
Teknologiaratkaisujen kehittäminen mikromuovien hallintaan

TKMiHa-hankkeen raportti

Sonja Korhonen, Ollipekka Kivin & Jari Mustonen

Teknologiaratkaisujen kehittäminen mikromuovien hallintaan

TKMiHa-hankkeen raportti

Sonja Korhonen, Ollipekka Kivin & Jari Mustonen

Satakunnan ammattikorkeakoulu

Pori 2024

Satakunnan ammattikorkeakoulu

Sarja B, Raportit 1/2024

ISSN 2323-8356 | ISBN 978-951-633-406-9 (verkkojulkaisu)

Copyright Satakunnan ammattikorkeakoulu ja tekijät

Julkaisija:

Satakunnan ammattikorkeakoulu

PL 1001, 28101 Pori

www.samk.fi

Kannen graafinen suunnittelu: Eveliina Sillanpää, Kallo Works

Satakunnan ammattikorkeakoulun julkaisut ilmaiseksi ladattavissa: theseus.fi.

SISÄLLYS

KÄYTETYT LYHENTEET	7
1 JOHDANTO.....	8
2 YLEISTÄ MIKROMUOVEISTA.....	9
2.1 Mikromuovin määritelmä.....	10
2.2 Primääriset ja sekundääriset mikromuovit	10
3 MIKROMUOVIEN LÄHTEET JA KULKEUTUMISREITIT	11
3.1 Lähteet.....	11
3.2 Kulkeutuminen vesistöihin.....	13
3.2.1 Jätevesi.....	14
3.2.2 Hulevesi	14
3.3 Kulkeutuminen maaperään.....	14
3.4 Kulkeutuminen ilmakehään.....	15
3.5 Mikromuovien kulkeutumisen mallintaminen.....	15
4 MIKROMUOVIEN HAITALLISUUS	16
4.1 Ihmisen altistuminen mikromuoveille	16
4.2 Haitalliset aineet	17
4.3 Mikromuovit eliöissä.....	17
4.4 Eläin- ja solukokeet	18
5 SÄÄDÖKSET	19
5.1 Mikromuovien rajoitusehdotus.....	19
5.2 SUP-direktiivi.....	20
5.3 Mikromuovit juomavedessä	20
6 MIKROMUOVIEN TUTKIMINEN	20
6.1 Menetelmien standardisointi.....	21
6.2 Kontaminaation ehkäisy	21
6.3 Näytteenottomenetelmät	22
6.3.1 Näytetilavuus.....	22
6.3.2 Näytteenottovälineet.....	22
6.4 Esikäsittely- ja suodatusmenetelmät.....	23
6.4.1 Tiheyserottelu.....	23
6.4.2 Orgaanisen aineen hajotus	24
6.4.3 Seulonta.....	24
6.4.4 Suodatus	25
6.5 Analysointimenetelmät	25
6.5.1 Mikroskopointi.....	25

6.5.2 FTIR.....	26
6.5.3 Raman	26
6.5.4 GC-MS	27
7 OLEMASSA OLEVAT TEKNOLOGISET RATKAISUT	27
7.1 Mikromuovia keräävät laitteet.....	27
7.1.1 Clewat	27
7.1.2 Clearbot-roskankerääjä.....	28
7.1.3 Seabin.....	29
7.1.4 The Great Bubble Barrier.....	29
7.2 Mikromuovin reaaliaikainen analysointi	30
7.2.1 Draper-drone	30
7.2.2 REMMI-hanke	31
7.2.3 Impedanssispektroskopia.....	31
7.2.4 Prototyyppi mikromuovien tunnistukseen	32
7.3 Ratkaisut mikromuovien leviämisen ehkäisyyn	32
7.3.1 Pyykinpesun mikromuovikuidut	32
7.3.2 Tekonurmikenttien kumirouhe.....	34
7.3.3 Jäteveden mikromuovit	35
8 SUODATINLAITTEISTON KEHITTÄMINEN.....	37
8.1 Haavi-Heikki laitteisto.....	37
8.2 Laitteiston kehityskohteet.....	39
8.2.1 Aurinkopaneelien optimointi	39
8.3 Laitteiston sijoitus	39
9 TAIVALLAHDEN SUODATUSARKKU, HELSINGIN KAUPUNKI	40
9.1 Suodatusarkun tehokkuus hulevesien valumisen yhteydessä	41
10 EROTUSMENETELMIÄ MIKROMUOVIN POISTAMISEEN VEDESTÄ	42
10.1 Membranibioreaktori	42
10.2 Kiekkosuodatus	42
10.3 Hiekkasuodatus.....	42
10.4 Korkeapaine-flotaatio.....	42
10.5 Sähkökoagulaatio.....	43
11 KONSEPTI MIKROMUOVIN POISTAMISEEN VEDESTÄ.....	43
12 JOHTOPÄÄTÖKSET	45
LÄHTEET	

KÄYTETYT LYHENTEET

μ-FTIR - Micro Fourier Transform Infrared
 μm - Mikrometri
 ATR-FTIR - Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared
 DDT- Diklooridifenyylitrikloorietaani
 ECHA - Euroopan kemikaalivirasto
 EPM - Epifluorenssimikroskooppi
 FPA-FTIR - Focal Plane Array Detector Fourier Transform Infrared
 FTIR - Fourier Transformation Infrared - Fourier-muunnos infrapunaspektrometria
 GC-MS - Gas Chromatography–Mass Spectrometry - Kaasukromatografia-massaspektrometria
 H₂O₂ - Hydrogen peroxide - Vetyperoksidi
 HCl - Hydrochloric Acid - kloorivety
 HDPE - High-density polyethylene - Suuritiheyspolyeteeni
 ISO - International Standardization Organization
 L - Litra
 LDPE - Pientiheyspolyeteeni
 MBR - Membrane Bioreactor - Kalvobioreaktori
 mm - Millimetri
 MP - Mikromuovipartikkeli
 NaCl - Natriumklorodi
 NaI - Natriumjodidi
 NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration – Kansallinen valtameri- ja ilmakehävirasto
 PAH- Polyaromaattiset hiilivedyt
 PCB- yhdisteet - Polyklooratutbifenyylilyhdisteet
 PE - Polyeteeni
 PET - Polyteenitereftalaatti
 pH - Pondus Hydrogenii - vesiliuoksen tai muun nesteen happamuuden mittayksikkö
 PP - Polypropeeni
 PS - Polystyreeni
 PVC - Polyvinyylidikloridi
 Py-GC-MS - Pyrolysis Gas Chromatography-Mass Spectrometry - Pyrolyysi-kaasukromatografia-massaspektrometria
 SAMK - Satakunnan ammattikorkeakoulu
 SBR-rouhe - Styreeni-butadieeni-kumirouhe
 SEM-EDX - Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray spectroscopy -laboratorion menetelmä
 SUP - Single Use Plastics - Kertakäyttömuovit
 SYKE - Suomen ympäristökeskus
 TKMiHa - Teknologiaratkaisut mikromuovien hallintaan -hanke
 UNEP - United Nations Environment Programme - Yhdistyneiden kansakuntien ympäristöohjelma
 UV-säteily - Ultraviolettisäteily
 WWF – World Wildlife Fund
 ZnCl₂ - Zinc chloride – Sinkkikloridi








1 JOHDANTO

Vähennä ja vältä, kierrätä ja korvaa - muovitiekartta Suomelle on käynnistetty vauhdittamaan muovin kestävästä kiertotaloudesta. Muovitiekartan tavoitteiden toteutumiseksi on asetettu konkreettisia toimenpiteitä, joista yksi on tutkimustiedon lisääminen muovien haitallisista terveys- ja ympäristöhaitoista ja niiden ratkaisusta. (Ympäristöministeriö, 2022.) Teknologiaratkaisut mikromuovien hallintaan (TKMiHa) -hankkeen tavoitteena on osaltaan toteuttaa tätä toimenpidettä kehittämällä suodatuslaitteistoa mikromuovien tutkimuskäyttöön. Laitteiston avulla voidaan tuottaa jatkossa lisää tietoa mikromuoveista ja niiden esiintyvyydestä ympäristössä. Hanke mahdollistaa ympäristöön päätyvien mikromuovien hallintaan, tutkimukseen ja vähentämiseen liittyvien teknologisten ratkaisujen kehittämisen. Hankkeessa hyödynnetään aiempaa tietämystä mikromuovilähteistä ja herkistä kohteista, joihin mikromuovien ehkäisemistä koskevat toimet kannattaa ensisijaisesti kohdistaa. Tämän vuoksi hankkeessa tuotetaan, käytettävissä olevien resurssien puitteissa, kirjallisuuskatsaus mikromuovien lähteisiin, haittoihin, tutkimusmenetelmiin ja olemassa oleviin laitteistoihin liittyen.

Koulutuskeskus Salpaus on osana Lahti – Euroopan ympäristöpääkaupunki 2021-ohjelmaa kehittänyt prototyypin uusiutuvaa energiaa käyttävästä suodatinlaitteistosta mikromuovien suodattamiseksi vedestä. TKMiHa-hankkeessa on tarkoitus jatkokehittää mikromuovien tutkimiseen ja keräämiseen soveltuvaa laitteistoa, jota tultaisiin myöhemmin hyödyntämään osana laajempaa mikromuoveihin liittyvää tutkimuskokonaisuutta. Hankkeen mukainen suodatinlaitteiston kehitystyö toteutetaan SAMKissa ja kokoonpanossa tehdään yhteistyötä paikallisten toimijoiden kuten ammatillisen oppilaitoksen kanssa. Suodatinlaitteisto ja siihen kehitettävät uudet ratkaisut ovat avointa julkisesti saatavilla olevaa tietoa ja laitteisto tulee SAMKin opetus- ja tutkimuskäyttöön.

2 YLEISTÄ MIKROMUOVEISTA

Muovit koostuvat polymeereistä, joiden suuret molekyylit muodostuvat pienten monomeerien liittyessä toisiinsa kemiallisten reaktioiden kautta. Vaikka muovia voi valmistaa myös luonnonpolymeereistä, muovit ovat useimmiten synteettisiä petrokemian tuotteita. Niiden valmistuksessa käytetään pääsääntöisesti fossiilisia raaka-aineita kuten öljyä. Polymeerien lisäksi muovit sisältävät erilaisia täyte- ja lisäaineita, joiden avulla materiaalin ominaisuuksia voidaan muokata käyttösovelluksen mukaan (kuva 1). Muovien lisäaineita ovat esimerkiksi erilaiset väriaineet, palonestoaineet, lujitteet ja pehmitteet sekä stabilisaattorit. Suurin osa maailmassa tuotetuista muoveista ovat valtamuoveja, joihin sisältyvät polyeteeni (PE), polypropeeni (PP), polystyreeni (PS) ja polyvinyylidikloridi (PVC) ja polyeteenitereftalaatti (PET). Polyeteeni luokitellaan usein vielä tiheyden perusteella pientiheyspolyeteeniksi (LDPE) tai suuritiheyspolyeteeniksi (HDPE). (Muoviteollisuus ry, n.d.-a; Muoviteollisuus ry, n.d.-b.)

MATERIAALI-MERKINTÄ	NIMI	YLEISET OMINAISUUDET	ESIMERKKEJÄ KÄYTTÖKOHTEISTA JA LAJITTELUSTA
	Polyeteenitereftalaatti	Kirkas, kova, kemikaaleja kestävä	Virvoitusjuoma- ym. pullot. Pantilliset pullot kauppojen automaatteihin. Muut muovipakkaukeräykseen.
	Polyeteeni high-density	Samea tai värillinen, joustava, vahamainen pinta	Mehupullot, virvoitusjuomakorit. Muovipakkaukeräykseen.
	Polyvinyylidikloridi	Erittäin monimuotoinen ja -piirteinen	Harvoin pakkausmateriaalia. Ei muovipakkaukeräykseen
	Polyeteeni low-density	Pehmeä, joustava, vahamainen pinta	Muovikassit, pussit, kalvot. Muovipakkaukeräykseen
	Polypropeeni	Jäykkä, sitkeä, hyvin monikäyttöinen	Narut, rasiat, kalvot, pehmusteet. Muovipakkaukeräykseen
	Polystyreeni	Lasin kirkas tai värjätty, hauras, vaahdotettu (EPS)	Rasiat, purkit, pehmusteet. Muovipakkaukeräykseen
	Muut	Kaikkien ylläolevien yhdistelmät	Rasiat, kannet, pussit. Muovipakkaukeräykseen

Kuva 1. Yleisimmät muovilaadut ja niiden käyttökohteet. (Suomen Uusiomuovi Oy, n.d.)

2.1 Mikromuovin määritelmä

Muovit voidaan jakaa koon perusteella nano-, mikro-, meso- ja makromuoveihin (Hartmann, ym., 2019). Mikromuovit ovat pieniä kiinteitä veteen liukenemattomia synteettisiä partikkeleita. Ne koostuvat suurien muovituotteiden tavoin polymeereistä ja muovin lisäaineiden seoksista. NOAA:n (National Oceanic and Atmospheric Administration) järjestämässä mikromuoveja käsittelevässä kansainvälisessä tutkimustyöpajassa määritettiin mikromuovien kokoluokan ylärajaksi 5 mm, joka on myöhemmin vakiintunut tieteellisissä yhteisöissä (Arthur, ym., 2009). Määritelmä mikromuovien kokoluokan alarajasta ei ole vielä täysin vakiintunut (Hartmann, ym., 2019). Useimmiten mikromuoveihin viitataan tutkimuksissa kuitenkin 1 µm-5 mm kokoisina partikkeleina (Frias & Nash, 2019).

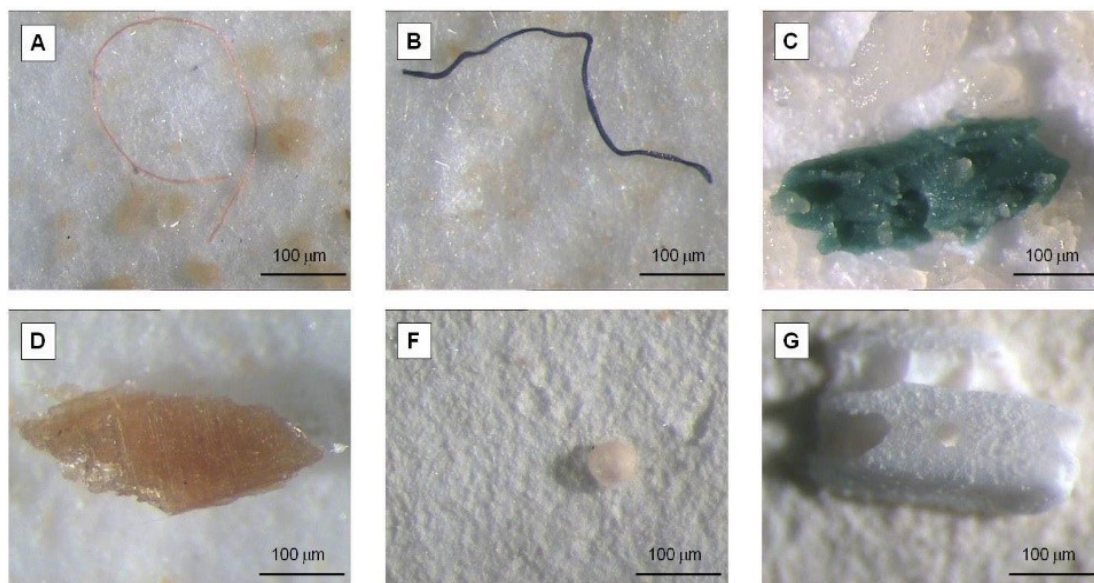
Ympäristöön päätyvät mikromuovit ovat pääsääntöisesti yleisimmin käytettyjä muovilaatuja kuten PE- ja PP-muoveja. Synteettiset kumipartikkelit lasketaan usein myös mikromuoveiksi. Esimerkiksi tekonurmikenttien täyteaineena käytetty styreeni-butadieeni-kumirouhe (SBR-rouhe) on tunnistettu yhdeksi suurimmista mikromuovien päästölähteistä ympäristöön. Styreeni-butadieeni-kumi (SBR) on synteettinen kumi, joka valmistetaan kopolyroimalla butadieenia ja styreeniä. SBR materiaalista valmistetaan pääosin autonrenkaita. Kierrätetyistä autonrenkaista valmistetaan taas tekonurmikenttien täyteaineena hyödynnettyä SBR-rouhetta. SBR-rouhetta kutsutaan mikromuovien ohella välillä myös mikrokumiksi. (Setälä, ym., 2022; Speight, 2020.)

2.2 Primääriset ja sekundääriset mikromuovit

Mikromuovit voidaan jakaa kahteen ryhmään sen perusteella, mistä ne ovat lähtöisin. Primääriset mikromuovit ovat tarkoituksella valmistettuja pieniä mikromuovipartikkeleita. Niitä käytetään usein kuorinta- ja hankausaineina esim. kosmetiikkatuotteissa ja maaleissa. Primäärisiä mikromuoveja ovat myös muovituotteiden valmistuksessa käytetyt pelletit, jotka voivat päätyä ympäristöön esim. lastauksen tai kuljetuksen aikana. Myös tekonurmikenttien täyteaineena käytetty SBR-rouhe luokitellaan tarkoituksella valmistetuksi eli primääriseksi mikromuoviksi. Sekundääriset mikromuovit syntyvät taas suurempien muovikappaleiden hajotessa. Esimerkiksi ajan kuluessa pieniksi muovipartikkeleiksi pilkkoutuneet muoviroskat ovat sekundäärisiä mikromuoveja. Sekundäärisiä mikromuoveja syntyy myös esim. keinokuituvaatteiden pesun sekä autonrenkaiden (SBR) kulumisen seurauksena. Suurin osa vesistöön päätyvistä mikromuoveista ovat sekundäärisiä mikromuoveja. (WWF, 2020, s. 7–8; GESAMP, 2019, s. 9.)

Syntylähteen lisäksi mikromuovit voidaan jakaa eri ryhmiin myös muodon perusteella (kuvio 1). Mikromuovipartikkelit luokitellaan muodoltaan pääsääntöisesti pelleteiksi (pellets), kuiduiksi (fibers), kalvoiksi (films), fragmenteiksi (fragments) ja

vaahtomuoveiksi (foams). Esimerkiksi keinokuituvaatteiden pesusta syntyvät mikromuovit luokitellaan muodon perusteella kuiduiksi. (GESAMP, 2019, s. 11.)

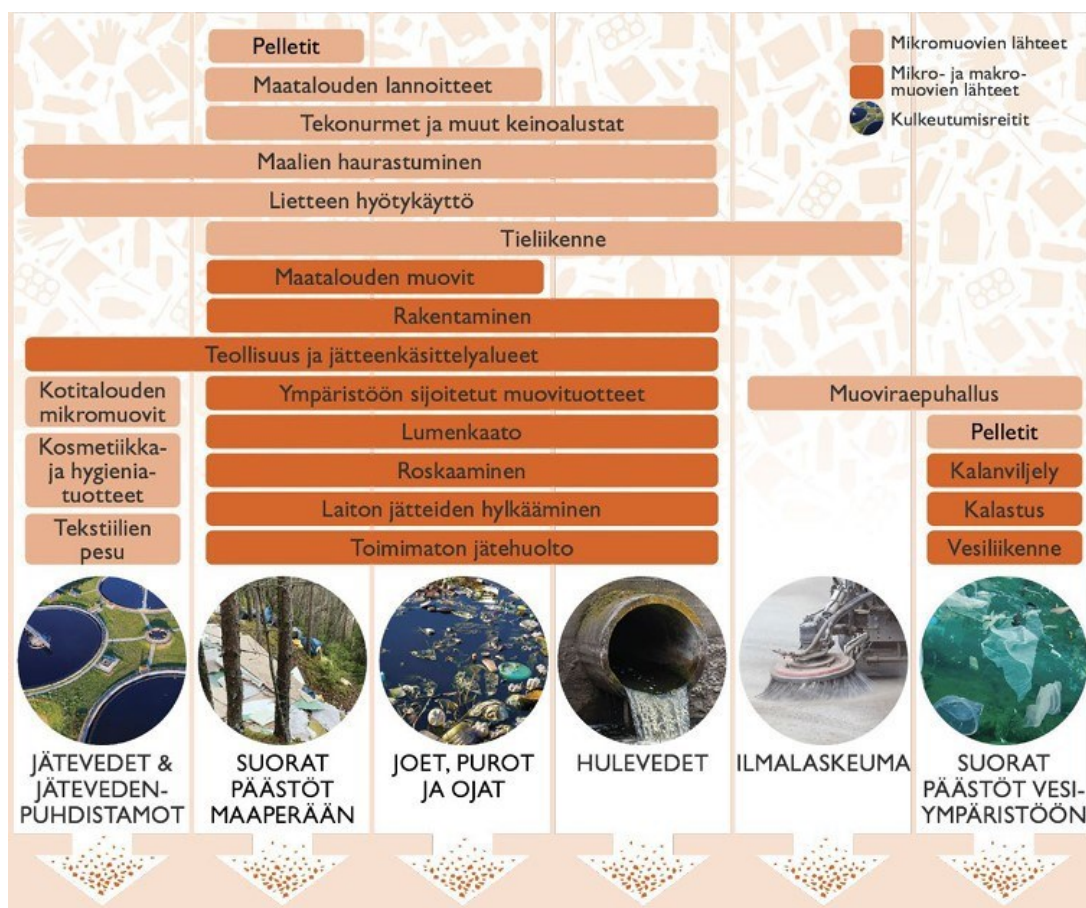


Kuvio 1. Mikromuovin eri muotoja: kuidut (A ja B), fragmentit (C ja D), pelletti (F) ja vaahto (G). (Pizzurro ym., 2022.)

3 MIKROMUOVIEIN LÄHTEET JA KULKEUTUMISREITIT

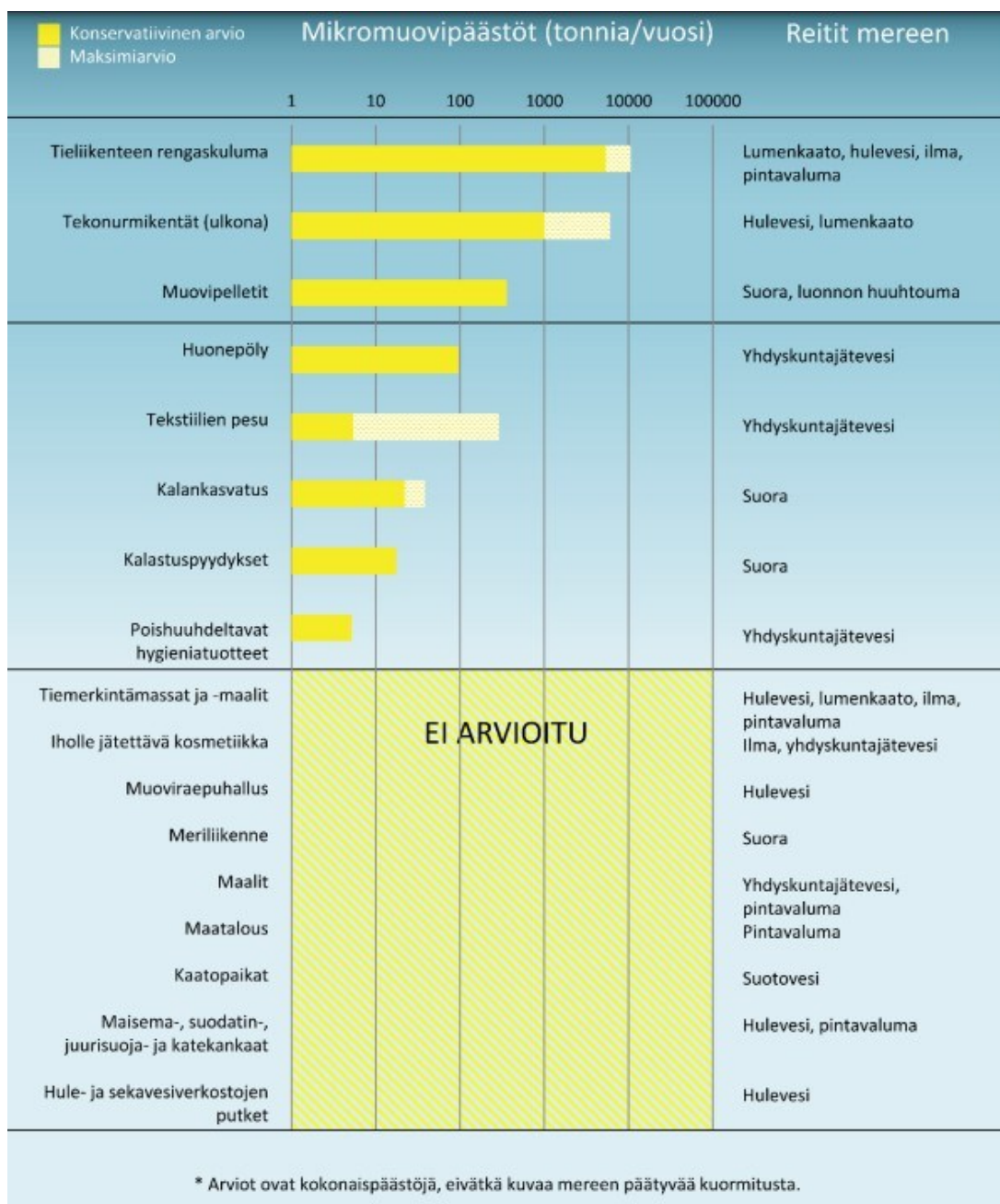
3.1 Lähteet

Mikromuovien tiedetään kulkeutuvan ympäristössä ilmakehään, maaperään ja vesistöön. Mikromuoveja voi päätyä ympäristöön 1) tuotteisiin tarkoituksellisesti lisättyjen mikromuovipartikkelien päästöistä, 2) tuotteiden käytön aikana tapahtuvan kulumisen seurauksena, 3) ympäristöön päätyneen isomman muoviroskan hajoamisen vuoksi tai 4) vahingossa syntyneiden päästöjen takia (kuva 2). (Fjäder, ym., 2022.) Monet ympäristötekijät vaikuttavat ympäristöön päätyneiden isompien muoviroskien hajoamiseen (sekundäärisiksi) mikromuoveiksi. Esimerkiksi UV-säteily, lämpötila, pH ja hapen määrä vaikuttavat hajoamisprosessiin, jonka vuoksi prosessi vaihtelee paikasta toiseen ympäristötekijöjen mukaan. (Singh, ym., 2022.)



Kuva 2. Muovien lähteet ja kulkeutumisreitit ympäristöön. (Fjäder ym., 2022, s. 63.)

Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) RoskatPois! -hankkeessa tehdyn arvion mukaan tärkeimpiä yksittäisiä mikromuovipäästölähteitä Suomessa olivat tieliikenteen rengaskuluma, tekonurmikenttien täyteaineena käytetty mikrokumi, muovituotannossa käytetyt muovipelletit sekä keinokuitutekstiilien pesusta syntyvät mikromuovikuidut (kuva 3). Hankkeessa ei ole arvioitu kaikkia sekundääristen mikromuovien päästömääriä. Esimerkiksi isompien muoviroskien hajoamisen seurauksena syntyvien mikromuovipartikkelien määrää on hyvin vaikea selvittää, jonka vuoksi sitä ei ole huomioitu tutkimuksessa. (Setälä & Suikkanen, 2020, s. 6.)



Kuva 3. Mikromuovien lähteet, vuosittaiset päästöt ja kulkeutumisreitit Suomessa. (Setälä & Suikkanen, 2020, s. 6.)

3.2 Kulkeutuminen vesistöihin

Mikromuoveja löytyy kaikkialta vesistöistä: pintakerroksista, syvemmltä vesipatsaasta sekä meren ja järvien pohjalta (SYKE, 2020a). Mikromuovien kulkeutumiseen vesiympäristössä vaikuttavat partikkelien fysikaaliset ominaisuudet kuten koko, muoto ja muovilaadun tiheys. Osa muovilaaduista kelluvat vedessä, kun taas osa muoveista ovat vettä tiheimpiä ja vajoavat sen vuoksi syvemmlle. Vesiympäristössä mikromuovipartikkelien pinnalle kertyy vähitellen bakteereista ja muista veden mikrobeista koostuva kerros eli biofilmi, jonka vuoksi myös vettä kevyemmät mikromuovipartikkelit voivat vajota ajan kuluessa (Sillanpää, ym., 2018). Jäte- ja hulevesiä pidetään merkittävänä mikromuovien reitteinä vesiympäristöön.

Suuria määriä (käsiteltyjä) jätevesiä ja (käsittelemättömiä) hulevesiä lasketaan luontoon jatkuvasti (Talvitie, 2019). Mikromuoveja kulkeutuu myös suoraan vesistöön esimerkiksi meriliikenteen, kalastuksen ja muovipellettien kuljetuksesta (Fjäder, ym., 2022).

3.2.1 Jätevesi

Kotitalouksien jätevesiin päätyy mikromuoveja muovipartikkeleja sisältävistä kosmetiikka- ja hygienia tuotteista. Lisäksi jätevesiin päätyy runsaasti mikromuovikuituja keinokuitutekstiilien pesusta. Kotitalouksien jätevesien lisäksi myös teollisuuden jätevesiin voi päätyä mikromuovia. (Fjäder, ym., 2022.) Mikromuovit kulkeutuvat jätevesiviemäriä pitkin jätevedenpuhdistamolle. Arvion mukaan jopa 99 % mikromuoveista poistuu jätevedestä jätevedenpuhdistusprosessin aikana. Partikkelien poistotehokkuus riippuu kuitenkin puhdistamolla käytetyistä käsittelymenetelmistä. (Sun, ym., 2019.) Tehokkaasta mikromuovien poistamisesta huolimatta jätevedenpuhdistamoilta päätyy paljon mikromuovia vesiympäristöön, koska käsiteltyä jätevettä lasketaan vesistöön jatkuvasti suuria määriä. (Talvitie, ym., 2017.)

3.2.2 Hulevesi

Jätevesien lisäksi hulevedet ovat yksi suurimmista mikromuovien kulkeutumisreiteistä vesistöihin. Hulevesi on maalta virtaavaa sade- ja lumensulamisvettä, joka valuu suoraan hulevesiviemäristä suodattamattomana vesistöön. (Fjäder, ym., 2022; SYKE, 2020a.) Hulevedet kuljettavat mukanaan isompia muoviroksia, jotka muuttuvat pienemmiksi mikromuovipartikkeleiksi hajoamisen ja haurastumisen seurauksena. Lisäksi hulevesiin voi päätyä mikromuoveja tieliikenteestä esim. ajoneuvojen kuluneista renkaista ja polymeerimateriaalia sisältävistä maalimerkinnoista. (SYKE, 2020b.) Hiukkasia irtoaa renkaista etenkin paikoissa, joissa kiihdytetään ja jarrutetaan, kuten liikennevaloissa ja liikenneympyröissä (Ziemann, 2018). Ajoneuvojen renkaista irronneet hiukkaset jäävät tien pintaan, josta ne huuhtoutuvat sateen mukana hulevesiviemäriin ja päätyvät lopulta vesistöihin. Lisäksi tekonurmikenttien täyteaineena käytetty styreeni-butadieeni-kumirouhe (SBR-rouhe) on tunnistettu yhdeksi suurimmista mikromuovien päästölähteistä ympäristöön. Tekonurmikenttien kumirouhetta valuu vesistöihin etenkin hulevesien mukana. (Setälä, ym., 2022.)

3.3 Kulkeutuminen maaperään

Vaikka suurin osa jätevedenpuhdistamolle kulkeutuvista mikromuoveista poistuu puhdistusprosessin aikana, jopa 80 % jätevedestä poistetusta mikromuovista päätyy prosessin jätevesilietteeseen. Jätevesiliete on ravinnerikasta, jonka vuoksi sitä käytetään usein maanparannusaineena. Lietteen kautta jätevesien mikromuovit

päätyvät maaperään ja leviävät ympäristöön. (Sun, ym., 2019.) Lisäksi maataloudessa mikromuovia voi päätyä maaperään muoviin kapseloitujen hidasliukoisten lannoitteiden myötä sekä maatalouksessa käytetyistä katekalvoista. Mikromuoveja voi irrota maaperään myös isommista ympäristöön päätyneistä muoviroskista sekä ajoneuvojen rengaskulumasta. (Fjäder, ym., 2022).

3.4 Kulkeutuminen ilmakehään

Ilmassa olevia mikromuoveja on tutkittu vesistön ja maaperän mikromuoveja vähemmän. Mikromuoveja kulkeutuu ilmakehään erilaisista keinokuitutekstiileistä kuten vaatteista, isompien muoviroskien kulumisesta, kaatopaikoilta ja jätteenpoltosta. Lisäksi tieliikenteestä syntyvä rengaspöly on yksi mikromuovin lähteistä ilmaan. (Fjäder, ym., 2022.)

3.5 Mikromuovien kulkeutumisen mallintaminen

Alankomaalaisen Wageningen yliopiston tutkimuksen tuloksena on kehitetty laskentamalli, jonka avulla pystyy mallintamaan mikromuovien kulkeutumista maalta mereen. Tutkimusryhmän kehittämä laskentamalli perustuu Global NEWS (Nutrient Export from WaterSheds) malliin. Tutkimuksessa arvioitiin määrällisesti kuinka paljon mikromuovia päätyy meriin Euroopan jokien kautta. Mallissa käytettiin eri mikromuoveille tyypillisiä lähteitä kuten pyykinpesusta, autonrenkaista ja teiden kulumisesta syntyviä mikromuoveja. Lähteinä tutkimuksessa käytettiin pistelähteitä kuten jätevedenpuhdistamoita. Tutkimuksen mukaan mikromuoveja kulkeutuu jokien kautta eniten Välimereen ja Mustaan mereen. Lisäksi jätevedenpuhdistamoiden paremman tehokkuuden takia Itämereen, Pohjanmereen ja Atlantin valtameren kulkeutuu vähemmän mikromuoveja kahteen aikaisempaan mainittuun mereen verrattuna. (Siegfried, ym., 2017.)

Laskentamallissa käytetyt kaavat ja niiden selitykset (Siegfried, ym., 2017.):

$$\text{Yield}_{\text{MP}} = n \sum_i (\text{FE}_{\text{riv},i} \times \text{RS}_{\text{pnt},i})$$

MP = mikromuovityyppi n. Neljä (n=4) huomioonotettua lähdettä, PCP henkilökohtaiset hygienia tuotteet, kotitalouspöly HD, pyykinpesu tekstiilit LD ja kulumahiukkaset renkaista ja teistä TRWP.

$\text{FE}_{\text{riv},i}$ = Virtauksiin syötettyjen mikromuovien osuus

$\text{RS}_{\text{pnt},i}$ = Mikromuovin syöttö jokiin pistelähteestä $\text{kg km}^2/\text{a}$

$$L_{\text{MP}} = \text{Yield}_{\text{MP}} \times A$$

L_{MP} = Mikromuovikuormitus kg/a

Yield_{MP} = Yhtälön 1 tulos, mikromuovien tuotto

A = Valuma-alue (allas alue) km^2

$$RS_{pnt,i} = (1 - hw_{frem,i}) \times PConDen \times WShw_{cap,i}$$

$RS_{pnt,i}$ = Mikromuovien syöttö jokiin pistelähteestä kg km²/a

$hw_{frem,i}$ = Mikromuovien osuus, joka poistuu jätevedenpuhdistuksen aikana

$PConDen$ = Viemäriverkostoon liitetty väestötiheys asukas/km²

$WShw_{cap,i}$ = Mikromuovien pääsy vesistöalueelle yhtä henkilöä kohti kg/henkilö/a

$$FE_{riv,i} = (1 - Ret_{,i}) \times (1 - FQrem_{,i})$$

$FE_{riv,i}$ = Jokiin syötettävän mikromuovien osuus, joka kulkeutuu joen suuhun

$Ret_{,i}$ = Jokien oma mikromuovien säilytyksen osuus

$FQrem_{,i}$ = Mikromuovien poistuma joesta vedenkulutuksesta johtuen

4 MIKROMUOVIEIN HAITALLISUUS

Mikromuoveja on löydetty jo valtameristä, raakavedestä, sedimenteistä, jätevedestä, eliöistä, vesijohtovedestä, pullovedestä, ilmasta, elintarvikkeista ja ihmisistä. Vaikka mikromuoveja on kaikkialla, partikkelien aiheuttamista terveys- ja ympäristöhaitoista ei ole vielä paljon tietoa. (Fjäder, ym., 2022; WHO, 2019.)

4.1 Ihmisen altistuminen mikromuoveille

Mikromuovit voivat päätyä ihmiskehoon nieltynä ruoan tai juoman kautta, hengitettynä ilman kautta, tai ihokosketuksen kautta esim. kosmetiikkatuotteista (Prata, ym., 2020). WWF:n toimeksiannosta konsulttifirma Dalberg ja Newcastlen yliopisto toteuttivat yhteistyössä tutkimuksen, jonka tulosten mukaan ihmisen kehoon voi päätyä jopa pankkikortin verran (5 g) mikromuovia viikossa (WWF, 2019, s. 7). Uudempien tutkimusten mukaan ihmiskehoon päätyy kuitenkin paljon tätä vähemmän mikromuovia, noin 0,1–5 g viikossa. Vaihtelua kehoon kertyvän mikromuovien määrään aiheuttaa mm. henkilön maantieteellinen sijainti. (Senathirajah, ym., 2021.) Mikromuoveja on löytynyt ihmisen suolistosta, mutta arvion mukaan noin 90 % niellyistä mikromuoveista poistuu kehosta ulosteen mukana. Kehoon kertyvät mikromuovipartikkelit aiheuttavat kuitenkin huolta, sillä niiden pitkäaikaisista vaikutuksista ei ole vielä tarpeeksi tietoa. (Smith, ym., 2018). Mikromuoveja on löydetty ihmisen kehosta myös istukasta, keuhkokudoksesta ja jopa verestä (Amato-Lourenço, ym., 2021; Leslie ym., 2022; Ragusa, ym., 2021).

4.2 Haitalliset aineet

Tällä hetkellä ihmisiin kohdistuvista mikromuovien aiheuttamista terveyshaitoista ei ole vielä tarpeeksi tietoa saatavilla. Mahdolliset haitalliset terveysvaikutukset voivat kuitenkin johtua mikromuovipartikkelien fysikaalisten vaikutusten lisäksi myös niiden sisältämistä ja kantamista kemikaaleista sekä partikkelin mukana kulkevista mikrobeista. Fysikaaliset vaikutukset liittyvät muovipartikkelien kokoon, muotoon ja pitoisuuteen. Kemialliset vaikutukset liittyvät kemikaaleihin, jotka lisätään muoveihin tuotantovaiheessa (lisäaineet) sekä kemikaaleihin, jotka tarttuvat muovipartikkeleihin ympäristöstä ajan kuluessa. Lisäksi ympäristöstä voi kertyä muovipartikkelien pinnalle haitallisia mikrobeja. (Campanale, ym., 2020.)

Mikromuovien sisältämät kemikaalit ovat lisätty materiaaliin lisäaineina jo tuotantovaiheessa antamaan muoville erilaisia ominaisuuksia kuten väriä ja kestävyyttä. Mikromuovien sisältämällä lisäaineilla kuten palonestoaineilla, pehmitteenä käytetyillä ftalaateilla sekä väriaineina ja stabilisaattoreina käytetyillä metalleilla voi olla terveydelle haitallisia vaikutuksia (Campanale, ym., 2020; Fjäder, ym., 2022). Muovipartikkeleihin sisältämien kemikaalien lisäksi niihin voi kertyä ympäristöstä orgaanisia haitallisia ympäristömyrkyjä kuten PAH- (polyaromaattiset hiilivedyt), DDT- (diklooridifenyylitrikloorietaani) tai PCB- yhdisteitä (polyklooratutbifenyylit) (Fjäder, ym., 2022). Ympäristöstä mikromuovien pinnalle voi kertyä myös esim. raskasmetalleja, lääkkeitä ja terveydelle haitallisia mikrobeja (Singh, ym., 2022.) Mikromuovien sisältämät lisäaineet ja mukana kulkeutuvat haitalliset aineet voivat kulkeutua ulos muoveista ja vapautua ympäristöönsä, aiheuttaen mahdollisia terveys- ja ympäristöhaittoja (Fjäder, ym., 2022; Prata, ym., 2020).

4.3 Mikromuovit eliöissä

Mikromuovipartikkelien on osoitettu kulkeutuvan eliöstä toiseen ravintoverkon kautta (kuva 4). Esimerkiksi maaperäeliöt voivat toimia mikromuovien kulkeutumisreitteinä maanpäälliseen ravintoverkkoon, josta partikkelit kulkeutuvat eteenpäin. Maa- ja vesiympäristön eliöissä mikromuovipartikkelien on todettu aiheuttavan vaurioita ja tukoksia ruuansulatuskanavassa. Lisäksi mikromuovien on todettu voivan siirtyä eliöiden verenkiertoon ja kudoksiin sekä aiheuttavan tulehdusta ja oksidatiivista stressiä. Mikromuoveja nielleet eliöt ovat osoittaneet myös kasvun heikentymistä ja nälkiintymistä, koska niellyt mikromuovipartikkelit aiheuttavat valheellista täysinäisyyden tunnetta. Mikromuovit voivat aiheuttaa laajemmin ekosysteemissä lisääntymishäiriöitä sekä käyttäytymisen ja toiminnan muutoksia. (Fjäder, ym., 2022; Lusher ym., 2017.)



Kuva 4. Mikromuovien ekologiset vaikutukset. (Fjäder, ym., 2022, s. 63.)

4.4 Eläin- ja solukokeet

Mikromuoveja löydetty eläimistä ja ihmisistä, mutta niiden varsinaisia terveyshaittoja on tutkittu tällä hetkellä vain eläin- ja solukokeiden avulla. Eläin- ja solukokeiden avulla on saatu viitteitä mikromuovien terveydelle haitallisista vaikutuksista. Tutkimukset osoittavat, että mikromuovit voivat mahdollisesti aiheuttaa solutoksisuutta, tulehdusta, oksidatiivista stressiä sekä immuunireaktion ja aineenvaihdunnan häiriöitä. On myös tutkimuksia mikromuovien aiheuttamasta neuro- ja lisääntymistoksisuudesta sekä karsinogeenisuudesta. Lisäksi on joitain todisteita muoveihin tarttuneiden kemikaalien ja mikrobien vaikutuksista terveyteen. Monissa tutkimuksissa on todennettu erilaisten eläin- ja ihmispatogeenien esiintyvän mikromuovien päällä vesiympäristössä, mutta tieto ongelman vakavuudesta on vajavaista (Audrézet, ym., 2021). (Danopoulos ym., 2022; Prata, ym., 2020; Rahman, ym., 2021.)

Hiirikokeissa mikromuovien on todettu jopa läpäisevän hiirien veriaivoesteen. Tavallisesti veriaivoeste estää haitallisten aineiden pääsyn verenkierrosta aivokudokseen. Hiirille syötettiin mikromuovia seitsemän päivän ajan. Hiirille syötetyt alle kahden mikrometrin kokoiset mikromuovit läpäisivät veriaivoesteen ja kertyivät aivojen mikroglia-soluihin. Mikroglia-solut näkivät mikromuovit uhkana, joka johti hiirien aivosolujen apoptoosiin eli ohjelmoituun solukuolemaan. Mikromuovien pääsystä ihmisten aivoihin veriaivoesteen läpi ei ole vielä varmaa tietoa, mutta tutkimusten mukaan se voi olla hyvinkin mahdollista. (Kwon, ym., 2022.)

Eläin- ja solututkimusten tulokset ovat vain viitteellisiä, sillä niissä on käytetty suuria mikromuovi annosmääriä ja tasalaatuisia muoveja, jotka eivät vastaa normaalia altistumista. Tavanomaisesti elimistöön kertyy monia eri muovilaatuja yhden

muovilaadun sijaan. Lisäksi eläin- ja solukokeissa käytetyt mikromuovit ovat puhdasta muovia, joka ei vastaa pitkään ympäristössä olleita mikromuovipartikkeleita. (Fjäder, ym., 2022.)

5 SÄÄDÖKSET

Muutamissa maissa primääriset mikromuovit ovat olleet jo kiellettyinä pitkään kansallisissa laeissa tai asetuksissa. UNEP'in (United Nations Environment Programme) raportin mukaan vuonna 2018 henkilökohtaisten hygienia- ja kosmetiikkatuotteiden primääriset mikromuovit olivat kielletty 192 maasta kahdeksassa maassa (4 %). Nämä kahdeksan maata olivat Uusi-Seelanti, Kanada, USA, UK, Etelä-Korea, Ruotsi, Ranska ja Italia. (UNEP, 2018, s. 3.) Suomessa ei ole vielä mikromuoveja koskevia säädöksiä, mutta EU-tasoinen primääristen mikromuovien rajoitusehdotus on käynnissä.

5.1 Mikromuovien rajoitusehdotus

Euroopan Unionin muovistrategian tavoitteena on lisätä muovijätteen kierrätystä EU:ssa. Kierrätyksen tehostaminen estää samalla hajoavista muovirokista tulevien sekundääristen mikromuovien syntymisen. Osana muovistrategiaa, Euroopan komissio on pyytänyt Euroopan kemikaalivirastoa (ECHA) arvioimaan tieteellisiä todisteita mikromuovien haitoista, joiden perusteella ECHA on myöhemmin laatinut rajoitusehdotuksen. Rajoitusehdotus koskee tarkoituksellisesti lisättyjä mikromuoveja eli primäärisiä mikromuoveja, ja rajoituksen tavoitteena on vähentää ja estää mikromuovien päätyminen ympäristöön. Laajamittainen mikromuovien rajoitus tulisi koskemaan EU/ETA-alueen markkinoilla olevia tuotteita kuten primäärisiä mikromuoveja sisältäviä hygienia- ja kosmetiikkatuotteita, maaleja, torjunta-aineita ja lannoitteita. Osana rajoitusehdotusta on ehdotettu myös tekonurmikenttien täyteaineena käytetyn SBR-kumirouheen käytön kieltämistä kuuden vuoden siirtymäajan jälkeen. (ECHA, n.d.)

Edellä mainittujen mikromuovien rajoitus tullaan toteuttamaan kemikaaliasetuksen (REACH-asetus) nojalla, siten että komissio tekee muutosehdotuksen asetuksen liitteeseen XVII (tiettyjen vaarallisten aineiden, seosten ja esineiden valmistuksen, markkinoille saattamisen ja käytön rajoitukset). Rajoitukset tulevat voimaan koko Euroopan laajuisesti, mikäli ehdotus hyväksytään. Alustavan arvion mukaan rajoitus ehkäisisi jopa 500 000 mikromuovitonin päätyminen ympäristöön 20 vuoden aikana. (ECHA, n.d.)

5.2 SUP-direktiivi

Euroopan Unionin SUP-direktiivin (Single Use Plastics) tavoitteena on vähentää kertakäyttöisten muovituotteiden kulutusta. Direktiivin myötä Suomessa on asetettu tuotekiello määrättyjen kertakäyttöisten tuotteiden markkinoille saattamisesta. Lisäksi tuotteille on asetettu merkintävaatimuksia, jotta kuluttaja tietää, että tuote on valmistettu muovista. Koska SUP-direktiivin myötä ympäristöön päätyvän isomman muoviroskan määrää vähennetään, direktiivi vähentää samalla myös kulumisesta syntyvien mikromuovien, eli sekundääristen mikromuovien määrää. (Tukes, n.d.)

5.3 Mikromuovit juomavedessä

Euroopan Unionin uudistettu juomavesidirektiivi (Drinking Water Directive) tuli voimaan vuonna 2021. Tämän jälkeen vuonna 2022 Euroopan komissio julkaisi ensimmäisen tarkkailtavien aineiden luettelon (Watch List), johon on listattu aineita ja yhdisteitä, joita voi esiintyä juomavedessä ja jotka ovat ihmisen terveydelle mahdollisesti haitallisia. Tällä hetkellä tarkkailtavien aineiden luettelossa on vain hormonitoimintaa häiritseviä yhdisteitä. (European Commission, 2019.) Komission on julkaistava mikromuoveille tarkoitettu mittausmenetelmä kolmen vuoden kuluessa uudistetun direktiivin voimaantulosta, jotta myös mikromuovit voidaan lisätä tarkkailtavien aineiden luetteloon. Täten juomavedelle tullaan määrittämään tulevaisuudessa myös mikromuoveja koskeva ohjearvo. (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2020/2184/EU, 13 art.)

6 MIKROMUOVIEIN TUTKIMINEN

Mikromuoveja on tutkittu jo kauan, mutta tutkimuksessa on yhä standardisoitujen menetelmien puute. Mikromuovitutkimuksen keskeisimmät vaiheet ovat näytteenotto, näytteen esikäsittely ja partikkelien tunnistaminen sekä pitoisuuden määrittäminen. Olemassa olevat tutkimustulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia, sillä niissä on käytetty erilaisia näytteenotto- ja analyysimenetelmiä sekä eri mikromuovien kokoluokittelua. Mikromuovinäytteitä voidaan ottaa ympäristöstä maaperästä, ilmasta ja vedestä. (Fjäder, ym., 2022; Prata, ym., 2019.) Tässä katsauksessa keskitytään tarkastelemaan vesinäytteenottoa ja vesistöjen mikromuovien analysointia.

6.1 Menetelmien standardisointi

Menetelmien harmonisointia ja standardisointia viedään tällä hetkellä eteenpäin ISO:n (International Standardization Organization) työryhmän toimesta. ISO:n valmisteleva standardiluonnos “ISO/DIS 24187 Principles for the analysis of plastics and microplastics present in the environment” on tällä hetkellä DIS eli luonnosvaiheessa. Luonnoksesta tulee virallinen kansainvälinen ISO-julkaisu, jos maat antavat sille hyväksynnän. (ISO/DIS 24187:2021(E), 2021.)

Standardiluonnoksen mukaan standardi tulee määrittelemään ympäristössä olevien mikromuovien tutkimisen keskeiset periaatteet, jotka tulee ottaa huomioon myöhemmin kehitettäessä tarkempia näytteenotto-, näytteenvalmistus- ja havaitsemismenetelmiä. Vesistöjen mikromuovianalysoinnin osalta standardissa tulee olemaan ohjeistuksia mm. näytetilavuuteen ja näytteenottovälineisiin sekä mikromuovien tunnistusmenetelmiin liittyen. Lisäksi standardin termit ja määritelmät -osiossa tarkennetaan mikromuovien kokoluokitusta. Standardissa mikromuovit ovat määritelty yleisesti 1 µm-5 mm kokoisiksi partikkeleiksi ja ne ovat jaettu kahteen ryhmään: mikromuoveihin ja suurin mikromuoveihin. Mikromuoveiksi lasketaan 1 µm-1 mm kokoiset partikkelit, ja suuriksi mikromuoveiksi lasketaan 1 mm-5 mm kokoiset partikkelit. Standardin myötä mikromuovitutkimuksessa myös kehoitetaan jakamaan partikkelit eri kokoluokkiin, jotta partikkelien tunnistus helpottuisi. (ISO/DIS 24187:2021(E), 2021.)

6.2 Kontaminaation ehkäisy

Kaikissa mikromuovien tutkimusvaiheissa, näytteenotosta lopulliseen analysointiin, on huomioitava näytteen kontaminaatoriski. Kontaminaatiolla tarkoitetaan tässä tilanteessa ulkopuolisten muovipartikkelien päätymistä mikromuovinäytteeseen. Kontaminaatoriskiä voi minimoida välttämällä muovisten näytteenotto- ja analysointivälineiden käyttöä. Muovin sijaan tulisi suosia lasisia ja metallisia välineitä. Lisäksi keinokuituisiin vaatteisiin pukeutumista tulisi välttää, ja vaatteet tulisi suojata (100 %) puuvillaisella laboratoriotakilla. Myös työpiste on pidettävä hyvin puhtaana ja välineet on huuhdeltava ultra puhtaalla vedellä ennen ja käyttöä. Ilmassa leijuvien mikromuovihiukkasten aiheuttaman kontaminaatoriskin ehkäisemiseksi näytteitä olisi hyvä käsitellä laboratorion vetokaapissa. Näytteet tulee myös peittää esim. esikäsitteilyn aikana. (Prata, ym., 2019.)

6.3 Näytteenottomenetelmät

6.3.1 Näytetilavuus

Ympäristövesinäytteitä ottaessa on tärkeää määrittää halutun näytteen tilavuus. Tarvittava näytetilavuus riippuu pitkälti siitä, minkä kokoisia mikromuovipartikkeleja halutaan tutkia. Voidaan olettaa, että mitä pienempiä muoveja tutkitaan, sitä enemmän niitä on lukumääräisesti vesiympäristössä. Tämän vuoksi pienimpien (μm tason) mikromuovipartikkelien tutkimusta varten voi riittää vähäinen näytetilavuus kuten litra, kun taas suuremmat mikromuovit (>1 mm) vaativat näytteenotossa useiden vesikuutiometrien keräämisen. Kuitenkin lähes kiintoainevapaissa vesistöissä on otettava erittäin suuria näytemääriä, jotta näyte olisi tarpeeksi edustava. (Fjäder, ym., 2022; ISO/DIS 24187:2021(E), 2021.)

6.3.2 Näytteenottovälineet

Pienen tilavuuden näytteitä on otettu usein laboratoriopulloon tai metalliseen ämpäriin. Suuren tilavuuden näytteet on otettu taas erilaisilla verkoilla ja pumpuilla. Vuonna 2019 tehdyssä tutkimuksessa käytiin läpi 20 eri mikromuovipartikkelien vesinäytteenottotutkimusta ja määritettiin niistä eniten käytetyt näytteenottomenetelmät. Tutkimuksen mukaan eniten käytettyjä näytteenottomenetelmiä vesiympäristön mikromuovitutkimuksessa ovat verkot/haavit (11), pumput (5) ja seulat (3). Vain yhdessä tutkimuksista käytettiin pulloja ja ämpäriä vesinäytteiden keräämiseen. (Prata, ym., 2019.) Avomeren vesinäytteitä on otettu mikromuovitutkimuksessa usein aluksen perässä vedettävällä pintahaavilla, kun taas rannikkonäytteitä on otettu usein pumppua ja erikokoisia suodattimia hyödyntäen (0,02, 0,1 ja 0,3 mm) (Fjäder, ym., 2022).

Näytteenottoverkkoja on monia erilaisia, mutta eniten käytettyjä ovat Manta-, plankton- ja Neuston-verkot. Verkkoihin yleensä asennetaan myös virtausmittari, jotta verkon suodattaman veden määrää olisi helppo seurata. Verkkoja on monia eri kokoja ja ne voivat olla 1,5–4,5 m pitkiä sekä silmäkooltaan 20–5000 μm . Verkon silmäkoon valitseminen on erityisen tärkeää. Liian suuren silmäkoon verkkoihin ei jää kiinni pienimpiä mikromuovipartikkeleita, mutta toisaalta pienen silmäkoon verkot taas tukkeutuvat helposti. Manta- ja Neuston-verkkojen pienin mahdollinen havaitsemisraja on 333 μm kokoiset partikkelit ja planktonverkon 100 μm kokoiset partikkelit. Kaikkien verkkojen käyttö on helppoa, ja ne mahdollistavat suuren näyteotannon. Toisaalta niiden käyttö on myös aikaa vievää sekä kallista ja verkot vaativat usein veneen käyttöä. Planktonverkkoihin jää Neuston- ja Manta-verkkoja pienempiä partikkeleita mutta planktonverkot myös tukkeutuvat helposti pienen silmäkoon vuoksi. Näytteenoton jälkeen verkoihin jääneet partikkelit huuhdellaan ulkopuolelta ultrapuhtaalla vedellä keräysastiaan, jossa niitä säilytetään ennen partikkelien analysointia laboratoriossa. (Cutroneo, ym., 2020; Prata, ym., 2019.)

Pumppausjärjestelmät ovat verkkoja harvinaisempia näytteenottotapoja mikromuovien näytteenotossa. Pumpuilla pystyy ottamaan näytteitä pintavedestä tai syvemältä vesipatsaasta ja ne mahdollistavat suuren näytteenottotilavuuden. Näytteiden mikromuovipartikkelien koko riippuu suoraan pumppujärjestelmän suodattimien koosta. Pumppujärjestelmissä käytetään usein muutamia eri silmäkoon suodattimia, joiden avulla partikkelit jaetaan kokoluokkiin. Pumppujärjestelmien käyttö on vaivatonta ja ne mahdollistavat suodattimen silmäkoon tarkan valinnan sekä suuren vesimäärän läpikäymisen. Pumppausjärjestelmät voidaan varustaa virtausmittarilla suodatetun vesimäärän määrittämiseksi. Näytteenoton jälkeen pumppujärjestelmien seulojen partikkelit huuhdellaan ultrapuhtaalla vedellä keräysastiaan, jossa niitä säilytetään ennen partikkelien analysointia laboratoriossa. Pumppujen haittapuoli on se, että ne vaativat laitteiston ja energiaa toimiakseen. Lisäksi pumppu ja muut järjestelmän osat voivat aiheuttaa kontaminaatiota näytteeseen, mikäli komponenteissa on muovia. Pumppujärjestelmien siirtäminen näytteenotto paikasta toiseen voi olla myös työlästä. (Cutroneo, ym., 2020; Prata, ym., 2019.)

6.4 Esikäsittely- ja suodatusmenetelmät

Laboratorioissa mikromuovinäytteiden erotus vedestä tapahtuu tiheyserottelulla, suodattamalla tai seulomalla. Lisäksi näytteestä poistetaan usein esikäsittelyn aikana ylimääräinen orgaaninen aines, jolloin näytteestä tulee puhtaampi ja mikromuovit ovat helpommin havaittavissa. Esikäsittelymenetelmien tarve riippuu näytteen koostumuksesta, tutkittavien mikromuovipartikkelien koosta sekä niiden määritysmenetelmästä. Talousvesinäytteitä ja muita puhtaampia vesinäytteitä ei ole tarpeellista esikäsitellä, toisin kuin likaisempia ympäristövesinäytteitä. (Fjäder, ym., 2022.) Vesinäytteen esikäsittely on tärkeää etenkin ennen instrumentaalista analyysiä (FTIR/Raman spektroskopia, py-GC/MS) (Löder & Gerds, 2015).

6.4.1 Tiheyserottelu

Eri mikromuovilaatujen tiheydet vaihtelevat yleensä noin $0,8\text{--}1,6\text{ g cm}^{-3}$. Mikromuovit erotetaan vedestä käyttämällä nestettä, joka on tiheämpää kuin mikromuovit, jolloin muoviset partikkelit nousevat nesteen pintaan ja mineraaliaineet laskeutuvat astian pohjaan. Tiheyserotteluun voidaan käyttää monia eri liuoksia. Yleisimmin käytössä olevat liuokset ovat kylläisiä suolaliuoksia, jotka valmistetaan sekoittamalla suodatettuun veteen NaCl (natriumklorodia), natriumjodidia (NaI) tai sinkkikloridia (ZnCl_2). NaCl-liuoksen avulla pystytään erottelemaan iso osa yleisimmistä mikromuovilaaduista (taulukko 1). NaI-liuoksella erottelu onnistuu vielä suuremmalle osalle mikromuovilaaduista, mutta ZnCl_2 -liuos on näistä kolmesta ainoa, joka erottelee kaikki yleisimmistä muovilaaduista. Myös ZnBr_2 -liuoksen on arvioitu erottelevan 99 % polymeerimateriaaleista. Sitä käytetään kuitenkin tiheyserottelussa

harvemmin sen ekologisen haitallisuuden ja korkean hinnan vuoksi. (Fjäder, ym., 2022; Prata, ym., 2019.)

Taulukko 1. Polymeerimateriaalien tiheydet.

(Sisanth, ym., 2017.; Prata, ym., 2019.)

Polymeeri	Tiheys (g cm ⁻³)	Vesi 1 g cm ⁻³	NaCl 1,2 g cm ⁻³
PP	0,9–0,91	+	+
PE	0,92–0,97	+	+
SBR kumi	~0,94	+	+
PS	1,04–1,1	-	+
PVC	1,16–1,58	-	±
PET	1,37–1,45	-	-

+ = tiheyserottelu onnistuu, - = tiheyserottelu ei onnistu, ± = tiheyserottelu mahdollinen

6.4.2 Orgaanisen aineen hajotus

Tiheyserottelun jälkeen näytteestä voidaan myös hajottaa ylimääräinen orgaaninen aines. Hajotusmenetelmiä on monia, ja niiden tavoitteena on hajottaa näytteestä orgaaninen aines, jättäen mikromuovit jäljelle. Myös muovi on hiilivetyä sisältävä orgaaninen materiaali, mutta hajotusmenetelmissä käytetään aineita siten, että ne eivät vahingoita muovia. Kaikille mikromuovinäytteille ei ole tarpeellista tehdä orgaanisen aineen hajotusta. Hajotuksen tarve vaihtelee kunkin näytteen orgaanisen aineksen määrän mukaan. (Prata, ym., 2019.)

Hajotusmenetelmät voivat olla joko kemiallisia tai entsyymattisia. Entsyymattinen näytteenkäsittely on kemiallista hellävaraisempi, mutta entsyymit eivät kykene hajottamaan kaikkia aineita. Lisäksi entsyymattinen hajotus on kalliimpaa kuin kemiallinen hajotus. Yleisimpänä kemiallisena hajotusmenetelmä käytetään vetyperoksidia (H₂O₂, 30 %). Vetyperoksidia käytetään usein myös yhdessä rautakatalyytin kanssa hapetusreaktion vauhdittamiseksi (Fentonin reagenssi). Lisäksi kemiallisena hajotusmenetelmänä on kokeiltu esim. kloorivetyä (HCl), mutta sen on todettu hajottavan muovipartikkeleita kuten PET-muovia, jolla on alhainen haponkestävyys.

Hajotusmenetelmän optimoinnissa on tärkeä huomioida hajottavan aineen sopiva väkevyys, pH, lämpötila ja reaktioaika. (Fjäder ym., 2022; Prata, ym., 2019.)

6.4.3 Seulonta

Seulonnalla pystyy erottamaan mikromuoveja vesinäytteestä käyttämällä metallista laboratorioseulaa. Seulonnan voi toteuttaa yhdellä seulalla tai seulasarjalla, joissa seuloilla on eri silmäkoot. Käytettyjen seulojen määrä ja niiden silmäkoot riippuvat siitä, mitä seulonnan tulokseksi halutaan (tietty mikromuovi kokoluokka, tietyn mikromuoviosuuden poisto tai mikromuovien jako kokoluokkiin). Seulonnan voi

toteuttaa näytteenottipaikassa paikan päällä (in situ) tai myöhemmin laboratoriossa. Seulonnassa vesinäyte valutetaan seulasarjan lävitse ja puhdistetaan ultrapuhdaalla vedellä sen jälkeen. (Cutroneo, ym., 2020.)

6.4.4 Suodatus

Vesinäytteet suodatetaan usein suodattimille partikkelien analysointia varten. Mikromuovinäytteet voidaan suodattaa suoraan ilman esikäsitteilyä ja seulontaa tai niiden jälkeen. Partikkelit voidaan erottaa vedestä painovoimasuodatuksella tai vakuumisuodatuksella. Vakuumisuodatusta käytetään useammin, sillä se on nopeampaa suodatusmenetelmässä käytetyn alipaineen ansiosta. Suodatuksessa käytetään monia eri suodattimia, kuten polykarbonaatti- ja lasikuitusuodattimia. Suodattimien materiaali ja huokoskoko vaihtelevat käyttökohteen ja jatkoanalyysimenetelmän mukaan. Yleisimmin käytetyt suodattimet ovat halkaisijaltaan 45–47 mm ja suodattimien huokoskoot vaihtelevat 0,2–300 µm. (Cutroneo, ym., 2020.)

6.5 Analysointimenetelmät

Mikromuovien analysoinnin yleisimpiä tapoja ovat visuaalisen tunnistuksen menetelmät (mikroskopiointi), kemiallisen karakterisoinnin menetelmät (spektroskopia) ja termooanalyttiset menetelmät (pyrolyysi). Visuaalisen tunnistuksen avulla partikkeleita voidaan laskea ja niiden muotoa sekä väriä voidaan tarkastella. Kemiallisen karakterisoinnin myötä partikkelien materiaalit pystytään myös identifioimaan. Ilman kemiallista karakterisointia on mahdotonta sanoa mitä muovilaatua tutkittavat partikkelit ovat. (Fjäder ym., 2022.)

6.5.1 Mikroskopiointi

Optista mikroskooppia eli valomikroskooppia käytetään usein mikromuovien yleiseen visualisointiin, jonka avulla saadaan tietää partikkelien määrä, koko, muoto ja väri. Optisella mikroskoopilla voi nähdä myös pienimmät mikromuovipartikkelit (>1 µm). Mikroskopiolla ei saa yksinään tietoa partikkelien kemiallisesta koostumuksesta eli siitä, ovatko partikkelit polymeerimateriaalia vai eivät. Tämän vuoksi mikroskopiointissa on käytetty apuna erilaisia tekniikoita muovipartikkelien ja luontaisesti esiintyvien partikkelien erottelemiseen. (Fjäder ym., 2022.)

Esimerkiksi niilinpunaisella väriaineella voidaan värjätä näytteen partikkelit, jolloin väriaine imeytyy hydrofobisiin (muovi) pintoihin ja lisää mikromuovipartikkelien fluoresenssia. Tämän jälkeen värjätyt partikkelit voidaan laskea epifluorenssimikroskoopin (EPM) ja kuva-analyysin avulla. Toinen mikroskopiointin apuna käytetty menetelmä on partikkelien erottelu manuaalisesti kuumaneulan avulla.

Kuumaneulalla polymeeripartikkelit erotetaan muista partikkeleista niiden termisten ominaisuuksien perusteella. Muovipartikkelit sulavat kuumaneulan alla, kun taas muut partikkelit eivät. Vaikka värjäystekniikan ja kuumaneulan avulla polymeeripartikkelit pystytään erottamaan muista partikkeleista, menetelmät eivät silti anna tietoa muovipartikkelien eri muovilaaduista. Tämän vuoksi mikromuovipartikkelien kemialliseen karakterisointiin on hyödynnettävä lisälaitteita. (Fjäder ym., 2022; ISO/DIS 24187:2021(E), 2021.)

6.5.2 FTIR

FTIR (Fourier Transformation Infrared) spektroskopia on tällä hetkellä käytetyin menetelmä mikromuovien tunnistukseen ja kemialliseen karakterisointiin. FTIR-menetelmällä voidaan tunnistaa tarkasti eri mikromuovilaatuja niiden tunnusomaisten infrapunaspektrien avulla. Muovipolymeerien IR-spektrit ovat hyvin uniikkeja ja selkeitä, jonka vuoksi spektroskopia on optimaalinen keino mikromuovien identifiointiin. Näytteeseen kohdistetaan IR-säde, ja infrapunasäteilyn sähkömagneettinen signaali muunnetaan Fourier-muunnoksen avulla luettavaksi spektriksi, jonka eri huiput kertovat näytteen muovilaadusta. IR-spektrissä näkyy näytteen absorbanssi tai transmittanssi säteilyn aaltoluvun funktiona. Muovilaadun tunnistamiseksi näytteen spektriä verrataan laajaan spektrikirjastoon. (Löder & Gerdts, 2015.)

FTIR analyseissä käytetään useita eri tekniikoita. Tekniikoihin kuuluvat ATR-FTIR (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared) spektroskopia, FPA-FTIR (Focal Plane Array Detector Fourier Transform Infrared) spektroskopia ja μ -FTIR (Micro Fourier Transform Infrared) spektroskopia. (ISO/DIS 24187:2021(E), 2021.) ATR-FTIR tekniikka soveltuu suurempien ($>500 \mu\text{m}$) mikromuovipartikkelien tunnistukseen. ATR-FTIR menetelmässä yksittäisen näytteen spektri mitataan painamalla ATR-kidettä näytteen pintaa vasten. FPA-FTIR tekniikka mahdollistaa yhdellä mittauksella useiden tuhansien spektrien samanaikaisen tallentamisen täsmennetyllä alueella ja siten partikkelien kemiallisten kuvien luomisen. (Löder & Gerdts, 2015.) μ -FTIR tekniikka mahdollistaa taas pienempien mikromuovipartikkelien analysoinnin. Sillä on mahdollista analysoida jopa $10 \mu\text{m}$ kokoisia mikromuoveja. Etuna on myös se, että näytteestä on mahdollista mitata yksittäisen mikromuovipartikkelin spektri. (Fjäder, ym., 2022.)

6.5.3 Raman

Raman-spektroskopia on FTIR-spektroskopian jälkeen yksi käytetyimmistä spektroskooppisista mikromuovien analysointimenetelmistä (Prata, ym., 2019). Raman spektroskopiassa näytteeseen kohdistetaan laservalo ja näytteestä mitataan valon sirontaa. Sironnasta syntyy aineelle ominainen spektri, jota verrataan spektrikirjastoon aineen tunnistamiseksi. Raman spektroskopialla on mahdollista

tunnistaa hyvinkin pieniä mikromuovipartikkeleja. Raman spektroskopiassa voi syntyä kuitenkin paljon taustamelua laservalon käytöstä, joka voi vaikeuttaa näytteen analysointia. (Löder & Gerdts, 2015.) Raman-spektroskopian avulla pystyy analysoimaan FTIR spektroskopiaan verrattuna pienempiä partikkeleita. Jos käytössä on μ FTIR ja μ Raman spektrometrit, niin FTIR menetelmällä voi tunnistaa jopa 10 μ m kokoisia partikkeleita ja Raman menetelmällä jopa 1 μ m kokoisia partikkeleita (Fjäder, ym., 2022).

6.5.4 GC-MS

Mikromuovien tunnistukseen voidaan käyttää myös termoanalyttisiä menetelmiä. Termoanalyttisissä (GC-MS) menetelmissä näyte pyrolysoidaan inertissä olosuhteissa ja yksittäisten polymeerien uniikit hajoamistuotteet tunnistetaan. GC-MS menetelmät eroavat toisistaan niiden lämmitysmenetelmien suhteen, mutta termoanalysointimenetelmistä tunnetuin on Py-GC-MS (Pyrolysis Gas Chromatography-Mass Spectrometry) menetelmä. (ISO/DIS 24187:2021(E), 2021.)

Pyrolyysiprosessissa (Py-GC-MS) muovit hajotetaan lämmöllä, jolloin syntyy polymeerityypeille ainutlaatuinen höyryfragmentti, joka viedään kaasukromatografiin ja tunnistetaan massaspektrometrillä. Py-GC/MS menetelmä on tehokas keino kemialliseen karakterisointiin eli eri mikromuovilaatujen tunnistamiseen, mutta menetelmän huono puoli on se, että näyte tuhoutuu analyysin aikana. Lisäksi menetelmän haittapuoli on, että analysoidavista mikromuovipartikkeleista ei saa tietoa partikkelien lukumäärästä, muodosta tai koosta. (Löder & Gerdts, 2015; Prata, ym., 2019.)

7 OLEMASSA OLEVAT TEKNOLOGISET RATKAISUT

7.1 Mikromuovia keräävät laitteet

7.1.1 Clewat

Clewat-alus on suomalainen muoviroskaa ja öljyä keräävä puhdistuslaite (kuva 5). Alus on ihmisen ohjattava ja se on toimintakykyinen merissä, järvissä ja joissa. Alus kerää roskat imun avulla sen suuaukolle. Sen jälkeen se säätelee vedenvirtausta siten, että roskat ja mikromuovit kerääntyvät liukuhihnalle, josta ne lajitellaan roskasäiliöihin. Clewatin alus pystyy keräämään jopa puolen millimetrin kokoisia mikromuoveja ja roskaa noin 200 m³/h. Clewat-alusten puomit ovat säädeltäviä ja niiden pituutta lisäämällä pystytään kasvattamaan puhdistettavan alueen leveyttä.

Clewatilla on myös Cleansweep-aluksia, jotka puhdistavat vesistöä ja toimivat samanaikaisesti tutkimusaluksina. (Clewat, 2022.)



Kuva 5. Clewat- alus vedessä. (Clewat, 2022.)

7.1.2 Clearbot-roskankerääjä

Clearbot on autonominen Hong Kongissa keksitty sähköllä toimiva laite, joka kerää veden pinnalta muoviroskia ja öljyä (kuva 6). Clearbot Neo pystyy keräämään jopa 15 litraa öljyä ja 200 kg kelluvaa roskaa päivässä. Laite on tarkoitettu käytettäväksi vesiteillä (satamat, venesatamat, kanavat). Se pystyy roskia kerätessään keräämään myös samanaikaisesti dataa ja erottelemaan eri muoviroskia toisistaan. (Clearbot, 2022.)



Kuva 6. Clearbot veteen laskettuna. (Clearbot, 2022.)

7.1.3 Seabin

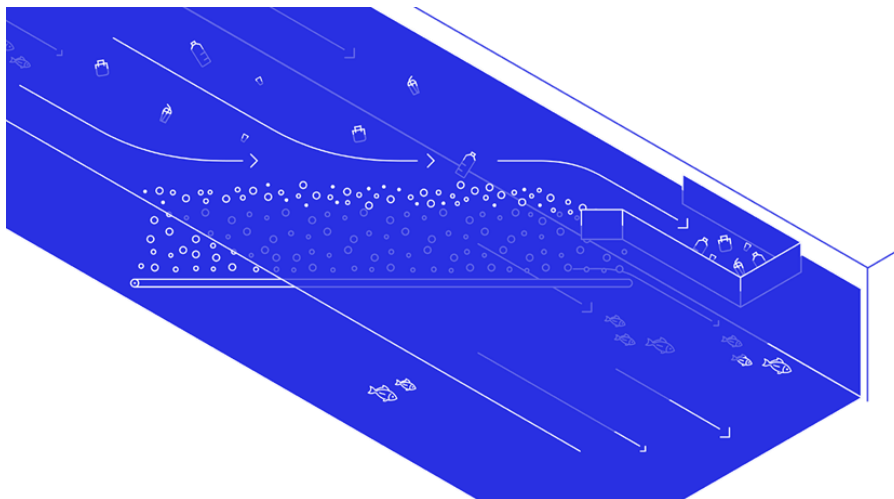
Australialainen Seabin on ns. vedessä kelluva roskakori, joka pumpkaa vettä vedenpinnalta suodatuslaitteeseen (kuva 7). Vesi pumpataan laitteen läpi takaisin mereen, mutta pumpatun veden mukana kulkeutuneet mikromuovit (+2mm), makromuovit ja muu roska jäävät Seabin laitteen suodattimeen. Seabin on asennettava kiinteästi tarpeeksi rauhalliseen ympäristöön (venesatamat/satamat), jotta asennussijainnin vedenvirtaus on maksimissaan 4 solmua. Laitteeseen voi asentaa myös parempia suodattimia ja öljyä kerääviä tyynyjä. Seabin pystyy keräämään arvioilta noin 3,9 kg roskaa päivässä ja laitteen sisälle mahtuu yhteensä 20 kg roskaa. (The Seabin Project, 2022.)



Kuva 7. Seabin vedessä. (Ecodna.art, 2019.)

7.1.4 The Great Bubble Barrier

The Great Bubble Barrier on Alankomaissa kehitetty tekniikka muoviroskien keräämiseen joesta. Joen pohjalle asennetaan putki, jonka läpi veteen puhalletaan ilmaa. Ilma luo jokeen ”kuplaverhon”, jonka avulla roskat ajautuvat joen virtauksen suuntaisesti ylös veden pinnalle asennettuun muoviroskien keräysjärjestelmään (kuva 8). Keräysjärjestelmä estää muoviroskien kulkeutumisen joesta merelle. Laite kerää lähinnä isompia roskia vedestä, mutta estää samalla kerättyjen muovien hajoamista ympäristössä pienemmiksi mikromuoveiksi. Laitteisto voidaan asentaa koko joen mittaiseksi, se pystyy toimimaan ympäri vuorokauden, eikä estä laivojen ja veneiden kulkua joessa. Laitteisto on asennettu kahteen sijaan Alankomaissa: jokeen ja vedenpuhdistamon yhteyteen. (The Great Bubble Barrier, 2022.)



Kuva 8. The Great Bubble Barrier toimintaperiaate. (The Great Bubble Barrier, 2022.)

7.2 Mikromuovin reaaliaikainen analysointi

7.2.1 Draper-drone

Draper on Yhdysvalloissa kehitetty autonominen vedenalainen drone, joka tunnistaa mikromuoveja vedestä jopa yhdeksän metrin syvyydestä (kuva 9). Laitteen toiminta perustuu Draper yrityksen kehittämään edistyneeseen sensoriin, joka on suunniteltu keräämään ja analysoimaan tietoa reaaliaikaisesti vedessä kelluvien mikromuovien koosta, määrästä ja materiaalirakenteesta. Laite lähettää keräämänsä datan valittuun järjestelmään, kuten nettisivuille. Tähän mennessä dronea ei ole itsessään testattu, mutta sensorin toimintaa on testattu veneeseen kiinnitettynä. Tulevaisuuden tähtäimenä on, että sensori toimisi sille suunnitellussa vedenalaisessa dronessa. Dronen on suunniteltu myös palaamaan itsenäisesti tuulivoimalla toimivaan latauspoijuun. (Draper, 2020.)



Kuva 9. Draper-drone prototyyppi. (Sprout Studios, 2021.)

7.2.2 REMMI-hanke

REMMI on Oulun yliopiston (Kajaanin Mittaustekniikan yksikkö) ja Kajaanin ammattikorkeakoulun (KAMK) yhteinen tutkimushanke, jonka tavoite on uuden kenttätoimintakykyisen laitteen kehittäminen mikromuovien reaaliaikaiseen mittaamiseen ja seurantaan. Hanke käynnistyi vuonna 2020 ja päättyy vuoden 2022 lopussa. Hankkeessa kehitetään reaaliaikainen optinen mikromuovien mittaustaitteisto vedentuotantolaitokselle, jota testataan. Hankkeessa myös testataan olemassa olevaa laitteistoa hulevesien mikromuovien mittaukseen ja päivitetään mikromuoviaiheista tietoa tutkimusympäristöstä ja mikromuovien lähteistä Kainuussa. Hankkeen tavoitteena on lisäksi tuottaa kolme kappaletta mittaajjärjestelmiä ja raportoida tuloksista. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2020.) (Kajaanin yliopistokeskus, 2022.)

7.2.3 Impedanssispektroskopia

Tutkimuksessa kokeiltiin mikromuovien määrän ja koon mittausta suoraan virtaavasta vedestä impedanssispektroskopiaa hyödyntäen. Impedanssispektroskopia tunnistaa yksittäisten partikkelien sähköisiä ominaisuuksia suoraan vesivirtauksesta ja jaottelee ne sen mukaan muovisiin ja ei-muovisiin partikkeleihin. Tutkimuksessa virtaavaan veteen lisättiin 212–1000 µm kokoisia polyeteenipellettejä ja samaa kokoluokkaa olevia biologisia partikkeleita kuten siemeniä ja katkaravun munia. Kokeilun aikana veden keskimääräinen virtausnopeus oli 103 ± 8 mL/min. Noin 90 prosenttia veteen lisätyistä 300–1000 µm kokoluokan mikromuovipelleteistä saatiin talteen. Partikkelien koot määriteltiin ja ne saatiin eroteltua biologisista partikkeleista. Vain 1 % biologisista partikkeleista tunnistettiin virheellisesti muovipartikkeleiksi. Kokeilussa käytetyt mikromuovit olivat muodoltaan pellettejä ja yhdenlaista

muovilaatua, joten tutkimus tulisi toistaa eri muotoisilla ja laatuilla mikromuoveilla. (Colson & Michel, 2021.)

7.2.4 Prototyyppi mikromuovien tunnistukseen

Prototyyppi on kehitetty tunnistamaan läpinäkyviä PET-mikromuoveja ja läpikuultavia LDPE-mikromuoveja vesistöissä. Kannettava laite kykenee tällä hetkellä vain maalla tehtyihin mittauksiin, mutta teoriassa sitä voidaan kehittää reaaliaikaiseen mittaukseen kykeneväksi laitteeksi. Laitteella voi tutkia näytteitä meristä, joista, järvistä ja jätevedenpuhdistamoiden suodatusvedestä. Prototyypin laitteisto koostuu latauskytketystä kamerasta (HH, langaton yhteys) ja kannettavasta optisesta laitteesta (CCD), jotka ovat molemmat kytketty kannettavaan tietokoneeseen. Laitteisto pystyy havaitsemaan mikromuoveja vedenpinnalla ja veden alla. Laitteiston ollessa kytkettynä tietokoneeseen, pystytään parempiin ja tarkempiin mittauksiin. (Asamoah, ym., 2019.)

Protolaitteen toiminta perustuu vedessä olevien mikromuovien ominaisuuksien interferenssikuvion muutoksiin, jotka vaihtelevat mikromuovityypin mukaan. Laitteisto tallentaa havaintotasolla interferenssikuvion ja peiliheijastuksen näytteestä laservalosäteitä hyödyntäen. Analyysissa interferenssikuvio antaa tarpeellista tietoa, mutta ei tarpeeksi paljon, jonka vuoksi peiliheijastus tarvitaan varmistamaan mikromuovien havainnoimista. Prototyypin kehittyessä, sitä voidaan mahdollisesti hyödyntää reaaliaikaiseen kenttämittaukseen. Yksi laitteiston huonoja puolia on se, että suuri vedenpinnan liikehdintä häiritsee mittaustuloksia. Tämä pystytään kuitenkin ehkäisemään osittain ottamalla runsaasti mittauksia ja tutkimalla niiden tulosten keskiarvoa. (Asamoah, ym., 2019.)

7.3 Ratkaisut mikromuovien leviämisen ehkäisyyn

7.3.1 Pyykinpesun mikromuovikuidut

Tekokuituisista vaatteista irtoaa pyykinpesun aikana mikromuovikuituja, jotka jatkavat matkaansa viemärin kautta jätevedenpuhdistamolle. Vaikka suurin osa puhdistamolle saapuvista mikromuoveista pystytään poistamaan puhdistusprosessin aikana, osa niistä läpäisee prosessin ja päätyy purkupuutken kautta vesistöön. Pesukoneisiin on keksitty erilaisia ratkaisuja mikromuovikuitujen jätevesiviemäriin kulkeutumisen ehkäisemiseksi. Kolme tällä hetkellä esille nousutta kuluttajille suunniteltua ratkaisua ovat pesukoneisiin asennettava suodatin, pesupussi sekä pesupallo.

Pesukoneeseen asennettavan mikromuovisuodattimen tarkoitus on kaapata pesukoneen poistoputken vedestä vaatteista irronneet mikromuovikuidut, ennen kuin ne jatkavat matkaansa jätevedenpuhdistamolle. Esimerkiksi Electrolux on kehittänyt suodattimen (kuva 10), jonka on arvioitu kaappaavan noin 90 % pesun aikana syntyvistä 45 µm suuremmista mikrokuiduista. Kyseinen suodatin on asennettavissa tällä hetkellä vain Electrolux, AEG and Zanussi -merkkisiin pesukoneisiin. (Electrolux, 2022.)



Kuva 10. Mikrokuitusuodatin pesukoneeseen. (Electrolux, 2022.)

Mikromuovikuitujen leviämisen ehkäisemiseksi on kehitetty myös pesupusseja. Esimerkiksi Guppyfriend -merkkinen pesupussi vähentää kuitujen irtoamista synteettisistä vaatteista ja samanaikaisesti suodattaa ne vähäiset kuidut, jotka irtoavat (kuva 11). Pesupussin testauksessa on arvioitu sen vähentävän mikrokuitujen irtoamisen määrää 79–86 % ja pesun aikana irtoavista mikrokuiduista jää pussiin noin 90 %. (Guppyfriend, 2022.)



Kuva 11. Guppyfriend pesupussi. (Guppyfriend, 2022.)

Yksi uudemmissa innovaatioista on pesukoneeseen synteettisten vaatteiden sekaan heitettävä pesupallo (kuva 12). Cora Ball -pesupallon tarkoituksena on kaapata pesun aikana irtoavat mikromuovikuidut vedestä. Testitulosten perusteella se estää noin 31 % mikromuovikuiduista kulkeutumasta jäteveden mukana puhdistamolle. (Cora Ball, 2022.)



Kuva 12. Cora Ball -pesupallo. (Cora Ball, 2022.)

7.3.2 Tekonurmikenttien kumirouhe

Suomalainen Filtro-hulevesisuodatin on kaivokohtaisesti asennettava suodatin hulevesien käsittelyyn (kuva 13). Se sopii uusiin sekä vanhoihin kaivoihin. Filtron suodatinkangas suodattaa kaupunki-, katu- ja pihaympäristöjen hulevesistä roskia, haitta-aineita ja kiintoaineita. Suodattimiin suodattuu myös hulevesien mukana kulkeutuva tekonurmikenttien muovirouhe. (Watec, 2022.) Filtro-hulevesisuodatin pystyy suodattamaan säännöllisesti yli 90 % vähintään 0,125 mm kokoisista partikkeleista. Tätä pienempien partikkelien poistotehokkuus vaihteli testikäytössä merkittävästi (16 %-60 %). Suodatin kykenee estämään myös suurimman osan mikromuovien leviämisestä hulevesien mukana eteenpäin. (Antikainen & Koskenlahti 2019.)



Kuva 13. Filtro-hulevesisuodatin. (Watec, 2022.)

Rouhesieppari on Filtron tapainen tuote, joka on erikoistunut tekonurmikenttien kumirouheen keräämisen. Se on hulevesikaivoihin asennettava metallinen suodatin, joka mahdollistaa kumirouheen talteenoton, kierrättämisen tai uudelleenkäytön (kuva 14). Samanlaisia rouhesieppareita on jo asennettu Pohjoismaihin useampia. (Lahti Aqua, 2020.)



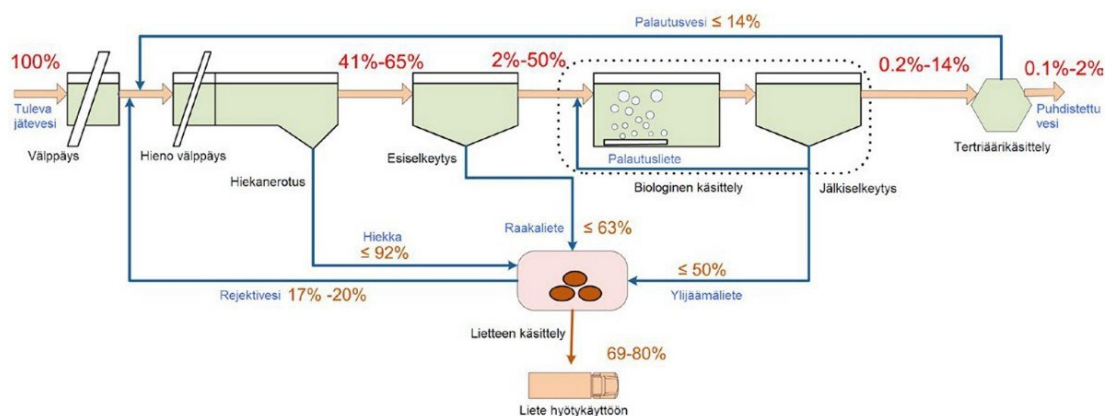
Kuva 14. Rouhesieppari. (Lahti Aqua, 2020.)

7.3.3 Jäteveden mikromuovit

Tutkimukset osoittavat, että jätevedenpuhdistamoilla on merkittävä rooli mikromuovien päätyemisessä ympäristöön. Mikromuovit päätyvät jäteveten esim. keinokuituvaatteiden pesusta ja mikromuovia sisältävien hygieniatuotteiden käytöstä. Jätevedet johdetaan jätevedenpuhdistamoille, joissa osa mikromuovista poistuu jäteveden puhdistusprosessin myötä. Jätevedenkäsittelytekniikoita ei kuitenkaan ole suunniteltu erityisesti mikromuovien poistamiseen, joten kaikki tekniikat eivät välttämättä poista mikromuovia. Jotkut jätevedenpuhdistustekniikat poistavat

jätevedestä enemmän mikromuovia kuin toiset. Tutkimuksen mukaan kalvobioreaktori (Membrane Bioreactor, MBR) puhdistaa jätevedestä mikromuovit tehokkaammin (99,9 %) edistyneisiin loppukäsittelymenetelmiin kuten hiekka- ja kiekkosuodattimen tai korkeapaine-flotaatioon verrattuna. Tehokkaasta mikromuovien poistamisesta huolimatta jätevedenpuhdistamoilta päätyy paljon mikromuovia vesiympäristöön, koska käsiteltyä jätevettä lasketaan vesistöön jatkuvasti suurina määrinä. (Talvitie, ym., 2017.) Jätevedenpuhdistuslaitosten prosessisuunnittelussa tulisi tulevaisuudessa ottaa mikromuovien poistotehokkuus huomioon enenemissä määrin, jotta jätevesien mikromuovikuormitus ympäristöön olisi vähäisempää.

Yhdessä tutkimuksessa arvioitiin miten jäteveden mukana tulevat mikromuovit kulkeutuvat jätevedenpuhdistamoilla, joissa on käytössä tertiäärikäsittely (kuva 15). Arvion mukaan hiekanerotuksen jälkeen jätevedessä on jäljellä noin 41–65 % mikromuovista. Esiselkeytyksen jälkeen jätevedessä on jäljellä 2–50 % mikromuovista, ja jälkiselkeytyksen jälkeen mikromuovia on jäljellä vain 0,2–14 %. Viimeisen käsittelyn eli tertiäärikäsittelyn jälkeen puhdistetussa jätevedessä on arviolta enää 0,1–2 % mikromuovia alkuperäiseen määrään verrattuna. Arvion mukaan edistyneillä tertiäärikäsittelylaitoksilla jopa 99,9 % mikromuoveista poistuu jätevedestä, mutta samanaikaisesti jopa 80 % jätevedestä poistetusta mikromuovista päätyy jätevesilietteeseen. Jätevesiliete on ravinnerikasta, jonka vuoksi sitä käytetään usein maanparannusaineena. Lietteen kautta mikromuovit päätyvät maaperään ja leviävät jälleen ympäristöön. (Sun, ym., 2019.)

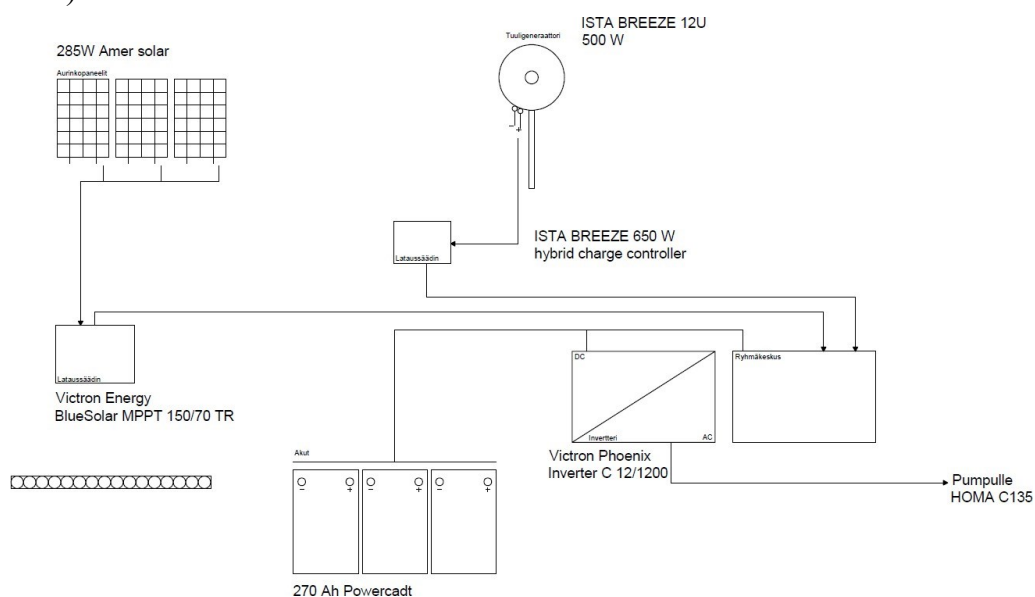


Kuva 15. Mikromuovien kulkeutuminen jätevedenpuhdistamolla. (Soininen, ym., 2020, s. 43.)

8 SUODATINLAITTEISTON KEHITTÄMINEN

8.1 Haavi-Heikki laitteisto

Haavi-Heikki prototyyppi on rakennettu lautalle (2,4 m x 3 m). Laudoista rakennettu lautan runko kelluu vedessä sen alle kiinnitettyjen muoviponttonien (2 kpl) avulla. Lautan päälle on sijoitettu mm. aurinkopaneelit, tuulivoimala, suodatinlaatikot sekä tukiteline vedessä olevalle uppopumpulle (kuva 16). Pumppu pumppaa suodattimiin vettä noin 1 m³/h. Akkujen ansiosta laitteiston oletetaan toimivan vuorokauden ympäri aurinko- ja tuulivoimalla. Aurinkopaneelien tuottamaa sähkön määrää pystyy seuraamaan reaaliaikaisesti puhelimen sovelluksella. (Koulutuskeskus Salpaus, 2021a.)



Kuva 16. Haavi-Heikki laitteiston sähkökaavio. (Koulutuskeskus Salpaus, 2021b.)

Pilottilaitteistossa on päällekkäin neljä punaista suodatinlaatikkoa (kuvasta 17 puuttuu yksi), joiden pohjalla olevien metalliverkkojen silmäkoko vaihtelee 0,5–5,0 mm. Ylimmän suodatinlaatikon verkon silmäkoko on 5,0 mm ja alimman 0,5 mm. Neljän suodatinlaatikon alla on vielä harmaa umpinainen laatikko, josta suodatettu vesi virtaa takaisin vesistöön. (Sakala, 2022.) Testikäytössä laite suodatti 1,8 ja 3,2 mm kokoisia mikropartikkeleita hulevesialtaan vedestä. (Koulutuskeskus Salpaus, 2021b.)



Kuva 17. Haavi-Heikki -laitteiston rakennekuva. (Koulutuskeskus Salpaus, 2021b.)

Haavi-Heikki prototyypilaitteiston komponentit (taulukko 2) ovat kaikki rautakaupasta hankittavia. Tavoitteena laitteiston suunnittelussa onkin ollut sen komponenttien hankintojen sekä kokoonpanon helppous. Prototyypilaitteisto painaa kokonaisuudessaan noin 600 kg ja hintaa sille tuli noin 6 000–10 000 euroa. Lisäkustannuksia syntyy lautan siirrosta ja komponenttien kuljetuksesta. (Veirto, 2021.)

Taulukko 2. Haavi-Heikki laitteiston komponentit. (Koulutuskeskus Salpaus, 2021b.)

Komponentti	Lisätieto
Tuulivoimala ja masto	500 W 12V/24V
Tuulivoimalan lataussäädin	650 W
Aurinkopaneelit ja säädettävä kiinnike	285 W
Aurinkopaneelien lataussäädin	150V max./70A
Invertteri	12 V 1200 VA
Akut	12 V 270 Ah
Ryhmäkeskus	-
Lautan tarvikkeet	2 kpl ponttonia puutavaraa
Vesipumppu	135 W
Letku ja hana	-
Suodatinlaatikot ja teline	4 kpl reiällistä leipomolaatikkaa 1 kpl laatikka umpinaisella pohjalla
Suodattimet (metalliverkot)	4 kpl metalliverkkoa Silmäkoko 0,5–5,0 mm
Sähköasennustarvikkeet	-
Kaapelit, kytkimet, sulakkeet	-

8.2 Laitteiston kehityskohteet

- Tilavuusvirtamittarin lisäys, joka mahdollistaa mikromuovien pitoisuuden laskemisen käsitellyn vesimäärän yksikköä kohti
- Reaaliaikaisen datankeruun mahdollisuudet
- Automatiikan kehitys laitteiston suodatuksen valvontaan (ilmoitus jos suodatin tukossa) ja näytteenottoon
- Lautan sähkölaitteiden vesitiiviys? (komponenttien IP-luokitus)
- Laitteiston muovimateriaalit aiheuttavat kontaminaatoriskiä näytteille; muovisia komponentteja tulisi välttää mahdollisuuksien mukaan (muoviletku, pumppu, leipomolaatikot).
- Tällä hetkellä, jos metalliverkot menevät tukkoon, suodatinlaatikot tulvivat ja osa vedestä valuu ulos
- Ankkurointi? Kiinnitys? Miten estetään ulkopuolisten pääsy sekä laitteistoon kajoaminen?
- Uusiutuvan energian ratkaisuihin muutoksia
- Pienempi silmäkoko alimmalle suodattimelle, tällä hetkellä 0,5 mm (mikromuovien kokohaarukka 1 µm- 5 mm)
- Yli 5 mm roskat ja partikkelit suodattava komponentti ennen letkua
- Pumpun tehon lisäys (tällä hetkellä pumppaa vettä vain n. 1 m³/h)
- Pumpattava vesinäyte tulisi ottaa noin 0,5 m syvyydestä joessa tai purossa (ISO 5667-17:2008 "Water quality -- Sampling -- Part 17: Guidance on sampling of bulk suspended solids")

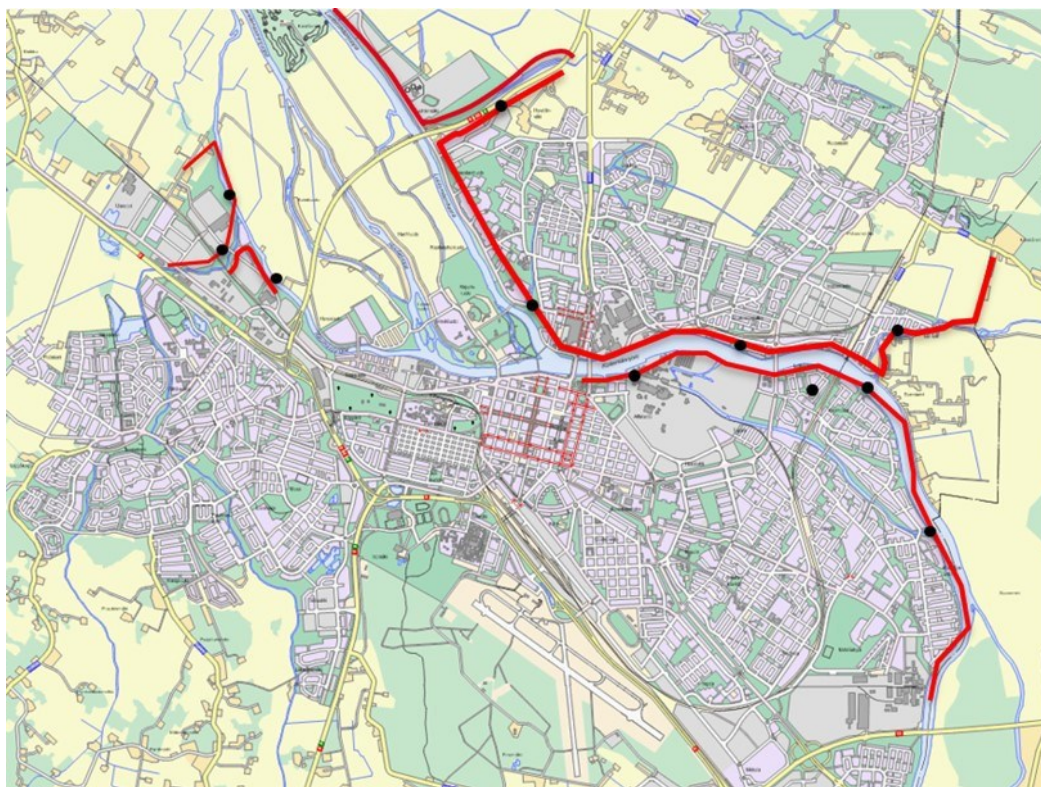
8.2.1 Aurinkopaneelien optimointi

Aurinkopaneelien tuottoon vaikuttavat varjostavat tekijät, paneelien suuntaus sekä paneelien asennuskulma. Pienikin varjostus voi heikentää paneelien sähköntuotantoa, joten varjostavien tekijöiden määrä tulee minimoida laitteiston sijaintia miettiessä. Varjostavia tekijöitä voivat olla esimerkiksi lähistöllä olevat puut ja rakennukset. Tuoton optimoinnin vuoksi lautta tulisi sijoittaa vesistöön siten, että sen päällä olevat paneelit on suunnattu etelään. Suomessa paneelien optimaalinen kallistuskulma tuotannon kannalta on 45 astetta, joten paneelit suositellaan tähän kulmaan asennettaviksi. (Motiva, 2022.)

8.3 Laitteiston sijoitus

Porissa on käytössä erillisviemäröinti, joka tarkoittaa, että kaupungin viemäriverkosto on jaettu erikseen jätevesiviemäriin ja hulevesiviemäriin. Hulevedet ovat yksi merkittävimmistä mikromuovien kulkureiteistä ympäristöön. Porissa hulevesiviemäriä on yhteensä noin 370 kilometriä. (Porin kaupunki, n.d.)

Kaupungin tulvaherkkyyden vuoksi Kokemäenjoen varrelle on rakennettu useita tulvapatoja, jotka suojaavat asuinalueita tulvimiselta joen vedenkorkeuden noustessa (Pelkonen, 2021). Tulvapatojen vuoksi kaupungin hulevesiä ei pystytä purkamaan suoraan jokeen, joten hulevedet pumpataan jokeen patojen yli. Ennen osaa hulevesipumppaamoista (kuva 18) on avoin oja tai kaupunkipuro, jossa voisi ajatella toteuttaa mikromuovien keräystä ja näytteenottoa. Purkuputken jälkeen ei välttämättä ole varmuutta siitä, mistä mahdolliset mikromuovit ovat lähtöisin. Myös mikromuovipitoisuudet laimenevat huleveden sekoittuessa jokeen. Ennen hulevesipumppaamoja on välvät, jotka suodattavat noin 5 cm suuremmat roskat ja kasvinosat pois. Kaikki 5 cm pienemmät partikkelit menevät veden mukana pumppaamoille eli myös mikromuovit. (Siirtola, 2022.)



Kuva 18. Tulvapadot (punainen) ja hulevesipumppaamot (musta) Porin keskustassa.

Sijainnissa huomioitava ja minimoitava mahdollinen aurinkopaneelien varjostus. Lisäksi lautta on sijoitettava siten, että paneelit ovat suunnattuna etelään maksimaalisen sähköntuoton saamiseksi.

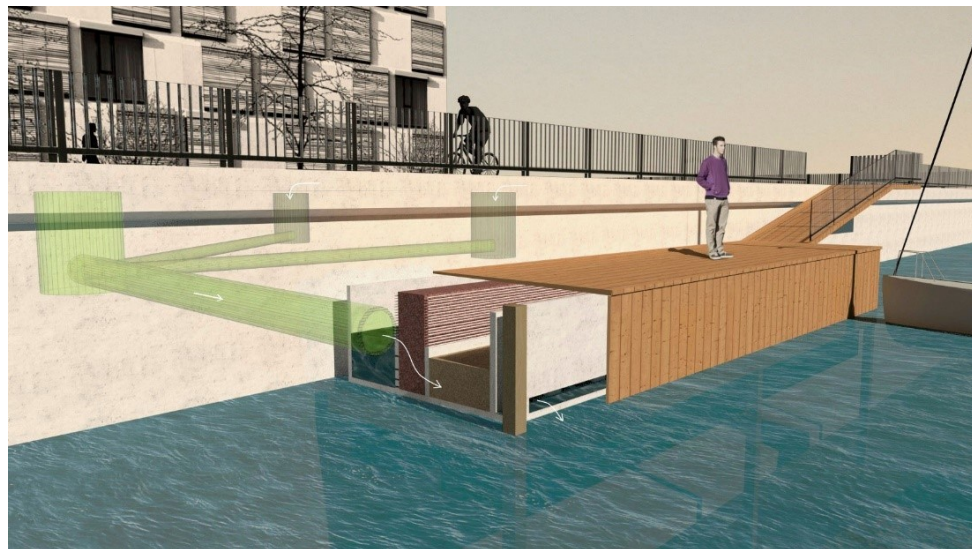
9 TAIVALLAHDEN SUODATUSARKKU, HELSINGIN KAUPUNKI

Vuonna 2019, Helsingin kaupunki pilotoi yhdessä rakennusalan konsulttiyritys WSP Finland Oy:n kanssa mikromuovien suodattamista maahan upotetun suodatusarkun

avulla. Suodatusarkku on sijoitettu Taivallahteen, jossa on huleveden purkupaikka mereen. Hulevesi tulee pääosin vilkkaasti liikennöidyltä Mechelininkadulta, jonka sisältämät mikromuovit koostuvat arviointien mukaan suurimmaksi osaksi liikennemerkitöjen massoista ja maaleista, kulkuneuvojen renkaista sekä pieneksi hajoavista roskista.

Suodatusarkku saapui Taivallahteen valmiina elementteinä, ja se koostuu betonisesta rungosta, kierrätysmuovista ja metallista rakennetuista kehikoista sekä erilaisista suodatinmateriaaleista. Suodatusarkun rakenne on kolmiosainen. Ensimmäisessä osassa on viivytytys- ja laskeutusallas tasaamassa virtausta. Toisessa osassa hulevesi kulkee karkeasuodattimena toimivan kevytsoran läpi, joka kerää suurimmat roskat vedestä. Kolmas osa kerää isoimman osan mikromuovista hienosuodattimiin, jotka koostuvat biohiilestä ja suodatushiekkasta, joiden suodatustehoa pilotissa testattiin.

Pilottia varten suunniteltiin ja valmistettiin omat näytteenottolaitteet, sillä hulevesien mikromuovien tutkiminen on vasta alussa, eikä sopivaa laitteistoa ole helppo löytää. Pilotissa osoittautui, että hiekka oli hieman biohiiltä parempi suodatusmateriaali. Sateen aikana hiekka keräsi 95–100 %:a mikromuoveista, kun taas biohiili keräsi 92–100 %:a. Näiden lisäksi myös muita kiintoaineita saatiin suodatettua. (Malve, 2020)



Kuva 19. Kuvituskuva rantaviivan lähelle asennetusta suodatusarkusta.

9.1 Suodatusarkun tehokkuus hulevesien valumisen yhteydessä

Pilotin tuloksia kerättiin kolmen sadekerran aikana. Mikromuovien keskivertopitoisuus (partikkelikoot välillä 90–5000 μm) oli 1.5 mikromuovipartikkelia (MP) litraa (L) kohden hiekkasuodattimen läpi ja 2.2 MP/L kohden biohiilisuodattimen läpi. Kun tulevan huleveden mikromuovipitoisuus oli keskimäärin 29 MP/L, suodatusarkun suodatustehokkuudeksi tuli 96 %:a hiekkasuodattimen ja 93 %:a biohiilisuodattimen osalta. Mikromuovien koko vaikutti myös suodatustehokkuuteen. Tehokkaimmin suodatusarkkuun jäivät yli 1000 μm :n partikkelit, jolloin saatiin poistettua 100 %:a mikromuovipartikkeleista. (Pankkonen, 2020, s. 39)

10 EROTUSMENETELMIÄ MIKROMUOVIN POISTAMISEEN VEDESTÄ

Alla luetellaan muutamia mahdollisia erotuskeinoja mikromuovin poistamiseen vedestä. Osassa on potentiaalia erotella mikromuovia jätevedenpuhdistamoilla.

10.1 Membraanibioreaktori

Membraanireaktorissa käytetään biologista katalyyttiä suodattamaan katalysoitua vettä membraanin läpi. Membraanikalvo voi koostua pienistä, esimerkiksi 1–10 mikrometrin kokoisista huokosista, ja suodatus perustuu huokosten läpi virtaavan veden paine-eroon. Vesi kulkee kalvon läpi, ja huokosia suuremmat partikkelit jäävät kalvon konsentraattia sisältävälle puolelle. (Haapala, 2020, s. 11)

10.2 Kiekkosuodatus

Kiekkosuodatin sisältää suodatinkiekkoja, jotka erottelevat partikkelit kiintoaineesta. Prosessoitava vesi kulkee kiekkoissa oleviin suodatinlohkoihin, joihin kiintoaine kertyy suodatinpaneelin pinnalle. Pintaan kertyvä kiintoaine hidastaa suodatusta, joka taas aiheuttaa veden määrän nousua laitteen sisällä. Kun veden pinta on riittävän ylhäällä, suodattimen taustapesurit aktivoituvat ja huuhtelee kertyneet kiintoaineet pois laitteesta. (Haapala, 2020, s. 12)

10.3 Hiekkasuodatus

Hiekkasuodattimessa vesi suodatetaan painovoiman avulla hiekkakerroksen läpi. Suodattimessa on hiekan lisäksi myös kerros kvartssia tai soraa. Veden sisältämä kiinteä aines jää hiekkajyvien väliin muodostuviin huokosiin ja imeytyy niiden pinnalle, kun suodatettu vesi virtaa eteenpäin suodatinlaitteiston pohjan kautta. Jyvien väleihin jäänyt kiinteä aine puhdistetaan taustapesusysteemillä, joka sijaitsee laitteen alaosassa. (Haapala, 2020, s. 14)

10.4 Korkeapaine-flotaatio

Korkeapaine-flotaatio on veden käsittelymenetelmä, jossa vettä käsitellään kemikaaleilla, jotta kiintoainepartikkelit muodostavat flokkeja. Käsitelty vesi kyllästetään ilmalla korkeassa paineessa ja pumpataan sitten ilmanpaineessa olevaan flotaatioaltaaseen. Alhaalla oleva ilma alkaa muodostua kupliksi alentuneen paineen

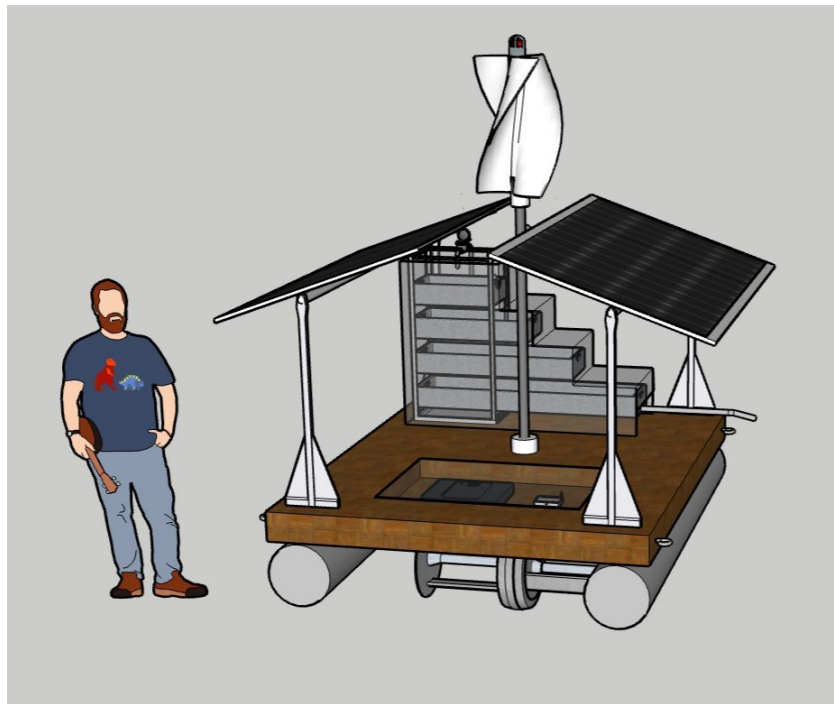
vuoksi ja kiintoainepartikkelit tarttuvat näihin kupliin ja kelluvat nesteen pinnalle. Lopuksi muodostunut liete erotetaan vedestä. Korkeapaineflotaation on osoitettu olevan tehokas menetelmä mikromuovin erottamisessa vedestä, ja käyttämällä tiettyä saostusainetta pystytään erottamaan jopa 95 % mikromuovipartikkeleista vedestä. (Haapala, 2020, s. 15)

10.5 Sähkökoagulaatio

Sähkökemiallinen koagulointi on elektrolyysiprosessi, jossa anodimetalli liukenee vesivirtaan samalla kun katodilla muodostuu vetykaasua ja hydroksidi-ioneja. Tämä prosessi johtaa positiivisesti varautuneiden metalli-ionien (rauta/alumiini) muodostumiseen, jotka reagoivat hydroksidi-ionien kanssa muodostaen metallihydroksideja, jotka horjuttavat nesteen sisältämien kiintoainepartikkelien pintavarauksia. Nesteeseen kehittyy koagulanttien muodostama lietepatja, johon kiintoaines jää kiinni, ja lopuksi katodilla muodostuvat vetykuplat nostavat lietteen pintaan, jolloin se voidaan erottaa nesteestä. Sähkökoaguloinnilla on saavutettu 85–99 %:n erotustehokkuus mikromuovin poistamisessa jätevedenpuhdistamoilla, ja tämä tehokkuus ei ole merkittävästi riippuvainen käsiteltävän veden pH-arvosta. (Haapala, 2020, s. 16)

11 KONSEPTI MIKROMUOVIEEN POISTAMISEEN VEDESTÄ

Hankkeessa luotu uusi konsepti mikromuovien poistamiseen vedestä on kehitelty, tässä aiemmin esitelty, Haavi-Heikki –laitteiston pohjalta. Uudessa konseptissa on kiinnitetty huomiota muun muassa laitteen materiaalivalintoihin, käytännöllisyyteen sekä langattomien yhteyksien lisäämiseen esimerkiksi laitteen huoltotarpeita varten. Uudessa konseptissa pyritään hyödyntämään mahdollisimman paljon kierrätysmateriaalia, ja suurin osa laitteesta on rosteria aiempien muoviosien sijasta. Tällä tavoin laitteen osat eivät aiheuta kontaminaatoriskiä mikromuovien keräyksessä ja laitteen kustannukset eivät nouse aiempaa Haavi-Heikki –laitteistoa huomattavasti korkeammaksi.



Kuva 20. 3D-kuva uudesta laitemallista.

Uuden laitteen voi ankkuroida käytännössä mihin tahansa, ja laite toimii itsenäisesti ilman ihmisen työpanosta. Laite on mahdollista käynnistää ja sammuttaa etänä, sekä laitteen tukkeutumisen voi huomata joko päällimmäisen laatikon etäluettavasta mittarista, joka ilmoittaa vedenpinnan nousemisesta yli sallitun tason, tai seuraamalla tilannetta laitteeseen asennetun valvontakameran kautta. Valvontakameran välityksellä voidaan myös valvoa laitteen ns. "koskemattomuutta"

Uuden konseptin laitteeseen asennetaan virtausmittari, jolloin voidaan laskea mikromuovipitoisuudet kerättyä vesimäärää kohden sekä seurata mikromuovimäärän vaihtelua eri vesialueilla.

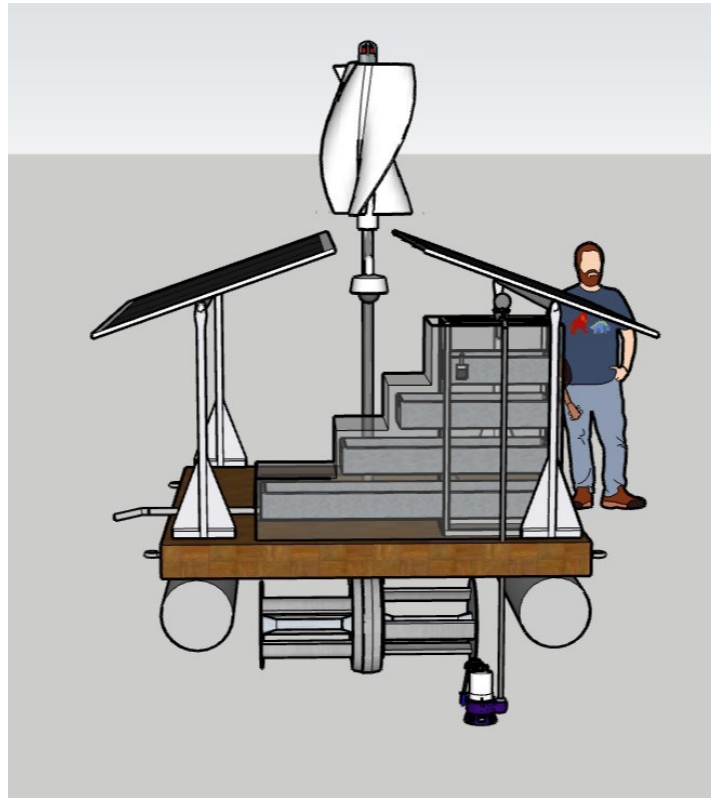
Lisätty älykäs hälytysjärjestelmä, joka ilmoittaa, mikäli suodattimet ovat tukossa tai täynnä. Hälyttää myös luvattomista vieraista (valvontakamera?)

Lisääntynyttä energiantarvetta, sekä myös varavirtalähteeksi, laitteen pohjaan asennetaan virtausgeneraattori, joka tuottaa laitteistolle energiaa veden virtauksesta. Laite tullaan asentamaan virtaavaan kohtaan joessa, joten generaattori tuottaa aina energiaa. Aurinkopaneelien määrää on kasvatettu Haavi-Heikki-laitteistoon verrattuna sekä niiden kulma on asetettu optimaalisemmaksi, jolloin aurinkoenergiaa saadaan kerättyä mahdollisimman paljon valoisana aikana. Tuulivoimajeneraattori on vertikaalinen, joka säästää tilaa lautalla ja on ulkonäöltään modernimpi kuin horisontaalinen turbiini.

Laitteen akusto ja etäohjausta sekä -seurantaa varten tarvittava modeemi on asennettu lautan lattian sisään vesitiiviiseen huoltotilaan.

Muoviset leipälaatikot korvataan rosterisilla laboratorioseuloilla, joissa on aiempaa pienempi silmäkoko pienempien mikromuovien talteenottoon. Seulat asetetaan

pyramidin malliseen muotoon, jotta mikromuoveista saadaan mahdollisimman iso osa täyteen, vaikka joku seuloista olisikin hetkellisesti täynnä. Suodatusyksikkö suojataan kovamuovisella ja lukittavalla kehikolla. Puhdas, käsitelty vesi ohjataan poistoletkun kautta laitteen sivusta takaisin veteen.



Kuva 21. 3D-kuva uudesta laitemallista.

Laitteen keräämää mikromuovia voitaisiin analysoida Satakunnan ammattikorkeakoulun tiloissa, jossa kerätyt muovimateriaalit voidaan käsitellä ja päästä mahdollisesti jäljille, mistä mikromuovi on alun perin tullut veteen.

12 JOHTOPÄÄTÖKSET

Mikromuovien esiintymistä, kulkeutumista sekä joutumista ihmiselimistöön ei selvästikään olla tutkittu vielä tarpeeksi. Mikromuovit ympäristössä on luonteeltaan hyvin merkittävä ja enenevässä määrin lisääntyvä riskitekijä. Jo tällä hetkellä mikromuoveja esiintyy kaikkialla vesistöissä sekä vesistöjen eliöstöissä. Mitä enemmän muovia tuotetaan ja kulutetaan, sitä enemmän sitä päätyy vesistöihin ja muualle ympäristöön. Mikromuoveja koskevat ongelmat ja haitat ympäristössä jatkavat yhä kasvuaan. Yleisesti ottaen muoveja päätyy ympäristöön erityisesti niiden elinkaaren loppuvaiheessa muodostuvina roskina. Lisäksi muovit ovat ympäristössä erittäin pysyviä.

Lisäksi vaikuttaa myös siltä, että mikromuovien, lähteet, niiden kulkeutumistiet ja -reitit ovat yhä lähinnä laskennallisten arvioiden varassa ja tarve tarkemmin tutkittua ja mitattua tietoa, jotta päästäisiin paremmin vaikuttamaan itse ongelman syntyyn ja sen juurisyihin. Myöskin lisää tietoa tarvitaan pienten muovihiukkasten käyttäytymisestä niin ihmisten kuin muun eliöstön elimistössä.

Myöskään tähän aihealueeseen liittyvä standardointi ei ole vielä riittävän pitkälle kehittynyttä. Eli tosin sanoen, mikromuovien näytteenotto- ja analyysimenetelmiä on edelleen välttämätöntä kehittää, harmonisoida ja standardisoida, jotta tuloksia pystyttäisiin paremmin vertailemaan eri tutkimusten välillä.

Myös tässä yhteydessä on hyvä lainata eräässä SYKE:n raportissa mainittua ja yhä edelleen varsin merkittävää asiaan liittyvää seikkaa: “Jätteen synnyn ehkäisy ja kiertotalouden optimointi on tärkeää muovien aiheuttamien ympäristövaikutusten pitämiseksi mahdollisimman pieninä. Vuonna 2018 laadittu Muovitielkartta on esittänyt useita toimenpide-ehdotuksia muovien käytön vähentämiseksi, korvaamiseksi sekä kierrätyksen tehostamiseksi. Ekologisesti kestävä ja turvallisuusnäkökulmat huomioiva tuotesuunnittelu on osaltaan avainasemassa muovien ilmasto- ja ympäristöpäästöjen vähentämisessä.

Vaikka muoveja ja niiden vaikutuksiin kohdistuvaa sääntelyä on viime vuosina lisätty, on puutteita edelleen havaittavissa. Ensisijaisena hallintakeinona voidaan kuitenkin nähdä muovien ympäristöpäästöjen estäminen. Eräs keskeinen ongelma kuitenkin on, että suoria ohjauskeinoja sekundääristen mikromuovien syntymisen ehkäisemiseksi ei ole. Muovin ollessa edelleen keskeisessä roolissa useissa yhteiskunnan toiminnoissa, tarvitaan jatkossa edelleen monen tasoisia hallintakeinoja muovien aiheuttamien ympäristö- ja terveysvaikutusten vähentämiseksi.” (Fjäder ym., 2022, s. 4)

LÄHTEET

Raportissa käytetty APA 7 SAMK -lähdeviittausohjetta.

Amato-Lourenço, L. F., Carvalho-Oliveira, R., Júnior, G. R., dos Santos Galvão, L., Ando, R. A. & Mauad, T. (2021). Presence of airborne microplastics in human lung tissue. *Science Direct*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126124>

Antikainen, E. & Koskenlahti, A. (2019). Hulevesisuodattimen tutkimus. <https://static1.squarespace.com/static/625e9a3d6b414b0ba4d9c015/t/6272521e8b60950f704d01ec/1651659296273/Hulevesisuodattimen-testausraportti-Savonia-1.pdf>

Arthur, C., Baker, J. & Bamford, H. (2009). Proceedings of the International Research Workshop on the Occurrence, Effects and Fate of Microplastic Marine Debris. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-30. https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/2509/noaa_2509_DS1.pdf?

Asamoah, B. O., Kanyathare, B., Roussey, M. & Peiponen, K-E. (2019). A prototype of a portable optical sensor for the detection of transparent and translucent microplastics in freshwater. *Science Direct*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.114>

Audrézet, F., Zaiko, A., Lear, G., Wood, S. A., Tremblay, L. A. & Pochon, X. (2021). Biosecurity implications of drifting marine plastic debris: Current knowledge and future research. *Science Direct*. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111835>

Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V. & Uricchio, V. F. (2020). A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. National Library of Medicine. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>

Clearbot. 2022. Intelligent Trash & Oil Clean Up. Haettu 17.6.2022 osoitteesta <https://www.clearbot.org/usecase>

Clewat. 2022. Collection of Plastic Waste. Haettu 17.6.2022 osoitteesta <https://clewat.com/en/collection-of-plastic-waste/>

Colson, B. C. & Michel, A. P. M. (2021). Flow-Through Quantification of Microplastics Using Impedance Spectroscopy. American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acssensors.0c02223>

Cora Ball. (2022). A human-scale solution to microfiber pollution. <https://www.coraball.com/products/cora-ball>

Cutroneo, L., Reboa, A., Besio, G., Borgogno, F., Canesi, L., Canuto, S., Dara, M., Enrile, F., Forioso, I., Greco, G., Lenoble, V., Malatesta, A., Mounier, S.,

Petrillo, M., Rovetta, R., Stocchino, A., Tesan, J., Vagge G. & Capello, M. (2020). Microplastics in seawater: sampling strategies, laboratory methodologies, and identification techniques applied to port environment. Springer Link. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07783-8>

Danopoulos, E., Twiddy, M., West, R. & Rotchell, J. M. (2022). A rapid review and meta-regression analyses of the toxicological impacts of microplastic exposure in human cells. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127861>

Draper, 2020. Microplastic Sensor. Haettu 16.6.2022 osoitteesta <https://www.draper.com/explore-solutions/microplastics-sensor>

ECHA. (n.d.). Mikromuovit. Haettu 10.8.2022 osoitteesta <https://echa.europa.eu/fi/hot-topics/microplastics>

Ecodna.art. (21.3.2019). Seabin Project for Cleaner Marinas Cleaner Oceans. Haettu 17.6.2022 osoitteesta <https://ecodna.art/seabin-project-for-cleaner-marinas-cleaner-oceans/>

Electrolux. (2022). Electrolux launches microplastic filter to help tackle rising tide of plastic pollution. Electrolux Group. <https://www.electroluxgroup.com/en/electrolux-launches-microplastic-filter-to-help-tackle-rising-tide-of-plastic-pollution-34151/>

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2020/2184, annettu 16 päivänä joulukuuta 2020, ihmisten käyttöön tarkoitettujen veden laadusta. EUVL L 435, 23.12.2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:32020L2184&qid=1660136493970&from=EN>

European Commission. (2019). Zero pollution in drinking water: endocrine disrupting chemicals on new watch list of pollutants. Haettu 10.8.2022 osoitteesta https://environment.ec.europa.eu/news/zero-pollution-drinking-water-endocrine-disrupting-chemicals-new-watch-list-pollutants-2022-01-19_en

Fjäder, P., Korkalainen, M., Kauppi, S., Lehtiniemi, M., Salminen, J., Selonen, S., Setälä, O., Sillanpää, M., Sorvari, J., Suikkanen, S., Talvitie, J., Turunen, T., Virkkunen, H. & Ala-Ketola, U. (2022). Muovien haitalliset ympäristö- ja terveysvaikutukset. Suomen ympäristökeskus (SYKE). <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-5480-5>

Frias, J.P.G.L. & Nash, R. (2019). Microplastics: Finding a consensus on the definition. Science Direct. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.022>

GESAMP. (2019). Guidelines for the monitoring and assessment of plastic litter in the ocean. United Nations Environment Programme (UNEP), 9-11. <http://www.gesamp.org/publications/guidelines-for-the-monitoring-and-assessment-of-plastic-litter-in-the-ocean>

Guppyfriend. (2022). Your solution against microplastics. <https://en.guppyfriend.com/#:~:text=the%20food%20chain.-,The%20GUPPYFRIEND%20Washing%20Bag,t%20lose%20any%20fibres%20itsel>
f

Haapala, T. (2020). Mikromuovien poistaminen vedestä [Kandidaatintyö, Lappeenrantaan-Lahden teknillinen yliopisto LUT]. LUTpub. https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/161157/Kandidaatintyo_Haapala_Teemu.pdf?sequence=1

Hartmann, N. B., Hüffer, T., Thompson, R. C., Hassellöv, M., Verschoor, A., Daugaard, A. E., Rist, S., Karlsson, T., Brennholt, N., Cole, M., Herrling, M. P., Hess, M. C., Ivleva, N. P., Lusher, A. L. & Wagner, M. (2019). Are We Speaking the Same Language? Recommendations for a Definition and Categorization Framework for Plastic Debris. ACS Publications. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05297>

ISO/DIS 24187:2021(E). (2021). Principles for the analysis of plastics and microplastics present in the environment. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:24187:dis:ed-1:v1:en>

Kajaanin yliopistokeskus. 2022. Vesien mikromuovien reaaliaikaista mittaamista varten kehitteille optinen mittauslaitteisto. Haettu 16.6.2022 osoitteesta <https://www.oulu.fi/fi/kajaanin-yliopistokeskus/uutiset/vesien-mikromuovien-reaaliaikaista-mittaamista-varten-kehitteille-optinen-mittauslaitteisto>

Koulutuskeskus Salpaus. (2021a). Yksinkertainen on kaunista- Haavi-Heikki tekee likaisen työn ympäristöpääkaupungin hengessä. ePressi. www.epressi.com/tiedotteet/ymparisto-ja-luonto/yksinkertainen-on-kaunista-haavi-heikki-tekee-likaisen-tyon-ymparistopaakaupungin-hengessa.html#.YMwvOODH0iE.linkedin

Koulutuskeskus Salpaus. (2021b). Haavi-Heikki – aurinko- ja tuulienergialla toimiva laitteisto mikromuovien keräämiseen. <https://www.salpaus.fi/wp-content/uploads/2021/12/Haavi-Heikki-lopputuote-2021-12-17.pdf>

Kwon, W., Kim, D., Kim, H., Jeong, S. W., Lee, S., Kim, H., Lee, Y., Kwon, M. K., Hwang, J., Han, J. E., Park, J., Lee, S. & Choi, S. (2022). Microglial phagocytosis of polystyrene microplastics results in immune alteration and apoptosis in vitro and in vivo. Science Direct. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150817>

Lahti Aqua. (2020). Lahti ottaa ensimmäisenä Suomessa käyttöön tekonurmikenttien Rouhesiepparit. <https://www.lahtiaqua.fi/uutiset/lahti-ottaa-ensimmaisena-suomessa-kayttoon-tekonurmikenttien-rouhesiepparit/>

Leslie, H. A., van Velzen, M.J.M., Brandsma, S. H., Vethaak, A. D., Garcia-Vallejo, J. J. & Lamoree, M. H. (2022). Discovery and quantification of plastic particle

pollution in human blood. Science Direct.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107199>

Lusher, A. L., Welden, N. A., Sobral, P. & Cole, M. (2017). Sampling, isolating and identifying microplastics ingested by fish and invertebrates. Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/C6AY02415G>

Löder, M. G. J. & Gerdts, G. (2015). Methodology Used for the Detection and Identification of Microplastics-A Critical Appraisal. Springer Link.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_8

Malve Riitta. (2020) Hulevesien mikromuovit pysähtyvät suodatusarkkuun. Haettu 12.9.2023 osoitteesta <https://rakennustaito.fi/hulevesien-mikromuovit-pysahtyvat-suodatusarkkuun/>

Motiva. (2022). Aurinkopaneelien asentaminen.
https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/hankinta_ja_asennus/aurinkopaneelien_asentaminen

Muoviteollisuus ry. (n.d.-a). Muovin määrittely. Haettu 10.8.2022 osoitteesta
https://www.plastics.fi/fin/muovitieto/muovit/muovin_maarittely/

Muoviteollisuus ry. (n.d.-b). Muovit ovat monipuolinen materiaaliryhmä. Haettu 10.8.2022 osoitteesta <https://www.plastics.fi/fin/muovitieto/muovit/>

Pankkonen, P. (2020). “Urban stormwater microplastics – Characteristics and removal using a developed filtration system” [pro gradu -työ, Aalto yliopisto]. Aaltodoc.
https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/44294/master_Pankkonen_Pietu_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Pelkonen, J. (21.7.2021). Porin merkittävä tulvariski nousi jälleen esille Keski-Euroopan tulvien vuoksi – tärkeä tulvasuojeluhanke makaa hallinto-oikeudessa.
<https://yle.fi/uutiset/3-12029081>

Pizzurro, F., Recchi, S., Nerone, E., Salini, R. & Barile, N.B. (2022). Accumulation Evaluation of Potential Microplastic Particles in *Mytilus galloprovincialis* from the Goro Sacca (Adriatic Sea, Italy). MDPI Open Access Journals.
<https://doi.org/10.3390/microplastics1020022>

Porin kaupunki. (n.d.). Vesijohto- ja viemäriverkosto. Haettu 11.8.2022 osoitteesta
<https://www.pori.fi/asuminen-ja-ymparisto/vesihuolto/laatu-ja-ymparisto/vesijohto-ja-viemariverkosto>

Prata, J. C., Costa, J. P., Duarte, A. C. & Rocha-Santos, T. (2019). Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: a critical review. Science Direct. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.029>

Prata, J. C., Costa, J. P., Lopes, I., Duarte, A. C. & Rocha-Santos, T. (2020). Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects. Science Direct. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134455>

Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V., Carnevali, O., Papa, F., Rongioletti, M.C.A., Baiocco, F., Draghi, S., D'Amore, E., Rinaldo, D., Matta, M., Plasticenta, E. G. (2021). First evidence of microplastics in human placenta. Science Direct. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>

Rahman, A., Sarkar, A., Yadav, O. P., Achari, G. & Slobodnik, J. (2021). Potential human health risks due to environmental exposure to nano- and microplastics and knowledge gaps: A scoping review. Science Direct. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143872>

Sakala, A. (15.6.2022). Sähköposti Haavi-Heikki protolaitteiston suodattimien suunnittelijalta.

Senathirajah, K., Attwood, S., Bhagwat, G., Carbery, M., Wilson, S. & Palanisami, T. (2021). Estimation of the mass of microplastics ingested – A pivotal first step towards human health risk assessment. Science Direct. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124004>

Setälä, O., Hakala, O., Lehtiniemi, M., Pankkonen, P., Sainio, E. & Tirroniemi, J. (2022). Kumirouheen kulkeutuminen jalkapallokentiltä ympäristöön. Suomen Ympäristökeskus. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-5487-4>

Setälä, O. & Suikkanen, S. (2020). Suomen merialueen roskaantumisen lähteet. Suomen ympäristökeskus (SYKE). <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-5140-8>

Siirtola, A. (16.6.2022). Sähköposti Porin kaupungin hulevesiasiantuntijalta.

Sillanpää, M., Talvitie, J., Lehtiniemi, M., Setälä, O. & Kiviranta, H. (2018). Esiselvitys mikromuovien esiintyvyydestä Suomen talousvesissä. Vesilaitosyhdistys (VVY). https://www.vvy.fi/site/assets/files/6785/talousveden_mikromuovit_raportti_www-sivuille.pdf

Singh, S., Trushna, T., Kalyanasundaram, M., Tamhankar, A. J. & Diwan, V. (2022). Microplastics in drinking water: a macro issue. International Water Association Publishing. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.189>

Sisanth, K. S., Thomas, M.G., Abraham, J. & Thomas, S. (2017). 1 - General introduction to rubber compounding. Science Direct. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100409-8.00001-2>

Smith, M., Love, D. C., Rochman, C. M. & Neff, R. A. (2018). Microplastics in Seafood and the Implications for Human Health. *Current Environmental Health Reports*. <https://doi.org/10.1007/s40572-018-0206-z>

Soininen S., Haatanen N. & Pulkkinen P. (2020). Metsä, ympäristö ja energia: soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. *Kaakkois-suomen ammattikorkeakoulu*, 43–44. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-344-295-5>

Speight, J. G. (2020). Monomers, polymers, and plastics. *Science Direct*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809923-0.00014-X>

Sprout Studios, 2021. Draper: Microplastic-Sensing Drone. Haettu 16.6.2022 osoitteesta <https://sprout.cc/work/projects/microplastic-sensing-drone/>

Suomen Uusiomuovi Oy. (n.d.). Muovien materiaalimerkit. Haettu 10.8.2022 osoitteesta https://www.uusiomuovi.fi/fin/pakkaus_kierrataa/muovien_kierratys/muovien_materiaalimerkit/

SYKE. (2020a). Mikromuoveja löytyy kaikkialta vesistöissä, määrät vesieliöissä ja kaloissa vaihtelevat. Suomen ympäristökeskuksen tiedote. [https://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Tiedotteet/Mikromuoveja_loytyy_kaikkialta_vesistois\(58322\)](https://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Tiedotteet/Mikromuoveja_loytyy_kaikkialta_vesistois(58322))

SYKE. (2020b). Tieliikenne on merkittävä mikromuovin lähde. Suomen ympäristökeskuksen tiedote. [https://www.syke.fi/fi-FI/Tutkimus_kehittaminen/Tieliikenne_on_merkittava_mikromuovin_la\(55912\)](https://www.syke.fi/fi-FI/Tutkimus_kehittaminen/Tieliikenne_on_merkittava_mikromuovin_la(55912))

Siegfried, M., Koelmans, A. A., Besseling, E. & Kroeze, C. (2017). Export of microplastics from land to sea. A modelling approach. *Science Direct*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.10.011>

Talvitie, J. (12.4.2019). Jätevedenpuhdistamot ja hulevedet – mitä tiedetään ja mitä pitäisi tietää? [diaesitys]. Suomen meriympäristön roskaantumisen – sidosryhmäseminaari. Suomen ympäristökeskus (SYKE). <https://www.syke.fi/download/noname/%7B843CD233-8FE5-4DAF-9BC0-F6DFDB453C87%7D/145803>

Talvitie, J., Mikola, A., Setälä, O. & Arto Koistinen. (2017). Solutions to microplastic pollution-Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies. *Science Direct*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.005>

The Great Bubble Barrier. 2022. The Bubble Barrier. Haettu 17.6.2022 osoitteesta <https://thegreatbubblebarrier.com/technology/>

The Seabin Project. 2022. Seabin V5. Haettu 17.6.2022 osoitteesta <https://seabinproject.com/the-seabin-v5/>

Tukes. (n.d.). Kertakäyttöiset muovituotteet, SUP. Haettu 10.8.2022 osoitteesta <https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/kertakayttoiset-muovituotteet-sup#6b7dea9b>

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2020. EU:n aluekehitysrahaston (EAKR) rahoittaman hankkeen kuvaus: Reaaliaikaisen mikromuovien mittausjärjestelmän kehitys ja testaus REMMI. Haettu 16.6.2022 osoitteesta <https://www.eura2014.fi/rrtiepa/projekti.php?projektikoodi=A76390>

UNEP. (2018). Legal limits on Single-Use Plastics and Microplastics: A Global Review of National Laws and Regulations. <https://www.unep.org/resources/publication/legal-limits-single-use-plastics-and-microplastics-global-review-national>

Veirto, T. (2.8.2021). Sähkötekniikan lehtori näki unta mikromuovia seulovasta laitteesta – rakensi Haavi-Heikin: "Osat ovat edullisia ja jokaisen saatavilla". Yle Uutiset. <https://yle.fi/uutiset/3-12039493>

Watec. (2022.) Filtro-hulevesisuodatin. <https://www.watec.fi/tuotteet/p/filtro>

WHO. (2019). Microplastics in drinking-water. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/326499/9789241516198-eng.pdf?ua=1>

WWF. (2020). Euroopan kemikaaliviraston rajoitusehdotus mikromuovien käytölle. https://wwf.fi/app/uploads/a/f/2/lyeu48t55uoruhxgrzsuak/wwf_mikromuovit_paino_0403.pdf

WWF. (2019). No plastic in nature: Assessing plastic ingestion from nature to people. Haettu 11.8.2022 osoitteesta https://awsassets.panda.org/downloads/plastic_ingestion_press_singles.pdf

Ympäristöministeriö. (2022). Vähennä ja vältä, kierrätä ja korvaa: Muovitiekartta 2.0. <https://muovitiekartta.fi/>

Ziemann, M. (14.9.2018). Saksalaistutkimus: Suurin osa mereen päätyvästä mikromuovista aiheutuu autonrenkaista – Mitä rajummin kiihdytät ja jarrutat, sitä enemmän irtoaa. <https://yle.fi/uutiset/3-10405667>