

Waltteri Wiro

# NANOMUOVIT YHDYSKUNTAJÄTEVESIEN KÄSITTELYSSÄ

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta

Kandidaatintyö

Tarkastaja: Marja Palmroth

Helmikuu 2020

# TIIVISTELMÄ

Walteri Wiro: Nanomuovit yhdyskuntajätevesien käsittelyssä  
Nanoplastics in municipal wastewater treatment  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Ympäristö- ja energiatekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma  
Helmikuu 2020

---

Nanomuovit (kooltaan  $<1 \mu\text{m}$ ) ovat mikromuovien ( $1 \mu\text{m} - 5 \text{mm}$ ) hajoamistuotteita, jotka syntyvät mikromuovien hajotessa ajan myötä, muovien valmistusprosessissa tai muovikappaleen käytön aikana. Nano- ja mikromuovit ovat kestävyytensä ja adsorpoimiensa haitta-aineiden takia vaaraksi eliöille. Pienen kokonsa takia nanomuoveja ei voida myöskään nykyisillä menetelmillä havainnoida tai tutkia kunnolla. Hajoamismekanismeja ovat muun muassa hydrolyysi ja mekaaninen murtuminen. Koska nanomuovit ovat mikromuovien hajoamistuotteita, ovat niiden lähteet samat. Mikromuovien lähteitä ovat kotitaloudet, joiden jätevesissä on kosmetiikka- ja siivoustuotteissa hankausaineina käytettyjä mikromuoveja, teollisuus ja sekaviemäröidyt hulevedet. Mikromuovien materiaaleja on monia, mutta niistä yleisimmät jätevedessä ovat polyesterei ( $\sim 28\text{-}89\%$ ), polyeteeni ( $\sim 4\text{-}51\%$ ), polyeteenitereftalaatti ( $\sim 4\text{-}35\%$ ) ja polyamidi ( $\sim 3\text{-}30\%$ ).

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin, kuinka nanomuovit syntyvät ja miten ne päätyvät jätevesiin. Lisäksi tutkittiin nanomuovien esiintyvyyttä jätevedessä ja vaikutusta aktiivilieteprosessiin perustuvassa jäteveden käsittelyssä, sekä tapoja, joilla nanomuovien määrää ja vaikutusta puhdistusprosesseihin voidaan vähentää. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena.

Jätevedenpuhdistusprosessit poistavat mikromuoveja tehokkaasti (jopa  $99,9\%$ ), mutta pienempiä nanomuoveja ne eivät välttämättä poista yhtä tehokkaasti. Kulkeutuessaan jätevedenpuhdistamolla prosessista toiseen nanomuovit saattavat aiheuttaa haittaa käsittelyvaiheiden toiminnallisuudelle ja tehokkuudelle vaurioittamalla ja tukkimalla prosesseja. Vaikka mikromuovit saadaankin poistettua tehokkaasti jätevedestä, jää niitä aina jonkin verran jäljelle, ja purkuvesistöön päätyy lopulta paljonkin mikromuoveja, koska käsiteltävät vesimäärät ovat niin suuret. Jätevedenpuhdistamolla syntyy myös sisäistä mikromuovikuormitusta, sillä noin  $20\%$  vedestä poistetuista mikromuoveista palautuu palautuslietteen mukana prosessiin.

Käsittelyvaiheista mikromuoveja poistavat parhaiten esikäsitely ( $35\text{-}59\%$ ) ja esiselkeytys ( $50\text{-}98\%$ ). Näissä vaiheissa poistuu isompia ja kuitumaisia mikromuoveja, kun taas biologisessa käsittelyssä poistuu enemmän partikkelimaisia mikromuoveja. Poistetut nano- ja mikromuovit jäävät prosesseissa syntyvään lietteeseen. Lietteessä olevien mikromuovien ( $>100 \mu\text{m}$ ) on huomattu olevan veteen jääviä mikromuoveja ( $<100 \mu\text{m}$ ) isompia, joten voidaan sanoa, että jätevedenpuhdistusprosessi poistaa paremmin suurempia kuin pienempiä mikromuoveja.

Nanomuovit voivat aiheuttaa haittaa käsittelyvaiheille pienen kokonsa ja pintakemiansa takia, esimerkiksi häiritsemällä mikrobien toimintaa aktiivilieteprosessissa ja anaerobisessa mädätyksessä, rikkomalla kalvosuodattimia terävien reunojensa avulla tai tukkimalla suodattimia. Jotta nanomuovien määrää ja vaikutusta voitaisiin tulevaisuudessa vähentää, tulee ensin kehittää toimiva menetelmä, jolla niitä voidaan havaita ja tutkia. Nykyisiä jätevedenpuhdistusprosesseja ei ole suunniteltu poistamaan nano- tai mikromuoveja. Niitä varten tarvitaan oma osaprosessinsa, esimerkiksi tiheyteen perustuva erottelu, koagulaatio tai UV-säteilytys. Tehokkain tapa olisi ehkäistä nano- ja mikromuovien päätyminen jätevedenpuhdistamoille.

Avainsanat: nanomuovi, yhdyskuntajätevesi, jätevedenpuhdistamo, mikromuovi, muovi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto . . . . .	1
2	Nano- ja mikromuovit jätevedessä . . . . .	3
2.1	Nano- ja mikromuovien lähteet ja muodostuminen . . . . .	3
2.2	Nano- ja mikromuovien muovityypit ja ominaisuudet . . . . .	5
2.2.1	Muovityypit . . . . .	6
2.2.2	Analysointi . . . . .	7
3	Jätevedenpuhdistamo . . . . .	9
3.1	Esikäsittely ja esiselkeytys . . . . .	10
3.2	Aktiivilieteprosessi ja jälkiselkeytys . . . . .	10
3.3	Jälkikäsittely ja lietteen käsittely . . . . .	11
3.4	Yhteenveto . . . . .	11
4	Nanomuovit jätevedenpuhdistusprosessissa . . . . .	13
4.1	Nano- ja mikromuovien kulkeutuminen jätevedenpuhdistamolla . . . . .	13
4.2	Nanomuovien vaikutus eri käsittelyvaiheisiin . . . . .	15
4.2.1	Esikäsittely ja esiselkeytys . . . . .	15
4.2.2	Aktiivilieteprosessi ja jälkiselkeytys . . . . .	15
4.2.3	Jälkikäsittely . . . . .	16
4.2.4	Lietteen käsittely . . . . .	17
5	Nanomuovien määrän ja vaikutuksen vähentäminen . . . . .	19
6	Johtopäätökset . . . . .	22
	Lähteet . . . . .	24

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

BAF	biologinen aktiivisuodatus
BOD	biokemiallinen hapentarve
DAF	paineflotaatio
DF	kiekkosuodatin
DLS	dynaaminen valon sironta
EPS	solupolystyreeni
FPA micro-FTIR	polttotasorivi-ilmaisimeen perustuva mikro-Fourier-muunnos-infrapunaspektroskopia
FTIR	Fourier-muunnos-infrapunaspektroskopia
MBR	kalvobioreaktori
NTA	nanopartikkeleiden seuranta-analyysi
PA	polyamidi
PAN	akryyli
PE	polyeteeni
PES	polyesteri
PET	polyeteenitereftalaatti
POP-yhdiste	pysyvä orgaaninen ympäristömyrkky
PP	polypropeeni
PS	polystyreeni
PVC	polyvinyylikloridi
Pyr-GC-MS	pyrolyysi-kaasukromatografia-massaspektrometri
RSF	pikahiekkasuodatin
SEM	pyyhkäisyelektronimikroskopia

# 1 JOHDANTO

Monista erilaisista synteettisistä ja puolisynteettisistä orgaanisista aineista koostuvat muovit ovat taipuvia materiaaleja, jotka voidaan muokata monen kokoiseksi ja muotoiseksi kiinteiksi kappaleiksi. Muovit hajoavat luonnossa hyvin hitaasti, mikä tarkoittaa, että ne jäävät kuormittamaan ympäristöä pitkäksi aikaa. (Costa et al. 2016) Muoveja sekä niiden ympäristövaikutuksia ja säilyvyyttä on tutkittu jo vuosia (Triebkorn et al. 2019; S. Wagner & Reemtsma 2019). Muovia kulkeutuu jätevedenpuhdistamoille kotitalouksien ja teollisuuden jätevesien sekä hulevesien sekaviemäroinnin mukana. Vesistöihin muoveja päätyy muun muassa kosmetiikka- ja siivoustuotteista ja muovin valmistuksen raaka-aineista.

Nykyisin käytössä olevat muovit keksittiin vuonna 1907 ja niiden massatuotanto aloitettiin 1940-luvulla (Mattsson et al. 2015). Siitä lähtien muovintuotannon määrä on kasvanut joka vuosi muutamaa poikkeusta lukuunottamatta. Pelkästään vuonna 2017 maailmassa valmistettiin noin 348 miljoonaa tonnia muovia, josta noin puolet päätyi roskaksi ympäristöön ja vesistöihin (PlasticsEurope 2018; Ritchie & Roser 2020). Muovijätteellä tarkoitetaan ympäristöön hylättyä muovikappaletta. Tämä roska voi hajota erikokoisiksi jakeiksi. (Gigault et al. 2018) Tämä tarkoittaa sitä, että muovijätteen määrä kasvaa jatkuvasti ja se on muodostumassa suureksi ongelmaksi tulevaisuudessa, jos asiaan ei keksitä ratkaisua. 2010-luvulla tutkimusta on tehty erityisesti liittyen mikromuoveihin.

Mikromuovit määritellään useimmiten polymeereiksi, joiden maksimikoko on 5 mm ja minimikoko 1  $\mu\text{m}$ , sillä suurin osa mikromuoveihin kohdistuvasta tutkimuksista keskittyy tälle välille, koska käytössä olevat karakterisointimenetelmät ovat käyttökelpoisia vain tällä välillä (Horton et al. 2017). Mikromuovien lisäksi on nyt alettu tutkia nanomuoveja, jotka ovat mikromuovien hajoamistuotteita, sillä niiden vaikutuksista ei vielä tiedetä tarpeeksi. Tässä työssä nanomuoveiksi määritellään kaikki muovipartikkelit, joiden vähintään yhden ulottuvuuden mitta on pienempi kuin 1  $\mu\text{m}$  ja joilla on kolloidisia ominaisuuksia (Gigault et al. 2018; Hartmann et al. 2016).

Tämä työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena ja työn tavoitteena on selvittää, kuinka nanomuovit muodostuvat ja miten ne päätyvät jätevesiin. Lisäksi selvitetään nanomuovien esiintyvyyttä ja vaikutusta jätevedenpuhdistusprosessissa. Työssä käsitellään myös menetelmiä, joilla voidaan vähentää nanomuovien määrää ja vaikutusta jätevedenpuhdistuksen prosesseihin jätevedessä.

Työn toisessa luvussa käsitellään nanomuovien muodostumista ja ominaisuuksia. Kolmannessa luvussa esitellään tyyppillinen jätevedenpuhdistamo prosesseineen. Neljännes-

sä luvussa tarkastellaan nanomuovien esiintymistä ja vaikutusta jätevedenpuhdistuksessa ja sen eri vaiheissa. Viidennessä luvussa pohditaan tapoja nanomuovien määrän ja vaikutuksen vähentämiseksi jätevedenpuhdistusprosessissa. Kuudennessa luvussa tehdään johtopäätökset.

## 2 NANO- JA MIKROMUOVIT JÄTEVEDESSÄ

Tässä luvussa käsitellään jätevedeen päätyvien nanomuovien lähteitä ja muodostumista-  
poja sekä jätevedessä esiintyvien nanomuovien muovityyppejä.

### 2.1 Nano- ja mikromuovien lähteet ja muodostuminen

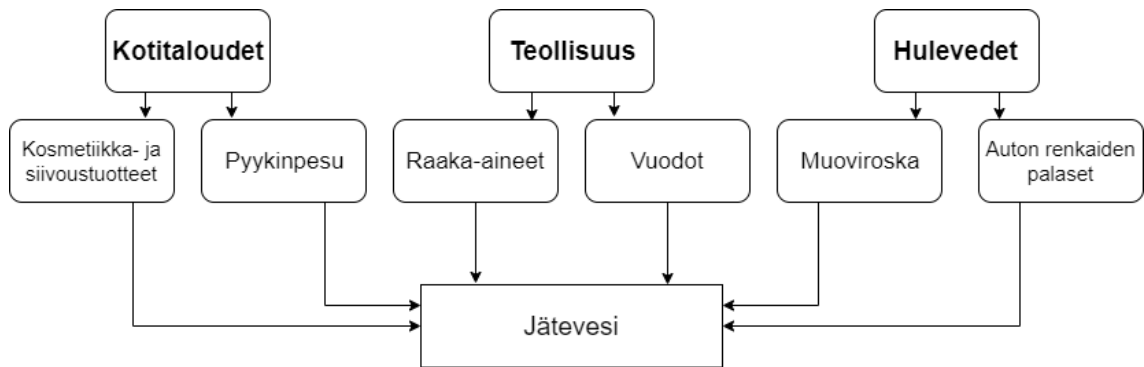
Jätevesiin ja vesistöihin päätyvät muovit voidaan jakaa kahteen eri ryhmään niiden muo-  
dostumistavan perusteella. Nämä ryhmät ovat primääriset ja sekundääriset muovit. Pri-  
määriset muovit päätyvät vesiin siinä kokoluokassa, missä ne on alun perin valmistettu,  
esimerkiksi kosmetiikassa käytetyt mikromuovit. Sekundääriset muovit ovat puolestaan  
suurempien muovikappaleiden hajoamisen seurauksena syntyneitä partikkeleita. (Matts-  
son et al. 2015)

Kotitalouksista peräisin oleva mikromuovikuormitus aiheutuu pääasiassa kosmetiikka- ja  
siivoustuotteiden käytöstä. Esimerkiksi hammastahnoissa ja saippuoissa käytetään mik-  
romuovipartikkeleita hankausaineina. Kosmetiikkatuotteita käytetään maailmanlaajuisesti  
paljon joka päivä ja käytön jälkeen ne huuhdotaan viemäriin, jolloin myös muovipartik-  
kelit päätyvät jätevesiin. Toinen tärkeä mikromuovien lähde kotitalouksissa on pyykinpe-  
su. Pestäessä pyykkiä koneellisesti irtoaa vaatteista polyesteri- tai akrylikuituja. (Browne  
et al. 2011)

Muita mikromuovien lähteitä ovat teollisuus, kuten muovin tuotannon raaka-aineet, muovi-  
hartsijauheen vuodot ja ilmapuhalluksessa käytettävät muovipelletit (Costa et al. 2016),  
ja sekaviemärointiin päätyvät hulevedet. Nämä hulevedet kuljettavat mukanaan ympä-  
ristöön kerääntynyttä muoviroskaa ja auton renkaista kulumisen seurauksena irronneita  
pieniä muovipalasia. Meriin muovia päätyy lisäksi laivojen tuottamien jätteiden mukana,  
roskaamisen myötä sekä huolettomasti käsiteltyjen muovisten kalastusvälineiden kautta  
(Costa et al. 2016).

Nanomuovit muodostuvat muovikappaleiden hajoamisen seurauksena mikromuovien ha-  
jotessa ajan myötä, muovien valmistusprosessissa tai muovikappaleen käytön aikana  
(Gigault et al. 2018). Ne ovat nanokokoisia partikkeleita, jotka ovat kolloidisia, eli ne ovat  
niin hienojakoisia, että niitä sisältävää seosta ei voida pitää heterogeenisenä, mutta kui-  
tenkin niin suuria, ettei seosta voida pitää homogeenisenä (Moreno & Peinado 2012).  
Koska muovien on todettu hajoavan mikromuoveiksi, oletetaan muovien hajoavan myös  
nanomuoveiksi samojen mekanismien seurauksena. (Enfrin et al. 2019) Mikromuovien  
lähteet ovat siis myös nanomuovien lähteitä. Tämän hajoamisen seurauksena nanomuo-

vit ovat keskenään hyvin erilaisia fyysisiltä ominaisuuksiltaan ja koostumukseltaan (Gigault et al. 2018). Kuvassa 2.1 on kooste jätevedessä esiintyvien mikromuovien lähteistä.



**Kuva 2.1.** Kooste jäteveden mikromuovien lähteistä.

Nano- ja mikromuoveja saattaa päätyä myös ilmakehään maataloudessa käytettävien polyeteenikalvojen (PE) hajoamisen, vaatteiden kuivauksen, saastuneen puhdistamolietteen lannoitekäytön ja nanokokoisia polymeeripartikkeleita vapauttavan termisen solupolystyreenin (EPS/Styrox) leikkauksen seurauksena. 3D-tulostuksen on myös raportoitu tuottavan hyvin pieniä muovikappaleita (11,5 - 116 nm). (Costa et al. 2016)

Suurien muovikappaleiden hajoaminen tapahtuu erilaisten mekanismien vaikutuksesta, yhdessä tai erikseen. Näitä mekanismeja ovat altistuminen UV-säteilylle, hydrolyysi, mekaaninen murtuminen hiekan aiheuttaman hankauksen, veden turbulenssin tai mikro-organismien yhteyttämisen seurauksena. (Gewert et al. 2015)

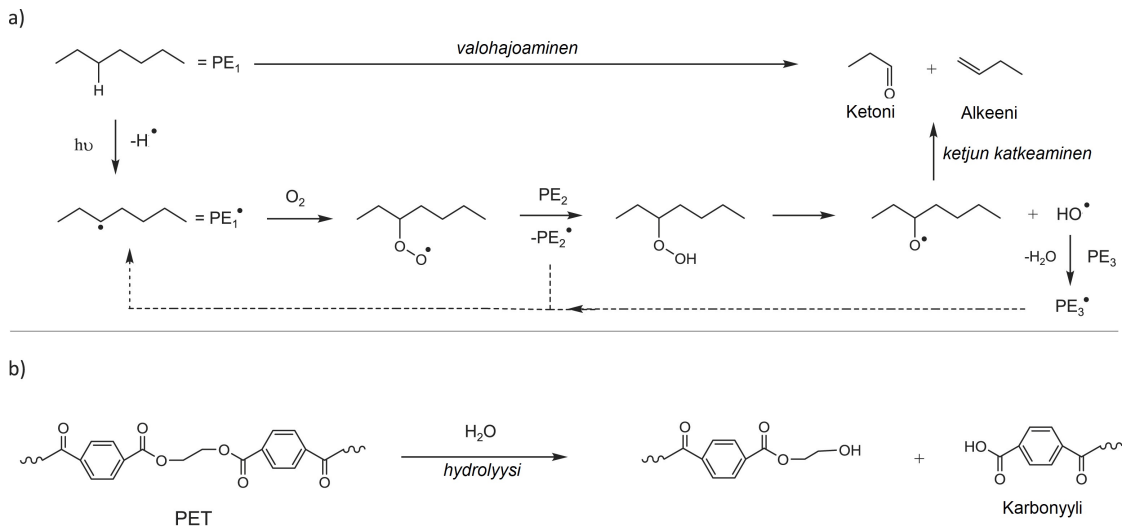
Muoveja valmistetaan ekstruusiolla, puristusmuovauksella tai valamalla, mikä saattaa jättää muoveihin jännitteitä, kuten vääntymiä tai rakoja epätasaisen jäähtymisen seurauksena, jotka heikentävät materiaalia ja helpottavat muovin mekaanista murtumista (Adhikari et al. 2016). Nämä jäännösjännitteet saattavat joissain tapauksissa parantaa muovin ominaisuuksia, mutta ne voivat myös heikentää niitä lyhentäen samalla muovin elinikää (Macías et al. 2015). Kun materiaali saavuttaa käyttöikänsä lopun, heikentynyt muovikappale on alttiimpi jännityssäröilylle ja siksi se hajoaa helpommin tuottaen mikro- ja nanomuoveja (Enfrin et al. 2019). Myös muovin muista ominaisuuksista, kuten iskunkestävyydestä ja kovuudesta, riippuen muovikappaleet saattavat vaurioitua ja hajota mikromuoveiksi (Ward & Sweeney 2012).

Päätyessään luontoon polymeerit altistuvat bioottisten ja abioottisten prosessien hajotettavaksi. Abioottiset prosessit toimivat tärkeänä ensimmäisenä vaiheena näiden materiaalien hajottamisessa, sillä ne poistavat rakenteelliset ja mekaaniset ominaisuudet lisäten pinta-alaa mikrobikasvustoille ja fysikaalis-kemiallisille vuorovaikutuksille. Näitä mekanismeja ovat terminen ja valon aiheuttama hajoaminen, joita pidetään luonnon tehokkaimpina abioottisina hajotusmenetelminä. Lisäksi kemiallinen ja mekaaninen hajoaminen ovat abioottisia mekanismeja. (Costa et al. 2016)

Hydrolyysi on yksi pääasiallisista hajoamisprosesseista polymeereille, joissa on muitakin atomeita kuin hiiltä ja vetyä. Hydrolyysissä vesi katkaisee aineen kemiallisia sidoksia



(kuva 2.2) (Muller 1994). Esterisidosten katkeaminen johtaa karboksyyliyhymien muodostumiseen, jolloin hydrolyysistä tulee autokatalyyttinen, sillä happamat olosuhteet lisäävät hydrolyysin määrää. Sekä valon katalysoima hapettuminen että hydrolyysin aiheuttama hajoaminen johtavat murtumien, säröjen ja kolojen muodostumiseen kappaleiden pinnalla, mikä aiheuttaa muovin haurastumisen. (Cai et al. 2018) Muovien heiketessä mekaaninen rasitus, kuten kitka ja kuluminen, voi johtaa mikromuovien muodostumiseen (Cooper & Corcoran 2010). Kuvassa 2.2 on esitetty kemiallisen valohajoamisen ja hydrolyysin reaktiot.



**Kuva 2.2.** a) Polyeteenin valohajoaminen UV-säteilyn vaikutuksesta ja b) polyeteeniterefalaatin hajoaminen hydrolyysillä, muokattu lähteestä Gewert et al. 2015.

Bioottisista mekanismeista tärkein on eliöiden erittämien entsyymien aiheuttama hydrolyysi (Costa et al. 2016). Tämä on pääasiallinen mekanismi erityisesti biohajoavien muovien hajoamisessa (Ahmed et al. 2018). Biohajoavat muovit on valmistettu hajoamaan biomassaksi, hiilidioksidiksi ja vedeksi termokemiallisten prosessien myötä (Greene 2014). Mikrobit, kuten *Pseudomonas fluorescens* ja *Penicillium simplicissimum*, hajottavat muovit tuottamalla entsyymejä, kuten proteaaseja ja lipaaseja (Ahmed et al. 2018). Polymeerien molekyylit altistuvat mikrobiselle vaikutukselle polymeerisen rakenteen kadotessa ketjun katkeamisen ja lisääntyneen kosteuden ja hapen saatavuuden takia vähenevien verkkositoutumisreaktioiden johdosta (Costa et al. 2016).

## 2.2 Nano- ja mikromuovien muovityypit ja ominaisuudet

Nanomuovien pieni koko aiheuttaa sen, että niitä on hyvin vaikea havaita nykyisillä tekniikoilla, joten myös niiden tutkiminen on haastavaa. Tutkittaessa muovityyppejä, joista nanomuovit koostuvat, voidaan käyttää hyväksi sitä tietoa, että nanomuovit ovat mikromuovien hajoamistuotteita eli niissä esiintyvät muovityypit ovat samoja.

## 2.2.1 Muovityypit

Mikromuovit voidaan jakaa muotonsa perusteella kuituihin ja partikkeleihin (Talvitie, Mikola, Setälä et al. 2017). Kuidut ovat ohuita ja pitkiä, kun taas partikkelit ovat muodoltaan pyöreitä. Primääriset mikromuovit, joita käytetään esimerkiksi kosketiikkatuotteissa hankausaineina ovat muodoltaan pyöreitä (Prata 2018). Nanomuoveissa partikkelit ovat oletettavasti yleisempiä, sillä erityisesti vaatteista irtoavat muovikuidut eivät säily hajotesaan kuituina.

Muovit voidaan jakaa kesto- ja kertamuoveihin niiden ominaisuuksien perusteella. Kestomuovit voidaan muokata uusiksi käytettäväksi tuotteiksi sulattamalla, kun taas kertamuovit saavat kerran muotonsa, jota ei voi enää muokata. (Andrady 2017) Yleisimmät jätevedenpuhdistamoille tulevasta jätevedestä ja purkuvesistöön johdettavasta vedestä löytyvät polymeerit ovat kestumuoveja: polyesteri (PES), polyeteeni (PE), polyetyleni tereftalaatti (PET) ja polyamidi (PA) (J. Sun et al. 2019).

Suomalaisen tutkimuksen mukaan Helsingin Viikinmäen jätevedenpuhdistamolle tulevan jäteveden yleisimmät mikromuovien muovityypit ovat polyesteri (60%), polyeteeni (14%), akryyli (PAN) (7%), polyvinyylikloridi (PVC) (5%), polystyreeni (PS) (4%) ja polypropeeni (PP) (3%). Suurin osa kuitumaisesta polyesteristä on peräisin tekstiileistä ja polyeteeni puolestaan hygieniatuotteista. (Talvitie, Mikola, Koistinen et al. 2017) Näistä polymeereistä polyeteeni on tuotetuin muovi maailmassa (PlasticsEurope 2018). Taulukossa 2.1 on esitetty jäteveden yleisimmät muovityypit, niiden ominaispainot ja globaali valmistusmäärä vuonna 2015.

**Taulukko 2.1.** Jätevedessä yleisesti esiintyvät muovityypit.

Muovityyppi	Lyhenne	Osuus jätevedessä olevasta mikromuovista (%) <sup>[1]</sup>	Ominaispaino ( $g/cm^3$ ) <sup>[2],[3]</sup>	Globaali valmistusmäärä (Mt) (2015) <sup>[4]</sup>
Akryyli	PAN	-	1,16	-
Polyeteeni	PE	~4–51%	0,91 - 0,94	116
Polyesteri	PES	~28–89%	-	-
Polypropeeni	PP	-	0,85 - 0,92	68
Polyvinyylikloridi	PVC	-	1,16 - 1,30	38
Polystyreeni	PS	-	1,04 - 1,09	25
Polyetylenitereftalaatti	PET	~4–35%	1,34 - 1,39	33
Polyamidi	PA	~3–30%	1,13 - 1,15	13 (2016) <sup>[5]</sup>

1. J. Sun et al. 2019, 2. Kholodovych & Welsh 2007, 3. Sundt et al. 2014, 4. Geyer et al. 2017, 5. Plastics insight 2016

Eri muovityyppien ominaispaino vaikuttaa vahvasti siihen, kuinka ne käyttäytyvät jätevedenpuhdistuksessa. Osalla muoveista ominaispaino on alle 1, mikä tarkoittaa sitä, että ne kelluvat jäteveden pinnalla. Kelluvia muoveja ovat muun muassa polypropeeni ja polyeteeni. Ominaispaino ei aina kerro suoraan kappaleen tiheyttä, sillä siihen vaikuttavat

myös kappaleeseen sitoutuneet muut aineet. (Andrady 2017) Myös esimerkiksi biofilmin muodostuminen muovikappaleen pinnalle vaikuttaa sen tiheyteen.

Nano- ja mikromuovit ovat uhka eliöille kestävyytensä ja mahdollisen ruokaketjussa kulkeutumisensa takia. Ne voivat aiheuttaa mekaanista kuormitusta nieltynä, mutta altistavat merieliöitä myös vaarallisille aineille. (Talvitie, Mikola, Setälä et al. 2017) Nano- ja mikromuovien ei ole todettu aiheuttavan akuuttia tappavaa vaikutusta eläviin organismeihin, mutta ne voivat aiheuttaa pitkäaikaista myrkyllisyyttä, jota pidetään avaintekijänä pitkäaikaisaltistumiselle. Nano- ja mikromuovit aiheuttavat myrkyllisiä vaikutuksia useamman eri mekanismin kautta. Ensinnäkin muovien valmistuksessa käytettävät polymeeriset materiaalit aiheuttavat myrkyllisyyttä. (J. Sun et al. 2019) Polystyreeni on hyvä esimerkki, sillä sitä käytetään laajasti suojapakkauksissa, säilytysrasioissa, pulloissa ja kansissa, mutta se pystyy siirtymään verenkierrossa ja häiritsemään esimerkiksi vedessä elävien siivilöijien, jotka saavat ravintonsa siivilöimällä vedestä suspensiossa olevaa ainetta, lisääntymistä (Sussarellu et al. 2016). Toiseksi mikromuovit voivat vahingoittaa organismeja ja aiheuttaa tulehdusta pienen kokonsa ja terävän muotonsa takia (J. Sun et al. 2019). Mikromuovien on huomattu aiheuttavan joillekin organismeille aliravitsemusta ja muutoksia lisääntymisessä (Besseling et al. 2014).

Myös muoveihin valmistuksen aikana yhdistettävät lisäaineet, joiden tarkoituksena on parantaa muovien ominaisuuksia, voivat toimia myrkkynä organismeille. Esimerkiksi ftalaaetit ja polybromatut difenyylietterit ovat kaksi yleisesti käytössä olevaa lisäainetta, joita käytetään palonestoaineina muoveissa. Ne tunnetaan kuitenkin myös hormonitoimintaa häiritsevinä kemikaaleina. Nano- ja mikromuovien suuri pinta-alan suhde tilavuuteen ja hydrofobinen luonne tarkoittavat sitä, että ne myös adsorpoivat tehokkaasti pysyviä orgaanisia ympäristömyrkyjä (POP-yhdisteet), kuten polykloorattuja bifenyylejä, ja myös muita mahdollisesti haitallisia yhdisteitä. (J. Sun et al. 2019)

## 2.2.2 Analysointi

Fourier-muunnos-infrapunaspektroskopia (FTIR) on käytetyin menetelmä mikromuovien havainnoimisessa jätevedenpuhdistamoilla. Siinä mikromuovipartikkeleita altistetaan infrapunasäteilylle ja syntyvässä spektrissä näkyvät huippuarvot vastaavat tiettyjä atomien välisiä kemiallisia sidoksia. Saadun spektrin avulla voidaan tunnistaa näytteessä olevat yhdisteet vertaamalla sitä viitearvoihin. Nämä viitearvot kuvaavat kuitenkin hyvin puhdasta ja ideaalia näytettä, eivätkä luonnosta saatavaa. (J. Sun et al. 2019)

Pyyhkäisy-elektronimikroskopia (SEM), dynaaminen valon sironta (DLS) ja nanopartikkeleiden seuranta-analyysi (NTA) mahdollistavat partikkeleiden havaitsemisen 10 nm asti (Filipe et al. 2010; Pecora 2000; Silva et al. 2018). Tästä johtuen nämä tekniikat ovat sopivia nano- ja mikromuovien havaitsemiseen. SEM:iä käytetään partikkeleiden muodon tutkimiseen, kun taas DLS ja NTA antavat tietoa kokojakaumasta ja partikkelien konsentraatiosta. Partikkeleita, jotka ovat pienempiä kuin 10  $\mu\text{m}$ , kuten nanomuovit, ei pystytä analysoimaan Raman- ja FTIR-menetelmillä. (Enfrin et al. 2019) Tästä johtuen uusia tekniikko-

ja, kuten polttotasorivi-ilmaisimeen perustuva mikro-Fourier-muunnos-infrapunaspektroskopia (FPA micro-FTIR) ja pyrolyysi-kaasukromatografia-massaspektrometri (Pyr-GC-MS), on kehitetty ratkaisemaan pienten partikkelien karakterisointia (Fries et al. 2013; Löder et al. 2015). Nano- ja mikromuovien määrän määrittäminen mahdollistaa jätevedenpuhdistamon lävitse kulkeutuvien partikkelien määrän arvioimisen ja sen avulla voidaan selvittää partikkeleiden vaikutusta prosessiin (Enfrin et al. 2019).

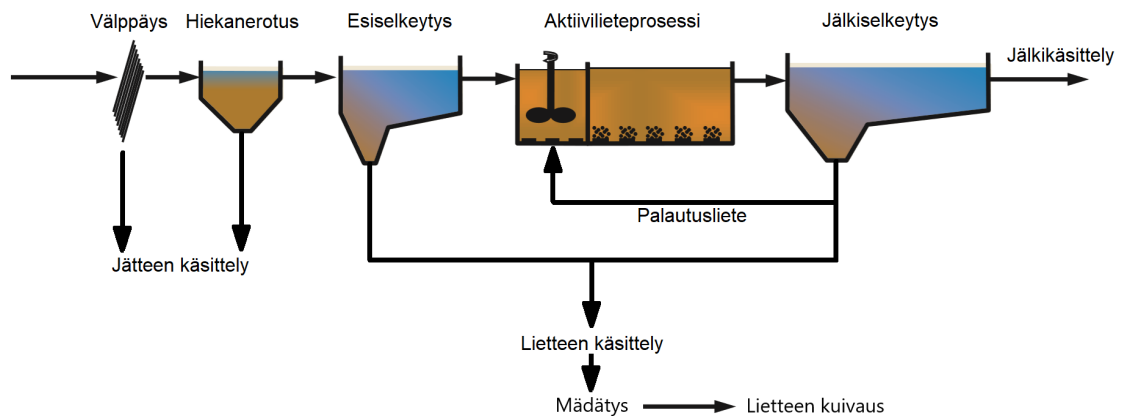
Tämänhetkisillä analyysimenetelmillä on hyvin vaikeaa mitata, kuinka paljon nanomateriaaleja jätevedessä todellisuudessa on. Tämän takia tietokonesimulaatioita käytetään jätevedessä olevien nanomateriaalien määrän arvioimiseksi. Nämä mallit simuloivat nanopartikkeleiden elinkaarta ja laskevat nanopartikkeleiden odotusarvon jätevedelle. Vaikka nanomateriaalit jäävät tehokkaasti jätevedenkäsittelyprosesseihin, tietokonesimulaatiot osoittavat, että käsitelty jätevesi on yksi nanopartikkeleiden pääreiteistä vesistöihin. (Data and knowledge on Nanomaterials 2019)

Lisäämällä muovipartikkeleihin jäljitysainetta voidaan vaikeasti havaittavia partikkeleita seurata. Mitrano et al. 2019 tekemässä tutkimuksessa nanomuovipartikkeleihin lisättiin metallinen tunnistinjälki, jonka avulla tutkittiin nanomuovien käyttäytymisen mekanismeja. Sakan yllä olevassa nesteessä, joka vastaa jätevedenpuhdistamon ulosvirtaavaa vettä, oli alle 1% mitatuista nanomuoveista, kun taas yli 99% oli lietteessä. (Mitrano et al. 2019)

### 3 JÄTEVEDENPUHDISTAMO

Jäteveden puhdistamisen tarkoituksena on poistaa jätevedestä haitalliset ominaisuudet sekä aineet ja tarten suojella ympäristöä pilaantumiselta sekä ihmisten terveyttä, kun vesistöön laskettava vesi on puhdistettu huolellisesti. Puhdistustavoitteen saavuttamiseksi jätevedestä poistetaan happea kuluttavaa orgaanista ainesta, kiintoainetta, taudinaiheuttajia eli patogeenejä ja ravinteita, joista tärkeimmät ovat typpi ja fosfori. (Data and knowledge on Nanomaterials 2019; Water Environment Federation 2018) Nanomuovit saattavat aiheuttaa epätoivottuja vuorovaikutuksia jätevedenpuhdistamoilla, kun partikkeleiden fysikaalis-kemialliset ominaisuudet vaikuttavat jätevedenpuhdistusprosessien tehoon ja toiminnallisuuteen vaurioittamalla ja tukkimalla puhdistusprosesseja. (Enfrin et al. 2019)

Aktiivilieteprosessiin perustuva mekaaniskemiallisbiologinen jätevedenpuhdistusprosessi koostuu mekaanisista, kemiallisista ja biologisista prosesseista. Jokaiselle jätevedenpuhdistamolle valitaan käsittelyvaiheet ja teknologiat tapauskohtaisesti parhaan puhdistustehon saavuttamiseksi. Kuvassa 3.1 on esitetty tyypillinen yhdyskuntajäteveden puhdistusprosessi.



**Kuva 3.1.** Tyypillinen yhdyskuntajäteveden puhdistusprosessi, muokattu lähteestä Laitinen et al. 2014.

Tässä luvussa kuvataan yhdyskuntajäteveden käsittelyvaiheita, joita ovat esikäsitteley, esiselkeytyks, aktiivilieteprosessi, jälkiselkeytyks ja jälkikäsitteley. Tämän lisäksi pohditaan muovien ominaisuuksien perusteella, miten käsittelyvaiheet vaikuttavat niihin.

### 3.1 Esikäsittely ja esiselkeytys

Esikäsittelyn kolme tärkeintä tehtävää ovat vaikeasti käsiteltävän kiintoaineen poisto, seuraavien puhdistusyksiköiden suojele ja niiden puhdistustehon parantaminen. Esikäsitellyssä poistetaan fysikaalisin menetelmin isoja kappaleita ja karkeaa kiintoainetta käyttäen välppiä ja siivilöitä. Niiden avulla poistetaan isoja ja puhdistusprosesseja haittaavia kappaleita, kuten oksia ja roskia. Hiekanerotuksessa karkeampi aines, kuten hiekka, sora ja lasi laskeutetaan altaan pohjalle, jotta ne eivät aiheuta vahinkoa tuleville käsittelyprosesseille. (Water Environment Federation 2018)

Ilmastetussa hiekanerotuksessa voidaan samalla poistaa jätevedestä rasva ja öljy, kun ilmakuplat kelluttavat ne pintaan, josta ne kaavitaan pois (Laitinen et al. 2014). Poistettavia aineita ovat erityisesti rasva ja öljy, mutta myös nano- ja mikromuovit, joiden ominaispaino on vettä alhaisempi (Sutherland 2008). Nano- ja mikromuoveista osa saadaan myös poistettua esikäsitellyssä, kun ne kiinnittyvät laskeutuviin partikkeleihin.

Esiselkeytys on ensimmäinen vaihe jätevedenpuhdistuksessa, jossa poistetaan kiintoainetta ja orgaanista ainetta laskeuttamalla (Laitinen et al. 2014). Koaguloitkemikaalia lisäämällä voidaan suspensiossa olevat aineet saada laskeutumaan helpommin. Koagulaatiokemikaaleilla, kuten alumiinisulalla, muutetaan kolloidien pintavarausta, jolloin ne voivat yhdistyä laskeutumiskelpoisiksi hiukkasryhmiksi. (Water Environment Federation 2018) Sama mekanismi on käytössä biologisessa käsittelyssä, kun fosforia saostetaan (Laitinen et al. 2014). Prosessi on tärkeä, sillä kiintoaineen, kolloidien ja biokemiallisen hapentarpeen (BOD) vähentäminen laskevat hapentarvetta, vähentävät energiankulutusta ja suojaavat biologisia käsittelyprosesseja vaurioitumiselta.

Esiselkeytyksessä poistetaan myös veden pinnalla kelluvat aineet, kuten rasvat, öljyt ja lehdet, jotka eivät jääneet esikäsitelyyn. (Water Environment Federation 2018) Osalla nano- ja mikromuoveista tiheys on veden tiheyttä pienempi, jolloin ne nousevat pintaan ja ne voidaan kerätä pois jätevedestä. Esikäsitelyn tapaan myös tässä vaiheessa muovipartikkelit tarttuvat laskeutuviin partikkeleihin.

### 3.2 Aktiivilieteprosessi ja jälkiselkeytys

Biologisessa käsittelyssä mikrobit käyttävät biohajoavaa orgaanista ainetta ja ravinteita tuottaakseen energiaa ja biomassaa. Yleisimmin käytetty prosessi on aktiivilieteprosessi, jossa mikro-organismit ovat suspensiossa jätevedessä. Sen yksikköprosesseja ovat ilmastus, jälkiselkeytys ja fosforin rinnakkaissaostus. Riippuen prosessista, voi siinä olla mukana myös hapettomia tai vähähappisia vyöhykkeitä. (Laitinen et al. 2014) Fosforin saostuksella poistetaan fosforia vedestä flokkulaatiolla ja sitä seuraavalla ilmaflotaatiolla tai laskeutuksella (Enfrin et al. 2019).

Kun mikrobit kasvavat ja sekoittuvat prosessiin lisättävän ilman seurauksena, ne flokkuloituvat aktiivilietteeksi. Ilmastusaltaasta vesi johdetaan jälkiselkeytysaltaaseen, jossa mikrobimassa laskeutetaan. Suurin osa laskeutetusta lietteestä kierrätetään takaisin il-

mastusaltaaseen, jotta prosessin korkea mikrobipitoisuus pysyy yllä, mikä mahdollistaa biohajoavan orgaanisen aineen nopean hajoamisen. Loput lietteestä johdetaan käsiteltäväksi anaerobisessa mädätyksessä. Mikrobit voivat olla kiinnittyneenä myös kantajakappaleiden, jotka voivat olla esimerkiksi muovisia, pinnalle biofilminä. Kantajakappaleilla täytettyä suodatinta kutsutaan biofilmiprosessiksi. (Water Environment Federation 2018) Jälkiselkeytyksessä mikrobien laskeutuessa nano- ja mikromuovit saattavat kiinnittyä niihin ja päätyä joko takaisin aktiivilieteprosessiin palautuslietekierron mukana tai poistua prosessista.

### 3.3 Jälkikäsitely ja lietteen käsittely

Jälkikäsitely eli tertiäärikäsittely voidaan toteuttaa, jos jätevesi sisältää paljon orgaanista ainetta, jäteveden laatu ei tavoita sille asetettuja ympäristöluvan mukaisia lähtevän veden pitoisuuksia käsittelyn aiemmissa vaiheissa tai purkuvesistössä on vaarana rehevöityminen (Laitinen et al. 2014). Käytettyjä menetelmiä jälkikäsitelyssä ovat kemiallinen saostus, rakeinen suodatus, kalvosuodatus ja mikrosiivilöinti. Käsittelyn tavoitteena on poistaa vedestä kiintoainetta, BOD:ta, fosforia, typpeä ja mikrobeja. Suspensiossa olevaa kiintoainetta voidaan poistaa rakeisella suodattimella, jossa käytetään materiaalina hiekkaa tai antrasiittia. (Water Environment Federation 2018) Pienet muovipartikkelit voivat jäädä kiinni suodattimiin, mutta pienen kokonsa ansiosta nanomuovit saattavat kulkeutua myös niiden lävitse.

Jälkikäsitelyn jälkeen puhdistettu vesi eli effluentti johdetaan purkuvesistöön. Tällöin ne nano- ja mikromuovit, joita ei pystytty jätevedenpuhdistusprosesseilla poistamaan, päätyvät luontoon ja vesistöihin. Välppäyksessä ja hiekanerotuksessa kerätyt jätteet kuljetetaan kaatopaikalle tai polttoon yhdyskuntien sekajätteen kanssa. Esiselkeytyksessä, aktiivilieteprosessissa ja biologisessa käsittelyssä syntyvä liete stabiloidaan ja hygienisoitetaan, jotta niiden biohajoavuus sekä terveys- ja ympäristöhaitat vähenevät. Lietettä kuivataan ja tiivistetään mekaanisilla ja termisillä menetelmillä, mikä helpottaa sen loppusijoittamista ja kuljettamista. Lietettä voidaan käyttää myös biokaasun tuotannossa mädättämällä sitä. Käsiteltyä lietettä voidaan käyttää lannoitteena tai maanparannusaineena. (Water Environment Federation 2018) Lietteeseen jääneet nano- ja mikromuovit päätyvät luontoon, kun lietettä käytetään hyödyksi.

### 3.4 Yhteenveto

Jätevedenpuhdistamot koostuvat monista erilaisista osaprosesseista, jotka on valittu puhdistettavan jäteveden ominaisuuksien ja tapauskohtaisten puhdistustavoitteiden mukaan. Taulukossa 3.1 on esitetty yhteenveto jäteveden käsittelyn eri vaiheista ja mahdollisista yksikköprosesseista.

**Taulukko 3.1.** Yhteenveto jätevedenpuhdistuksen vaiheista.

Käsittelyvaihe	Yksikköprosessit	Tarkoitus
Esikäsittely	Välppäys, siivilöinti, hiekanerotus, rasvanerotus	Suojaa seuraavia käsittelyvaiheita ja parantaa niiden toimintaa poistamalla suuria kappaleita
Esiselkeytys	Laskeutus, flotaatio, kemiallinen saostus	Poistaa kiintoainetta
Biologinen käsittely	Aktiivilieteprosessi, jälkiselkeytys, biosuodatus	Poistaa ravinteita (typpi ja fosfori) ja happea kuluttavia yhdisteitä
Jälkikäsittely	Mikrosiivilöinti, suodatus, kalvosuodatus, flotaatio, flokkaus ja laskeutus, kalvobioreaktori	Tehostaa kolloidien ja kiintoaineen poistoa

Pienen kokonsa ja kevyen rakenteensa takia nano- ja mikromuovit ovat vaikeita puhdistettavia jätevedenpuhdistamoilla. Vaikka prosessit on suunniteltu poistamaan suurempia muovikappaleita, voidaan pienempien muovipartikkeleiden poistaminen toteuttaa joko niitä varten suunnitelluilla osaprosesseilla, kuten suodattimilla, tai muokkaamalla jo olemassa olevia prosesseja.



## 4 NANOMUOVIT

### JÄTEVEDENPUHDISTUSPROSESSISSA

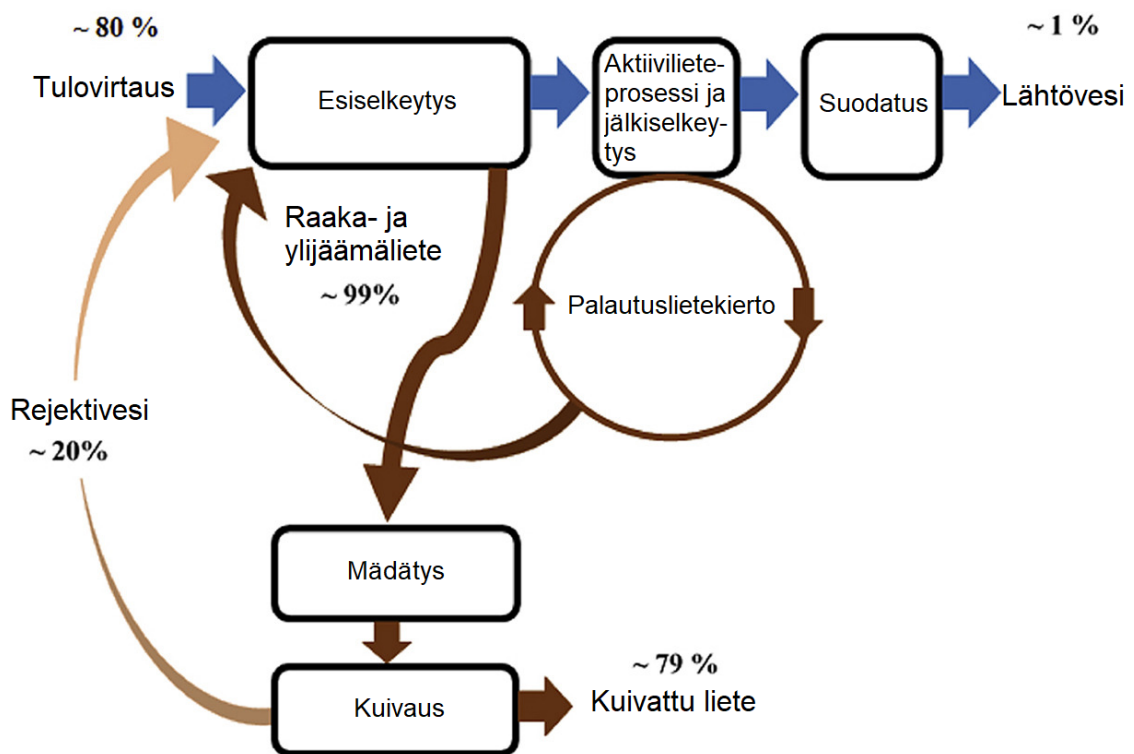
Jätevedenpuhdistusprosessit on suunniteltu poistamaan vedestä epäpuhtauksia. Kuitenkaan mitään niistä ei ole suunniteltu poistamaan nanomuoveja. (Enfrin et al. 2019) Tässä kappaleessa käsitellään nanomuoveja jätevedenpuhdistamolla ja sen eri prosesseissa.

#### 4.1 Nano- ja mikromuovien kulkeutuminen jätevedenpuhdistamolla

Vaikka joidenkin jätevedenpuhdistusprosessien on osoitettu poistavan mikromuoveja tehokkaasti (jopa 99,9%) jätevedestä kokoluokassa 1  $\mu\text{m}$  - 5 mm (Carr et al. 2016), ei sama välttämättä päde pienemmille partikkeleille, kuten nanomuoveille. Vettä kevyemmät muovityypit, kuten PE ja PP, kelluvat veden pinnalla, jolloin ne eivät laskeudu kuin vasta tarttuessaan painavimpiin partikkeleihin. Puhdistustehokkuus riippuu myös valituista käsitelyprosesseista (Costa et al. 2016). Pienen kokonsa ja erilaisen kemiallisen koostumuksensa takia nanomuovit voivat helposti kulkeutua veden mukana jätevedenpuhdistamolla kunnostusprosesseihin aiheuttaen haasteita toiminnallisuudessa ja prosessin tasapainossa pitämisessä (Enfrin et al. 2019). Jätevedenpuhdistusprosesseissa nanomuoveihin saattaa kiinnittyä patogeenejä ja opportunistisia eliöitä (Machado et al. 2018).

Jätevedenpuhdistamoiden on tutkittu olevan yksi merkittävimmistä mikromuovin lähteistä vesistöihin (Murphy et al. 2016). Vaikka muovipartikkeleita voidaan poistaa puhdistamolla todella tehokkaasti (98-99%) käsitellyn veden määrä on kuitenkin niin suuri, että muovipartikkeleita päätyy silti paljon purkuvesistöön. Talvitie, Mikola, Setälä et al. 2017 tekemän tutkimuksen mukaan 20% jätevedenpuhdistuksessa poistetusta mikromuovista palautuu palautuslietteen mukana takaisin puhdistusprosessin alkuun, mikä aiheuttaa sisäistä kuormitusta, kun taas 79% päätyy kuivattuun lietteeseen (ks. kuva 4.1). Tutkimuksessa mikromuovikappaleiden muoto muuttui puhdistusprosessin aikana. Sisäänvirtauksessa noin 70% mikromuoveista oli muovikuituja, kun taas ulosvirtauksessa vain 30%. Suurin osa kuiduista poistettiin jo esikäsitelyssä. Sisäänvirtauksen mukana tulevat tekstiilien kuidut jäävät pääasiallisesti kiinni suurempaan orgaaniseen jätteeseen, joka laskeutuu esiselkeytyksessä. (Talvitie, Mikola, Setälä et al. 2017)

Kulkeutuessaan läpi jätevedenpuhdistusprosessien nano- ja mikromuovit altistuvat erilaisille pumppauksen ja sekoittamisen aiheuttamille leikkausvoimille, jotka voivat rikkoa



**Kuva 4.1.** Massatase Viikinmäen jätevedenpuhdistamon mikromuoveista, muokattu lähteestä Talvitie, Mikola, Setälä et al. 2017.

partikkeleita pienemmiksi palasiksi lisäten näin nanomuovien määrää vedessä. Tällöin mikromuovien konsentraatio ulosvirtaavassa vedessä laskee, kun taas havaitsemattomien nanomuovien määrä kasvaa. (Enfrin et al. 2019) Nano- ja mikromuovit ovat herkkiä pilkkoutumiselle johtuen heikentyneestä pintakerroksesta, joka voi hajota mekaanisen ja kemiallisen kuormituksen seurauksena (Cooper & Corcoran 2010). Vaikka nano- ja mikromuovien pilkkoutumisen on uskottu tapahtuvan merissä ja sisävesissä ultravioletti- ja luonnollisen aaltovaikutuksen seurauksena, on jätevedenpuhdistamoiden todettu aiheuttavan pilkkoutumista keinotekoisella kuormituksella. Sekoituksen ja pumpauksen aiheuttamien leikkausvoimien lisäksi nano- ja mikromuoveja kovemmat aineet, kuten hiekkasuodatuksessa käytettävä hiekka, voivat aiheuttaa muovipartikkeleiden pilkkoutumista. (Enfrin et al. 2019) Kun partikkelin koko saavuttaa nanotason, törmäykset vesimolekyylien ja muiden ionisten molekyylien kanssa voivat estää partikkeleita saostumasta. Tämä vuorovaikutus aiheuttaa satunnaisen liikkeen koko liuoksessa ja sitä kutsutaan Brownin liikkeeksi. Partikkeleiden koon ollessa muutaman mikrometrin, Brownin liike alkaa olla havaittavissa, kun taas partikkelikoon ollessa 100 nanometriä liike on hyvin vallitsevaa. (Gigault et al. 2018)

Pienet partikkelit, kuten nanomuovit, joilla on korkea pintavaraustiheys, kasaantuvat väljään muodostelmaan, jonka pintavaraus on korkeampi kuin -30 mV (Enfrin et al. 2019). Nano- ja mikromuovien kasaantumista tutkittaessa veden koostumus on tärkeässä osassa. Muovissa käytetyt lisäaineet muuttavat partikkeleiden pintakemiaa vaikuttaen samalla

niiden kasaantumis- ja dispersio-ominaisuuksiin. Pintakemiansa takia nano- ja mikromuovit voivat myös adsoroida epäpuhtauksia vedessä ja muodostaa kasaantumia muiden partikkeleiden kanssa, jolloin niiden koko ja tiheys muuttuvat, mikä johtaa myös niiden kelluvuuden muuttumiseen. (Hahladakis et al. 2018)

## 4.2 Nanomuovien vaikutus eri käsittelyvaiheisiin

Huonosti liukenevat biohajoamattomat nanomuovit pystyvät vuorovaikuttamaan membraanien, soluelinten ja molekyylien kanssa. Tämä voi aiheuttaa monia yleisesti myrkyllisten kemikaalien synnyttämiä vaikutuksia, kuten tulehdusta, membraanien läpäisykyvyn muutosta ja oksidatiivista stressiä. (Machado et al. 2018) Jos jätevedessä on paljon nano- ja mikromuoveja, voivat ne vaikuttaa jätevedenpuhdistusprosessien toimivuuteen. Esimerkiksi suodatusprosesseissa suodattimet saattavat tukkeutua tai vahingoittua paakkuuntumisen tai kulumisen seurauksena. (Enfrin et al. 2019)

### 4.2.1 Esikäsittely ja esiselkeytys

Esikäsittely ja -selkeytys voivat poistaa suurimman osan jätevedessä olevista mikromuoveista (Talvitie, Mikola, Setälä et al. 2017). On osoitettu, että 35-59% mikromuoveista pystyttiin poistamaan esikäsittelyssä ja 50-98% esiselkeytyksessä. Partikkelit saatiin poistettua vedestä pääasiallisesti vaahdonpoistolla, öljynerotuksella ja laskeutuksella esiselkeytyksessä. (Sutherland 2008) Nano- ja mikromuovien kyky adsoroida epäpuhtauksia vedestä voi vähentää öljynerotuksessa poistettavien nano- ja mikromuovien määrää, kun ne muodostavat suurempia partikkeleita, jotka eivät kellu.

Esikäsittelyllä on suurin vaikutus mikromuovien kokojakaumaan, sillä se pystyy poistamaan suurimman osan isokokoisemmista partikkeleista. Eräässä tutkimuksessa huomattiin, että isompien partikkeleiden, joiden koko oli 1000  $\mu\text{m}$  - 5000  $\mu\text{m}$ , määrä putosi 45%:sta 7%:iin esikäsittelyn jälkeen. (J. Sun et al. 2019) Talvitie, Mikola, Setälä et al. 2017 mukaan esikäsittely poisti partikkeleita, jotka olivat kooltaan suurempia kuin 100  $\mu\text{m}$ , jolloin pienemmän koon (20-100  $\mu\text{m}$ ) partikkeleiden suhteellinen määrä kasvoi jätevedessä. Esikäsittely ja -selkeytys siis poistavat tehokkaasti isomman kokoluokan mikromuoveja käsiteltävästä jätevedestä, mikä tarkoittaa sitä, että ne eivät poista pieniä nanomuoveja yhtä tehokkaasti.

### 4.2.2 Aktiivilieteprosessi ja jälkiselkeytys

Biologisen käsittelyn eli sekundäärikäsittelyn on todettu poistavan 50% jäteveden mikromuoveista kemikaalisella koagulaatiolla ja laskeuttamisella jälkiselkeytysaltaassa (Talvitie, Mikola, Setälä et al. 2017). Toisin kuin primäärikäsittely, sekundäärikäsittely poistaa paremmin partikkeleita kuin kuituja, mikä saattaa johtua siitä, että helposti laskeutuvat tai kelluvat kuidut on jo poistettu esikäsittelyn aikana, kun taas jäljellä olevilla muovikappaleilla voi olla joku ominaisuus, kuten neutraali kelluvuus, joka voi vastustaa poistamista.

(J. Sun et al. 2019) Eräissä tutkimuksissa mikromuovit, jotka olivat pienempiä kuin 500  $\mu\text{m}$ , poistuivat kokonaan sekundäärikäsittelyssä (Talvitie, Mikola, Setälä et al. 2017). Sekundäärikäsittelyn kuivatussa lietteessä on myös todettu esiintyvän mikromuoveja jopa yli 20000 kpl/kg (J. Sun et al. 2019).

Nanopartikkelit, kuten nanomuovit, saattavat vaikuttaa negatiivisesti biologisiin prosesseihin, esimerkiksi orgaanisen aineen hajoamiseen tai typen ja fosforin poistoon inhiboimalla prosesseja, kuten nitrifikaatiota. Koska todellisuudessa jätevedessä olevien nanopartikkeleiden määrä on pieni, oletetaan, että nanopartikkeleilla ei ole vaikutusta biologisiin prosesseihin. (Data and knowledge on Nanomaterials 2019) Nano- ja mikromuovien haitallisuutta bakteereille ei vielä kuitenkaan tarkkaan tunneta. Eräs tutkimus osoitti, että polystyreeniä olevat nano- ja mikromuovit, joiden koko oli välillä 55 nm - 1000 nm, inhiboivat *Halomanas alkaliphila* -bakteerin kasvua (X. Sun et al. 2018).

Negatiivisesti varautuneet nano- ja mikromuovit voivat muodostaa sidoksia jätevetteen li-sättävien alumiini- tai rautasuolojen ja vedessä olevien epäpuhtauksien kanssa, jolloin vapaiden suolojen määrä vähenee. Nano- ja mikromuovit siis aiheuttavat sen, että suolojen määrää tulee lisätä, jotta epäpuhtauksien saostuminen ja flotaatio voisivat tapahtua. Koska nano- ja mikromuovien määrää jätevedessä ei tiedetä tarkasti, voivat ne aiheuttaa haittavaikutuksia fosforin saostukselle. (Enfrin et al. 2019)

### 4.2.3 Jälkikäsittely

Jälkikäsittelyn eri tekniikoita ovat muun muassa pikahiekkasuodatus, kalvosuodatus ja desinfiointi. Pikahiekkasuodatusta käytetään suspensiossa olevan kiintoaineen keräämiseen joko mekaanisella suodatuksella tai fysikaalisella adsorptiolla kolmen kerroksen (antrasiittirae, piihiekkä ja sora) läpi. Pikahiekkasuodatus poistaa tehokkaasti kiintoainesta vedestä, mutta ylin kerros voi tukkeutua nopeasti, minkä vuoksi suodatin täytyy vastavirtahuuhdella 2-3 päivän välein. (Scholz 2016) Nano- ja mikromuovit voivat pienen kokonsa takia päästä koko ensimmäisen kerroksen läpi. Piihiekkä adsorpoi kuitenkin partikkeleita hydrofiilisten vuorovaikutusten avulla, mikä tukkii kerroksen ja heikentää suodattimen tehoa (Enfrin et al. 2019). Säännöllinen vastavirtahuuhtelukaan ei välttämättä poista adsorpoituneita nano- ja mikromuoveja niiden pinnalla olevien hydroksyyli-ryhmien takia (Cai et al. 2018; Cooper & Corcoran 2010; Gewert et al. 2015). Suuren ominaispinta-alansa takia nanomuovit saattavat sisältää useampia hydroksyyli-ryhmiä, mikä johtaa vahvempiin sidoksiin piihiekan kanssa, kun niiden välille muodostuu vetysidoksia. Tämän takia nano- ja mikromuovit voivat olla haitaksi pikahiekkasuodatukselle. (Enfrin et al. 2019)

Kalvojen, kuten ultrasuodatuskalvojen, huokoskoko vastaa nano- ja mikromuovien kokoa, minkä takia ne ovat tehokkaita poistamaan näitä pieniä muovihiukkasia vedestä (Talvitie, Mikola, Koistinen et al. 2017), mutta samalla kalvon pinnan ja muovipartikkeleiden väliset vuorovaikutukset lisääntyvät. Mikromuovien taipumus hajota nanomuoveiksi kulkiessaan jätevedenpuhdistamon läpi voi lisätä kalvosuodattimen saavuttavien nanomuovien määrää ja täten lisätä niiden vuorovaikutuksen todennäköisyyttä suodatusprosessin kanssa

(Enfrin et al. 2019). Hajottuaan nano- ja mikromuoveilla on epäsäännöllinen muoto (Klein et al. 2018; Lambert & M. Wagner 2016), jonka reunat voivat vahingoittaa kalvoja. Tämä ilmiö korostuu, kun käänteisosmoosikalvossa käytetään korkeaa painetta. Kalvoteknologiaa käytetään laajasti jätevedenpuhdistamoilla, koska ne kestävät kemiallista ja mekaanista kulutusta, niitä saa eri huokoskolla ja materiaalilla, ja niitä on helppo suurentaa sekä operoida. (Enfrin et al. 2019) Alle 2% mikromuoveista löydettiin jälkikäsitteilyn eli tertiäärikäsittelyn ulosvirtaavasta vedestä ja näiden partikkeleiden kokoluokka oli 20 - 100  $\mu\text{m}$ , mikä johtuu kalvosuodatustekniikoiden käytöstä, kuten ultrasuodatuksesta ja käänteisosmoosista (Talvitie, Mikola, Koistinen et al. 2017; Ziajahromi et al. 2017). Tämä tulos tarkoittaa, että suuri määrä mikromuoveja jää kalvosuodattimiin, mikä heikentää suodattimien tehokkuutta ajan saatossa (Enfrin et al. 2019).

Desinfiointin tarkoituksena on tuhota vedessä ja jätevedessä olevat taudinaiheuttajat ja loiset ennen uudelleenkäyttöä tai laskemista purkuvesistöön (Brandt et al. 2017). Kloorauksessa nano- ja mikrokokoinen suspensiossa oleva kiintoaine voi heikentää prosessin vaikutusta vedessä oleviin mikro-organismeihin, jotka voivat olla flokkien tai suspensiossa olevien partikkelien seassa (Narkis et al. 1995). Otsonoinnissa taas muovipartikkelit voivat sitoutua otsonimolekyyleihin samalla näin vähentäen vapaana olevien otsonimolekyylien määrää, jolloin osa taudinaiheuttajista saattaa jäädä veteen. Vaihtoehtoinen käsittelytapa kloorauksen ja otsonoinnin tilalle on esimerkiksi ultraviolettisäteilytys, jossa ei tarvita vaarallisia kemikaaleja ja joka ei tuota myrkyllisiä sivutuotteita. (Brandt et al. 2017) Suspensiossa olevat mikrokokoiset partikkelit saattavat kuitenkin suojata mikro-organismeja UV-valolta ja estää näin desinfiointin. (Carré et al. 2018) Talvitie, Mikola, Setälä et al. 2017 tutkimuksen mukaan tertiäärikäsittelyn vaiheena käytettävä biologinen aktiivisuodatus (BAF) ei pienennä mikromuovien konsentraatiota käsitellyssä vedessä. Viikinmäen jätevedenpuhdistamolla BAF:n tehtävänä on poistaa tyypeä jätevedestä, mutta aiemmin tehdyn tutkimuksen (Talvitie, Heinonen et al. 2015) perusteella suodatuksen odotettiin poistavan myös mikromuoveja. (Talvitie, Mikola, Setälä et al. 2017)

#### 4.2.4 Lietteen käsittely

J. Sun et al. 2019 huomasivat, että mikromuovien kokojakauma lietteessä on hyvin erilainen jätevedessä olevien mikromuovien kokojakaumaan verrattuna. Tuloksena oli, että lietteessä olevat mikromuovit ovat pääasiallisesti suurempia kuin jätevedestä saadut mikromuovit. (J. Sun et al. 2019) Tästä voidaan päätellä, että jätevedenpuhdistamot poistavat helpommin suuremmat mikromuovit kuin pienet. Täten myös mikromuovit poistuvat prosesseissa paremmin kuin nanomuovit.

Mädätyksessä orgaaninen aine hajoaa, mutta lietteenkäsittely ei vaikuta biohajoamattomiin tai hitaasti hajoaviin partikkeleihin, kuten muoviin. Lietteen kuivauksessa rejektivesi erotetaan ja johdetaan takaisin jätevedenpuhdistusprosessin alkuun. (Talvitie, Mikola, Setälä et al. 2017) Talvitie, Mikola, Setälä et al. 2017 tekemän tutkimuksen mukaan rejektivesi toimii puhdistamon sisäisenä nano- ja mikromuovikuormituksen palauttamalla

niitä takaisin prosessiin.

Toisessa tutkimuksessa huomattiin, että kooltaan 55 nm olevat nanomuovit heikensivät lietteen anaerobista mädätystä. (Enfrin et al. 2019) Nanomuovien on myös todettu inhiboivan *Acetobacteroides hydrogenigenes* -bakteerin kasvua ja aineenvaihduntaa anaerobisessa mädätyksessä. Mädätyksen tehokkuus myös heikentyi nanomuovien vaikutuksesta. Metaanin saanto ja -tuotto eivät osoittaneet korrelaatiota nanomuovikonsentraation kanssa. Nanomuovien vaikutusta anaerobiseen mädätykseen tarkastelevassa tutkimuksessa mädätykseen lisätyt nanomuovipartikkelit esiintyivät prosessissa kahdessa eri muodossa: irrallisena biokaasulietteessä ja lietteeseen sekä bakteereihin kiinnittyneinä. Lietteiden pinnalle oli kiinnittynyt merkittävä määrä nanomuoveja. Lietteiden rakenne ei kuitenkaan muuttunut nanomuovien vaikutuksesta. (Fu et al. 2018)

## 5 NANOMUOVIEIN MÄÄRÄN JA VAIKUTUKSEN VÄHENTÄMINEN

Nanomuoveista ja niiden vaikutuksista ei vielä tiedetä paljoa. Isoin huolenaihe liittyy nano- ja mikromuovien vaikutukseen jätevedenpuhdistamoilla onkin juuri tiedonpuute vedessä olevien nano- ja mikromuovien koosta, konsentraatiosta ja ominaisuuksista (Enfrin et al. 2019). Tässä luvussa käsitellään nanomuovien määrän ja vaikutuksen vähentämistä tulevaisuudessa erilaisin keinoin.

Tärkein asia nanomuovien tutkimisen helpottamisessa on menetelmän löytäminen, jolla näitä erittäin pieniä hiukkasia voidaan havainnoida ja tutkia. Jätevedessä olevien nanomuovien poistamista varten ei ole olemassa vielä mitään varsinaisia menetelmiä. Nanomuovien pieni koko luo vaikeuden keksiä tarpeeksi pieniin hiukkasiin pystyvän puhdistusmenetelmän. Muutamia vaihtoehtoja ja kokeiluja on jo esitetty mikromuovien poistamiseksi.

Tiheyteen perustuva erottelu on yksi vaihtoehdoista. Veden tiheyttä on mahdollista muokata siten, että nano- ja mikromuovit jäävät kellumaan, jolloin ne on helppo poistaa kuorrinnalla. Monien muovien tiheys on lähellä veden tiheyttä, mikä tekee näistä materiaaleista valmistettujen nano- ja mikromuovien poistamisen jätevedestä haastavaksi. Esimerkiksi lisäämällä NaCl tai NaI veden tiheys voidaan nostaa 1,00 g/cm<sup>3</sup>:sta 1,2 g/cm<sup>3</sup>:een ja 1,8 g/cm<sup>3</sup>:een, jolloin jopa tiheämmästä päästä olevat (PET) nano- ja mikromuovit saataisiin kellumaan. Tämä prosessi ei kuitenkaan sovellu jätevedenpuhdistamoille, sillä pienen kokonsa takia nano- ja mikromuovien tiheuserotus tulee suorittaa staattisessa tilassa, koska virtaava vesi levittäisi partikkelit. Nano- ja mikromuovien tiheys ei määrity pelkästään muovityypin perusteella, vaan siihen vaikuttavat myös muovin valmistuksessa käytetyt lisäaineet ja muut kemikaalit, jotka ovat adsorpoituneet muovipartikkelien pinnalle. Tästä syystä johtuen muovipartikkeleiden ja kelluttamiseen tarvittavan seoksen tiheyden arviointi ei ole helppoa. Veden tiheyden nostamiseen käytettävät suolat saattavat olla haitallisia, kuten NaI, joka on myrkyllinen ympäristölle. Lisäksi suolojen keräys ja pesu uudelleenkäyttöä varten on kallista, sillä tarvittavan puhtauden saavuttamiseksi materiaaleja joudutaan esikäsittelemään. (Enfrin et al. 2019)

Fyysiset ja kemialliset prosessit, jotka hallitsevat nanomuovien yhtymistäipumusta luonnollisiin kolloideihin, vaikuttavat oletettavasti hyvin vahvasti siihen, kuinka nopeasti nanomuovipartikkelit kiinnittyvät suurempiin suspensiossa oleviin materiaaleihin ja täten myös laskeutuvat (Mitrano et al. 2019). Koagulanttien käyttäminen voisi auttaa muodostamaan

vahvoja ja stabiileja rakenteita, jotka olisi helppo poistaa vedestä kuorinnalla tai laskeuttamalla (Enfrin et al. 2019). Alumiinisulolat olivat erään tutkimuksen mukaan tehokkaampia poistamaan PE-partikkeleita (poistoteho 25%), kuin rautasulolat, jotka poistivat 15% partikkeleista (Ma et al. 2019). Anionisen polyakryyliamidin lisääminen alumiinisulolajien lisäksi nosti poistotehon 60%:iin, mikä johtunee kasaantumien tiivistymisestä. (Enfrin et al. 2019)

Koagulaatio on osoittautunut lupaavaksi esikäsitteilymenetelmäksi, mutta syntyvät flokit tulisi poistaa joko kuorimalla tai laskeuttamalla, sillä membraanit kärsivät edelleen tukkeutumisesta. Pienillä partikkeleilla, kuten nanomuoveilla, on suurempi pintavaraustiheys kuin suuremmilla partikkeleilla ja siitä johtuen niitä on vaikeampi tehdä epätasapainoisiksi. Tarvittaisiin korkeampi energia nanomuovien suspension hajottamiseen ja niiden kasaantumiseksi. Tästä johtuen koagulaatiota pitää vielä optimoida, jotta sen avulla voitaisiin poistaa nano- ja mikromuoveja. (Enfrin et al. 2019) Nano- ja mikromuovien erottamiseksi kemiallisesta lietteestä tulisi myös keksiä menetelmä.

Yksi vaihtoehto nano- ja mikromuovien määrän vähentämiseksi jätevedessä on niiden biologinen hajottaminen ennen kuin ne päätyvät kalvosuodattimiin. Nano- ja mikromuovien hajoamista tapahtuu vedessä, mutta muovin mineralisaatio vedessä voi kestää satoja vuosia. (Enfrin et al. 2019) Hajoamisnopeutta voitaisiin lisätä käyttämällä eliöitä, kuten bakteereja, jotka käyttäisivät muovia hiilenlähteenä (Caruso 2015). *Zalerion maritimum*-sienen taipumus hajottaa PE-partikkeleita osoitettiin tutkimuksessa, jossa 43% muovista oli hajonnut 14 päivässä altistuttuaan sienelle (Enfrin et al. 2019). Toisessa tutkimuksessa *Rhodococcus*-bakteerikannan todettiin hajottavan PP-partikkeleista 6,4% polymeerimassasta 40 päivässä (Auta et al. 2018). Kolmannessa tutkimuksessa *Ideonella sakaiensis* hajotti PET-kalvon kokonaan kuudessa viikossa (Yoshida et al. 2016). Muovien biohajoaminen on ideaali ratkaisu nano- ja mikromuovien poistamiseksi vedestä, mutta ympäristön muuttajat, kuten veden koostumus ja lämpötila, muovityyppi, konsentraatio ja bakteerien saatavuus voivat hidastaa biohajoamista (Enfrin et al. 2019). Muovien hajoamisajat ovat varsin pitkiä verrattuna jätevedenpuhdistamoiden normaaliin lieteikään (5-15 pv (Karttunen 2004)), joten prosessi ei sovellu sellaisenaan jätevedenpuhdistamoille.

Pintakäsittelyn käyttäminen nano- ja mikromuovien aiheuttaman tukkeutumisen estämiseksi kalvosuodatuksessa on haastavaa, koska kalvon ominaisuudet, kuten karheus, hydrofobisuus ja pintavaraus, tulee olla muokattuna vedessä olevien nano- ja mikromuovien ominaisuuksien perusteella, minkä määrittäminen on vielä vaikeaa. Kalvon hydrofiilisyyden nostaminen voisi laskea nano- ja mikromuovien adsorptiota, sillä ne ovat pääasiassa hydrofobisia polymeereja, kuten PE, PP ja PS. Lisäksi kalvon karheuden vähentäminen vähentäisi samalla myös vuorovaikutusta nano- ja mikromuovien kanssa. (Enfrin et al. 2019)

Luonnossa yksi pääasiallisista muovia hajottavista tekijöistä on UV-säteily. Tästä syystä yksi keino vähentää nano- ja mikromuovien määrää jätevedessä voisi olla UV-säteilytys. Menetelmä on toki jo käytössä jälkikäsitteilymenetelmänä, mutta erillinen nano- ja mikromuoveille tarkoitettu puhdistusmenetelmä olisi tarpeen. Menetelmä vaatii vielä tutki-



musta esimerkiksi sen suhteen, että hajottaako UV-säteily muovipartikkeleita vain entistä pienemmiksi varsinaisesti kuitenkin poistamatta niitä vedestä.

Pilot-mittakaavan tutkimuksessa tarkasteltiin neljää eri käsittelymenetelmää mikromuovien vähentämiseksi. Nämä menetelmät olivat kiekkosuodatin (DF), pikahiekkasuodatin (RSF), paineflotaatio (DAF) ja kalvobioreaktori (MBR). Kiekkosuodatin koostuu kahdesta vierekkäisestä kiekosta, joissa on 24 suodatuspaneelia. Käsiteltävä vesi tulee suodatinpaneelien sisältä prosessiin. Puhdistusteho perustuu fyysiseen pidättymiseen ja lietekerroksen muodostumiseen. Pikahiekkasuodatuksessa käytettiin metrin sorakerrosta, jonka raekoko oli 3-5 mm, ja puolen metrin kvartsikerrosta, jossa raekoko oli 0,1-0,5 mm. Suspensiossa olevan kiintoaineen poistamisen lisäksi mikrobien adheesio poistaa ravinteita ja mikrobeja. (Talvitie, Mikola, Koistinen et al. 2017)

Paineflotaatiossa käsiteltävään veteen lisätään korkeapaineista vettä. Ilmakuplat kiinnittyvät suspensiossa olevaan kiintoainekseen, jolloin se nousee pinnalle, josta se kuoritaan pois. Ennen flotaatiota jäteveteen lisätään flokkulaatiota tehostavaa kemikaalia, kuten polyalumiinikloridia. Kalvobioreaktori koostuu uppokalvojärjestelmästä ja ultrasuodatuksesta. Suodatuksessa vesi ohjataan kalvojen läpi alipaineessa ja se kerätään erilliseen säiliöön. MBR on kalvosuodatuksen ja biologisen reaktorin yhdistelmä, joka käsittelee suspensiossa olevaa kiintoainetta, liuennutta orgaanista ainetta ja ravinteita. Kaikki näistä neljästä prosessista saavuttivat 95%:n puhdistustehokkuuteen kooltaan yli 20  $\mu\text{m}$  oleville mikromuoveille. (Talvitie, Mikola, Koistinen et al. 2017) Menetelmien tehokkuutta nanomuoveihin ei kuitenkaan osata vielä sanoa.

Uusien menetelmien kehittämisen sijaan voitaisiin säätää jo olemassa olevia prosesseja poistamaan nano- ja mikromuoveja paremmin. Flotaatio ja laskeutus ovat osoittaneet tehokkuutensa, joten pitäisi tutkia, voiko niiden tehokkuutta parantaa entisestään. Huokoskoon, materiaalien ja virtauksen määrän tutkiminen membraanien ja suodattimien kanssa kannattaa. Rasvanpoiston tehokkuutta nanomuoveihin voitaisiin tehostaa, jotta muovipartikkelit eivät päädy lietteeseen ja sitä kautta lietteen hyötykäytön myötä luontoon. (J. Sun et al. 2019)

Jotta jätevedenpuhdistuksen prosesseja voitaisiin suojata nanomuoveilta, tulisi nanomuovien päätymistä näihin prosesseihin ehkäistä (Enfrin et al. 2019). Koska nano- ja mikromuovit ovat pääasiallisesti lähtöisin kotitalouksista, voisi niiden syntymistä jo siellä vähentää (J. Sun et al. 2019).

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Muovin valmistuksen ja kulutuksen määrän kasvaessa vuosi vuodelta myös jätevesiin päätyvien muovipartikkeleiden määrä kasvaa. Muovi säilyy ympäristössä pitkään ja on haitaksi eliöille kulkeutuessaan niiden elimistöihin. Jätevesien mukana kulkeutuva mikromuovi (kooltaan  $1 \mu\text{m} - 5 \text{mm}$ ) hajoaa nanomuoveiksi ( $<1 \mu\text{m}$ ) UV-säteilyn, hydrolyysin, mekaanisen murtumisen tai mikro-organismien yhteyttämisen seurauksena.

Koska nanomuovit syntyvät mikromuovien hajotessa, ovat nanomuovien lähteet samat kuin mikromuovien lähteet. Jäteveteen mikromuoveja päätyy pääasiassa kotitalouksista, teollisuudesta ja sekaviemärointiin päätyvien hulevesien mukana. Jäteveden mikromuovit voidaan jakaa kuituihin ja partikkeleihin niiden muodon perusteella. Muovityyppejä mikromuoveista löytyy monia. Näistä yleisimmät ovat polyesteri, polyeteeni, polyeteenitereftalaatti ja polyamidi. Muovien ominaispainosta riippuu se, että kelluvatko ne vai eivät, mikä vaikuttaa niiden kulkeutumiseen jätevedenpuhdistamolla ja sen prosesseissa. Kelluvia muoveja ovat muun muassa polyeteeni ja polypropeeni.

Nanomuovien pieni koko aiheuttaa sen, ettei niiden määrästä tai ominaisuuksista jätevedessä vielä osata sanoa juuri mitään, sillä ei ole vielä olemassa tarpeeksi hyvää menetelmää, jolla nanomuoveja voitaisiin havaita ja tutkia. Tärkein asia nanomuovien tutkimuksen kannalta onkin siis tällaisen menetelmän kehittäminen. Nanomuovien käyttäytymistä voidaan ennustaa mikromuovien käyttäytymisen pohjalta. Jätevedenpuhdistamoiden on tutkittu poistavan mikromuoveista jopa 99,9%, mutta pienikokoisemmat nanomuovit eivät välttämättä poistu yhtä tehokkaasti.

Jätevedenpuhdistamon vaiheista tärkeimmät mikromuovien poiston kannalta ovat esikäsitteily ja esiselkeytys, joissa pystytään poistamaan yli puolet kaikista jäteveden mikromuoveista. Erityisesti isommat kuitumaiset mikromuovit jäävät näihin käsittelyvaiheisiin. Biologinen käsittely poistaa mikromuoveja entisestään, mutta jälkikäsitteilykin jälkeen vedessä on vielä mikromuoveja jäljellä. Käsitellyn veden määrä on niin suuri, että vaikka puhdistustehokkuus onkin hyvä, päätyy mikromuoveja silti paljon purkuvesistöön. Poistetut nano- ja mikromuovit jäävät prosesseissa syntyvään lietteeseen. Lietteessä olevien mikromuovien on myös todettu olevan kooltaan suurempia ( $>100 \mu\text{m}$ ), kuin veteen jäävät mikromuovit ( $<100 \mu\text{m}$ ), joten voidaan sanoa, että jätevedenpuhdistusprosessi poistaa paremmin suurempia kuin pienempiä mikromuoveja. Tällöin nanomuovit saattavat välttyä vieläkin paremmin poistolta.

Nanomuovit voivat olla haitaksi jätevedenpuhdistusprosessille pienen kokonsa ja pintake-

miansa takia. Ne voivat muun muassa häiritä mikrobien toimintaa aktiivilieteprosessissa ja anaerobisessa mädätyksessä, sitoutua saostuskemikaaleihin lisäten näin niiden kulu- tusta, rikkoa kalvosuodattimia terävien reunojensa avulla tai tukkia suodattimia. Tämän takia nanomuovien poistaminen jätevedestä on tärkeää, jotta puhdistusprosessi pysyy mahdollisimman tehokkaana.

Jotta nanomuovien määrää ja vaikutusta voidaan vähentää tulevaisuudessa, tulee mei- dän ensin oppia niistä enemmän. Tällöin käsitämme paremmin, mitä ne aiheuttavat ja kuinka se voidaan ehkäistä. Tämänhetkisiä jätevedenpuhdistamoilla käytettyjä prosesse- ja ei ole suunniteltu poistamaan nano- tai mikromuoveja, joten tarvitaan juuri niitä ajatel- len valmistettuja menetelmiä. Muutamia menetelmiä, kuten kiekkosuodattimia, paineflo- taatiota ja kalvobioreaktoria, ja niiden tehokkuutta mikromuoveihin on jo tutkittu. Muita vaihtoehtoja ovat esimerkiksi tiheyteen perustuva erottelu, koagulaatio ja UV-säteilytys. Jotta nano- ja mikromuoveja ei tarvitsisi ruveta erottamaan jätevedestä, olisi järkevää vähentää niiden päätymistä jäteveeteen, esimerkiksi pienentämällä kotitalouksien aiheut- tamaa mikromuovikuormitusta.

## LÄHTEET

- Adhikari, A., Bourgade, T. & Asundi, A. (2016). Residual stress measurement for injection molded components. *Theoretical and Applied Mechanics Letters* 6.4, 152–156.
- Ahmed, T., Shahid, M., Azeem, F., Rasul, I., Shah, A. A., Noman, M., Hameed, A., Manzoor, N., Manzoor, I. & Muhammad, S. (2018). Biodegradation of plastics: current scenario and future prospects for environmental safety. *Environmental Science and Pollution Research* 25.8, 7287–7298.
- Andrady, A. L. (2017). The plastic in microplastics: A review. *Marine Pollution Bulletin* 119.1, 12–22.
- Auta, H. S., Emenike, C. U., Jayanthi, B. & Fauziah, S. H. (2018). Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by *Bacillus* sp. and *Rhodococcus* sp. isolated from mangrove sediment. *Marine Pollution Bulletin* 127, 15–21.
- Besseling, E., Wang, B., Lüring, M. & Koelmans, A. A. (2014). Nanoplastic Affects Growth of *S. obliquus* and Reproduction of *D. magna*. *Environmental science & technology* 48.20, 12336–12343.
- Brandt, M. J., Johnson, K. M., Elphinston, A. J. & Ratnayaka, D. D. (2017). *Twort's Water Supply (Seventh Edition)*, 475–511. ISBN: 9780-081000250.
- Browne, M. A., Crump, P., Niven, S. J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T. & Thompson, R. (2011). Accumulation of Microplastic on Shorelines Woldwide: Sources and Sinks. *Environmental science & technology* 45.21, 9175–9179.
- Cai, L., Wang, J., Peng, J., Wu, Z. & Tan, X. (2018). Observation of the degradation of three types of plastic pellets exposed to UV irradiation in three different environments. *Science of The Total Environment* 628-629, 740–747.
- Carr, S. A., Liu, J. & Tesoro, A. G. (2016). Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants. *Water Research* 91, 174–182.
- Carré, E., Pérot, J., Jauzein, V. & Lopez-Ferber, M. (2018). Impact of suspended particles on UV disinfection of activated-sludge effluent with the aim of reclamation. *Journal of Water Process Engineering* 22, 87–93.
- Caruso, G. (2015). Plastic degrading microorganisms as a tool for bioremediation of plastic contamination in aquatic environments. *Journal of Pollution Effects & Control* 3.3, 1–2.
- Cooper, D. A. & Corcoran, P. L. (2010). Effects of mechanical and chemical processes on the degradation of plastic beach debris on the island of Kauai, Hawaii. *Marine Pollution Bulletin* 60.5, 650–654.

- Costa, J. P. da, Santos, P. S. M., Duarte, A. C. & Rocha-Santos, T. (2016). (Nano)plastics in the environment – Sources, fates and effects. *Science of the Total Environment* 566-567, 15–26.
- Data and knowledge on Nanomaterials (2019). *Nanomaterials in the wastewater treatment plant*. (viitattu: 13.11.2019). URL: <https://www.nanoobjects.info/en/nanoinfo/cross-cutting/2764-nanomaterials-in-the-wastewater-treatment-plant#literature>.
- Enfrin, M., Dumée, L. F. & Lee, J. (2019). Nano/microplastics in water and wastewater treatment processes – Origin, impact and potential solutions. *Water Research* 161, 621–638.
- Filipe, V., Hawe, A. & Jiskoot, W. (2010). Critical evaluation of Nanoparticle Tracking Analysis (NTA) by NanoSight for the measurement of nanoparticles and protein aggregates. *Pharmaceutical research* 27.5, 796–810.
- Fries, E., Dekiff, J. H., Willmeyer, J., Nuelle, M.-T., Ebert, M. & Remy, D. (2013). Identification of polymer types and additives in marine microplastic particles using pyrolysis-GC/MS and scanning electron microscopy. *Environmental Science: Processes & Impacts* 15.10, 1949–1956.
- Fu, S.-F., Ding, J.-N., Zhang, Y., Li, Y.-F., Zhu, R., Yuan, X.-Z. & Zou, H. (2018). Exposure to polystyrene nanoplastic leads to inhibition of anaerobic digestion system. *Science of The Total Environment* 625, 64–70.
- Gewert, B., Plassmann, M. M. & MacLeod, M. (2015). Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. *Environmental science. Processes & impacts* 17.9, 1513–1521.
- Geyer, R., Jambeck, J. R. & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances* 3.7, e1700782.
- Gigault, J., Halle, A. ter, Baudrimont, M., Pascal, P.-Y., Gauffre, F., Phi, T.-L., Hadri, H. E., Grassl, B. & Reynaud, S. (2018). Current opinion: What is a nanoplastic? *Environmental Pollution* 235, 1030–1034.
- Greene, J. P. (2014). *Sustainable Plastics : Environmental Assessments of Biobased, Biodegradable, and Recycled Plastics*. Somerset: John Wiley & Sons, Incorporated, 71. ISBN: 9781118899496.
- Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E. & Purnell, P. (2018). An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of Hazardous Materials* 344, 179–199.
- Hartmann, N. B., Skjolding, L. M., Nolte, T. & Baun, A. (2016). Aquatic ecotoxicity testing of nanoplastics-lessons learned from nanoecotoxicology. *SETAC Europe 26th Annual Meeting*. SETAC Europe, 43–44.

- Horton, A. A., Walton, A., Spurgeon, D. J., Lahive, E. & Svendsen, C. (2017). Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Science of the Total Environment* 586, 127–141.
- Karttunen, E. (2004). *Vesihuolto II*. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry., 521. ISBN: 9789517584388.
- Kholodovych, V. & Welsh, W. (2007). Densities of Amorphous and Crystalline Polymers. *Physical Properties of Polymers Handbook*. New York, NY: Springer New York, 611–617. ISBN: 9780387312354.
- Klein, S., Dimzon, I. K., Eubeler, J. & Knepper, T. P. (2018). Analysis, Occurrence, and Degradation of Microplastics in the Aqueous Environment. Toim. S. Lambert & M. Wagner. *Freshwater Microplastics. The Handbook of Environmental Chemistry*, vol 58. Springer, Cham, 51–67.
- Laitinen, J., Nieminen, J., Saarinen, R. & Toivikko, S. (2014). *Paras käyttökelpoinen tekniikka (BAT) - Yhdyskuntien jätevedenpuhdistamot*.
- Lambert, S. & Wagner, M. (2016). Characterisation of nanoplastics during the degradation of polystyrene. *Chemosphere* 145, 265–268.
- Löder, M. G. J., Kuczera, M., Mintenig, S., Lorenz, C. & Gerdt, G. (2015). Focal plane array detector-based micro-Fourier-transform infrared imaging for the analysis of microplastics in environmental samples. *Environmental Chemistry* 12.5, 563–581.
- Ma, B., Xue, W., Hu, C., Liu, H., Qu, J. & Li, L. (2019). Characteristics of microplastic removal via coagulation and ultrafiltration during drinking water treatment. *Chemical Engineering Journal* 359, 159–167.
- Machado, A. A. S., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S. & Rillig, M. C. (2018). Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biology* 24.4, 1405–1416.
- Macías, C., Meza, O. & Pérez, E. (2015). Relaxation of residual stresses in plastic cover lenses with applications in the injection molding process. *Engineering Failure Analysis* 57, 490–498.
- Mattsson, K., Hansson, L. -.-A. & Cedervall, T. (2015). Nano-plastics in the aquatic environment. *Environmental Science: Processes & Impacts* 17.10, 1712–1721.
- Mitrano, D. M., Beltzung, A., Frehland, S., Schmiedgruber, M., Cingolani, A. & Schmidt, F. (2019). Synthesis of metal-doped nanoplastics and their utility to investigate fate and behaviour in complex environmental systems. *Nature Nanotechnology* 14.4, 362–368.
- Moreno, J. & Peinado, R. (2012). Chapter 18 - The Colloidal State. *Ecological Chemistry*, 303–321.
- Muller, P. (tammikuu 1994). Glossary of terms used in physical organic chemistry (IUPAC Recommendations 1994). *Pure and Applied Chemistry* 66.5, 1077–1184.

- 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* 50.11, 5800–5808.
- Narkis, N., Armon, R., Offer, R., Orshansky, F. & Friedland, E. (1995). Effect of suspended solids on wastewater disinfection efficiency by chlorine dioxide. *Water Research* 29.1, 227–236.
- Pecora, R. (2000). Dynamic light scattering measurement of nanometer particles in liquids. *Journal of nanoparticle research* 2.2, 123–131.
- Plastics insight (2016). *Polyamide production 2016*. (viitattu: 6.12.2019). URL: <https://www.plasticsinsight.com/resin-intelligence/resin-prices/polyamide/>.
- PlasticsEurope (2018). *Plastics - the Facts 2018*. (viitattu: 10.11.2019). URL: [https://www.plasticseurope.org/application/files/6315/4510/9658/Plastics\\_the\\_facts\\_2018\\_AF\\_web.pdf](https://www.plasticseurope.org/application/files/6315/4510/9658/Plastics_the_facts_2018_AF_web.pdf).
- Prata, J. C. (2018). Microplastics in wastewater: State of the knowledge on sources, fate and solutions. *Marine Pollution Bulletin* 129.1, 262–265.
- Ritchie, H. & Roser, M. (2020). Plastic Pollution. *Our World in Data*. (viitattu 12.12.2019). URL: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>.
- Scholz, M. (2016). Chapter 11 - Rapid Filtration. *Wetlands for Water Pollution Control (Second Edition)*, 69–75.
- Silva, A. B., Bastos, A. S., Justino, C. I. L., Costa, J. P. da, Duarte, A. C. & Rocha-Santos, T. A. P. (2018). Microplastics in the environment: Challenges in analytical chemistry - A review. *Analytica Chimica Acta* 1017, 1–19.
- Sun, J., Dai, X., Wang, Q., Loosdrecht, M. C. M. van & Ni, B.-J. (2019). Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal. *Water Research* 152, 21–37.
- Sun, X., Chen, B., Li, Q., Liu, N., Xia, B., Zhu, L. & Qu, K. (2018). Toxicities of polystyrene nano- and microplastics toward marine bacterium *Halomonas alkaliphila*. *Science of The Total Environment* 642, 1378–1385.
- Sundt, P., Schulze, P.-E. & Syversen, F. (2014). *Sources of microplastic pollution to the marine environment*. (viitattu: 3.12.2019). URL: <http://www.miljodirektoratet.no/Documents/publikasjoner/M321/M321.pdf>.
- Sussarellu, R., Suquet, M., Thomas, Y., Lambert, C., Fabioux, C., Pernet, M. E. J., Goïc, N. L., Quillien, V., Mingant, C., Epelboin, Y., Corporeau, C., Guyomarch, J., Robbens, J., Paul-Pont, I., Soudant, P. & Huvet, A. (2016). Oyster reproduction is affected by exposure to polystyrene microplastics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 113.9, 2430.
- Sutherland, K. (2008). Section 5 - Oils and Hydraulic Systems. *Filters and Filtration Handbook (Fifth Edition)*, 295–367.

- Talvitie, J., Heinonen, M., Pääkkönen, J.-P., Vahtera, E., Mikola, A., Setälä, O. & Vahala, R. (2015). Do wastewater treatment plants act as a potential point source of microplastics? Preliminary study in the coastal Gulf of Finland, Baltic Sea. *Water Science and Technology* 72.9, 1495–1504.
- 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.
- Talvitie, J., Mikola, A., Setälä, O., Heinonen, M. & Koistinen, A. (2017). How well is micro-litter purified from wastewater? – A detailed study on the stepwise removal of microlitter in a tertiary level wastewater treatment plant. *Water Research* 109, 164–172.
- Triebkorn, R., Braunbeck, T., Grummt, T., Hanslik, L., Huppertsberg, S., Jekel, M., Knepfer, T. P., Kraus, S., Müller, Y. K., Pittroff, M., Ruhl, A. S., Schmieg, H., Schür, C., Strobel, C., Wagner, M., Zumbülte, N. & Köhler, H.-R. (2019). Relevance of nano- and microplastics for freshwater ecosystems: A critical review. *Trends in Analytical Chemistry* 110, 375–392.
- Wagner, S. & Reemtsma, T. (2019). Things we know and don't know about nanoplastic in the environment. *Nature Nanotechnology* 14.4, 300–301.
- Ward, I. M. & Sweeney, J. (2012). *Mechanical properties of solid polymers*. John Wiley & Sons.
- Water Environment Federation (2018). *Design of Water Resource Recovery Facilities, Sixth Edition*. 6th edition. New York: McGraw-Hill Education. ISBN: 9781260031188.
- Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., Toyohara, K., Miyamoto, K., Kimura, Y. & Oda, K. (2016). A bacterium that degrades and assimilates poly (ethylene terephthalate). *Science* 351.6278, 1196–1199.
- 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.