

Pro gradu -tutkielma

Mikromuovien prosessikohtalo Nenäinniemen
jätevedenpuhdistamolla

Kalle Ryymin



Jyväskylän yliopisto

Bio- ja ympäristötieteiden laitos

Ympäristötiede

28.2.2019

JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO, Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta
Bio- ja ympäristötieteiden laitos
Ympäristötiede

Kalle Ryymin: Mikromuovien prosessikohtalo Nenäinniemen
jätevedenpuhdistamolla
Pro gradu -tutkielma: 38 s, yksi liite, 1 s.
Työn ohjaajat: FT Pauliina Salmi, TkT Julia Talvitie, Dosentti, FT Anna
Karjalainen
Tarkastajat: Professori Tuula Tuhkanen, FT Pauliina Salmi

Helmikuu 2019

Hakusanat: mikromuovitase, poistoteho, Raman-mikroskopia.

Mikromuovien (MM), 1 µm – 5 mm kokoluokan polymeeripartikkelien, esiintyminen ympäristössä on herättänyt huolta viime vuosina. Jätevedenpuhdistamot ovat tärkeä mikromuovien kauttakulkureitti ympäristöön. Tässä työssä tutkittiin Jyväskylän Nenäinniemen jätevedenpuhdistamon poistotehoa mikromuovien osalta, erityishuomiona vuonna 2018 valmistuneen uuden tertiärikäsittelyn, eli 10 µm huokoiskoon kiekkosuodattimen, vaikutus poistotehoon. Tulevasta jätevedestä, primääri-, sekundääri-, ja tertiärikäsittelyn jälkeisistä vesistä sekä anaerobisesti käsitellystä linkokuivatusta lietteestä otetuista kertanäytteistä eristettiin mikromuovit entsymaattisesti. Näytteistä laskettiin halkaisijaltaan 20 µm – 5 mm mikromuovien määrä ja niiden kemiallinen koostumus määritettiin Raman-mikroskopiolla. Tutkimus osoitti, että Nenäinniemen jätevedenpuhdistamo poisti jäteveden mikromuoveista 99 %. Jätevedestä poistetut mikromuovit päätyivät jätevesilietteeseen. Yleisimmät näytteistä eristetyt muovilaadut olivat polyeteeni (PE), polypropeeni (PP) ja polyeteeni tereftalaatti (PET). Primäärikäsittelyt poistivat tulevan jäteveden pitoisuudesta 91 % ja sekundäärikäsittelyssä muovien pitoisuus nelinkertaistui. Kiekkosuodatin poisti sekundäärikäsitellystä jätevedestä 97 % mikromuoveista.

UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ, Faculty of Mathematics and Science
Department of Biological and Environmental Science
Environmental Science

Kalle Ryymin: Fate of microplastics in Nenäinniemi wastewater treatment plant
MSc thesis: 38 p, 1 appendix, 1 p.
Supervisors: Ph.D Pauliina Salmi and D.Sc (Tech) Julia Talvitie, Docent, Ph.D Anna Karjalainen
Inspectors: Professor Tuula Tuhkanen and Ph.D Pauliina Salmi

February 2019

Keywords: microplastic balance, Raman microscopy, removal rate.

Concern about the occurrence of microplastics (MPs, polymer particles < 5 mm) in the environment has risen of late. In this study the MP removal capability of Nenäinniemi wastewater treatment plant (WWTP) was studied as well as the role that a tertiary treatment, a 10 µm pore size disc filtration installed in 2018, played in the MP removal efficiency. Point samples from wastewater influent, primary, secondary and tertiary effluent and anaerobically treated drained sludge were taken, and MPs were extracted from the samples using an enzymatic purification protocol. MPs 20 µm – 5 mm in diameter were counted, and their chemical composition analysed using Raman-microscopy. The Nenäinniemi WWTP was found to remove 99 % of microplastics, and removed microplastics were deposited into drained sludge. The most common polymers encountered were polyethylene (PE), polypropylene (PP) and polyethene terephthalate (PET). Primary treatments removed 91 % of the influent MP concentration. Surprisingly, in secondary treatment, the MP concentration quadrupled. Disc filtration, however, removed 97 % of the microplastics remaining after secondary treatment.

SISÄLLYSLUETTELO

SISÄLLYSLUETTELO.....	
1 JOHDANTO.....	1
2 TIETEELLINEN TAUSTA.....	3
2.1 Mikromuovit tutkimuskohteena.....	3
2.2 Mikromuovit jätevedenpuhdistamoilla.....	4
2.2.1. Jätevedenpuhdistusprosessit	4
2.3. Tutkimusmenetelmien kehitys.....	6
2.3.1. Mikromuovien laskenta ja materiaalien määrittäminen.....	6
2.3.2. Mikromuovien eristäminen vedestä ja jätevesilietteestä	6
2.3.3. Negatiivinen ja positiivinen kontrolli.....	7
3 AINEISTO JA MENETELMÄT.....	8
3.1. Nenäinniemen jätevedenpuhdistamo.....	8
3.2. Näytteenotto.....	9
3.2.1. Tuleva jätevesi	10
3.2.2. Suuren tilavuuden näytteet.....	10
3.2.3. Kiinteä näyte.....	10
3.3. Mikromuovien eristäminen näytteistä.....	11
3.3.1. Näytteiden esikäsittely	11
3.3.2. Mikromuovien eristäminen entsyymaattisella menetelmällä.....	11
3.4 Yli 300 µm partikkelien poiminta.....	14
3.5. Partikkelitaseen määrittäminen Raman-mikroskopiolla.....	14
3.6 Virhelähteiden hallinta.....	16
3.6.1. Työvälineet	16
3.6.2. Negatiivinen kontrolli.....	16

3.6.3. Positiivinen kontrolli	17
3.7 Taselaskelma ja puhdistusteho	18
3.8. Tilastollinen tarkastelu	18
4 TULOKSET	19
4.1. Positiivinen ja negatiivinen kontrolli	19
4.2. Jäteveden mikromuovit	19
4.2.1. Mikromuovipitoisuudet	19
4.2.2. Mikromuovien laatujakauma	20
4.2.3. Mikromuovien kokojakauma	21
4.3. Lietteen mikromuovit	21
4.4. Mikromuovitase	22
5 TULOSTEN TARKASTELU	23
5.1 Positiivinen ja negatiivinen kontrolli	23
5.2. Jäteveden mikromuovit	24
5.2.1. Mikromuovipitoisuudet	24
5.2.2. Mikromuovien laatujakauma	26
5.2.3. Mikromuovien kokojakauma	26
5.3. Lietteen mikromuovit	27
5.4. Mikromuovitase	28
6 PÄÄTELMÄT	29
KIITOKSET	30
KIRJALLISUUS	30
LIITE 1. NÄYTEPÄIVÄN (9.7.2018) VIRTAAMATIEDOT	

SANASTO JA LYHENTEET

SANASTO

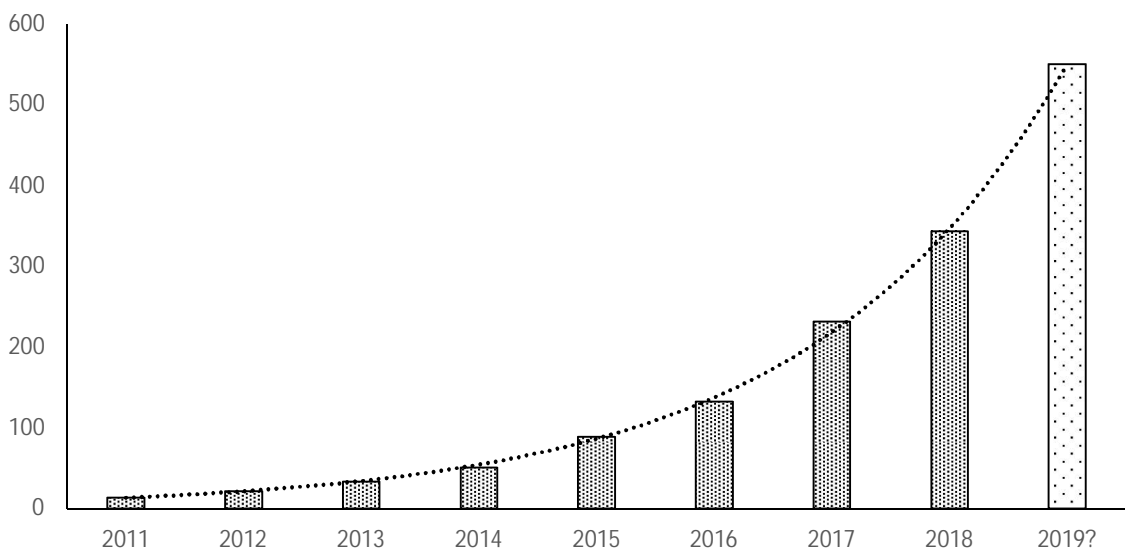
Negatiivinen kontrolli	Näyte, joka vapaa tutkittavasta materiaalista
Positiivinen kontrolli	Näyte, jossa tunnettu määrä tutkittavaa materiaalia
Vuorokausisumma	Mikromuovien määrä näytepisteessä kpl vrk ⁻¹

LYHENTEET

EVA	Eteenivinyyliasettaatti
MAA	Metakryylihapo
MBR	Kalvobioreaktori
MM	Mikromuovi
PDMS	Polydimetyylisiloksaani
PAN	Polyasetonitriili
PE	Polyeteeni
PET	Polyeteenitereftalaatti
PMMA	Polymetyylimetakrylaatti, "Akryyli"
POM	Polyasetaali
PP	Polypropeeni
PS	Polystyreeni
PTFE	Polytetrafluoroeteeni, "Teflon"
SBM	Styreeni-butyylimetakryyli-kopolymeeri
DAF	Korkeapaineflotaatio

1 JOHDANTO

Mikromuoveja (MM) ovat 1 μm – 5 mm kokoiset muovipartikkelit (Frias ja Nash, 2019). Mikromuoveihin liittyvien julkaisujen määrä on eksponentiaalisessa kasvussa (Kuva 1), samoin kuin myös suuren yleisön kiinnostus aihetta kohtaan (GESAMP, 2015, Web of Sciences, 2019). Mikromuoveja löytää maapallolta lähes kaikkialta, kuten koskemattomina pidetyiltä Etelämantereen alueilta (Waller ym. 2017).



Kuva 1. Artikkelien määrän kehitys viime vuosina kappaleina, aiheena "microplastic" (Web of Sciences, haettu 15.1.2019). Vuoden 2019 luku on ennuste.

Mikromuoveja syntyy kahdella tavalla: suurempien muovinkappaleiden hajotessa pienemmiksi osiksi (sekundäärinen tuotanto) tai suoraan valmistamalla esimerkiksi kosmetiikkateollisuudessa (primäärinen tuotanto) (Frias ja Nash, 2019).

Mikromuovien tutkiminen on haastavaa, sillä standardoituja menetelmiä tutkimukseen ei ole, ja mikromuovien luotettava tunnistaminen vaikeutuu koon pienetessä.

Jätevedenpuhdistamot ovat yksi tunnettu mikromuovien kauttakulkureitti ympäristöön. Jätevedenpuhdistamojen mikromuovien puhdistustehosta on tehty viime vuosina useita tutkimuksia ja nykyaikaiset suurten kaupunkien puhdistamot puhdistavat jo 99 % mikromuoveista yli 20 µm kokoluokissa (Carr ym. 2016; Murphy ym. 2016; Talvitie ym. 2017a; 2017b). Vaikka jätevedenpuhdistuksen taso on näin korkea, yhdyskuntien aiheuttaman suuren kuormituksen vuoksi suomalaisilta jätevedenpuhdistamoilta päätyy edelleen mikromuoveja vesiekosysteemeihin arviolta satoja miljardeja kappaleita vuodessa (Talvitie, 2018).

Nenäinniemen jätevedenpuhdistamo on Keski-Suomen suurin jätevedenpuhdistamo, jossa käsitellään noin 165 000 asukkaan jätevedet. Puhdistamolle tehtiin vuosina 2016 – 2018 mittavat saneeraustyöt vedenpuhdistustehon parantamiseksi ja on mielenkiintoista, miten vuonna 2018 asennettu, jätevedenpuhdistuksessa huipputekniikkaa edustava 10 µm huokoskoon kiekkosuodatusjärjestelmä vaikuttaa mikromuovien prosessikohtaloon laitoksella.

Yhdyskuntajätevesi on kuitenkin vain pieneltä osin mikromuovia, joten mikromuovit on eristettävä näytteistä ennen materiaalianalyysiä, jopa 20 µm kokoisia mikromuovipartikkeleita tutkittaessa (Löder ym. 2017). Tässä työssä eristetään puhdistamolta puhdistusprosessin eri vaiheista otetuista näytteistä 20 µm – 5 mm kokoiset mikromuovit, lasketaan niiden pitoisuudet sekä määritetään kemiallinen koostumus ja muodostetaan puhdistamolle taselaskelma, joka ilmentää puhdistamolle tulevaa ja sieltä lähteviä mikromuovivirtoja ja puhdistusprosessin tehokkuutta.

Hypoteesit:

H₁: Kiekkosuodatus lisää puhdistamon kykyä poistaa mikromuoveja lähtevästä jätevedestä.

H₂: Poistetut muovit päätyvät jätevesilietteeseen.

2 TIETEELLINEN TAUSTA

Mikromuovien tutkimiseen ei tätä työtä kirjoittaessa ole standardoituja menetelmiä olemassa. Mikromuovien näytteenotto-, eristys- sekä laskentamenetelmät vaihtelevat tutkimuksesta toiseen, jolloin tulosten vertaileminen mielekkäällä tavalla toisiinsa on haasteellista. Tilanne on kuitenkin parantumassa tiedon lisääntyessä. Tässä kappaleessa esitellään kirjoitushetkellä tiedossa olevia keskeisiä asioita.

2.1 Mikromuovit tutkimuskohteena

Mikromuoveihin on viitattu monissa tutkimusartikkeleissa vuosien varrella. Määritelmät kuitenkin ovat vaihdelleet. Frias ja Nash (2019) ehdottivat mikromuovien määritelmäksi: "Mikromuovit ovat synteettisiä kiinteitä partikkeleita tai polymeerisiä matriiseja, joilla on säännöllinen tai epäsäännöllinen koko ja muoto, joiden koko on 1 μm – 5 mm, jotka ovat joko primääriseen tuotannon tai sekundääriseen hajoamisen tulosta, ja jotka ovat veteen liukenemattomia". Näytteenotto-, käsittely-, ja laskentamenetelmien rajoitusten vuoksi tämän määritelmän alarajaan pääseminen on haasteellista.

Koska muovia käytetään runsaasti niin vaatteissa, rakennusmateriaaleissa kuin esineissä, tulee erityiseksi haasteeksi erottaa tutkittavat muovipitoisuudet mahdollisesta tutkimustyöskentelyn aiheuttamasta kontaminaatiosta. Jo sisäilmassa on valtavia määriä mikromuovia: Gasperin ym. (2018) mukaan tasaiselle pinnalle laskeutuvien kuitumaisten partikkelien lukumäärä vaihteli välillä 1586 – 11130 kpl neliometriä kohden, pääosan ollessa kokoluokan 7 - 15 μm kuituja. Gasperin ym. (2018) mukaan näistä 29 % oli muovia. Kontaminaation riski on siis suuri huoneilmassa työskenneltäessä.

Muoveja ei saisi tutkimuskäsittelyn aikana myöskään hukata eikä muuttaa; se vääristää tutkimustuloksia ja vaikeuttaa materiaalin määrittystä, jos partikkelien kemiallinen rakenne muuttuu.

Tutkittavien muovien kokoluokalla on merkitystä, koska ympäristön mikromuovien kappalemäärä kasvaa jyrkästi tarkasteltavan koon pienentyessä (Araujo ym. 2018). Pelkästään suurempien muovipartikkeleiden tutkiminen voi antaa väärän kuvan kokonaistilanteesta. Jäteveden mikromuoveihin liittyvissä tutkimuksissa määritettävien muovien koon alaraja on vaihdellut tyypillisesti välillä 10 – 300 μm (Kang ym. 2018). Tässä tutkimuksessa valittiin 20 μm alaraja, koska se on osoittautunut käytännölliseksi aikaisemmissa Suomen puhdistamoilla tehdyissä tutkimuksissa (Talvitie, 2018).

2.2 Mikromuovit jätevedenpuhdistamoilla

Kang ym. (2018) teki yhteenvedon mikromuovitutkimuksesta jätevedenpuhdistamoilla. Tulevien jätevesien mikromuovipitoisuudet Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa vaihtelevat kirjallisuudessa välillä 15.1 - 640 MM l^{-1} (mikromuovia litrassa). Lähtevien jätevesien pitoisuudet puolestaan vaihtelivat välillä 0 – 65 MM l^{-1} . Puhdistustehot olivat tyypillisesti kuitenkin 99 % mikromuoveista tai enemmän.

Talvitien ym. (2017a) ja Laresin ym. (2018) mukaan mikromuovipitoisuudet saapuvassa jätevesivirrassa vaihtelevat päivämäärästä ja kellonajasta riippuen, ja kahden näytteenottoajan- tai päivän välinen ero pitoisuudessa voi olla 3-10 kertainen. Tämä tulee ottaa huomioon näytteenottoa suunniteltaessa ja tutkimustuloksia tulkittaessa.

2.2.1. Jätevedenpuhdistusprosessit

Jätevedenpuhdistamojen perusprosessit jaetaan tyypillisesti kolmeen luokkaan: primääri- sekundääri- ja tertiärikäsittelyihin. Primäärin puhdistuksen

tarkoituksena on poistaa jätevedestä lähinnä kiintoainesta kuten puuta, kiviä, hiekkaa ja muuta materiaa mikä voisi vahingoittaa tai tukkia herkempiä jäteveden käsittelylaitteistoja. Yleisimmin primääripuhdistukseen kuuluu välppäys eli eräänlainen karkea suodatus, sekä hiekanerotus, jossa jätevettä johdetaan tarkoitukseen suunniteltujen kanavien läpi, jossa painavampi hiekka-aines laskeutuu kanavan pohjalle. Hiekanerotuksesta jätevesi virtaa edelleen esiselkeytykseen, jossa jäteveden virtausnopeutta alennetaan, jotta liukenemattoman kiintoaineksen laskeutuminen lietteeksi kiihtyy. Primäärikäsittelyn aikana jätevedenpuhdistamoilla aletaan tyypillisesti jäteveteen lisäämään myös kemikaaleja ravinteiden poistoa varten. (TU Delft, Urban Sewage Treatment, 2019).

Sekundäärikäsittelyn alkuvaiheessa yhdistetään primäärikäsitelty jätevesi, aerobiset hajottajamikrobit ja happi. Tämä voidaan toteuttaa lisäämällä jäteveteen aktiivilietettä, eli lietettä, joka sisältää valmiiksi suuren määrään hajottajia, sekä ilmastamalla seosta voimakkaasti. Tällä periaatteella toimii perinteinen aktiivilieteprosessi. Myös muita samankaltaisia järjestelmiä, kuten biologinen suodatin on käytössä. Sekundääriprosessin bakteerit kuluttavat vedestä ravinteita ja happea, ja ne muodostavat sekundääristä lietettä, jota poistetaan prosessista tai kierrätetään aktiivilietteenä. (TU Delft, Urban Sewage Treatment, 2019).

Sekundäärikäsittelystä jätevedestä on poistettu jopa 99 % mikromuoveista (Carr ym. 2016; Murphy ym. 2016; Talvitie ym, 2017a, M. Lares ym. 2018). Edustavien näytteiden saamiseksi näytteenottotilavuuksien on oltava suurempia, mitä puhdistetumpaa jätevesi on.

Puhdistustehon parantamiseksi primääri- ja sekundäärikäsittelyjen lisäksi on yleistymässä ns. tertiäärikäsittelyt. Niiden kirjo on jo laaja, ja Talvitie ym. (2017b) luettelee jäteveden tertiäärikäsittelyjä olevan muun muassa kiekkosuodatus, hiekkasuodatus, tertiäärinen biologinen suodatin sekä bioreaktorikalvosuodatus. Taudinaiheuttajia voidaan vielä lisäksi poistaa esimerkiksi otsonoimalla tai UV-

käsittelyllä. Talvitien (2017b) mukaan erilaiset suodatuksiin perustuvat tertiärikäsittelyt poistavat yli 20 µm kokoluokan mikromuoveista 95 % enemmän kuin perinteiset jätevedenpuhdistusprosessit.

2.3. Tutkimusmenetelmien kehitys

2.3.1. Mikromuovien laskenta ja materiaalien määrittäminen

Mikromuoveja tutkittiin aluksi jätevesinäytteistä silmämääräisesti mikroskopoimalla (Kang ym. 2018). Shimin ym. (2017) ja Ziajahromin ym. (2017) mukaan silmämääräinen tarkastelu johtaa kuitenkin suurella todennäköisyydellä muovien määrän yli- tai aliarvioimiseen. Silmämääräiseen tunnistamiseen perustuva menetelmä soveltunee suurehkojen 2 - 5 mm kokoluokan mikromuovien karkeaan ja nopeaan tunnistamiseen (Shim., ym 2017). Tätä pienempien muovien tunnistamisessa on syytä käyttää muita menetelmiä.

Viime vuosien yleisimmät mikromuovien karakterisointimenetelmät ovat olleet värähtelyspektroskopiaan perustuvat Fourier-infrapunaspektroskopia (FT-IR) sekä Raman-mikroskopia (Araujo ym. 2018, Kang ym. 2018). Erottelukyky menetelmissä on noin 10 µm (FT-IR) ja 1 µm (Raman-mikroskopia). Menetelmät ovat kuitenkin toistaiseksi aikaa vieviä ja analyysilaitteistot kalliita (Shim ym. 2017).

Muita käytettyjä menetelmiä ovat densitometria, differentiaalinen pyyhkäisykalorimetria ja kaasukromatografi-massaspektrometria (Araujo ym. 2018).

2.3.2. Mikromuovien eristäminen vedestä ja jätevesilietteestä

Löderin ym. (2017) mukaan muovien osuus näytematriisista ympäristönäytteiden kohdalla on suhteellisen pieni, alle 2 % näytteen kokonaispainosta. Näytteestä siis täytyy, etenkin tutkittavan partikkelikoon pienentyessä alle 100 µm luokkaan, pystyä poistamaan mahdollisimman pitkälle kaikki muu paitsi muovi.

Talvitien (2018) mukaan eristyskäsittelyt ovat perustuneet veden poistamiseen, orgaanisen aineen hajottamiseen ja tiheuserotteluun. Tilavuuden pienentäminen on tapahtunut siivilöimällä, suodattamalla tai kelluttamalla (tiheyden mukaan erotteleva menetelmä). Tilavuuden pienentäminen vähentää myös eristyskäsittelyn myöhemmissä vaiheissa käytettävien reagenssien kulutusta ja siten kustannuksia.

Orgaanista ainetta on jätevesinäytteistä vähennetty Talvitien (2018) mukaan vaihtelevan vahvaisilla suola-, typpi- tai perkloorihapoilla tai niiden sekoituksilla, tai emäksisillä natrium- tai kaliumhydroksidiliuoksilla. Happo- ja emäskäsittelyjen heikkoutena on kuitenkin niiden haitalliset vaikutukset muovipartikkeleille, sillä ne voivat sulattaa muoveja, tuhota tai pienentää niiden kokoa ja myös muuttaa niiden kemiallista rakennetta, jolloin materiaalin tunnistaminen vaikeutuu (Hurley ym. 2018, Talvitie ym. 2018).

Tässä työssä käytettiin Löderin ym. (2017) kehittämää eristysmenetelmää, jossa yhdistetään vetyperoksidihapetus, entsymaattinen käsittely ja tiheuserotus. Menetelmä soveltuu Löderin ym. (2017) mukaan monenlaisille näytematriiseille: pinta- ja jätevesinäytteet, rasvaiset eliöperäiset näytteet kuten simpukan kudokset, sedimenttinäytteet, pintavesinäytteet ja sokeripitoisille näytteille kuten ruokanäytteet. Entsymaattista menetelmää käyttämällä Löder ym. (2017) vähensi näytteen kuivapainoa $98,3 \pm 0,1$ %.

2.3.3. Negatiivinen ja positiivinen kontrolli

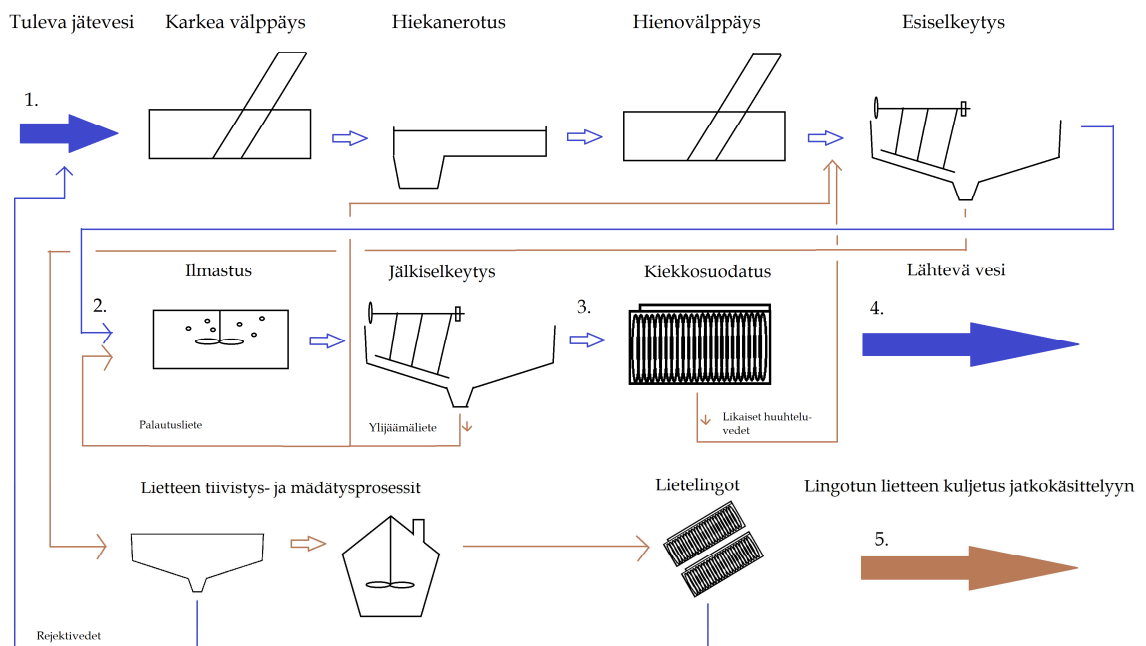
Jotta työn tuloksista saadaan muihin tutkimuksiin nähden vertailukelpoisia, on selvitettävä menetelmien vaikutus mikromuovipitoisuuksiin. Laadunvarmistukseen kuuluu negatiivinen ja positiivinen kontrolli. Negatiivisella kontrollilla tarkoitetaan näytettä, jonka tiedetään olevan vapaa tutkittavasta aineesta (tässä tapauksessa muovi). Mikäli näytekäsittelyn jälkeen negatiivisesta kontrollista löytyy muovia, tiedetään, mikä on käsittelyn aiheuttaman kontaminaation taso.

Positiivisella kontrollilla taasen tarkoitetaan näytettä, johon on lisätty tunnetun laatuista ja kokoista muovia, joka voidaan erottaa näytteessä valmiiksi olevista muoveista luotettavasti. Näytekäsittelyn lopuksi positiivisesta kontrollista lasketaan jäljelle jääneet muovit ja määritetään laboratoriokäsittelyn saanto. Saantoa käytetään laboratoriotyöskentelyn tason arviointiin. Löder ym. (2017) käytti positiivisissa kontrolleissa kirkkaan punaisia, 180 - 212 µm halkaisijan polyeteenipartikkeleita, joiden saannoksi saatiin 84,5 %. Simon ym. (2018) käytti hieman vastaavan kaltaisen laboratoriokäsittelyn positiivisina kontrolleina pieniä (koko tuntematon) polystyreenirakeita (PS) sekä epäsäännöllisen muotoisia, tuntemattoman kokoisia polyeteenipartikkeleita (PE). Näiden saannoksi tuli 77,7 % ja 57,6 %, vastaavasti. Tätä korkeampia saantoja voinee pitää luotettavina.

3 AINEISTO JA MENETELMÄT

3.1. Nenäinniemen jätevedenpuhdistamo

Nenäinniemen jätevedenpuhdistamo on Keski-Suomen suurin jätevedenpuhdistamo, joka palvelee noin 165 000 asukkaan tarpeita. Puhdistamon omistaa Jyväskylän Seudun Puhdistamo Oy, jonka omistavat Jyväskylän kaupunki sekä Laukaan ja Muuramen kunnat yhdessä. Puhdistamo otettiin alun perin käyttöön vuonna 1973, ja ennen vuotta 2018 jätevedenpuhdistus laitoksella perustui primääri- ja sekundäärikäsittelyihin. Primäärikäsittelyihin kuuluvat karkea välppäys, hiekanerotus, hienovälppäys ja esiselkeytys, sekundäärikäsittelynä toimii biologinen aktiivilieteprosessi (ilmastus ja jälkiselkeytys). Tertiäärikäsittelynä käytössä on vuonna 2018 käyttöön otettu 10 µm huokoskoon kiekkosuodatus. Kuvassa 2 ovat puhdistamon keskeiset prosessiyksiköt esiteltyinä sellaisina kuin ne ovat vuoden 2019 alussa.



Kuva 2. Nenäinniemen jätevedenpuhdistamon keskeiset prosessit vuoden 2019 alussa. Siniset nuolet kuvaavat vesiä ja ruskeat lietteitä. Numerot kuvaavat näytteenottopisteitä: 1 - tuleva jätevesi, 2 – primäärikäsitelty jätevesi, 3 – sekundäärikäsitelty vesi, 4 – lähtävä (tertiäärikäsitelty) vesi, 5 – linkokuivattu liete.

Ympäristölupaehtoien tiukentuessa vaatimukset biologisen ja kemiallisen hapenkulutuksen, ravinteiden (ammoniumtyppi ja fosfori), sekä kiintoaineen ja taudinaiheuttajien poistoteholle kasvoivat, ja Nenäinniemen puhdistamolla aloitettiin vuonna 2016 mittava saneerausprojekti, jotta poistoteho vastaisi vuonna 2018 voimaan astuvan ympäristöluvan ehtoja. Saneeraus tuli päätökseen syksyllä 2018, ja sen merkittävimpinä muutoksina aiempaan olivat ilmastusaltaiden laajennus, uuden jätkiselkeyttimen rakennus sekä terciäärikäsittelyjen lisäys. Lisätyt terciäärikäsittelyt olivat kemikalointi, 10 µm huokoskoon kiekkosuodatus sekä UV-hygienisointi.

3.2. Näytteenotto

Näytteet otettiin tulevasta jätevedestä (piste 1, Kuva 2), primäärikäsittelystä jätevedestä (piste 2, Kuva 2), sekundaarikäsittelystä jätevedestä (piste 3, Kuva 2),

tertiärikäsittelystä lähtevästä vedestä (piste 4, Kuva 2) ja anaerobisesti käsitellystä liingotusta lietteestä (piste 5, Kuva 2). Näytepisteiltä otettiin kolme rinnakkaista kertanäytettä. Näytteenotto kaikilta näytepisteiltä suoritettiin 7.9.2018 kello 09:00 - 20:00 välisenä aikana. Näytteenotto aloitettiin puhdistamon alkupäästä (tuleva vesi) tertiärikäsittelyyn (lähtevä vesi) asti edeten.

3.2.1. Tuleva jätevesi

Tulevan jäteveden näytteet otettiin sinkkiämpärillä ja kaadettiin kannulla suppilon kautta polyeteenistä (PE) valmistettuihin pulloihin (tilavuus 1 l). Pullot oli huuhdeltu laboratoriossa kraanavedellä ja lisäksi ultrapuhdalla vedellä (Milli-Q IQ 7000 ja Milli-Q HR 7060, Merck KGaA).

3.2.2. Suuren tilavuuden näytteet

Näytteenotto esiselkeytyksen jälkeisistä vaiheista tehtiin Talvitien ym. (2018) in situ jaottelumenetelmällä, jossa kierrettävien putkiliittimien kumitiivisteiden väliin asetetuille 300 µm, 100 µm ja 20 µm silmäkoon nylonhaavikankaista tehdyille suodattimille pumpattiin näytepisteeltä jätevettä, kunnes suodatinkankaat tukkeutuivat. Suodattimia vaihtaessa liittimet huuhdeltiin ultrapuhdalla vedellä. Näytetilavuudet määritettiin Gardena Water Smart Flow Meter -virtausmittarilla. Eri näytepisteiltä pumpattavat tilavuudet vaihtelivat suodatinkoosta ja pisteestä riippuen 1 – 1000 l välillä. Näytteet pakattiin maastossa kosteina petrimaljoihin, ja niitä säilytettiin valolta suojattuna viileässä myöhemmin tässä työssä esiteltävään eristysmenettelyyn asti. Näytteet pidettiin säilytyksen ajan ultrapuhdasta vettä ruiskuttamalla kosteana, jotta muovit eivät kuivumisen takia takertuisi suodatinkankaisiin.

3.2.3. Kiinteä näyte

Anaerobisesti käsitellystä linkokuivatusta lietteestä otetut näytteet pakattiin folioon, joka suljettiin 500 ml Orthex-pakasterasiaan, ja näytteitä säilytettiin pimeässä 4 °C lämpötilassa.

3.3. Mikromuovien eristäminen näytteistä

3.3.1. Näytteiden esikäsittely

Jotta haluttu tilavuus tulevaa jätevettä mahtuisi tässä tutkimuksessa käytettyihin 250 ml hioskorkillisiin lasipulloihin (eristyskäsittelyissä myöhemmin käytettävä reaktioastia), piti ennen Löderin ym. (2017) menettelyyn siirtymistä näytettä tiivistää suodattamalla näytteestä vettä pois Millipore-vakuumisuodatusjärjestelmällä (Model no. WP6122050, lasinen suodatuspullo ja teräksinen suodatinalusta- ja suppilo, silikonitiiviste). Ensin näyte suodatettiin Millipore-suodatusjärjestelmällä 300 µm huokoskoon terässuodattimelle, josta jäämät huuhdeltiin reaktioastiaan ultrapuhtaalla vedellä. Tämän jälkeen suodos suodatettiin 100 µm huokoskoon suodattimen läpi, josta taas jäämät huuhdeltiin reaktioastiaan. Lopulta 100 µm suodos suodatettiin vielä kertaalleen 20 µm suodattimen läpi, ja jäämät huuhdottiin ultrapuhtaalla vedellä reaktioastiaan, ja suodos kaadettiin pois.

Anaerobisesti käsitellyn linkokuivatun lietteen kuiva-ainepitoisuus määritettiin standardin SFS-3008 (1981) mukaisesti kaikista kolmesta rinnakkaisesta näytteestä. Vähintään 10 g kuiva-ainetta sisältävä vastaava määrä näytettä punnittiin reaktioastioihin.

Näytteiden välissä kaikki suodatukseen liittyvät välineet huuhdeltiin kraanavedellä sekä ultrapuhtaalla vedellä.

3.3.2. Mikromuovien eristäminen entsyymaattisella menetelmällä

Työssä sovellettiin Löderin ym. (2017) kehittämää entsyymaattista eristysmenetelmää (Kuva 3), joka on kehitetty muovien eristämiseksi useista erilaisista näytematriiseista. Menetelmässä poistetaan näytteen orgaaninen aines entsyymejä (proteaasi, lipaasi, sellulaasi ja kitinaasi) hyväksikäyttäen sekä 30 % vetyperoksidilla hapettamalla, ja hiekka tiheyserottelulla. Menetelmä on muovien kannalta hellävaraisempi kuin esimerkiksi voimakkaiden happojen tai emästen

käyttö. Tässä työssä menetelmää muokattiin alkuperäiseen julkaisuun verrattuna siten, että ensimmäinen vaihe (natriumlauryylisulfaattikäsittely) korvattiin vetyperoksidihapetuksella (30 % H₂O₂), koska ensimmäisissä kokeiluissa ennen varsinaisten näytteiden käsittelyä vetyperoksidihapetuksen todettiin poistavan orgaanista ainesta tehokkaammin. Entsyymikäsittelyiden reagenssien valmistus, eristyslämpötilat sekä käsittelyajat tehtiin Löderin ym. (2017) julkaisussa esitettyjen ohjeiden mukaisesti. Tässä työssä käytettiin samanlaisia entsyymejä (ASA Specialenzyme GmbH) kuin Löderin ym. (2017) julkaisussa.



Kuva 3. Kaaviokuva tässä työssä käytetystä eristysmenettelystä. Vasemmassa sarakkeessa on käytetty liuos ja oikealla puolella vastaavasti käsittelyn vaatima aika vuorokausina ja lämpötila (t) Celsiusasteina. (Löder ym. 2017).

Eristyskäsittelyn aikana reagenssit vaihdettiin tulevan jäteveden ja suuren tilavuuden näytteistä suodattamalla näyte Millipore-vakuumisuodatusjärjestelmällä 20 µm terässuodattimille ja laittamalla terässuodattimet takaisin 250 ml hioskorkillisiin lasipulloihin sekä mittaamalla eristysmenetelmässä seuraavana vuorossa olevat reagenssit suodattimien päälle.

Tässä työssä käsittelyyn menevä kuiva-aineen määrä anaerobisesti käsitellyn linkokuivatun lietteen osalta oli 11 – 14 grammaa. Näin suuri määrä kuiva-ainetta ei suodattunut 20 µm suodattimelle, joten pelkän välisuodatuksen sijaan reagenssit vaihdettiin siten, että näyte ensin jaettiin 50 ml näyteputkiin (VWR International, eränumero: 803CD) ja sentrifugoitiin 3000 G:ssä nopeudella 2 min ajan. Tämän jälkeen supernatantti kaadettiin lasiseen dekanterilasiin, ja pelletti (pohjalle jäänyt aines) sekoitettiin näyteputkessa ultrapuhdaaseen veteen vorteksoimalla 1 min ajan. Tämän jälkeen näyteputket sentrifugoitiin taas 2 min ajan 3000 G:ssä, ja supernatantti kaadettiin lasiseen dekanterilasiin. Tämän jälkeen supernatantti suodatettiin 20 µm silmäkoon terässuodattimella, ja suodatin jäämineen asetettiin pinseteillä reaktioastian pohjalle. Sentrifugoidut pelletit lisättiin samaan astiaan, ja edettiin Löderin ym. (2017) menettelyn mukaisesti.



Kuva 4. Havainnekuva näytteistä reaktioastioissaan entsymaattisen eristyksen aikana.

Lopuksi näytteistä eroteltiin hiekka tiheyserottelulla. Näyte huuhdeltiin viimeisen 20 µm suodattimelle tehdyn suodatuksen jälkeen tiheydeltään (ρ) 1,6 – 1,8 g cm⁻³ sinkkikloridi (ZnCl₂) -liuoksella erotussuppiloon, josta varovasti laskettiin 24 h aikana tasaisin väliajoin laskeutunut aines pois. Kun erotussuppilon pohjalle ei enää asettunut mitään, sinkkikloridiliuoksesta suodatettiin partikkelit 20 µm terässuodattimelle, jolta ne huuhdottiin takaisin reaktioastiaan 70 % etanoliliuokseen säilytystä varten.

3.4 Yli 300 µm partikkelien poiminta

Suuren tilavuuden näytteistä yli 300 µm kokoluokasta muovipartikkelit eroteltiin muusta näytematriisista valomikroskoopin alla pinseteillä poimimalla, sekä niiden määrä laskettiin ja materiaalit määritettiin välittömästi lasilevyltä Thermo Fischer Scientific DXR2 Raman-mikroskoopilla. Muovit siirrostettiin lasilevylle asettamalla ne 10 – 20 kappaleen ryhmissä vesipisaroihin, joiden annettiin kuivua ennen siirtämistä Raman-mikroskooppiin.

3.5. Partikkelitaseen määrittäminen Raman-mikroskopiolla

Partikkelitaseen määrittämistä varten puhdistetut, etanoliliuokseen säilötyt näytteet suodatettiin 0,2 µm huokoskoon Whatman Anodisc 25 mm alumiinioksidisuodattimille (eränumero: A18073265). Suodattimet suljettiin tämän jälkeen lasisiin 50 mm halkaisijan petrimaljoihin mikroskoopille kuljetuksen ajaksi.

Mikromuovit laskettiin ja muovilaadut määritettiin näytteistä Thermo Fischer Scientificin DXR2 Raman-mikroskoopilla käyttäen 785 nm laseria. Käytetty ohjelmisto oli OMNIC 9. Mikroskoopin asetukset haettiin sellaisiksi, että < 0.5 µm PP-partikkelit antoivat mahdollisimman suuren vasteen. Asetusten haarukoimiseen käytettiin mikromuovien kokoluokkaa olevia raastettuja polyeteenilastuja. Toimivimmaksi konfiguraatioksi havaittiin seuraavat asetukset: Laserin teho 20 mW, aukko 50 µm, tavoiteltu signaali/kohinasuhde (S/N) 100,

valotuksen maksimiaika 1 min, 10X objektiivi. Suuremmalla laserin teholla (maksimi 35 mW) osa mitattavista partikkeleista hajosi, pienemmällä (alle 10mW) signaali jäi liian heikoksi, jotta muoveja voitaisiin tunnistaa. Wolff ym. (2019) käyttivät samanlaisella laitteella ja laserilla samaa 20 mW tehoa.

Kahdeksantoista näytteen jälkeen käytössä ollut DXR2 Raman-mikroskooppi meni epäkuntoon, jonka jälkeen loput 16 näytettä laskettiin ja muovilaadut määritettiin saman valmistajan DXR 2xi Raman-mikroskoopilla. Jälkimmäisellä laitteella käytettiin OMNIC xi-ohjelmaa, jossa 785 nm laserin teho oli 20 mW, aukko 50 µm, valotusaika 1 s ja toistojen määrä 20 per Raman-mittaus, objektiivi 10X.

Muovien Raman-spektriä verrattiin ohjelmistojen mukana tuleviin valmiisiin kirjastoihin ja tavoitetasoksi tunnistamiselle asetettiin ohjelman ilmoittamana 70 % tai suurempi vastaavuus vertailuspektriin. Jos vastaavuus oli ohjelman mukaan 50 - 70 %, arvioitiin vastaavuutta piikkien sijainnin perusteella.

Jokaisesta näytteestä ei voitu laskea mikromuoveja koko Anodisc -suodattimen pinta-alalta kerralla, koska se olisi vienyt aikaa enemmän kuin yhden työpäivän näytettä kohden. Mikromuovit laskettiin kuitenkin vähintään yhdeltä neljäsosalta jokaisen suodattimen pinta-alasta. Koska suodattimien kokonaispinta-ala ja tutkittu ala tiedetään, pystytään laskemaan alkuperäisen näytteen mikromuovipitoisuudet yhtälöstä 1,

$$c = n_k / \frac{A_k}{A_t} * V \quad (1)$$

jossa c on mikromuovien pitoisuus näytepisteessä (MM l⁻¹), n_k tunnistettujen mikromuovien määrä kuvatulla alalla, A_k on suodattimelta tutkittu pinta-ala neliömillimetreinä (mm²), A_t on suodattimen kokonaispinta-ala (mm²) ja V näytteen alkuperäinen tilavuus litroina.

3.6 Virhelähteiden hallinta

Jotta jopa 20 µm kokoluokan muovipartikkelien määrää voitaisiin tutkia luotettavasti, joudutaan tekemään huomattava määrä varotoimenpiteitä kontaminaation välttämiseksi.

3.6.1. Työvälineet

Tässä työssä näyttekäsittelyt tehtiin laminaarissa (Kojair Tech Oy, malli KR-125 Safety), jossa ylhäältä alas puhallettavaa tasaista ilmavirtausta hyväksikäyttäen erotetaan huoneilma ja näytteet toisistaan. Ainoastaan lietenäytteiden sentrifugoinnin välissä supernatantit kaadettiin huoneilmassa dekantterilaseihin, joskin ne ja sentrifugiputket peitettiin kaatojen välissä välittömästi alumiinifoliolla. Näin minimoitiin huoneilmasta mahdollisesti tuleva mikromuovikontaminaatio. Kaikissa työvaiheissa käytettiin metallisia ja lasisia välineitä. Huuhteluissa käytetyille ruiskupulloille (Nalgene 0,25 l) ei löytynyt muovivapaata korviketta, samoin kuin sentrifugoinnissa käytetyille näyteputkille. Laboratoriossa käytetyt työtakit olivat 100 % puuvillaa (VWR International).

Kaikki eristysmenetelmässä käytetyt entsyymit ja reagenssit suodatettiin Millipore-suodatusjärjestelmällä 47 mm halkaisijan 1,5 µm huokoskokoon suodattimien läpi (GF/A, Whatman). ZnCl₂-liuos (tiheys 1,6-1,8 g cm⁻³) ei suodattunut tämän huokoskokoon läpi, joten se suodatettiin 10 µm silmäkoon 47 mm terässuodattimen läpi samalla laitteistolla.

Kaikki välineet (astiat, pinsetit, suodattimet ym.) huuhdottiin ennen käyttöä ja näytteiden välissä vähintään hanavedellä sekä ultrapuhtaalla vedellä tai 1,5 µm suodattimen läpi (GF/A, Whatman) suodatetulla 70 % w/w etanoliliuksella.

3.6.2. Negatiivinen kontrolli

Näytteenoton ja käsittelyjen kontaminaation määrän selvittämiseksi valmistettiin myös näytteet, jotka eivät olleet jäteveden kanssa tekemisissä lainkaan.

Tulevan jäteveden näytteiden kontrollit valmisteltiin siten, että näytepullojen tapaan esikäsitellyt PE-HD-pullot täytettiin ultrapuhtaalla vedellä ja peitettiin foliolla, sekä otettiin näytteenottotapahtumaan mukaan. Näytepullot avattiin jätevedenpuhdistamolla, pidettiin 60 s ajan auki ja folio sekä korkki kierrettiin takaisin paikoilleen.

Suuren tilavuuden näytteiden kontrollit valmistettiin käyttämällä eri kokoluokkia vastaavia suodatinkankaita paikoillaan suodatusputkessa, jonka jälkeen toistettiin muille suuren tilavuuden näytteille tehdyt käsittelyt. Negatiivisille kontrolleille ei kuitenkaan pumpattu mitään, sillä käytännössä jopa 1 m³ näytilavuuksia vastaavia määriä ultrapuhdasta vettä ei ollut saatavilla pumpattavaksi. Tämä jättää pumpusta mahdollisesti irtoavan muovikontaminaation huomiotta.

3.6.3. Positiivinen kontrolli

Löderin ym. (2017) entsyymaattisessa eristysmenetelmässä tulee yksittäiselle näytteelle noin kymmenen käsittelyä, joten on tärkeää varmistua, ettei muoveja katoa näytteiden käsittelyn aikana. Tässä työssä saanto määritettiin lisäämällä kolmeen erilliseen, vain tätä tarkoitusta varten otettuun tulevaa jätevettä sisältävään näytteeseen polypropeenistä (PP) veitsellä vuoltuja vaaleanpunaisen värisiä mikromuoveja. Vuollut vaaleanpunaiset muovit olivat kooltaan 0,5-2 mm. Kymmenen kappaletta lisättiin jokaiseen näytepulloon, minkä jälkeen kaikki käsittelyt tehtiin täsmälleen samalla tavalla tiheyserotteluun asti. Tiheyserottelun jälkeen näytteet suodatettiin 20 µm suodattimelle, josta muovit laskettiin valomikroskoopin avulla. Saanto eli S saadaan yhtälöstä 2,

$$S = \frac{n_f - n_i}{n_i} * 100 \quad (2)$$

jossa n_f on kappalemäärä lopussa, n_i on kappalemäärä alussa.

3.7 Taselaskelma ja puhdistusteho

Mikromuovitaseen määrittämiseksi laskettiin mikromuovipitoisuuksien ja näytepäivän virtaamien (Liite 1) tulona näytepistekohtaiset vuorokausisummat. Näin saadut luvut ovat muotoa kpl vrk^{-1} . Tulevan jäteveden sekä primääri- ja sekundäärikäsiteltyjen vesien virtaamatiedon saamiseen käytettiin Nenäinniemen päävirtaamamittaria, joka sijaitsee hiekanerotusaltaan jälkeen (Kuva 2). Taselaskelmassa päädyttiin käyttämään päävirtaamamittarin lukemaa, koska esiselkeytyksen jälkeisen nostopumppaamon ylä- ja alapuolelta saatavien virtaamamittausten tulokset olivat ristiriitaisia.

Anaerobisesti käsitellyn linkokuivatun lietteen poistuma Nenäinniemen puhdistamolta saatiin Mustankorkean kaatopaikalle saapuvan lietteen kuiva-aineen vuorokausittaisesta määrästä tonneina (Liite 1).

Mikromuovien puhdistusteho jätevedenpuhdistamolla tai yksittäisessä näytepisteessä laskettiin yhtälöstä 3, jossa puhdistusteho Z prosentteina,

$$Z = \frac{c_1 - c_2}{c_1} \times 100 \quad (3)$$

jossa C_1 on saapuvan jäteveden vuorokausisumma (kpl vrk^{-1}) ja C_2 lähtevän jäteveden vuorokausisumma. Vastaavasti puhdistusteho laskettiin myös anaerobisesti käsitellyn linkokuivatun lietteen ja lähtevän jäteveden sisältämien mikromuovien vuorokausisummien suhteesta.

3.8. Tilastollinen tarkastelu

Eri näytepisteiden välisten mikromuovien vuorokausisummien ja materiaalien sekä kokojakauman vaihtelun tilastollista merkitsevyyttä testattiin IBM SPSS Statistics 24 -ohjelmalla. Tilastolliset nollahypoteesit olivat seuraavat:

H_{Laatu} : Muovien laatu jakauma ei vaihtelee eri näytepisteissä.

$H_{\text{Pitoisuus}}$: Muovien vuorokausisummat eivät vaihtelee eri näytepisteissä.

H_{Koko} : Muovien koko ei vaikuta pitoisuuteen.

Tilastollisen merkitsevyyden rajaksi asetettiin $p \leq 0.05$. Muovilaaduille ja kokojakaumalle lasketut suhteelliset prosenttiosuudet ensin arcsin-muunnettiin, jonka jälkeen muovilaatujen vaihtelua eri näytepisteissä tutkittiin toisistaan riippuvien näytteiden Friedmanin kaksisuuntaisella varianssianalyysillä. Näytepisteiden vuorokausisummien vaihtelua sekä kokojakauman vaikutusta pitoisuuteen testattiin toisistaan riippumattomien näytteiden Kruskal-Wallis – testillä.

4 TULOKSET

4.1. Positiivinen ja negatiivinen kontrolli

Negatiivisista kontrollinäytteistä mitattiin $3,7 \pm 5,5 \text{ MM l}^{-1}$. Positiivisten kontrollien saannoksi saatiin $97 \pm 5,7 \%$. Tuloksille ei tehty korjauksia kontrolleihin liittyen.

4.2. Jäteveden mikromuovit

4.2.1. Mikromuovipitoisuudet

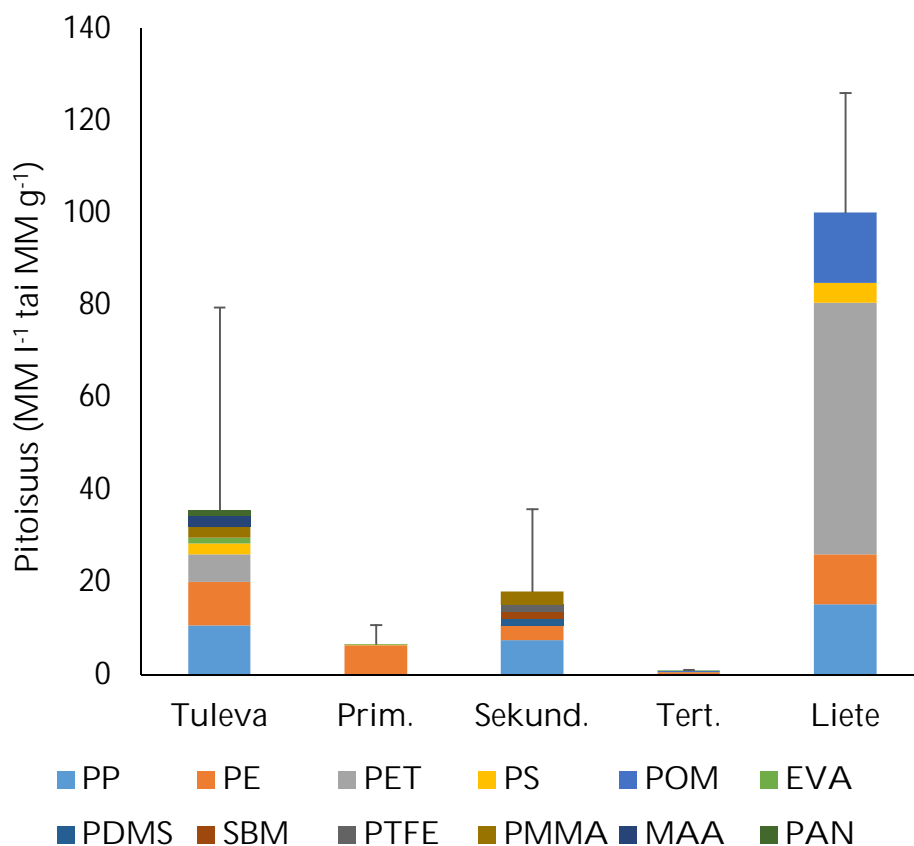
Jäteveden suurimmat mikromuovipitoisuudet mitattiin odotetusti puhdistamolle saapuvasta jätevedestä. Primäärikäsitteilyn jälkeisestä näytepisteestä mitattiin huomattavasti alhaisempia mikromuovipitoisuuksia, mutta sekundäärikäsitteilyssä mikromuovien pitoisuus oli jälleen suurempi. Tertiäärikäsitteilyn jälkeen mitattiin kaikkein pienimmät pitoisuudet (Taulukko 1).

Näytepiste	Pitoisuus	
	MM l ⁻¹	MM g ⁻¹ ka
Tuleva jätevesi	35 ± 44	
Primäärikäsitelty jätevesi	3,3 ± 4,3	
Sekundäärikäsitelty jätevesi	13 ± 18	
Tertäärikäsitelty jätevesi	0,3 ± 0,2	
Linkokuivattu liete		100 ± 26

Taulukko 1. Mikromuovien (MM) pitoisuudet litraa ja grammaa kuiva-ainetta (ka) kohti eri näytteenottopisteissä ± keskihajonta.

4.2.2. Mikromuovien laatujauma

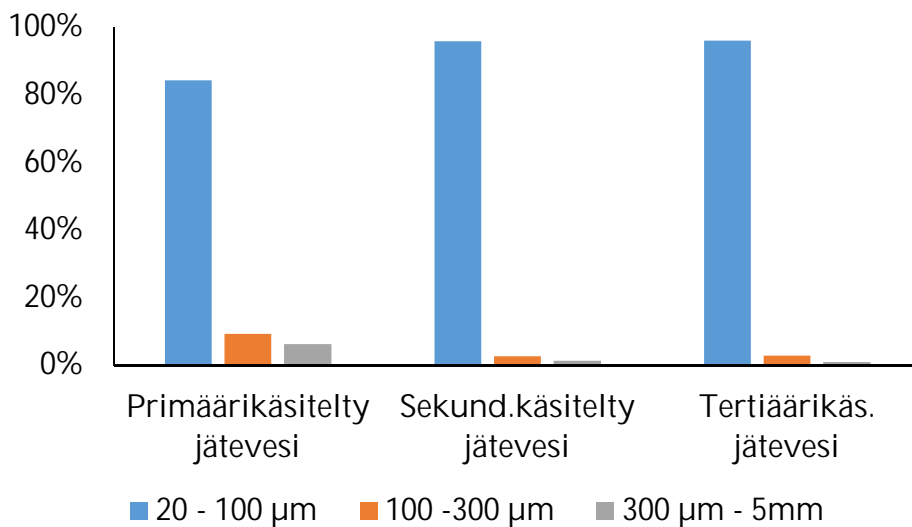
Analysoiduista näytteistä tunnistettiin yhteensä 12 erilaista muovilaatua. Näytepisteiden yleisimmät muovilaadut olivat pääosin samoja eri pisteissä (Kuva 5). Muovilaatujen vaihtelu eri pisteissä ei ollut tilastollisesti merkitsevää ($p = 0,784$).



Kuva 5. Näytepisteistä määritetyt mikromuovipitoisuudet sekä laadut. PP – polypropeeni, PE – polyeteeni, PET – polyeteenitereftalaatti, PS – polystyreeni, POM = polyasetaali, EVA = eteenivinyylisetaatti, PDMS - polydimetyylisiloksaani, SBM – styreeni butyyliimetakrylaatti, PTFE = polytetrafluoroeteeni eli "teflon", PMMA = akryyli, MAA = metakryylihapo (muovin valmistuksen raaka-aine), PAN = polyasetonitriili. Virhepalkit ilmentävät kokonaispitoisuuksien keskihajontoja.

4.2.3. Mikromuovien kokojakauma

Mikromuovien kokojakauma oli eri pisteissä samankaltainen, ja 20 – 100 µm kokoluokan mikromuoveja esiintyi eniten (Kuva 6). Pienimmän ja suurimman kokoluokan välinen jakauma erosi tilastollisesti merkitsevästi (Kruskall-Wallisn riippumattomien otosten testi, $p = 0.05$).



Kuva 6. Mikromuovien kokojakauma suuren tilavuuden näytteenottopisteiltä.

4.3. Lietteen mikromuovit

Lietteen mikromuovipitoisuus oli 100 ± 26 kpl g^{-1} ka (Taulukko 1). 54 % lietteen mikromuoveista oli PET-muovia (Kuva 5).

4.4. Mikromuovitase

Puhdistamolle kulkeutuu tulevan jäteveden mukana 1,1 miljardia mikromuovia vuorokaudessa, ja lähtevän jäteveden mukana vastaanottavaan vesistöön (Päijänteeseen) virtaa 8,8 miljoonaa mikromuovia vuorokaudessa (Kuva 7).

Mikromuovien kokonaispoistoteho tulevasta ja lähtevästä jätevedestä laskettuna oli 99 %. Jos puhdistamolla ei olisi tertiäärikäsittelyä (kiekkosuodatinta), pelkän primääri- ja sekundaarikäsittelyn yhteisteho olisi 63 %.

Lähtevän jäteveden vuorokausisumma erosi tilastollisesti merkitsevästi tulevan jäteveden ja anaerobisesti käsitellyn linkokuivatun lietteen vuorokausisummista (Kruskall-Wallisin riippumattomien otosten testi, $p = 0.011$ ja $p = 0.005$, vastaavasti). Tulevan jäteveden ja anaerobisesti käsitellyn linkokuivatun lietteen vuorokausisummat eivät eronneet tilastollisesti merkitsevästi toisistaan (Kruskall-Wallisin riippumattomien otosten testi, $p = 0,784$). Suurin osa poistetuista mikromuoveista päätyi linkokuivattuun lietteeseen (Kuva 7).



Kuva 7. Mikromuovien päiväkohtainen tase Nenäinniemen jätevedenpuhdistamolla.

5 TULOSTEN TARKASTELU

5.1 Positiivinen ja negatiivinen kontrolli

Yhdestä negatiivisesta kontrollinäytteestä analysoitiin 3 PP- yksi POM- sekä yksi PE-partikkeli, ja toisesta yksi PP-partikkeli. Kolmas rinnakkainen kontrolli osoittautui muovivapaaksi. Työssä mikromuovien eristämiseksi sovelletussa Löderin ym. (2017) menettelyssä on kymmenen vaihetta, jossa näytteen käsittelylius vaihdetaan. Vaikka erityistä huolellisuutta noudatettiin, mahdollisesti huoneilmasta tai muista näytteistä päätyi muutama partikkeli negatiivista kontrollia edustavaan näytteeseen.

Tässä työssä määritetty kontaminaation määrä jäi muihin jätevedenpuhdistamojen mikromuovitutkimuksiin nähden pieneksi. Esimerkiksi Simon ym. (2018) määrittä tanskalaisilla jätevedenpuhdistamoilla tehdyssä mikromuovitutkimuksessaan näytekäsittelyn kontaminaation tason olevan 2110 MM l^{-1} (17 % kaikista havaituista partikkeleista). Lares ym. (2018) määrittä mikkeliiläisellä Kenkäveronniemen jätevedenpuhdistamolla tehdyssä tutkimuksessaan kontaminaation tasoksi $4,4 \pm 1,4$ mikromuovipartikkeliä per näyte yli $250 \mu\text{m}$ kokoluokassa. Kaikissa mikromuovitutkimusta käsittelevissä artikkeleissa partikkelien ja kuitujen määrää kontrollinäytteissä ei ole eritelty, eikä toisaalta kontrollejakaan välttämättä tehty, mutta esimerkiksi Löder ym. (2017) ja Mintenig ym. (2017) raportoivat kontaminaatiota ilmenneen varotoimista huolimatta, ja sen täydellinen välttäminen lienee muovien yleisyyden takia mahdotonta parhaimmillakin menetelmillä.

Anaerobisesti mädätetylle linkokuivatulle lietteelle ei tehty negatiivista kontrollia, sillä saatavilla ei ollut mielekäästä muovivapaata matriisia, joka käyttäytyisi kuten linkokuivattu liete.

Koska kaikille erityyppisille näytteille ei saatu tehtyä negatiivisia kontrolleja, ei laboratoriotyöskentelyn kontrolleja käytetty tulosten korjaamiseksi. Negatiivisten

kontrollien mikromuovipitoisuudet jäivät muutenkin alhaisiksi, eli laboratoriotyöskentelyn taso oli hyvä.

Positiivisia kontrolleja ei ollut myöskään mielekästä käyttää tulosten korjaamiseen, sillä käytetyt PP-lastut olivat kooltaan suuria, eivätkä välttämättä kuvanneet kaikentyyppisten- ja kokoisten mikromuovien käyttäytymistä näytekäsittelyssä, jolloin korjaus voisi antaa väärän kuvan todellisesta tilanteesta.

Simon ym. (2018) piti jopa 58 – 78 % saantoja hyväksyttävänä. Tässä tutkimuksessa määritetty 97 % saanto siis vahvisti, että eristysmenettely peruseriaatteeltaan toimii. Pienempiäkin muovinkappaleita koetettiin tässä tutkimuksessa käyttää saantoprosentin määrittämisessä, mutta niiden kohdalla ongelmaksi tuli tunnistaminen näytteestä, sillä värin erottaminen luotettavasti hyvin ohuista muovilastuista on vaikeaa mikroskopisesti.

Tässä tutkimuksessa mikromuovien laskentaan ja muovilaatujen määrittämiseen käytettiin kahta eri Raman-mikroskooppia, mikä saattaa osaltaan lisätä vaihtelua rinnakkaisten näytteiden välillä. Kahdeksantoista näytettä laskettiin DXR 2 - Raman-mikroskoopilla, kunnes laite vikaantui. Kuusitoista näytettä laskettiin DXR X2i -Raman-mikroskoopilla, joka on mahdollisesti herkempi tunnistamaan muovien tyypilliset Raman-spektrit elektroninvahvistajan ansiosta. Tästä aiheutuvan mahdollisen vaihtelun suuruutta ei kuitenkaan voida arvioida, sillä laitteiden välistä keskinäistä vertailua ei tehty. Kaikista näytepisteistä (suuren tilavuuden näytteiden 300 µm - 5 mm kokoluokkaa lukuun ottamatta) laskettiin kuitenkin vähintään yksi näyte DXR 2xi-mikroskoopilla.

5.2. Jäteveden mikromuovit

5.2.1. Mikromuovipitoisuudet

Kangin ym. (2018) yhteenvedossa mainittuihin mikromuovitutkimuksiin verrattuna tässä tutkimuksessa mitatut mikromuovipitoisuudet olivat tulevan ja

lähtevän jäteveden virroissa sekä lietteessä kirjallisuuteen nähden pienemmästä päästä. Esimerkiksi Simonin ym. (2018) mikromuovitutkimuksessa tanskalaisilla jätevedenpuhdistamoilla sekä tulevan että lähtevän veden mikromuovipitoisuuksiksi määritettiin noin 200-kertaisia pitoisuuksia tähän tutkimukseen nähden. Näytenäytteiden mikromuovipitoisuuksien suhteelliset osuudet kuitenkin pysyivät lähes samoina.

Primäärikäsittelyn eri osaprosessien yhteensä yli 90 % puhdistusteho oli samaa luokkaa kuin Laresin ym. (2018) sekä Talvitien ym. (2017b) tutkimuksissa suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla. Myös Murphyn ym. (2016), tutkimuksessa skotlantilaisella jätevedenpuhdistamolla primäärikäsittelyn puhdistusteho oli samaa luokkaa. Nenäinniemen sekundäärikäsittelyssä mikromuovipitoisuus lähes nelinkertaistui. Todennäköisimmin tämä johtui prosessissa näytteenottopäivänä olleesta häiriöstä (S. Saviranta ja S. Nilsson, suullinen tiedonanto, 2018). Häiriön johdosta lietettä oli tertiäärikäsittelyssä tavanomaista enemmän, oletettavasti kuljettaen mikromuoveja mukanaan. Tämä näkyi myös näytteenotossa, jossa sekundaarikäsittelyn näytteenottotilavuudet jäivät suodattimien nopean tukkeutumisen takia pienemmiksi kuin primäärikäsittelyn vastaavat, vaikka tavallisesti prosessissa tilanne on päinvastainen.

Vaikka tertiäärikäsittelyyn tulevan jäteveden mikromuovipitoisuus oli muihin tutkimuksiin nähden korkea, tertiäärikäsittely Nenäinniemessä vastasi puhdistusteholtaan muita tutkittuja tertiäärikäsittelyjä, ja puhdistusteho oli selvästi korkeampi kuin Talvitien ym. (2017b) tutkima 10 µm kiekkosuodatin (Taulukko 2).

Tutkimus	Tertiärikäsittely	Pitoisuus (MM l ⁻¹)		Puhdistusteho (%)
		Tuleva	Lähtevä	
Talvitie 2017b	10 µm kiekkosuodatus	0,5 ± 0,2	0,3 ± 0,1	40,0
Talvitie 2017b	20 µm kiekkosuodatus	2,0 ± 1,3	0,03 ± 0,01	98,5
Talvitie 2017b	Hiekkasuodatus	0,7 ± 0,1	0,02 ± 0,007	97,1
Talvitie 2017b	DAF	2,0 ± 0,07	0,1 ± 0,04	95,0
Talvitie 2017b	MBR	6,9 ± 1,0	0,005 ± 0,004	99,9
Ziajahromi 2017	0,02 µm ultrasuodatus	-	0,28	N/A
Carr 2016	Hiekkasuodatus	-	0	100
Tämä tutkimus	10 µm kiekkosuodatus	13 ± 18	0,35 ± 0,22	97,2

Taulukko 2. Kirjallisuudessa tutkittujen tertiärikäsittelyjen mikromuovien puhdistustehokkuuksien vertailu. Kyseisissä tutkimuksissa muovit laskettiin ja muovilaadut määritettiin värähtelyspektroskopisesti FTIR -mikroskoopilla.

5.2.2. Mikromuovien laatujauma

Muovien materiaali- ja kokojakauma oli samankaltainen kuin aiemmissa tutkimuksissa, ja löytyneet materiaalit ovat samoja kuin eniten tuotetut ja myydyt muovilaadut yleisesti (Talvitie, 2018). Tässä työssä ei tarkasteltu eri muovilaatujen prosessikohtaloa yksityiskohtaisesti, mutta se voisi olla mahdollinen jatkotutkimuksen aihe.

5.2.3. Mikromuovien kokojakauma

Kokojakauma noudatti Araujon ym. (2018) teoriaa, jonka mukaan mikromuovien pitoisuus ympäristössä kasvaa jyrkästi kokoluokan pienentyessä, ja suurin osa löydettyistä mikromuoveista oli 20 – 100 µm kokoluokassa. Kangin ym. (2018) yhteenvedossa tulokset viittasivat samaan trendiin.

5.3. Lietteen mikromuovit

Tässä työssä tutkitun lietteen näytetilavuus 100-kertaistettiin Laresin ym. (2018) ja Vollertsenin ym. (2017) tutkimuksiin nähden. Näissä tutkimuksissa lietteen määrä oli ollut 0,1 g kuiva-ainetta (ka) tai vähemmän. Nenäinniemestä määritetty linkokuivatun lietteen mikromuovipitoisuus oli samaa luokkaa kuin Laresin ym. (2018) mikkeliäiseltä puhdistamolta määrittämä pitoisuus ($170,9 \pm 28,7 \text{ MM g}^{-1} \text{ ka}$).

Vollertsenin ym. (2017) tanskalaisia jätevedenpuhdistamoja tutkivassa raportissa 20 μm – 5 mm mikromuovien pitoisuus linkokuivatussa jätevesilietteessä puolestaan oli yli 1000-kertainen, keskimääräisen mikromuovikonsentraation ollessa $169\,000 \text{ MM g}^{-1} \text{ ka}$. Vollertsenin ym. (2017) luku oli tosin ekstrapoloitu alle 30 partikkelin määrittämisestä, eli näytteen edustavuus on kyseenalainen (näytteen paino 0,1 g josta siitäkin vain pieni osa lopulta analysoitu).

Ottaen huomioon kokojakaumaan liittyvän teorian (Araujo ym. 2018), suuri lietemäärä yhdistettynä pieneen karakterisoinnin alarajaan (20 μm), monivaiheiseen eristysmenetelmään sekä aikaa vievään materiaalianalyysimetodiin (Raman-mikroskopia) tarkoittaa, että tutkimukseen käytetystä ajasta merkittävä osa kului lietteen mikromuovien eristämiseen ja laskentaan. Eristysmenettelyssä ensimmäisenä reagenssina vetyperoksidin sijaan Löder ym. (2017) käyttivät natriumlauryylisulfaattia (SDS). Tässä työssä ensimmäisen kokeilun jälkeen kuitenkin huomattiin, että näyte ei silminnähdessä puhdistunut, ja toisaalta näytteen suodattaminen vaikeutui SDS:n vaahdotessa, joten SDS-käsittely korvattiin kaikille näytteille Hurleyn ym. (2018) menettelyllä 1b, eli vetyperoksidikäsittelyllä 60 °C:ssä. Tämä tutkimus osoitti, että jätevedelle Hurleyn ym. (2018) vetyperoksidimenettely toimi hyvin, mutta yli $10 \text{ g}^{-1} \text{ ka}$ sisältäville näytteille pelkkä vetyperoksidi ei riittänyt hajottamaan kuiva-ainesta, vaan Löderin ym. (2017) entsyymaattinen eristysmenetelmä oli tehokas, toisaalta aikaavievä vaihtoehto.



Kuva 7. Lietenäytteitä eristysmenettelyn keskivaiheilla.

5.4. Mikromuovitase

Vaikka mikromuovien pitoisuudet olivat tässä tutkimuksessa kaikissa näytepisteissä kirjallisuuteen nähden pienemmästä päästä, suhteelliset osuudet eri näytepisteissä vastasivat läheisesti muita tutkimuksia. Tarkoituksenmukaisin lähestymistapa erilaisten tutkimusten vertailemiseen lieneekin suhteellisten osuuksien vertailu, sillä vaikka tutkimusmenetelmät olisivat erilaisia, puhdistamon eri osaprosessien suhteellisten mikromuovipitoisuuksien pitäisi pysyä vertailukelpoisina, jos itse tutkimuksen menetelmät ovat kaikille pisteille samat. Nenäinniemen puhdistamon kokonaispuhdistusteho vastasi tavanomaista nykyaikaisten puhdistamojen puhdistustehoa (Taulukko 2, Carr ym. 2016; Murphy ym. 2016; Talvitie ym. 2017a; 2017b).

Vaikka Nenäinniemen jätevedenpuhdistamon mikromuovitaseessa sisään tuleva ja puhdistamolta lähtevä mikromuovien vuorokausisumma olivat suuruusluokaltaan hyvin lähellä toisiaan, on otettava huomioon, että anaerobisesti käsitelty

linkokuivattu liete on noin 20 vuorokautta vanhempaa verrattuna sisään tulevaan jäteveeseen. Jos lietenäyte olisi otettu anaerobiprosessille menevästä virrasta, olisi lietteen ikä ollut lähempänä muilta näytteenottoaikoilta otettujen näytteiden ikää.

6 PÄÄTELMÄT

Molemmat tutkimushypoteesit H_1 ja H_2 pidetään, eli kiekkosuodatus lisäsi puhdistamon kykyä poistaa mikromuoveja, ja puhdistusprosesseissa poistetut mikromuovit päätyivät jätevesilietteeseen. Tässä tutkimuksessa sekä tulevan, primäärikäsitellyn että sekundäärikäsitellyn jäteveden mikromuovipitoisuuksien kolmen rinnakkaisnäytteen väliset vaihtelut olivat suurehkoja. Vaihtelu saattoi olla todellista tai johtua osittain kahden eri Raman-mikroskoopin käytöstä. On myös mahdollista, että suuri määrä näytekäsittelyjä Löderin ym. (2017) eristysmenettelyssä johtaa helposti virheen kertautumiseen. Kokonaiskuvassa keskiarvoisista mikromuovipitoisuuksista johdetut vuorokausisummat muodostivat loogisen kokonaisuuden, joten mikromuovien prosessikohtalon selvittäminen Nenäinniemen jätevedenpuhdistamolla onnistui odotetusti.

Tämän työn jälkeen Nenäinniemen jätevedenpuhdistamolta olisi syytä tutkia mikromuovitasu uudelleen tilanteessa, jossa sekundäärikäsittely toimii normaalisti, jotta selviäisi, johtuiko mikromuovien määrän lisääntyminen prosessissa olevasta häiriöstä vai muista seikoista. Aiheesta on käynnissä jatkotutkimus, jossa selvitetään tarkemmin muiden osaprosessien vaikutusta taseeseen. Jatkotutkimuksen tuloksia käsittelevä käsikirjoitus tarjotaan julkaistavaksi tieteellisessä sarjassa vuoden 2019 aikana.

KIITOKSET

Kiitokset Jyväskylän Seudun Puhdistamo Oy:lle työn rahoittamisesta, sekä puhdistamon henkilökunnasta Petri Tuomiselle, Sonja Savirannalle ja Seppo Nilssonille avusta.

Kiitokset suurenmoisesta ohjauksesta Pauliina Salmelle, Julia Talvitielle ja Anna Karjalaiselle. Ilman teidän vinkkejä, tukea ja asiantuntemusta tämä projekti ei olisi tullut koskaan maaliin. Lisäksi kiitokset Mervi Koistiselle ja Emma Pajuselle kaikesta käytännön avusta laboratoriotyöskentelyyn liittyen.

KIRJALLISUUS

- Araujo C.F., Nolasco M.M., Ribeiro A.M.P. & Ribeiro-Claro P.J.A. 2018. Identification of microplastics using Raman spectroscopy: Latest developments and future prospects. *Water Research* 142: 426-440, doi:10.1016/j.watres.2018.05.060.
- Carr S.A., Liu J. & Tesoro A.G. 2016. Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants. *Water Research* 91: 174-182, doi:10.1016/j.watres.2016.01.002.
- Frias J.P.G.L., Nash R. 2019. Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Marine Pollution Bulletin*, 138: doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.11.022.
- Gasperi J., Wright S.L., Dris R., Collard F., Mandin C., Guerrouache M., Langlois V., Kelly F.J. & Tassin B. 2018. Microplastics in air: Are we breathing it in? 1: 1-5. <https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-01665768>.
- GESAMP 2015. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: part two of a global assessment (Kershaw, P.J., and Rochman, C.M., eds). (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/ UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). Rep. Stud. GESAMP No. 90, 96 p.
- Hurley R.R., Lusher A.L., Olsen M. & Nizzetto L. 2018. Validation of a Method for Extracting Microplastics from Complex, Organic-Rich, Environmental Matrices. *Environmental science & technology* 52: 7409-7417, doi:10.1021/acs.est.8b01517.

- Kang H., Park H., Kwon O., Lee W., Jeong D., Ju B. & Kwon J. 2018. Occurrence of microplastics in municipal sewage treatment plants: a review. *Environmental health and toxicology* 33: e2018013, doi:10.5620/eh.t.e2018013.
- Lares M., Ncibi M.C., Sillanpää M. & Sillanpää M. 2018. Occurrence, identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR technology. *Water Research* 133: 236-246, doi:10.1016/j.watres.2018.01.049.
- Löder M.G.J., Imhof H.K., Ladehoff M., Löschel L.A., Lorenz C., Mintenig S., Piehl S., Primpke S., Schrank I., Laforsch C. & Gerdts G. 2017. Enzymatic Purification of Microplastics in Environmental Samples. *Environmental science & technology* 51: 14283-14292, doi:10.1021/acs.est.7b03055.
- Mintenig S.M., Int-Veen I., Löder M.G.J., Primpke S. & Gerdts G. 2017. Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging. *Water Research* 108: 365-372, doi:10.1016/j.watres.2016.11.015.
- Murphy F., Ewins C., Carbonnier F. & Quinn B. 2016. Wastewater Treatment Works (WwTW) as a Source of Microplastics in the Aquatic Environment. *Environmental science & technology* 50: 5800-5808, doi:10.1021/acs.est.5b05416.
- S. Saviranta, S. Nilsson 2018, suullinen tiedonanto.
- S. Saviranta, 2018. Nenäinniemen kiekkosuodatus, Esitys vesihuoltopäivillä, 24.5.2018.
- Shim W.J., Hong S.H. & Eo S.E. 2017. Identification methods in microplastic analysis: a review. *Anal. Methods*, 2017, 9, 1384.
- Simon M., van Alst N. & Vollertsen J. 2018. Quantification of microplastic mass and removal rates at wastewater treatment plants applying Focal Plane Array (FPA)-based Fourier Transform Infrared (FT-IR) imaging. *Water Research* 142: 1-9, doi:10.1016/j.watres.2018.05.019.
- Suomen standardisoimisliitto SFS (1990). Veden, lietteen ja sedimentin kuiva-aineen ja hehkutusjäännöksen määrittäminen SFS 3008.
- Talvitie J. 2018. Wastewater treatment plants as pathways of microlitter to the aquatic environment.
https://www.openaire.eu/search/publication?articleId=od_____661::724675dc4eed88b97a930bf16b87acb4.
- Talvitie J., Mikola A., Koistinen A. & Setälä O. 2017. Solutions to microplastic pollution – Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies. *Water Research* 123: 401-407, doi:10.1016/j.watres.2017.07.005.

- Talvitie J., Mikola A., Setälä O., Heinonen M. & Koistinen A. 2017. How well is microlitter purified from wastewater? – A detailed study on the stepwise removal of microlitter in a tertiary level wastewater treatment plant. *Water Research* 109: 164-172, doi:10.1016/j.watres.2016.11.046.
- Thomson Scientific. Web of Science - WoS. 2019. http://apps.webofknowledge.com/WOS_GeneralSearch_input.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch
http://images.webofknowledge.com/WOKRS5132R4.2/help/WOS/hp_search.html. (Haettu 15.1.2019)
- TU Delft, Urban Sewage Treatment, 2019. Kurssimateriaali.
- Vollertsen Jes, Anna Hansen, 2017: Microplastic in Danish wastewater. Environmental Project No. 1906.
- Waller C.L., Griffiths H.J., Waluda C.M., Thorpe S.E., Loaiza I., Moreno B., Pacherras C.O. & Hughes K.A. 2017. Microplastics in the Antarctic marine system: An emerging area of research. *Science of the Total Environment* 598: 220-227, doi:10.1016/j.scitotenv.2017.03.283.
- Wolff S., Kerpen J., Prediger J., Barkmann L. & Müller L. 2019. Determination of the microplastics emission in the effluent of a municipal waste water treatment plant using Raman microspectroscopy. *Water Research X* 2: 100014, doi:10.1016/j.wroa.2018.100014.
- Ziajahromi S., Neale P.A., Rintoul L. & Leusch F.D.L. 2017. Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: Development of a new approach to sample wastewater-based microplastics. *Water Research* 112: 93-99, doi:10.1016/j.watres.2017.01.042.

LIITE 1. NÄYTEPÄIVÄN (9.7.2018) VIRTAAMATIEDOT

Näytepiste	Pitoisuus		Virtaama (m ³ vrk ⁻¹)	Massa (t ka vrk ⁻¹)
	MM l ⁻¹	MM g ⁻¹ ka		
Tuleva jätevesi	35 ± 44		30180	
Primäärikäsitelty jätevesi	3,3 ± 4,3		30180	
Sekundäärikäsitelty jätevesi	13 ± 18		30180	
Tertäärikäsitelty jätevesi	0,3 ± 0,2		29371	
Linkokuivattu liete		100 ± 26		9,6

Taulukko 3. Virtaamatiedot ja mikromuovipitoisuudet. Tulevan jäteveden sekä primääri- ja sekundäärikäsiteltyjen vesien virtaamatiedot perustuvat puhdistamon päävirtaamamittarin lukemaan, tertiäärikäsitellyn veden virtaamatieto perustuu sekundäärikäsittelyn jälkeisen virtaamamittarin sekä kiekkosuodattimen ylijäämälietteen tilavuuden erotukseen. Lietteen massa perustuu lietteen vastaanottoaikan (Mustankorkea, Jyväskylä) laskuttaman massan ja laboratoriossa määritetyn kuiva-ainesprosentin (32,15 %) tuloon.