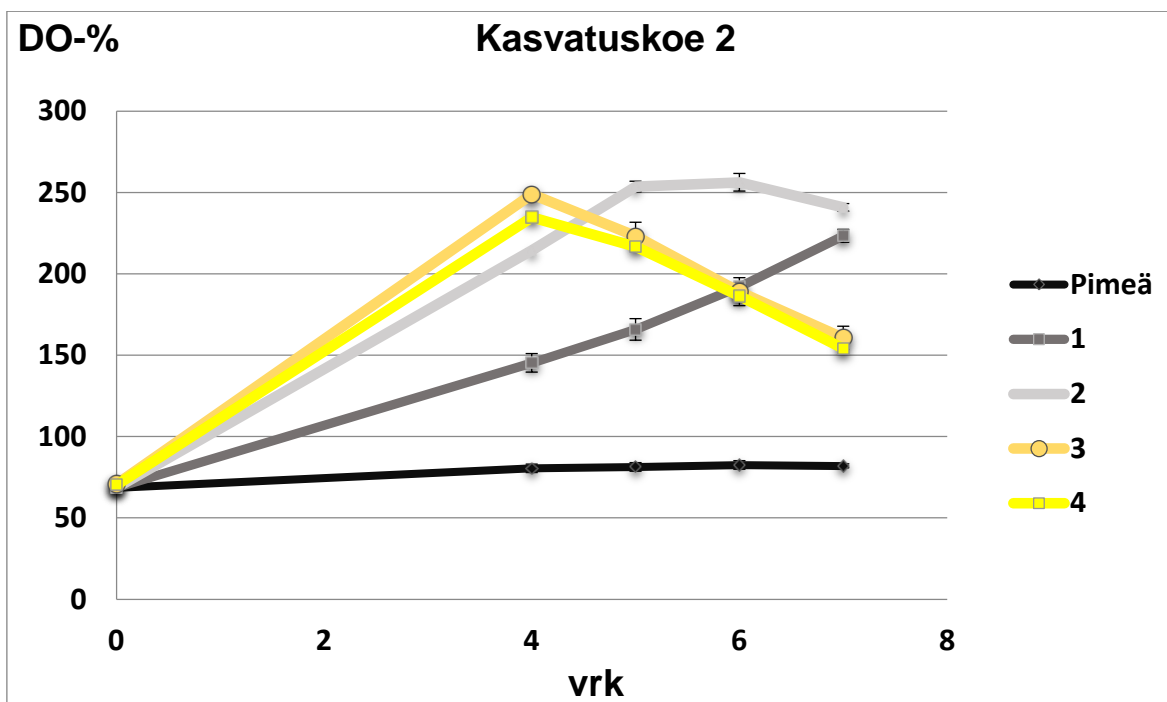
Kuvio 2. Hapen kyllästysarvon keskiarvo ja keskihajonta (9 vrk) kasvatuksen aikana pimeässä ja neljässä valointensiteetissä (1 = 7, 2 = 26, 3 = 61, 4 = 89  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) kokeessa 1

Taulukko 1. Kasviplanktonin tuorebiomassa alkutilanteessa jälkikosteikon LED-alueella ja kasvatusten lopputilanteessa pimeässä ja neljällä valotasolla kokeessa 1 (1 = 7, 2 = 26, 3 = 60, 4 = 89  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )

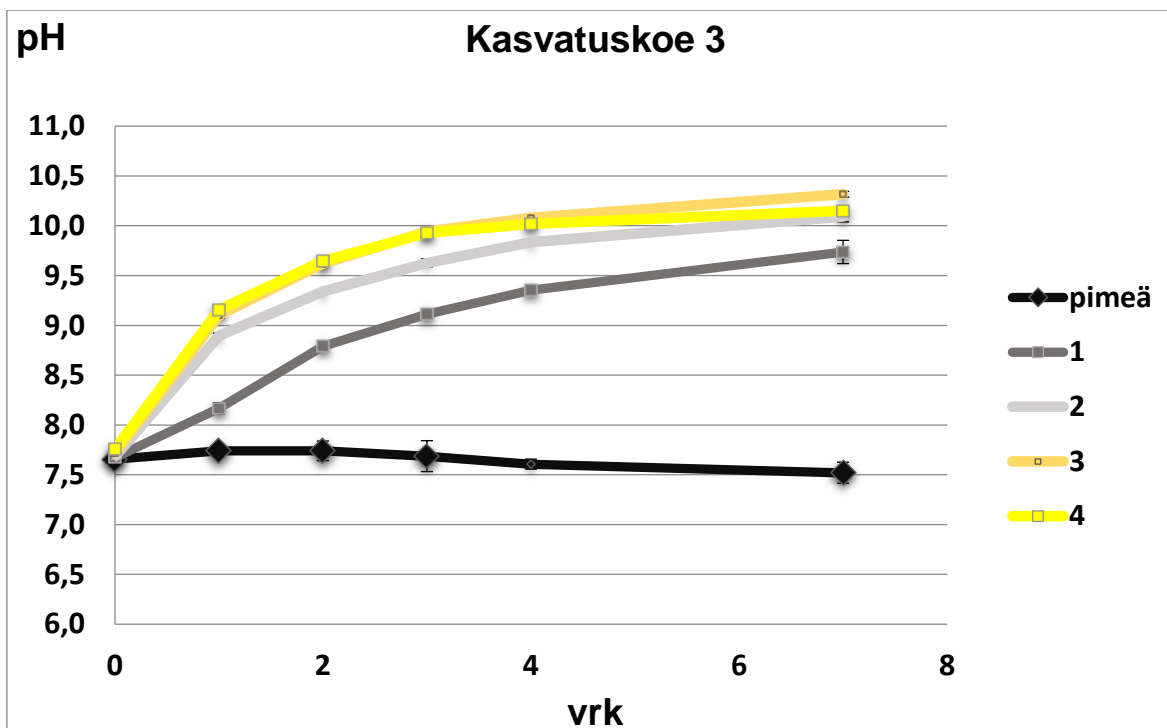
Kasvatuskoe 1 Kasviplankton biomassa (mg/l)	40Xobjektiivi, 50 ml sylinteri					
	Alku 5.2.2019	Loppu 14.2.2019				
	LED-alue	Pimeä	1	2	3	4
Näytetilavuus	50 ml	50 ml	7 ml	7 ml	7 ml	7 ml
<b>Chlorophyta Viherlevät</b>						
Chlamydomonas sp.	0,149	0,206	0,627	0,893	0,964	1,082
Coenochloris pyrenoidosa / Coelastrum micropodium	0,456	1,124	27,448	31,772	36,730	34,411
Scenedesmus acuminatus	0,013	0,013	0,095	0,048	0,048	0,048
Scenedesmus ecornis			0,152	0,038	0,038	0,000
Scenedesmus quadricauda	0,046	0,051	0,073	0,036	0,091	0,109
Tetraedron caudatum	0,001	0,001				
<b>Summa</b>	<b>0,67</b>	<b>1,40</b>	<b>28,40</b>	<b>32,79</b>	<b>37,87</b>	<b>35,65</b>
<b>Cryptophyta Nielulevät</b>						
Cryptomonas	<b>0,05</b>	<b>0,02</b>	<b>0,21</b>	<b>0,15</b>	<b>0,29</b>	<b>0,10</b>
<b>Cyanophyta Sinilevät</b>						
Ryppäät	<b>1,08</b>	<b>0,98</b>	<b>2,91</b>	<b>3,83</b>	<b>3,93</b>	<b>4,53</b>
<b>Bacillariophyta Piilevät</b>						
Anomoeoneis vitrea	0,002	0,002	0,007		0,007	
Cyclotella	0,191	0,183	20,886	27,123	25,034	25,933
Nitzschia acicularis		0,004			0,092	0,062
<b>Summa</b>	<b>0,19</b>	<b>0,19</b>	<b>20,89</b>	<b>27,12</b>	<b>25,13</b>	<b>26,00</b>
Muut	1,802	0,276	1,786	0,985	1,509	0,985
<b>Summa</b>	<b>3,79</b>	<b>2,86</b>	<b>54,19</b>	<b>64,88</b>	<b>68,73</b>	<b>67,25</b>
Ripsieläin Ciliata	0,060	0,198	0,616	0,739	0,185	



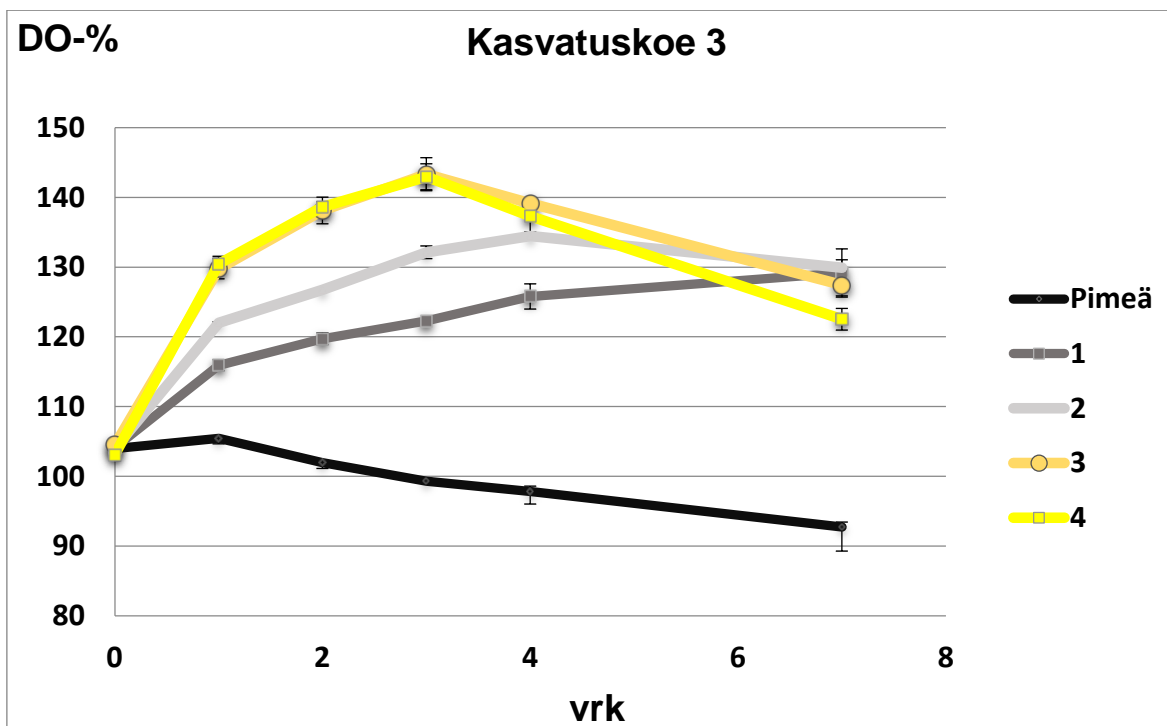
Kuvio 3. pH-luvun keskiarvo ja keskihajonta (7 vrk) kasvatuksen aikana pimeässä ja neljällä valotasolla (1 = 7, 2 = 25, 3 = 42, 4 = 81  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) kokeessa 2



Kuvio 4. Hapen kyllästysarvon keskiarvo ja keskihajonta (7 vrk) kasvatuksen aikana pimeässä ja neljällä valotasolla (1 = 7, 2 = 25, 3 = 42, 4 = 81  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) kokeessa 2



Kuvio 5. pH-luvun keskiarvo ja keskihajonta (7 vrk) kasvatuksen aikana pimeässä ja neljällä valotasolla (1 = 6, 2 = 22, 3 = 29, 4 = 52  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) kokeessa 3



Kuvio 6. Hapen kyllästysarvon keskiarvo ja keskihajonta (7 vrk) kasvatuksen aikana pimeässä ja neljällä valotasolla (1 = 6, 2 = 22, 3 = 29, 4 = 52  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ) kokeessa 3

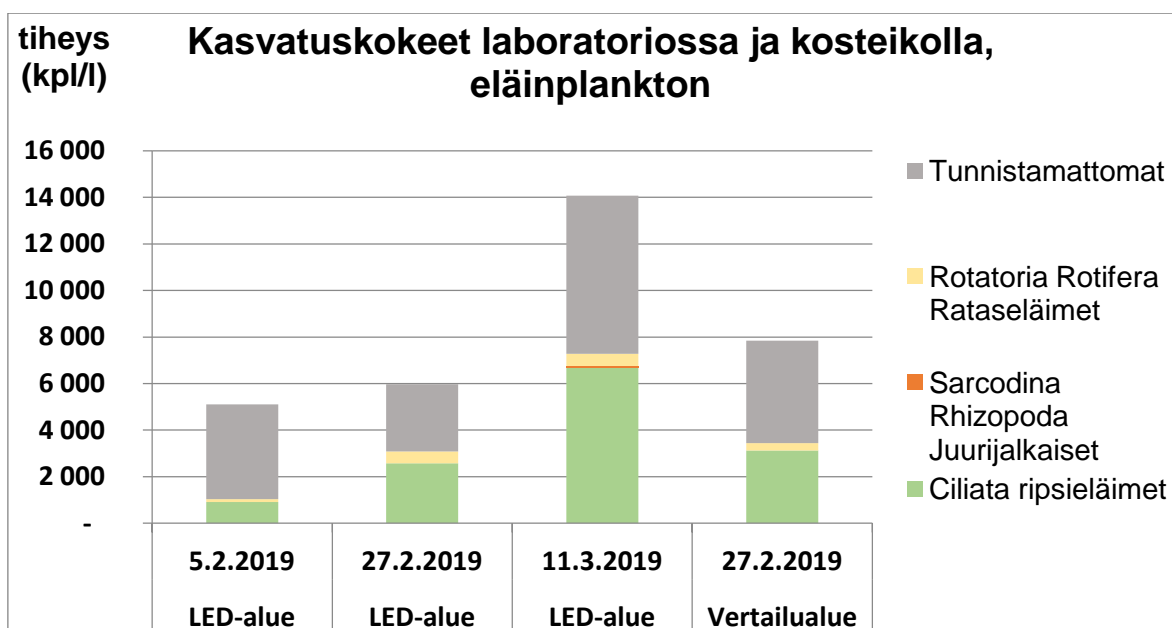
Taulukko 2. Kasviplanktonin tuorebiomassa alkutilanteessa jälkikosteikon LED-alueella ja kasvatusten lopputilanteessa pimeässä ja kolmella valotasolla kokeessa 3 (1 = 6, 2 = 22, 3 = 40  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )

<b>Kasvatuskoe 3 Kasviplankton biomassa (mg/l)</b>	40Xobjektiivi, 50 ml sylinteri				
	Alku 11.3.2019	Loppu 18.3.2019			
	<b>LED-alue</b>	<b>Pimeä</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Näytetilavuus</b>	12,5 ml	50 ml	12,5 ml	12,5 ml	12,5 ml
<b>Chlorophyta Viherlevät</b>					
Chlamydomonas sp	1,870	0,761	2,054	1,255	2,361
Coenochloris pyrenoidosa / Coelastrum micropodium	2,928	3,019	7,550	3,167	3,881
Neprocytium limneticum	0,094	0,006	0,023	0,187	0,655
Scenedesmus quadricauda			0,041		
Treubaria crassispira		0,003			0,010
<b>Summa</b>	<b>4,89</b>	<b>3,79</b>	<b>9,67</b>	<b>4,61</b>	<b>6,91</b>
<b>Cryptophyta Nielulevät</b>					
Cryptomonas	<b>0,156</b>	<b>0,097</b>	<b>0,164</b>	<b>0,109</b>	<b>0,156</b>
<b>Cyanophyta Sinilevät</b>					
Ryppäät	0,647	0,479	1,138	0,414	0,931
<b>Bacillariophyta Piilevät</b>					
Anomoeoneis vitrea	0,008	0,001			
Asterionella formosa				0,006	0,031
Cyclotella	0,764	0,550	3,468	1,893	1,860
Nitzschia acicularis				0,002	
<b>Summa</b>	<b>0,77</b>	<b>0,55</b>	<b>3,47</b>	<b>1,90</b>	<b>1,89</b>
Muut	0,010	0,028	0,021	0,066	0,176
<b>Summa</b>	<b>6,48</b>	<b>4,94</b>	<b>14,46</b>	<b>7,10</b>	<b>10,06</b>
Ripsieläin Ciliata	0,241	0,250	0,276	0,241	0,241



Taulukko 3. Eläinplanktonin tiheydet (kpl/l) eri näytteenottoaikoina

Eläinplankton (kpl/l)	20Xobjektiivi, 12,5 ml näytetilavuus ja sylinteri			
	LED-alue	LED-alue	LED-alue	Vertailualue
pvm	5.2.2019	27.2.2019	11.3.2019	27.2.2019
<b>Ciliata</b>				
<b>Ripsieläimet</b>				
Strombidium ja Amphileptus	911	2 570	6 592	3 039
Paramecium caudatum			112	89
<b>summa</b>	<b>911</b>	<b>2 570</b>	<b>6 704</b>	<b>3 129</b>
<b>Sarcodina Rhizopoda</b>				
<b>Juurijalkaiset</b>				
Diffugia			56	
<b>Rotatoria Rotifera</b>				
<b>Rataseläimet</b>				
Anuraeopsis fissa				45
Keratella Cochlearis	130	112	168	45
Keratella quadrata			56	45
Keratella Rotifer/Plationus			56	
Ploesoma triacanthum			112	
Polyartha dolichoptera/remata		410	134	179
<b>Summa</b>	<b>130</b>	<b>521</b>	<b>525</b>	<b>313</b>
<b>Summa kaikki tunnistetut</b>	<b>1 041</b>	<b>4 022</b>	<b>12 011</b>	<b>3 620</b>
muut	4 067	2 885	6 782	4 403
summa	5 108	6 907	18 793	8 023



Kuvio 7. Eläinplanktonin tiheydet (kpl/l) ja määräsuhteet eri ajankohtina Lammin jätevedenpuhdistamon jälkikosteikolla kasvatusten alkutilanteissa

Taulukko 4. Eläinplanktonnäytteissä esiintyneet suodattuneet suuremman kasviplanktonin biomassat (mg/l) eri näytteenottoaikoina Lammin puhdistamon kosteikkoaltaassa

Kasviplankton mg/l	20Xobjektiivi, 12,5 ml näytetilavuus ja sylinteri			
	LED-alue	LED-alue	LED-alue	Vertailualue
pvm	5.2.2019	27.2.2019	11.3.2019	27.2.2019
<b>Chlorophyta</b> <b>Viherlevät</b>				
Pediastrum boryanum	0,043	0,091	0,017	0,019
<b>Bacillariophyta</b> <b>Piilevät</b>				
Frustulia rhomboides	0,000	0,001	0,001	0,002
Muut piilevät	0,002	0,002	0,003	0,008
<b>Summa</b>	<b>0,045</b>	<b>0,094</b>	<b>0,020</b>	<b>0,028</b>
Levärypäs	0,020	0,041	0,022	0,095
<b>Summa</b>	<b>0,024</b>	<b>0,049</b>	<b>0,025</b>	<b>0,101</b>

Liite 3. Koe jälkikosteikon jään alla; Kenttäolosuhteet, lämpötila avannoissa, YSI-mittarin ja happiantureiden antamat DO-pitoisuudet, pH-luvun keskiarvot, ravinnepitoisuudet ja kasviplanktonin tuorebiomassa

Taulukko 1. Kenttäolosuhteet jätevedenpuhdistamon jälkikosteikolla kasvatuskokeen aikana

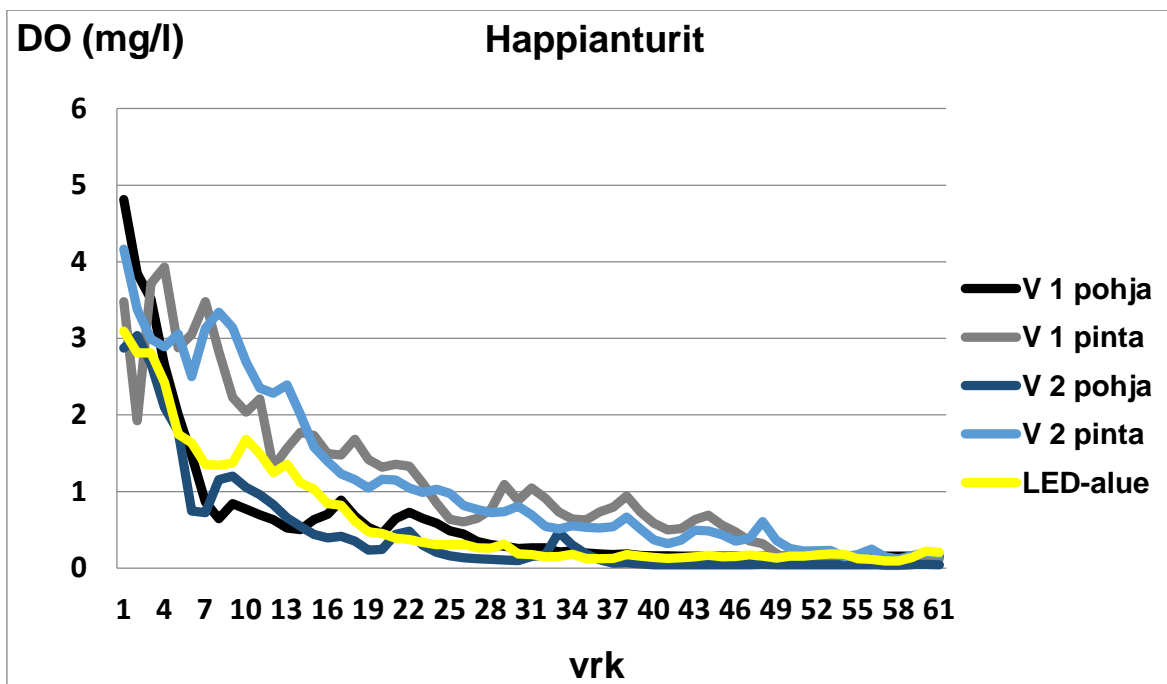
<b>Kenttäolosuhteet</b>						
<b>pvm</b>	<b>27.2.2019</b>	<b>4.3.2019</b>	<b>7.3.2019</b>	<b>11.3.2019</b>	<b>14.3.2019</b>	<b>18.3.2019</b>
<b>vrk</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>15</b>	<b>19</b>
Sää	puolipilvinen	pilvinen	pilvinen	aurinkoinen	pilvinen	pilvinen
Jään paksuus valo	31 cm	31 cm	31 cm	31 cm	31 cm	39 cm
Jään paksuus pimeä	30 cm	30 cm	30 cm	30 cm	30 cm	39 cm
Lumikerros	0	0,5 cm laikuittain	1 cm	4,5 cm	4,5 cm	0,5 cm sohjolunta
Syvyys valo	0,85 m					
Syvyys pimeä	1,15 m					

Taulukko 2. Valointensiteetit jätevedenpuhdistamon jälkikosteikolla kasvatuskokeen aikana avannoissa jään alla, keskiarvot jään alta eri suuntiin

<b>Kenttämittaukset (Licor, <math>\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}</math>)</b>						
<b>pvm</b>	<b>27.2.2019</b>	<b>4.3.2019</b>	<b>7.3.2019</b>	<b>11.3.2019</b>	<b>14.3.2019</b>	<b>18.3.2019</b>
<b>vrk</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>15</b>	<b>19</b>
LED-alue	38,8	22,4	10,9	24,3	18,7	62,8
Vertailualue	27,0	18,9	14,7	21,9	27,6	72,0

Taulukko 3. Veden lämpötilat avannoissa jätevedenpuhdistamon jälkikosteikolla kasvatuskokeen aikana LED-alueella ja vertailualueella pintavedessä ja puolen metrin syvyydessä

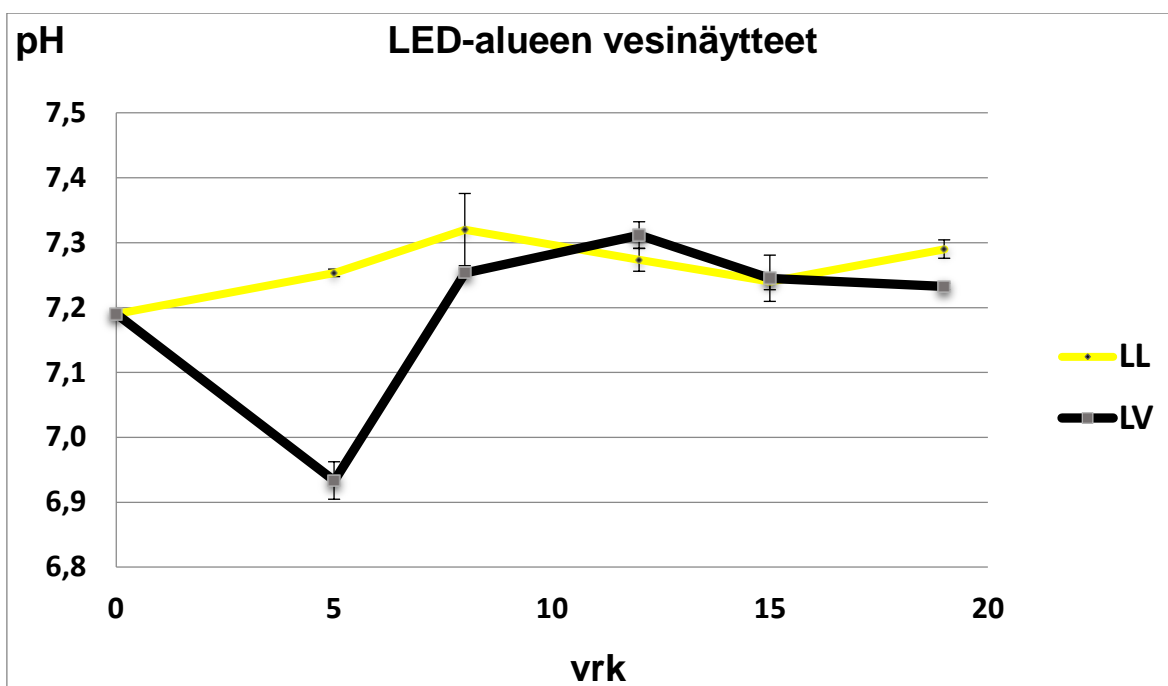
<b>Kenttämittaukset (YSI) lämpötila (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>						
<b>pvm</b>	<b>27.2.2019</b>	<b>4.3.2019</b>	<b>7.3.2019</b>	<b>11.3.2019</b>	<b>14.3.2019</b>	<b>18.3.2019</b>
<b>vrk</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>15</b>	<b>19</b>
LED-alue pinta	0,5	0,5	0,7	0,5	1,1	0,4
LED-alue 0,5 m	1,6	0,9	1,6	1,3	1,8	1,8
Vertailualue pinta	0,4	1	0,5	0,9	0,9	1,4
Vertailualue 0,5 m	2,2	2,2	1,9	2,4	2,6	2,5



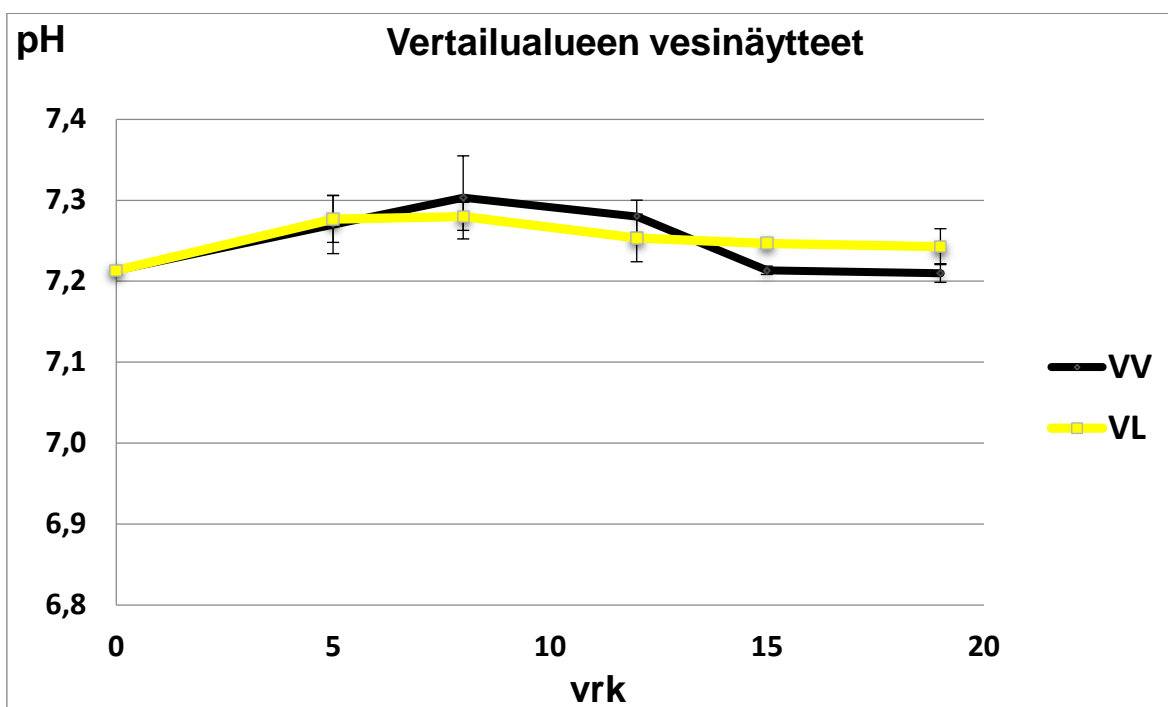
Kuvio 1. Happiantureiden mittaamat liukoisen hapen pitoisuudet jätevedenpuhdistamon jälkikosteikossa 5.12.2018 - 3.2.2019 (V = vertailualueet, pinta = 60 cm pohjasta, pohja = 20 cm pohjasta)

Taulukko 4. Hapen kyllästysarvot avannoissa YSI-mittarilla mitattuna jätevedenpuhdistamon jälkikosteikolla kasvatuskokeen aikana LED-alueella ja vertailualueella pintavedessä ja puolen metrin syvyydessä

<b>Kenttämittaukset: YSI-mittaukset, DO (%)</b>						
<b>pvm</b>	<b>27.2.2019</b>	<b>4.3.2019</b>	<b>7.3.2019</b>	<b>11.3.2019</b>	<b>14.3.2019</b>	<b>18.3.2019</b>
<b>vrk</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>15</b>	<b>19</b>
LED-alue pinta	42,1	47,5	67,1	108,9	117,7	106,8
LED-alue 0,5 m	13,2	47,0	64,3	112,1	96,1	103,2
Vertailualue pinta	43,0	58,7	74,2	105,7	97,9	122,5
Vertailualue 0,5 m	26,4	55,4	71,4	93,5	73,3	96,5



Kuvio 2. Koe jälkikosteikon jään alla; pH-luvun keskiarvo ja keskihajonta (19 vrk) kasvatuksen aikana LED-alueen näytevedessä



Kuvio 3. Koe jälkikosteikon jään alla; pH-luvun keskiarvo ja keskihajonta (19 vrk) kasvatuksen aikana vertailualueen näytevedessä

Taulukko 5. Koe jälkikosteikon jään alla; ravinnepitoisuudet ja vähenemät kokeen aikana

Ravinnepitoisuudet ( $\mu\text{g/l}$ )					
vrk	N/NH <sub>4</sub>	P/PO <sub>4</sub>	N/NO <sub>2</sub> + NO <sub>3</sub>	tot N	tot P
<b>LED-alueelta otettu näytevesi, jota inkuboitii LED-alueella</b>					
0	534	221	33162	35392	300
8	475	214	33504	35279	290
15	451	208	33951	34630	285
<b>Vähennmä 0 - 8</b>	59	7	-342	113	10
<b>Vähennmä 8 - 15</b>	24	6	-447	649	5
<b>Vähennmä yhteensä</b>	83	13	-789	762	15
<b>Vähennmä %</b>	15,5	5,9	-2,4	2,2	5,0
<b>LED-alueelta otettu näytevesi, jota inkuboitii vertailualueella</b>					
0	534	221	33162	35392	300
8	482	218	33227	31638	293
15	481	253	34088	34109	285
<b>Vähennmä 0 - 8</b>	52	3	-65	3754	7
<b>Vähennmä 8 - 15</b>	1	-35	-861	-2471	8
<b>Vähennmä yhteensä</b>	53	-32	-926	1283	15
<b>Vähennmä %</b>	9,9	-14,5	-2,8	3,6	5,0
<b>Vertailualueelta otettu näytevesi, jota inkuboitii vertailualueella</b>					
0	458	210	31882	36047	347
8	454	216	33497	33350	294
15	463	209	34016	34316	288
<b>Vähennmä 0 - 8</b>	4	-6	-1615	2697	53
<b>Vähennmä 8 - 15</b>	-9	7	-519	-966	6
<b>Vähennmä yhteensä</b>	-5	1	-2134	1731	59
<b>Vähennmä %</b>	-1,1	0,5	-6,7	4,8	17,0
<b>Vertailualueelta otettu näytevesi, jota inkuboitii LED-alueella</b>					
0	458	210	31882	36047	347
8	445	207	33480	33040	289
15	432	199	34601	34065	289
<b>Vähennmä 0 - 8</b>	13	3	-1598	3007	58
<b>Vähennmä 8 - 15</b>	13	8	-1121	-1025	0
<b>Vähennmä yhteensä</b>	26	11	-2719	1982	58
<b>Vähennmä %</b>	5,7	5,2	-8,5	5,5	16,7

Taulukko 6. Koe jälkikosteikon jään alla; Kasviplanktonin tuorebiomassat alku- ja lopputilanteessa (19 vrk)

<b>Kasviplankton tuorebiomassa (mg/l)</b>	Alku 27.2.2019	Loppu 18.3.2019		Alku 27.2.2019	Loppu 18.3.2019	
40Xobjektiivillä, 50 ml sylinteri	<b>LED-alue</b>	<b>LL</b>	<b>LV</b>	<b>Vertailu- alue</b>	<b>VV</b>	<b>VL</b>
<b>Näytetilavuus</b>	50 ml	13 ml	12,5 ml	50 ml	12,5 ml	12,5 ml
<b>Chlorophyta Viherlevät</b>						
Chlamydomonas sp.	0,173	0,177	0,219	0,123	0,176	0,140
Coenochloris pyrenoidoisa	1,475	5,600	5,462	0,657	2,580	7,514
Scenedesmus acuminatus	0,004	0,005			0,006	0,006
Scenedesmus bicaudatus	0,014	0,009	0,006	0,004	0,006	
Scenedesmus quadricauda	0,020	0,020	0,041	0,015		0,020
Tetraedron caudatum	0,002					
<b>Summa</b>	<b>1,690</b>	<b>5,811</b>	<b>5,729</b>	<b>0,800</b>	<b>2,767</b>	<b>7,680</b>
<b>Cryptophyta Nielulevät</b>						
Cryptomonas	0,039	0,135	0,086	0,055	0,171	0,101
<b>Cyanophyta Sinilevät</b>						
Ryppäät	0,899	4,601	3,285	0,821	1,862	3,440
<b>Bacillariophyta Piilevät</b>						
Anomoeoneis vitrea		0,012	0,008	0,003		
Cyclotella	1,389	2,226	1,649	0,416	2,031	2,957
Nitzschia acicularis			0,002			
<b>Summa</b>	<b>1,389</b>	<b>2,237</b>	<b>1,659</b>	<b>0,419</b>	<b>2,031</b>	<b>2,957</b>
Muut	0,034	0,056	0,059	0,054	0,097	0,059
<b>Summa</b>	<b>4,050</b>	<b>12,841</b>	<b>10,817</b>	<b>2,149</b>	<b>6,928</b>	<b>14,237</b>
Ripsieläin Ciliata	0,138	0,232	0,103	0,164	0,276	0,172