

Iiris Tuomi

AUTOLIIKENTEESTÄ AIHEUTUVAT MIKROMUOVIPÄÄSTÖT JA NIIDEN HALLITSEMINEN

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Silja Mustonen
2/2025

TIIVISTELMÄ

Iiris Tuomi: Autoliikenteestä aiheutuvat mikromuovipäästöt ja niiden hallitseminen
Car traffic caused microplastics and its management
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden kandidaattiohjelma, ympäristö- ja energiatekniikan
opintosuunta
Helmikuu 2025

Autoliikenne on välttämätön osa yhteiskunnan nykyisenkaltaista toimintaa. Autojen renkaiden kuluessa tienpintaa vasten, niistä irtoaa kulumishiukkasia, joiden seassa on primäärisiä mikromuoveja ja niihin kiinnittyneenä myrkyllisiä yhdisteitä. Auton renkaista peräisin olevat mikromuovit kattavat 24 % primäärisen mikromuovin lähteistä. Primäärisillä mikromuoveilla tarkoitetaan niitä mikromuoveja, jotka ovat mikromuovien kokoluokassa jo päästessään ympäristöön. Sekundääriset mikromuovit puolestaan syntyvät isompien muovipartikkelien hajotessa ajan saatossa.

Tällä hetkellä kulumishiukkaset suspendoituvat ilmaan, kulkeutuvat viereisille tien penkereille tai läpäisemättömille kaupunkiteiden varsille, joista ne jatkavat eteenpäin hulevesien ja pintavalunnan mukana. Pintavalunnan mukana mikromuovia sisältävä hulevesi kulkeutuu luontoon ja vesistöihin, jotka toimivat mikromuovien nieluina. Luontoon ja siten ekosysteemiin joutuessaan mikromuovit kerääntyvät ravintoketjuissa ja saattavat lopulta päätyä osaksi ihmisten ruokavaliota. Ilmaan suspendoituneet mikromuovit puolestaan heikentävät hengitysilmaa etenkin kaupunkialueella. Osa hulevesistä taas päätyy sekaviemäreiden kautta jätevedenpuhdistamoille.

Tässä kandidaatintyössä kartoitetaan ja pohditaan erilaisia ratkaisukeinoja, joita ongelmaan on pohdittu ja tutkittu. Tavoitteena on syventyä erityisesti autojen renkaiden materiaalien, ajoympäristön ja hulevesiratkaisujen vaikutuksiin ja mahdollisuuksiin mikromuovipäästöjen syntymisen ehkäisyssä ja leviämisen hallinnassa. Lähtökohtaisesti mikromuovien hallinta on hankalaa niiden pienen partikkelikoon ja morfologisten ominaisuuksien vuoksi. Työn tulokset kuitenkin osoittavat, että niiden hallintaa on alettu viime aikoina tutkia enemmän. Esimerkkinä jätevedenpuhdistamoille on asetettu direktiivi, joka velvoittaa niitä poistamaan mikropollutantteja jätevedestä ennen niiden päästämistä vesistöihin.

Työn tuloksena selvisi, että teiden lähiympäristöihin päätyvään mikromuovien määrään voisi olla mahdollista vaikuttaa vaihtamalla renkaiden materiaaleja kierrätettyihin ja biohajoaviin, jolloin syntyvät mikromuovit olisivat myös biohajoavia. Renkaiden kulumiseen voidaan vaikuttaa myös ajotien huoltamisella, sillä huonokuntoinen tie kuluttaa luonnollisesti rengasta enemmän kuin hyväkuntoinen. Myös tietyyypeillä on merkitystä mikromuovien synnyssä. Moottoritiet ovat mikromuovipäästöjen kannalta taloudellisimpia, sillä useilta kiihdytyksiltä ja jarrutuksilta säästytään kaupunki- ja maantieajoon verrattuna.

Mikromuovien leviämisen ehkäisemiseksi tuloksista nousi esiin konkreettiset vihreät roiskesuojat teiden reunoilla, vihreä hulevesien hallinta (GSI), biotekniikan hyödyntäminen sekä erillinen mikromuoveja sisältävän huleveden käsittely. Kukin ratkaisuehdotus sopii erilaisille alueille ja ympäristöihin ja osa niistä voisi toimia tehokkaasti yhdessä. Erillinen hulevesien käsittely taas toimisi esimerkiksi tiiviillä kaupunkialueella, jossa hulevesien mikromuoveja ei olisi mahdollista käsitellä GSI:llä syntypaikalla.

Autoliikenteen mikromuovien hallintaan on paljon työkaluja, mutta ne vaativat yhä tutkimusta toimiakseen riittävän tehokkaasti. Erityisen tärkeää on vaikuttaa asiaan lainsäädännöllä ja direktiiveillä, jotta muutos olisi mahdollisimman nopeaa. Yksilölle helpoin tapa vaikuttaa mikromuovien hallintaan on suosia julkista liikennettä sekä kevyen liikenteen ratkaisuja.

Avainsanat: auton renkaat, mikromuovit, kulumishiukkaset, kulkeutuminen, kestävä kaupunkisuunnittelu ja vihreä hulevesien hallinta.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

Opinnäytteessäni käytetyt tekoälytyökalut ja niiden käyttötarkoitukset on kuvailtu alla:

Työkalun nimi (ja versio): ChatGPT 2.0. Käyttötarkoitus ja osio, jossa työkalua käytettiin: Työn rakenteen hahmottelu ja ideointi työn alussa.

Työkalun nimi (ja versio): Scopus AI 2025. Käyttötarkoitus ja osio, jossa työkalua käytettiin: Lähteiden etsintä ja seulonta luvussa 3.

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien tekoälyllä tuotetut osat, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

SISÄLLYSLUETTELO

1.JOHDANTO.....	1
2.MIKROMUOVIT YMPÄRISTÖN KUORMITTAJINA.....	3
2.1 Mikromuovien lähteet.....	4
2.1.1 Primääriset mikromuovit.....	4
2.1.2 Sekundääriset mikromuovit.....	6
2.2 Mikromuovien kulkeutumistavat.....	7
2.2.1 Jätevedenpuhdistamot.....	7
2.2.2 Pintavalunta	8
2.2.3 Ilmalaskeuma	8
2.3 Mikromuovien vaikutukset.....	9
3.AUTOLIIKENNEPERÄISTEN MIKROMUOVIPÄÄSTÖJEN HALLINTA.....	11
3.1 Auton renkaiden kuluminen ja sen hallinta	11
3.2 Mikromuovien hallinta ympäristössä.....	14
3.3 Mikromuovien hallintamenetelmien vertailu: edut ja haasteet	17
4.JOHTOPÄÄTÖKSET	21
LÄHTEET	23

1. JOHDANTO

Muovi on monikäyttöinen sekä halpa materiaali, minkä vuoksi se valitaan materiaaliksi usein (Euroopan parlamentti 2018c). Muovia käytetään muun muassa pakkausmateriaalina, leluissa, kertakäyttöastioissa, auton renkaissa, vaatteiden kuituna ja maaleissa. Muoville tyypillisiä ominaisuuksia ovat vesitiiveys, läpinäkyvyys, riittävä kestävyys ja keveys. Kuten kaikella, myös muovilla ja sen käytöllä on kaiken hyvän rinnalla kääntöpuoli, mikromuovit.

Liikenteen on arvioitu aiheuttavan jopa 42 % kaikista primäärisistä mikromuoveista (Myszka et al. 2023). Tähän on laskettu mukaan renkaista irtoavien mikromuovien lisäksi tiemerkinnoista ja asfaltista irtoavat mikromuovit. Mikromuovit ovat aikamme suurimpia ympäristösaasteita, jotka havaittiin ensimmäisen kerran vuonna 1972 (Singh & Sharma 2023). Termi ”mikromuovi” otettiin käyttöön kuitenkin vasta vuonna 2004 ja se luokiteltiin ensimmäisen kerran huolestuttavaksi ympäristösaasteeksi vuonna 2007 (Picó & Damià 2019; Bodus et al. 2024).

Tähän päivään tultaessa mikromuovia on ehditty tutkia paljon, mutta tietämys ja ratkaisut sen aiheuttamiin ongelmiin ovat silti edelleen alkutekijöissään. Haasteena mikromuovien tutkimisessa on mittaamisen kehittäminen ja yhdenmukaistaminen, sillä tällä hetkellä on toteutettu vain yksittäisiä kokeita eri osa-alueista. Tällä hetkellä tietoa on laajalti ja kokonaisuus aiheesta on hajanainen ja hankala hahmottaa. Tästä seuraa useita tietopuutteita sekä epä johdonmukaisuuksia (Picó & Damià 2019). Tämän kirjallisuuskatsauksen tuloksena autoliikenneperäisistä mikromuoveista ja niiden nykytilanteesta on helpompaa saada käsitys, sillä työ kokoaa tietoa aiheesta saavutettavampaan muotoon.

Koska mikromuovit ovat vielä suhteellisen uusi käsite, on niiden terveyshaitoistakin varsin vähän varmaa tietoa. Tämän takia toimenpiteiden kriittisyyttäkin on hankalaa arvioida. Tulevaisuus näyttää, miten mikromuovit todella vaikuttavat biodiversiteettiin sekä ihmisten terveyteen. Varmaa on kuitenkin se, että kiihtyvä kulutus lisää mikromuovipäästöjä ja niihin on syytä kiinnittää huomiota ja etsiä ratkaisuja ennen kuin mitään peruuttamatonta tapahtuu.

Toimenpiteitä on onneksi alettu tekemään ja tutkimuksen määrä lisääntyy alati. Konkreettinen esimerkki tutkimuksen lisääntymisestä on se, että suurin osa tässä työssä lähteinä käytetyistä tutkimuksista on kuluneen 10 vuoden sisällä tehtyjä. Esimerkkinä toi-

menpiteestä EU on alkanut kaavailla yhdyskuntajätevesidirektiivin uudistusta kaikille jätevedenpuhdistamoille. Tämä direktiivi vaatii jätevedenpuhdistamoja poistamaan jätevedestä mikroepäpuhtauksia, joihin lukeutuvat mikromuovit (Eurooppa-neuvosto 2024).

Tämän työn tavoitteena on selvittää, mitkä seikat vaikuttavat renkaiden kulumiseen ja siten liikenneperäisten mikromuovien syntyyn ja voisiko liikenteestä aiheutuvien mikromuovien määrää vähentää vaihtamalla renkaissa käytettyjä materiaaleja biohajoaviin ja ympäristöystävällisempiin vaihtoehtoihin. Lisäksi kartoitetaan ratkaisuja, joilla mikromuovien kulkeutumista tien läheiseen luontoon ja vesistöihin voitaisiin estää. Samalla pohditaan, voisiko kestäväällä kaupunkisuunnittelulla luoda ratkaisuja, jotka noudattaisivat syntypaikalla käsittelyn strategiana.

Tutkimus on toteutettu kirjallisuuskatsauksena. Luvussa 2 avataan teoriaa mikromuovien lähteistä, kulkeutumistavoista ja niiden vaikutuksia ympäristöön sekä ekosysteemeihin. Luku pyrkii lisäämään ymmärrystä mikromuoveista ympäristösaasteina. Teoriassa esitettyjen tietojen pohjalta luvussa 3 syvennyttään autonrenkaiden sekä tiemerkinntöjen kulumisen aikaansaamaan mikromuoviin ja sen kulkeutumiseen ympäristöön. Lisäksi selvitetään, miten siihen voitaisiin vaikuttaa renkaiden materiaalivalinnoilla, ajoympäristöllä sekä kestäväällä kaupunkisuunnittelulla. Lopuksi kaikkia esitettyjä ratkaisuja vertaillaan arvioimalla niiden etuja ja haittoja. Luvussa 4 kootaan johtopäätökset työstä ja arvioidaan asetettuihin tavoitteisiin pääsemistä.

2. MIKROMUOVIT YMPÄRISTÖN KUORMITTAINA

Mikromuoveiksi luetaan sellaiset muovikappaleet, jotka ovat suurimmalta läpihalkaisijaltaan 1 µm – 5 mm. Kokoluokka on niin pieni, että mikromuovien silmämääräinen erottaminen ei ole mahdollista. Jos mikromuovi on pisimmältä mitaltaan alle 1 mm, voidaan sitä kutsua minimikromuoviksi ja ollessaan alle 1 µm kokoinen, kutsutaan sitä nanomuoviksi. (Crawford & Quinn 2016) Mikromuovit hajoavat taukoamatta pienemmiksi ja pienemmiksi, saavuttaen aina lopulta nanomuovin kokoluokan (Singh & Sharma 2023). Mikromuovin pienentyessä sen partikkeleiden löytäminen ja poistaminen hankaloituu ja voi lopulta olla jopa mahdotonta.

Vuotuisten mikromuovipäästöjen arvioidaan kasvavan vuoteen 2030 mennessä jopa 53 miljoonaan tonniin, jos muovin tuotanto ja käyttö lisääntyy totuttuun tahtiin (Myszka et al. 2023). Vuonna 2019 22 miljoonaa tonnia muovia päätyi ympäristöön ja tuon määrän on odotettu tuplaantuvan vuoteen 2060 mennessä (Euroopan parlamentti 2018c). Mikromuovia on siis tärkeätä tutkia yhä paremmin, jotta sen aiheuttamat ongelmat saataisiin hallintaan. Mikromuovin nykyistä määrää konkretisoi se, että partikkeleita on tällä hetkellä meressä 500 kertaa enemmän kuin tähtiä galaksissamme (United Nations 2017).

Kaikkein tehokkaimmin ympäristön mikromuovikuormaa voidaan pienentää vähentämällä muovimateriaalin käyttöä lainsäädännöllä sekä korvaamalla muovia uusilla biohajavilla materiaaleilla. Viime vuosina muovia koskevaa lainsäädäntöä on kiristetty. EU:n muovidirektiivi (EU 2019/904) on kieltänyt useita muilla materiaaleilla korvattavia kertakäyttöisiä muovituotteita kuten muovipillit, vanupuikot ja aterimet (Euroopan parlamentti 2018b). Muovikassien kohdalla on pääasiassa pyritty minimoimaan niiden myyntiä sekä kulutusta. Suomessa ja muissa Euroopan unionin jäsenmaissa direktiivi näkyy arkipäivässä.

Koska muovin käyttöä ei voida kokonaan lopettaa, keskitytään muovin kierrätyksen parantamiseen yhä tarkemmin (Picó & Damià 2019; Ympäristöministeriö). Muovin kierrätyksestä on tarpeen tehostaa, sillä muovin valmistajat tarvitsevat suuria määriä kierrätysmuovia edulliseen hintaan, jotta se olisi taloudellisempaa, kuin muovin valmistaminen neitseellisistä materiaaleista (Euroopan parlamentti 2018c). EU julkaisi vuonna 2018 kunnianhimoisen muovistrategian, jonka tavoitteena on, että kaikki muovipakkaukset ovat kierrätettäviä tai uudelleenkäytettäviä vuoteen 2030 mennessä (Euroopan parlamentti 2018b). Kierrätyksen tehostuminen näkyy esimerkiksi lisääntyneinä muovinkeräysastioina taloyhtiöissä.

Muovin kulutuksen vähentäminen vaatisi uusia ratkaisuja ja materiaaleja muovien tilalle, sillä ensisijaista ongelmanratkaisua on ongelman syntymisen ennaltaehkäiseminen. Tätä varten on kehitetty biohajoavia materiaaleja, jotka on valmistettu uusiutuvista raaka-aineista, kuten tärkkelyksestä, selluloosasta, ligniinistä ja bioetanolista. (Picó & Damià, 2019)

2.1 Mikromuovien lähteet

Mikromuovit voidaan jaotella syntymekanisminsa perusteella kahteen ryhmään: primäärisiin ja sekundäärisiin mikromuoveihin. Primääriset mikromuovit ovat ympäristöön joutuessaan kooltaan pieniä, halkaisijaltaan alle 5 mm (Euroopan parlamentti 2018a). Ne ovat siis ensisijaisessa muodossaan jo mikromuovin kokoisia ja saavat siitä nimensä. Sekundääriset mikromuovit puolestaan syntyvät luontoon joutuneiden suurempien muovipalojen hajotessa ajan myötä yhä pienemmiksi saavuttaen lopulta mikromuovien kokoluokan (Singh & Sharma 2023). Sekundääriset mikromuovit ovat siis alussa kooltaan makromuoveja, jotka hajotessaan pienenevät mikromuovien kokoluokkaan.

Tällä hetkellä mereen päätyneestä muovista 15–31 % on primäärisistä lähteistä ja 69–81 % sekundäärisistä (Euroopan parlamentti 2018a; Singh & Sharma 2023). Sekundääriset lähteet ovat vaarallisia, sillä jo yksi muovikappale ympäristössä aiheuttaa hajotessaan mittavan määrän mikromuoveja ympäristöön. Vesiekosysteemit ovat mikromuovien merkittävimpiä nieluja, minkä vuoksi voidaan olettaa, että mikromuovitonta vesistöä ei ole mahdollista löytää (Scopetani et al. 2022). Tästä syystä on luonnollista ilmoittaa mikromuovien lähteet osuuksina meriin päätyneestä mikromuovista.

2.1.1 Primääriset mikromuovit

Primäärisiä mikromuovien lähteitä ovat synteettisten vaatteiden pesu, auton renkaiden kuluminen, hygieniatuotteet ja infrastruktuurin kuluminen (Euroopan parlamentti 2018; Singh & Sharma 2023). Kuvassa 1 on esitetty, minkä prosenttiosuuden mikäkin osa-alue aiheuttaa kaikista primäärisistä mikromuoveista.



Kuva 1: Primääristen mikromuovien lähteet prosentteina osa-alueittain. Perustuu lähteeseen (Euroopan parlamentti 2018a; Singh & Sharma 2023)

Hygieniatuotteiden kohdalla mikromuovit on usein lisätty tuotteisiin tarkoituksella. Yleisimmin niitä esiintyy kuolleen ihon poistamiseen tarkoitetuissa kuorinta-aineissa mikromuovihelminä (Singh & Sharma 2023). Tällaisten hygieniatuotteiden tarkoituksenmukainenkin käyttö johtaa mikromuovien kulkeutumiseen jäteveeteen. Muihin primäärisiin lähteisiin jää 11 % kaikesta primäärisestä muovista. Mikromuovin tarkkoja lähteitä voi olla hyvinkin hankalaa arvioida, joten on luonnollista, ettei kaikelle mikromuoville ole mahdollista arvioida tarkkaa syntyperää.

Infrastruktuurin kulumisesta aiheutuu mikromuovia, mikäli rakennuksen tai tien pintamateriaali sisältää muovia. Esimerkiksi betoni, maalipinnat, rakennusmateriaalit ja tiemerkinnät voivat sisältää muovia ja kuluessaan vapauttaa mikromuoveja ympäristöönsä (Bank 2021; Burghardt & Pashkevich 2023). Tiemerkintöjen kulumisen on väitetty kattavan jopa 7 % kaikista meriin päätyneistä primäärisistä mikromuoveista (Burghardt & Pashkevich 2023). Täten se kattaisi jo lähes kolmasosan infrastruktuurin kulumisesta aiheutuvista mikromuoveista.

Renkaiden kulumisen aiheuttamilla mikromuovipäästöillä tarkoitetaan niitä mikromuovipartikkeleita, jotka irtoavat renkaasta sen kulumisen myötä. Uudessa, käyttämättömässä

auton renkaassa urasyvyys on 8–9 mm riippuen siitä, onko se kesä- vai talvirengas (No-kian renkaat, 2024a). Minimi urasyvyys renkaan elinkaaren lopussa on kesärenkailla 1,6 mm ja talvirenkailla 3 mm (Liikenneturva 2024). Tästä voidaan päätellä, että renkaan käyttöiän aikana sitä kuluu noin 6 mm, josta iso osa on kumia (Ziajahromi et al. 2020). Renkaita tuotetaan vuosittain 3 miljardia kappaletta ja vastaavasti 800 miljoona rengasta päätyy jätteeksi (Mayer et al. 2024). Renkaiden tuotannon ja käytön suuri volyyymi nostaa niiden prosentuaalisen osuuden miltei neljäsosaan kaikista primäärisistä mikromuoveista.

Synteettisten vaatteiden pesu on suurin yksittäinen mikromuovin primäärinen lähde, sillä se kattaa kolmasosan primäärisistä lähteistä. Ongelman volyyymi on kasvanut merkittävästi pikamuodin yleistytessä. Pikamuodin kasvun mahdollistajia ovat uudet synteettiset ja siten halvemmat materiaalit, joissa on käytetty mikromuovikuitua. Etenkin tekstiilien konepesun yhteydessä niistä irtoaa mikromuovikuitua pesuveteen. Mikromuovikuidun rakenne edesauttaa sen pysymistä veden mukana ja sitä kautta laajaa leviämistä virtojen mukana. (Wang et al. 2024a) Toisaalta harkitsematon vaatteiden kuluttaminen johtaa myös vaatteiden päätymiseen kaatopaikalle ja siten lopulta sekundäärisiksi mikromuoveiksi.

2.1.2 Sekundääriset mikromuovit

Sekundääriset mikromuovit ovat pitkälti peräisin luontoon joutuneesta muoviroskasta, joka on hajonnut korkean auringon intensiteetin vaikutuksesta sen ollessa kosketuksissa meriveden kanssa, sekaolosuhteissa, kuivassa säteilyssä tai jopa kaatopaikkaolosuhteissa (Huber et al. 2022). Auringon säteilyintensiteetti kasvaa, mitä lähemmäs päiväntasaajaa mennään.

Huber et al. (2022) selvittivät tutkimuksessaan sekundäärisen mikromuovin hajoamisai-koja. Hajoamisaikeihin vaikutti keskeisesti muovin hajoamisympäristön sijainti ja ilmasto-olosuhteet. Esimerkiksi päiväkohtainen auringon säteily ja lämpötila ovat merkittäviä muuttujia, jotka vaikuttavat hajoamisaikaan. Tulosten perusteella voidaan päätellä, että mitä aurinkoisempi ja siten lämpimämpi ilmasto on kyseessä, sitä nopeampaa muovin hajoaminen on. Itämerellä hajoaminen vie 1,61 vuotta, kun taas Tyynellä valtamerellä tuo aika on vain 0,74 vuotta, eli vajaan 9 kuukautta. Tutkimuksessa käytettiin 50 µm paksuista polypropeenikalvoa, joten hajoamisaikeja ei suoraan voida soveltaa oikeisiin veteen päätyneisiin muoviroskiin. Tutkimus kuitenkin antaa hyvin osviittaa siitä, miten olosuhteet vaikuttavat muovin hajoamisnopeuteen.

2.2 Mikromuovien kulkeutumistavat

Kuten kappaleessa 2.1 on mainittu, vesistöt ovat mikromuovien suurimpia nieluja. Mikromuoveja löytyy silti muualtakin ja ne voivat kerääntyä myös maaperään. (Schell et al. 2022). Mikromuovien kulkeutuminen vesistöihin ja maaperään voi tapahtua kolmea kautta: puhdistetun jäteveden mukana, pintavalumiin mukana tai ilman kautta laskeutumisena (Scopetani et al. 2022).

2.2.1 Jätevedenpuhdistamot

Jätevedenpuhdistamot lienevät merkittävimpiä mikromuovien ympäristövaikuttajia, sillä mikromuovit säilyvät jäteveden puhdistuksessa käytetyn mekaanisen käsittelyn sekä lietteenlaskeutusprosessin läpi (Schell et al. 2022). Jäteveden mekaanisen käsittelyn vaihteita ovat välppäys, hiekanerotus sekä esiselkeytys (Waterandwastewater, 2024). Välppäys ei luonnollisesti poista mikromuovia, sillä se on tarkoitettu isompien roskien poistoon. Hiekanerotuksen perustuessa kiinteiden partikkeleiden paino- ja keskipakovoimaan, ei sekään poista mikromuoveja niiden keveyden vuoksi (Waterandwastewater, 2024).

Esi- ja jälkiselkeytykseen tuleva liete koostuu orgaanisesta kiintoaineesta, joka on osittain liuenneena veteen, ja sen seassa on luonnollisesti suurin osa jäteveden päätyneistä primäärisistä mikromuoveista. Tulovesien mikromuovista arviolta noin 60–99 % päätyy puhdistamolietteeseen, eli siihen lietteeseen, joka poistetaan prosessista. Puhdistamolietteen mikromuovipitoisuudeksi on arvioitu 1000–186700 mikromuovipartikkeliä (MPs)/kg lietettä (dw) (Schell et al. 2022). Osa jälkiselkeytyksessä erotetusta lietteestä palautetaan aktiivilieteprosessiin, jotta lieteikä ja lietteen biologiseen toimintaan perustuva puhdistustehokkuus saataisiin optimaaliseksi ja tehokkaaksi (Waterandwastewater, 2024).

Osa lietteestä kuitenkin poistetaan prosessista ja käsitellään esimerkiksi mädättämällä, kompostoimalla tai polttamalla. Lietteestä voidaan tehdä esimerkiksi biokaasua, lannoitetta tai maanparannusainetta (Waterandwastewater, 2024). Euroopassa 35 % käsittelystä lietteestä levitetään maalle, mutta joissakin Euroopan maissa tuo prosentti voi olla huomattavasti korkeampi. Täten jätevedenpuhdistamot toimivat mikromuovien syöttölähteinä ekosysteemeihin. (Schell et al. 2022) EU:n uusi jätevesidirektiivi vaatii jätevedenkäsittelyä huomioimaan ja poistamaan mikromuoveja sekä mikropollutanteja yhä paremmin.

Vaikka jätevedenpuhdistusprosessia ollaan aikeissa kehittää, kannattaisi mikromuovien pääsemistä jäteveden ensisijaisesti estää. Kappaleessa 2.1.1. mainittuja mikromuovikuituja ja niiden päätymistä jätevedenpuhdistamoille voitaisiin ehkäistä jo syntypaikalla.

Tämä voitaisiin tehdä esimerkiksi kehittämällä kotitalouksien mikromuovien käsittelytekniikoita, jotta pesukoneesta ei vapautuisi niin paljoa mikromuoveja, jotka kulkeutuvat jätevedenpuhdistamoille (Sun et al. 2019). Vastaavanlainen menettely voisi olla sovellettavissa myös muiden primääristen mikromuovien lähteiden kohdalla.

2.2.2 Pintavalunta

Pintavalunnalla tarkoitetaan sade- tai sulamisvettä, joka kulkee kyllästetyllä tai läpäisemättömällä pinnalla imeytymättä siihen. Pintavaluntaan ja niiden osuuteen mikromuovien kuljettajana ei olla perehdytty yhtä paljoa kuin jätevedenpuhdistamoihin (Ziajahromi et al. 2020; Schell et al. 2022). Rakennetun ympäristön pinnoilla olevien mikromuovipäästöjen odotetaan kulkeutuvan vesistöihin pintavaluntana esimerkiksi huleveden mukana. Hulevesi on termi niille sade- ja sulamisvesille, jotka syntyvät rakennetussa ympäristössä ja ovat näin poisjohdettavia. Erityisesti infrastruktuurin ja auton renkaiden kulumisen seurauksena mikromuovia kertyy rakennetun ympäristön pinnoille, kuten teille.

Pintavalunnan mukana mikromuovit kulkeutuvat läheiseen ympäristöön, vesistöihin sekä kaupunkialueelle rakennettuihin hulevesikosteikkoihin (Ziajahromi et al. 2020). Hulevesikosteikko on huleveden hallintaa varten tehty luonnonmukainen ratkaisu, jonne hulevesi johdetaan. Hulevesikosteikot ovat usein suunniteltu huleveden käsittelyn ohella tarjoamaan elinympäristö erilaisille organismeille, kuten kasveille, linnuille ja kaloille, sekä mikro-organismeille. Tämä aiheuttaa ristiriidan, sillä elinympäristö voi olla organismeille haitallinen sen sisältämän mikromuovin vuoksi. (Ziajahromi et al. 2020)

2.2.3 Ilmalaskeuma

Mikromuovia voi olla myös ilmassa sen keveyden vuoksi. Dris et al. (2016) tutkimuksessa tutkitaan ilmakehän sisältämiä hiukkasia ja niiden laskeumaa. Tutkimuksen seuranta vuoden aikana laskeuma vaihteli välillä 2-355 hiukkasta/m²/vrk ja keskimääräinen laskeuma oli 110 ± 96 hiukkasta/m²/vrk. Mitatun alueen ominaisuuksilla on suuri vaikutus laskeumaan, esimerkkinä tutkimuksessa selvisi, että esikaupunkialueella on vähemmän mikromuovilaskeumaa kuin kaupunkialueella. Tuloksessa näkyy esimerkiksi kaupunkialueen infrastruktuurin kulumisen aiheuttama mikromuovi, mikä tukee aiemmin mainittua infrastruktuurin kulumisen 24 % osuutta kaikista primäärisistä lähteistä. Lisäksi tieverkosto on tiheämpi kaupunkialueella kuin esikaupunkialueella, mikä osaltaan vaikuttaa tulokseen.

Ilmassa esiintyy yleisimmin erittäin pieniä mikrokuituja, jotka ovat kokoluokaltaan 200–600 µm ja tätä suuremmat kuidut ovat harvinaisempia. Kaikkein pienimpiä kuituja on

vaikeaa tunnistaa, joten niitä ei ole otettu huomioon tutkimuksessa. Laskeumavirtaan vaikuttavat olennaisesti sateet, joiden määrä on positiivisesti verrannollinen mikromuovilaskeumaan. Voi olla, että myös sateen korkeudella on vaikutusta laskeumaan. Tämä on loogista, sillä kuten kappaleessa 2.1.1 mainittiin, mikromuovi takertuu morfologiansa ansiosta veteen tehokkaasti ja laskeutuu täten sateen mukana maahan. (Dris et al. 2016)

2.3 Mikromuovien vaikutukset

Mikromuovien vaikutukset luontoon ja sen organismeihin ovat suurin motiivi niiden hallitsemiselle. Mikromuovien hallinnalla suojataan luonnon biodiversiteettiä eli monimuotoisuutta sekä terveyttä. Mikromuovin pienen partikkelikoon takia se on helposti nieltävissä muodossa meressä tai makean veden ympäristössä (Dris et al. 2016). Lisäksi ilmassa oleva mikromuovi on hengitettävissä muodossa. (Singh & Sharma, 2023).

Mikromuovia kertyy organismeihin ja liikkuu ravintoketjun mukana (Bodus et al. 2024). Ravintoketjussa se liikkuu kasveista mereneläviin ja niistä edelleen nisäkkäisiin ja lintuihin. Mikromuovit aiheuttavat jo sellaisenaan ongelmia, sillä vesieliöillä ne täyttävät mahalaukun vähentäen ruoan saantia. Sen lisäksi mikromuovit voivat imeä ympäröiviä orgaanisia epäpuhtauksia itseensä ja toimia siten tartuntaväliaineena patogeeneille eli taudinaiheuttajille (Picó & Damià 2019; Bodus et al. 2024). (Singh & Sharma, 2023).

On näyttöä siitä, että mikromuovit voivat päätyä jopa kasveihin pienen kokonsa ansiosta. Kun mikromuovit pääsevät kasviin esimerkiksi halkeaman kautta, voivat ne päätyä aina juuriin saakka. Juuristosta mikromuovit siirtyvät helposti myös kasvin uusiin versoihin (Singh & Sharma, 2023). Mikromuoveja siis päätyy ekosysteemiin myös maaperästä.

Mereneläviin mikromuovit päätyvät ravinnon nielemisen mukana. Merenelävien sisältämiä mikromuovimääriä on tutkittu, ja tuloksena selvisi, että esimerkiksi ravinnokseen vettä suodattavassa simpukassa on huomattavasti enemmän mikromuoveja kuin joissakin kaloissa (Scopetani et al. 2022). Jotkin mikromuovit ovat niin myrkyllisiä, että ne lisäävät aikuisen lohien kuolleisuutta (Bodus et al. 2024).

Ihmisiin mikromuoveja päätyy tutkimusten mukaan pääasiassa ruokavalion ja hengityksen kautta (Gouin 2022). Mikromuoveille altistumisen määrää on erittäin hankalaa arvioida, ja vaikka WHO (World Health Organization) on antanut vuonna 2019 arvionsa esimerkiksi viikoittaisesta mikromuoveille altistumisesta, on myöhemmässä arviossa vuonna 2022 tarkka arvio jätetty antamatta, sillä se ei olisi luotettava. Toisaalta myös ihmisten iän, koon, elämäntavan ja asuinpaikan vaikutus altistumiseen tekee arvioinnista entistä hankalampaa. (THL 2024).

Myös tutkimus terveyshaitoista ihmisille on vielä alkutekijöissään. Koe-eläintutkimusten ja solumallien perusteella mahdollisia myrkyllisiä vaikutuksia on paljon. Mikromuovit voivat tunkeutua ruoansulatuskanavan kudoksiin ja elintärkeisiin elimiin ja aiheuttaa oksitadiivista stressiä, syöpää, kudonvaurioita, kroonista tulehdusta, hengityssairauksia ja genotoksisuutta (Bodus et al. 2024). WHO:n uusimman tutkimuksen perusteella mikromuovin terveysvaikutukset ovat verrattavissa muiden liukenemattomien hiukkasten aiheuttamiin terveysvaikutuksiin, eli niihin vaikuttavat kulutusnopeus, myrkyllisyys, muoto, koko, liukoisuus ja rakenne (Bodus et al. 2024). Tällä hetkellä altistus on vielä sen verran pientä, että se ei aiheuta merkittävää riskiä ihmisen terveydelle (THL 2024).

3. AUTOLIIKENNEPERÄISTEN MIKROMUOVI-PÄÄSTÖJEN HALLINTA

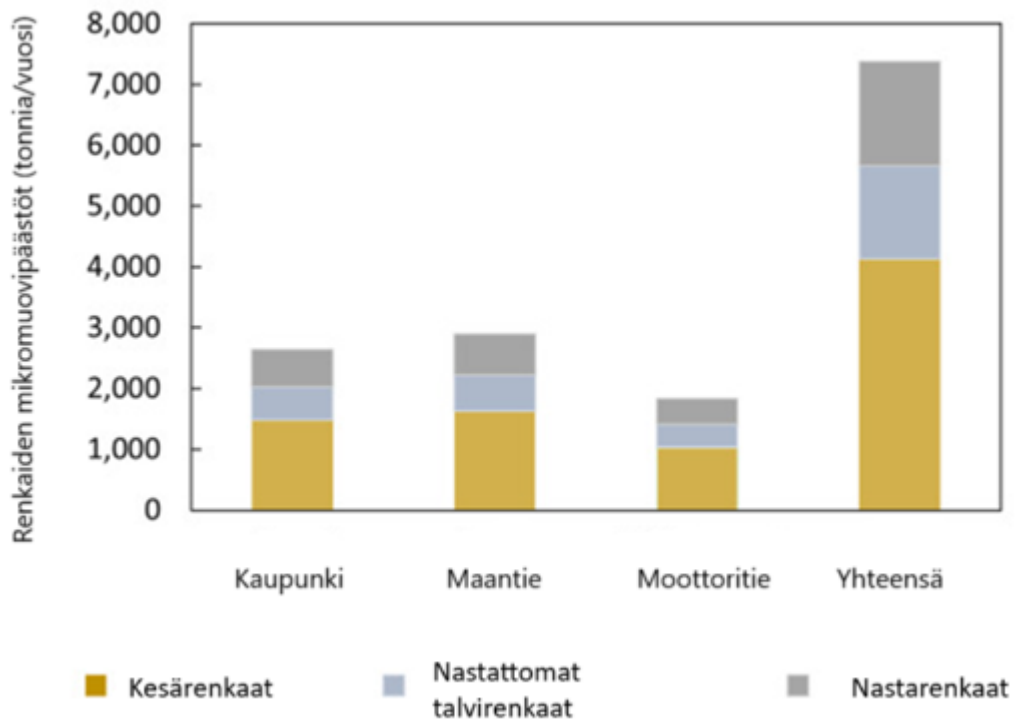
Tässä luvussa syvennyttään autoliikenneperäisiin mikromuoveihin, jotka esiintyvät renkaiden kulumishiukkasten seassa, sekä pohditaan ratkaisuja niiden syntymisen vähentämiseksi ja hallitsemiseksi. Ensisijaista on löytää ratkaisuja, joilla liikenteestä syntyvien mikromuovien määrää voitaisiin vähentää estäen niiden leviäminen. Vasta viimeiseksi keskitytään siihen, miten jo syntyneitä mikromuovipäästöjä voidaan käsitellä niin, etteivät ne aiheuttaisi haittaa ihmisille, eläimille tai ympäristölle.

Kuten kappaleessa 2.1.1 todettiin, auton renkaiden kuluminen kattaa reilun neljäsosan, 28 %, kaikista primäärisistä mikromuovien lähteistä. Vaikka pelkästään renkaista irtoaa paljon mikromuoveja, myös tiemerkinnet ja asfaltti kuluvat ja lisäävät osaltaan mikromuovien määrää tien läheisessä ympäristössä. Tiemerkinnoistä irtoaa mikromuovia vasta, kun niiden lasihelmiä sisältävä heijastava kerros hajoaa ja sen alla oleva pinnoitekerros joutuu kulutukseen. Heijastavan kerroksen hajoamista edesauttavat ajoneuvojen kääntyminen, raskaat ajoneuvot, lumen aeraus sekä nastarenkaat. (Burghardt & Pashkevich 2023) Samat asiat vaikuttavat myös asfaltin kulumiseen.

Tästä voidaan siis tehdä päätelmä, että pohjoismaissa, mukaan lukien Suomessa tiemerkinnoista aiheutuvat mikromuovipäästöt lienevät hieman korkeampia kuin esimerkiksi muualla Euroopassa, sillä nastarenkaita käytetään noin puolet vuodesta. Myös asfaltin modifiointiaineena voidaan käyttää muovia, jolloin sekin voi kuluessaan saada aikaan mikromuovipölyä (Myszka et al. 2023).

3.1 Auton renkaiden kuluminen ja sen hallinta

Auton renkaiden kuluminen riippuu rengas-, ajoneuvo- ja tietyyppistä (Polukarova et al. 2024). Tämän työn kannalta olennaisinta on kuitenkin tutkia vain tie- ja rengastyypin vaikutusta mikromuovipäästöihin. Kuvassa 2 on esitetty kunkin tietyyppin aiheuttama renkaiden kulumisesta aiheutunut mikromuovipäästöjen määrä tonneina vuodessa.



Kuva 2: Tie- ja rengastyypin vaikutus mikromuovipäästöjen syntymiseen. Kuva pohjautuu lähteeseen (Polukarova et al. 2024)

Kuvan 2 tiedot ovat peräisin Ruotsissa tehdystä tutkimuksesta, joten sen tulokset ovat sovellettavissa ilmaston puolesta Suomeenkin. Tietyyppien välillä ei ole kovin isoja eroja, mutta moottoritieillä ajaminen aiheuttaa luonnollisesti vähiten päästöjä, kun jarrutuksilta ja kiihdytyksiltä pitkälti vältetään pitkän matkan ajossa. Kaupungissa pysähtelyä on ylivoimaisesti eniten, mutta vauhdin ollessa hyvin maltillista, ovat renkaiden kulumisen ja siten myös mikromuovipäästöt vähäisempiä kuin maanteilla, jotka vaativat jatkuvaa kiihdyttämistä ja jarruttamista kovassa vauhdissa muun liikenteen ja nopeusrajoitusten takia. Kuvasta huomataan myös, että kesärenkailla ajamisesta syntyy suurin osa kulumishiukkaspäästöistä.

Tieperäiset pölyt (mukaan lukien tiemerkinnoista ja renkaista syntyvät mikromuovit) kulkeutuvat erittäin pitkiä matkoja ja ajotien roiskevyöhyke onkin 10 metriä (Burghardt & Pashkevich 2023). Laaja roiskealue vaikeuttaa mikromuovien määrän mittausta ja hallintaa. Euroopasta peräisin olevat tiedot kuitenkin osoittavat, että suurin osa renkaiden mikromuovien massasta kertyy tienvarsien lähelle, josta hulevesi ja ilmakehän reitit voivat siirtää hiukkasia kauemmaksi (Mayer et al. 2024).

Renkaiden kulumishiukkasista mukaan lukien mikromuoveista 67 % päättyy maaperään ja 12 % kulkeutuu hulevesien mukana kaupunkien pintavesiin. Pintavesien kautta ne

päätyvät ekosysteemiin ja voivat epäsuorasti kulkeutua myös ihmiseen. Kulumishiukkasten seassa on mikromuovin lisäksi muitakin epätoivottuja yhdisteitä, kuten metalleja ja myrkyllisiä yhdisteitä, jotka liukenevat veteen. On arvioitu, että liikenteen aikaansaamia kulumishiukkasia syntyy Euroopassa 1,3 miljoonaa tonnia vuodessa. Renkaiden kulumishiukkasista 12 % puolestaan suspendoituu ilmaan, mikä vaarantaa suorasti myös ihmiset näille yhdisteille hengittämisen kautta. (Bodus et al. 2024; Wang et al. 2024b)

Tiepölyssä on useita partikkeleita, joista kaikki eivät suinkaan ole mikromuoveja, mikä hankaloittaa mikromuovien määrän arviointia. Myszka et al. (2023) tutkivat NR-fluorenssimikroskopian käyttöä mikromuovien havaitsemisessa. Menetelmä perustuu Niilin punaiseen (NR) väriin, joka pystyy erottamaan mikromuoveja muusta tiepölystä hyvin pienessäkin kokoluokassa. Tämä menetelmä tuo mahdollisuuksia uusiakin sovelluksia silmällä pitäen. Sen avulla on myös mahdollista mitata, miten erilaiset hallitsemiskeinot vaikuttavat mikromuovien määrään.

Vaikka bensiinimoottoreita vaihdetaan sähköisiin, käytetään renkaissa edelleen muovipohjaista kumia, sillä sen ominaisuudet soveltuvat renkaan käyttötarkoitukseen erittäin hyvin. Renkaissa käytetään materiaalina kumin lisäksi täyte- ja lujiteaineita, prosessi- ja jatke öljyjä sekä muita lisäaineita, kuten 6-PPD:tä, joka on todettu erityisen myrkylliseksi vesieliölle. (Mayer et al. 2024; Mitchell & Anand 2024) Muovipohjaisia materiaaleja on kuitenkin alettu korvaamaan kierrätysmuovilla. Hiljattain Continental on ilmoittanut lisäävänsä polyeteenitereftalaattipulloista (PET) tehtyä kierrätettyä raaka-ainetta renkaisiinsa. Kierrätetty materiaali on todettu yhtä kestäväksi kuin neitseellinen materiaali. (Rengasmarket, 2024) Muovimateriaalien lisäksi lisäainekoostumuksen parantaminen voi vähentää mikromuovien myrkyllisyyttä ympäristössä (Wang et al. 2024b).

Vaikka kierrätysmateriaalin käyttö on askel kohti kestävämpää kehitystä, ei se estä mikromuovien syntyä. On kuitenkin tutkittu, voisiko kumia korvata biohajoavalla materiaalilla, jolloin siitä syntyvä mikromuovikaan ei olisi niin haitallista ympäristölle. Nokian renkaat on allekirjoittanut syksyllä 2024 kehittämissyhteistyösopimuksen yhdessä ruotsalaisen biomateriaaliteknologia yhtiö Reselo AB:n kanssa. Reselo AB:n innovaatio perustuu koivunkuorijätteestä valmistettuun materiaaliin, joka on täysin uusiutuvaa ja biohajoavaa. Koivunkuorijätteestä tehdyssä materiaalissa hyödynnetään puu-, paperi- ja vaneriteollisuudesta ylijäänyttä koivun kuorta. (Nokian renkaat, 2024b) Innovaatio on vielä alkutekijöissään ja vaatii paljon tutkimusta ja suunnittelua.

Liikenteen määrää on myös mahdollista vähentää yksityisautoilua rajoittamalla. Julkinen liikenne ja kevyen liikenteen ratkaisut, kuten kaupunkipyörät ja sähköpotkulaudat vähentävät etenkin kaupunkialueiden yksityisautoilun määrää. Kevyen liikenteen ratkaisut korvaavat jopa 31 % automatkoista vähentäen päästöjä (mukaan lukien mikromuovit) 21 %

(Comi & Antonio 2024). Yksilö voi siis helpoiten hallita mikromuoveja omilla arkipäiväisillä valinnoillaan. Erityisesti ydinkeskustan rauhoittaminen yksityisautoilulta voisi parantaa ilmanlaatua ja vähentää mikromuovipäästöjä. Autottomat alueet kuitenkin asettavat suuren haasteen kaupunkien infrasuunnittelulle, sillä ne vaativat mittavia muutoksia olakseen toimivia.

Moottoriteitä ja maanteitä ei ole mahdollista rajoittaa vastaavilla keinoilla, sillä ne ovat välttämätön osa liikenneverkostoa. Moottoriteiden suosiminen kannattaa, sillä se aiheuttaa huomattavasti vähemmän mikromuovipäästöjä kuin maantieajo (ks. kuva 3). Valta-väylät eivät onneksi ole sijainniltaan lähellä asutuskeskittyviä, jolloin niillä ajavien autojen renkaiden aiheuttamat kulumishiukkaset eivät välttämättä suspendoituessaan joutuisi suoraan ihmisten hengitysilmaan, toisin kuin kaupunkialueilla.

Mikäli autojen poistaminen kaupunkialueelta ei ole mahdollista, on kaupunkisuunnittelussa ja liikennejärjestelmissä syytä kiinnittää huomiota liikenteen sujuvuuteen. Älykällä liikennejärjestelmällä voidaan vaikuttaa esimerkiksi siihen, kuinka paljon alueella tulee pysähdyksiä liikennevaloihin sekä risteyksiin, ja jälleen kiihdytyksiä niiden jälkeen, mikä luonnollisesti vaikuttaa mikromuovi- ja hiilidioksidipäästöihin vähentävästi. Älykällä liikennejärjestelmällä pyritään ennustamaan liikennevirtoja ja siten optimoimaan liikennevaloaikataulua. (Jiang et al. 2021) Ne kuitenkin vaativat isoja investointeja, mikä voi vaikuttaa niiden käytettävyyteen.

Myös tiepintojen ja -merkintöjen materiaalivalinnoilla voidaan vaikuttaa kulumishiukkasten syntymisen määrään. Teiden kestävyysparantamiseksi niissä on alettu hyödyntää hiilikuitukomposiittimateriaaleja, joiden on osoitettu lisäävän tien veto-, puristus- ja taivutuslujuutta (Mitchell & Anand 2024). Vaikka materiaali on kestävä, on tien kunnon ylläpito ja huoltaminen silti erittäin tärkeää, sillä kulumishiukkasten käyttäytymiseen vaikuttavat tienpinnan karheus ja hiukkaskoko. Pienemmät hiukkaset jäävät loukkuun tienpintaan ja suuremmat taas todennäköisemmin kulkeutuvat muualle huleveden mukana. Mitä huonommassa kunnossa tie on, sitä enemmän se kuluttaa renkaita ja saa aikaan mikromuovipäästöjä. (Panko et al. 2013) Pohjoisessa ilmastoon aiheuttamat routavauriot ja muissa maissa sään ääri-ilmiöt vaikeuttavat kunnon ylläpitoa.

3.2 Mikromuovien hallinta ympäristössä

Mikro- ja nanomuovien hallitseminen ja käsittely on erittäin hankalaa niiden pienen partikkelikoon ja morfologisten ominaisuuksien vuoksi. Hulevedet ovat merkittävä väylä mikromuoveille, sillä ne sisältävät pintavalunnan mikromuovit, jotka ovat mobilisoituneet läpäisemättömiltä pinnoilta huleveteen, sekä ilmaan suspendoituneet mikromuovit, jotka

laskeutuvat tehokkaasti sateen mukana maahan ja päätyvät siten hulevedeksi (Mayer et al. 2024). Tästä syystä hulevesien hallinnan ja käsittelyn kehittämällä voisi olla potentiaalia tehokkaassa mikromuovin hallitsemisessa.

Tällä hetkellä hulevesiä hallitaan ensisijaisesti kaupunkialueen tulvien välttämiseksi. Hulevesien hallinta voi perustua seisoviin hulevesialtaisiin, kuten keinotekoisiiin kosteikkoihin, ja sadetynnyreihin tai suoran valuman kaappaamiseen, esimerkiksi läpäisevillä jalkakäytävillä ja viherkatoilla. Valuman suoraa kaappaus ja käsittely -tekniikkaa kutsutaan GSI:ksi (Green Stormwater Infrastructure), vapaasti suomennettuna vihreä hulevesien hallinta. (Bodus et al. 2024) GSI tarjoaakin kehityskelpoisen sovelluskohteen mikromuovien leviämisen estämiselle.

GSI voisi toimia ensimmäisenä puolustuslinjana mikromuovien leviämisen estämisessä. GSI:llä on suuri lievennyspotentiaali, eli sen avulla hulevedestä löytyviä ympäristösaasteita olisi mahdollista poistaa varsin tehokkaasti. Suunnittelukriteerit rajoittuvat tällä hetkellä kuitenkin vain muutamaa epäpuhtauteen, kuten helposti poistettaviin kiinteisiin aineisiin ja joissain tapauksissa myös kokonaisfosforiin ja -tyypeen. Muihin huolestuttaviin kontaminantteihin, kuten antibioottiresistenttigeeneihin, kulumishiukkasiin ja mikromuoveihin, ei keskitytä, vaikka on vahvaa näyttöä siitä, että GSI voisi tarjota mahdollisuuksia myös hankalempien epäpuhtauksien poistoon. (Bodus et al. 2024) GSI-menetelmän kehittäminen voisi siis olla mahdollinen ratkaisu nykyisiin mikromuovin aiheuttamiin vedenlaatuongelmiin.

GSI-mekanismeja, jotka sopivat mikromuovien poistamiseen, ovat suodatus, laskeutus ja biotransformaatio. Suodatuksella on saatu aikaan erinomaisia tuloksia, sillä sen avulla hulevedestä on saatu poistettua lähes 90 % mikromuoveista. Mikromuovien kertyminen suodattavaan väliaineeseen voi kuitenkin tukkia suodatusjärjestelmää, minkä vuoksi tekniikka vaatii lisää kehittämistä toimiakseen optimaalisesti mikromuovien poistamiseen. Suodatuksen tehokkuuteen vaikuttaa väliaineena käytetyn maaperän tyyppi. Karkean hiekan suodatuspoistotehokkuus on luonnon materiaaleista tehokkain, 96 %. Muita suodatuksessa käytettäviä materiaaleja ovat esimerkiksi rakeinen aktiivihiili ja biohiili. Väliaineen huokosten tukkeutumisen estämiseksi väliaine tulisi vaihtaa säännöllisesti. Muovia kerännyt maaperä voidaan käsitellä esimerkiksi pyrolyysillä, jolloin siinä olevat mikromuovit palavat (Bodus et al. 2024).

Laskeutus puolestaan perustuu siihen, että mikromuovit laskeutuvat ajan kanssa vesialtaan pohjalle. Menetelmä on ongelmallinen, sillä useimmat mikromuovit ovat niin kevyitä, että ne eivät laskeudu lainkaan veden ollessa niitä tiheämpää ja painavampaa. Laskeutusta on käytetty menetelmänä erityisesti keinotekoisissa hulevesialtaissa, mutta sen on todettu poistavan vain reilu puolet, 55 %, mikromuoveista vedessä. (Bodus et al. 2024)

Biotransformaatio poistaa mikromuoveista peräisin olevia epäpuhtauksia bioteknisin menetelmin ilman laitteistoa. Tällöin hulevedet voitaisiin johtaa nykyisellä tavalla keinotekoiisiin kosteikkoihin, jossa esimerkiksi mikro-organismit hajottaisivat niitä. Polymeerien biotransformaatioon osallistuu kaksi entsyymiluokkaa: solunulkoiset ja solunsisäiset depolymeeraasit. Polymeerien entsyymaattinen hajoaminen tapahtuu yleensä hydrolyysin kautta, jossa ensin entsyymi kiinnittyy polymeerin pintaan ja sitten katalysoi eli käynnistää hydrolyyttisen pilkkoutumisen. Mikrobien eksoentsyymit hajottavat monimutkaisia polymeerejä. Esimerkki biotransformaatiosta on valkomätäsieni, jonka on osoitettu poistavan renkaiden kulumisyhdisteitä. (Bodus et al. 2024) Tällä hetkellä biotekniset ratkaisut ovat toteutettavissa pienessä mittakaavassa, mutta vaativat paljon jatkotutkimusta pystyäkseen olemaan menetelmänä tarvittavan tehokas (Abhishek Kumar et al. 2020).

Koska GSI perustuu luonnonmukaisiin hulevesiratkaisuihin, ovat renkaiden kulumishiukkasten mikromuovit kosketuksissa allasta ympäröivän luonnon kanssa. Tämä aiheuttaa ongelmia, sillä näiden mikromuovien seassa on paljon myrkyllisiä yhdisteitä ja raskasmetalleja, mitkä saattavat haitata ympäröivien kasvien kasvua sekä kasvien ja mikrobien yhteistä toimintaa. Vaikka GSI on menetelmänä varsin lupaava, on tärkeää muistaa, että sekin aiheuttaa vahinkoa ympäristölle.

Toinen huomioon otettava seikka on vaihteleva huleveden määrä. Kun hulevettä syntyy paljon ei suodatus ja laskeutuminen välttämättä toimi odotetulla tavalla. (Bodus et al. 2024) Kaupunkialueella GSI:n tehokas toteuttaminen vaatii kaupunkisuunnittelulta paljon viherrakentamista sekä hulevesialtaiden säännöllistä maaperän vaihtoa. Viherrakentamisella tarkoitetaan vihreiden ratkaisujen ja rakenteiden lisäämistä kaupunkiin. Esimerkkejä viherrakentamisesta ovat viherkatot ja -seinät.

Harvemmin asutuilla alueilla voisi puolestaan uusia teitä rakentaessa olla viisasta jättää 10 metrin suojavyöhykkeitä tiiviiseen asutukseen ja vesistöihin, jotta suurimmalta kuormitukselta välttyttäisiin. Ojan kaltaisia veden valumiseen tarkoitettuja rakenteita löytyy jo nyt usean maantien varrelta, sillä veden ei haluta jäävän tielle vaarantamaan turvallisuutta. On selvää, että tielle irronneet kulumishiukkaset tarttuvat sateen tuomaan veteen ja kulkeutuvat sen mukana ensisijaisesti ojiin, jotka suodattavat jo nyt joitakin epäpuhtauksia, jolloin ne eivät päädy alavirran vesistöihin (Needelman et al. 2007). Näitä olemassa olevia rakenteita voisi siis hyödyntää GSI:n hulevesialtaina, joissa vesi puhdistuisi epäpuhtauksista, jotka tässä tilanteessa ovat suurimmaksi osaksi renkaiden kulumishiukkasia.

Koska roiskevyöhyke on laaja, voisi mikromuovien leviämistä hallita konkreettisilla suojuilla, jotka voisivat toimia tehokkaasti yhdessä GSI:n kanssa. Suojina voisi toimia esimerkiksi puut ja pensaat, joiden pinnoille osa mikromuoveista ja muista kulumishiukkasista

jäisi sen sijaan, että ne leviäisivät ympäristöönsä ja siitä edelleen eteenpäin pintavalunnan mukana (Wang et al. 2024b). Tällainen käytäntö ei tietenkään ole mahdollista toteuttaa kaikkialla, mutta erityisesti vesistöjen rinnalla kulkeville teille se voisi olla mahdollinen ratkaisu, sillä sellaisilla alueilla mikromuovit päätyvät vesistöihin suoraan, jolloin kuormitus on merkittävämpää. Konkreettiset suojat ovat kuitenkin työläästi toteuttaa, sillä tiet ovat pitkiä.

Mikäli GSI tai konkreettiset suojat eivät ole mahdollisia toteuttaa esimerkiksi kaupunki-alueilla, kun tila on rajoitettu, hulevedet kannattaisi johtaa käsiteltäväksi toisaalle ennen kuin niitä johdetaan ympäristöön tai jätevedenpuhdistamolle. Tällöin puhdistettava vesimäärä olisi paljon pienempi ja puhdistus olisi halvempaa toteuttaa. Erilliskäsittely kuitenkin vaatii erillisiä käsittelyaltaita hulevesille.

Nykyään hulevesiä ei enää johdeta jätevedenpuhdistamoille, sillä sääilmiöt voivat aiheuttaa viemäreiden ylitäyttymistä. Sekaviemäri hule- ja jätevesille eivät kuitenkaan ole täysin historiaan jääneitä, sillä vanhemmissa kaupungeissa ne ovat edelleen käytössä. Jätevedestä mikromuoveja poistetaan ennen biologista käsittelyä esimerkiksi kalvosuodatuksen, sähkösaostuksen ja koaguloinnin avulla. Näiden mekaanisten prosessien poistotehokkuus on 16,5–98,4 % (Bodzek et al. 2024).

Yksi lupaavimmista tekniikoista jätevedessä olevan mikromuovin poistamiseksi vaikuttaa olevan membraanibioreaktori (MBR), jota käytetään osana biologista puhdistusprosessia. Membraanibioreaktori yhdistää kalvosuodatusta sekä biologista jätevedenkäsittelyä ja sen mikromuovin poistotehokkuus on 78,1–99,9 % (Bodzek et al. 2024; Picó & Damià 2019). Tämä tekniikka vaatisi ison investoinnin mikromuovin poistoon tarkoitettuun laitteistoon, esimerkiksi membraanireaktoreihin, jotta kaupunkien hulevedet voitaisiin esikäsitellä erillään tai yhdessä jäteveden kanssa niin, ettei niihin jäisi ympäristölle vaarallisia yhdisteitä.

3.3 Mikromuovin hallintamenetelmien vertailu: edut ja haasteet

Vaihtoehtoja autoliikenneperäisen mikromuovin ehkäisyyn, hallintaan ja poistoon on lukuisia, mutta ne vaativat tutkimusta ja/tai investointeja ollakseen tehokkaita. Liikenteen mikromuovit vaativat laajoja toimenpiteitä, sillä niitä syntyy kaikkialla ja tieverkostot ovat usein tiiviissä yhteydessä ihmisasutuksen sekä viereisen luonnon ja sen ekosysteemien kanssa. Alla olevassa taulukossa 1 on esitetty aiempien alalukujen ratkaisuehdotukset etuineen ja haasteineen tiiviisti ja kriittisesti tarkasteltuina. Taulukon jälkeen pohditaan ratkaisuehdotusten käytännöllisyyttä ja käyttökohteita tarkemmin.

Taulukko 1: Kootut ratkaisuehdotukset liikenteestä syntyvien mikromuovien hallitsemiseksi: edut ja haasteet.

Ehdotus	Edut	Haasteet
Renkaiisiin enemmän bioha-joavia materiaaleja/kierrätysmateriaaleja, ympäristöystävällisempiä lisäaineita ja kulumiskestävämmät renkaat	Renkaiden kulumishiuk-kaset eivät ole niin myrkyllisiä ekosysteemeille ja mikromuoveja syntyy vähemmän	Uudet materiaalit voivat vaikuttaa renkaan turvallisuuteen → vaatii paljon tutkimusta
Tiepintojen kunnon ylläpito	Tien pinta kuluttaa rengasta mahdollisimman vähän	Ilmasto- ja sääolosuhteiden negatiiviset vaikutukset tien kuntoon
Liikenteen sujuvoittaminen: pysähdysten ja kiihdytysten minimointi	Vähemmän mikro-muovien syntymistä (+ hiilidioksidipäästöjä)	Vaatii investoinnin liikennejärjestelmiin → korkeat kustannukset
Julkisen ja kevyen liikenteen suosiminen (ei autoilua ydinkeskustassa, jossa paljon asutusta), suurten liikenneväylien sijoittaminen kauemmaksi asutuskeskuksista	Kaupungin hengitysilma parempi mikromuovien, mutta myös muiden auton päästöjen osalta	Mahdolliset muutokset kaupungin infrastruktuuriin → pitkä prosessi ja vaatii paljon rahaa
GSI ensimmäisenä puolustuslinjana (suodatus ja laskeutus)	Mikromuovit tulevat käsitellyksi lähellä syntymispaikkaansa. GSI on luonnonmukainen ratkaisu, jolla on suuri lievennyspotentiaali	GSI altaat saattavat olla joidenkin eliöiden elinympäristöjä. GSI vaatii säännöllisiä toimenpiteitä toimiakseen
Hulevesialtasiin biotekniikkaa (biotransformaatio)	Biotekniikan ratkaisut ovat luonnollisia	Vaatii paljon tutkimusta toimiakseen
Suojat (esim. pensaat/puut) suojaväyhykkeet, hulevesialtaat	Estävät mikromuovien leviämisen tienvarsilta kaappaamalle ne. Tärkeitä erityisesti teillä, jotka sijaitsevat lähellä vesistöä	Vaatii paljon työtä, sillä tiet ovat pitkiä
Mikromuovia sisältävän veden käsittely erillään, jätevedenpuhdistuksen mikromuovien poistotehokkuuden kasvattaminen	Viimeistään jätevedenpuhdistus (esim. membraanireaktori) katkaisisi mikromuovien kulkeutumisen eteenpäin	Vaatii investointeja uuteen tekniikkaan ja mahdollisesti erillisiä käsitteilyalueita hulevesille

Jokainen ratkaisumenetelmä sopii erilaisille alueille ja ympäristöihin ja niillä voi olla myös tehokkaita tuloksia yhdessä käytettynä. Renkaiden materiaalien vaihtaminen on toimissaan käytössä kaikissa tilanteissa, mikä tekee siitä varsin vaikuttavan hallintakeinon. Tutkimus renkaiden materiaalin vaihtamisesta on kuitenkin edelleen aivan alkutekijöissä. Lisäksi ajoympäristöön huomion kiinnittäminen on tärkeää kaikkialla niin turvallisuuden kuin renkaiden kulutuksenkin kannalta. Lisääntyvät sään ääri-ilmiöt ja pohjoisessa hankala ilmasto vaativat kestävyyttä teiltä ja yhä aktiivisempaa ajoteiden huoltamista sekä ylläpitoa.

Liikenteen sujuvoittaminen ja yksityisautoilun vähentäminen tulevat ratkaisukeinoina kyseeseen ainoastaan kaupunkialueilla, jossa liikennettä ja risteyksiä on paljon. Ratkaisu vaatii kuitenkin niin paljon muutoksia kaupungin infrastruktuuriin ja investointeja älykkäisiin liikennejärjestelmiin, että sitä ei välttämättä ole kannattavaa tehdä pelkästään mikromuovien vähentämiseksi. Tämän ratkaisun vaikutus mikromuovien määrään ei välttämättä ole kovin iso, sillä mikromuoveja syntyy edelleen ja niiden käsittelyyn olisi syytä kiinnittää huomiota pienemmästä määrästä huolimatta. Mikäli toimenpiteillä saavutettaisiin muitakin hyötyjä, voidaan sen toteuttamista pitää järkevänä.

Syntyneiden mikromuovien hallinnassa ylivoimaisesti monikäyttöisin ja sovelluskykyisin menetelmä on GSI, sillä se sopii sekä maantiealueille että joillekin kaupunkialueille. GSI:tä hyödyntävät luonnonmukaiset hulevesialtaat sopivat hyvin sekä osaksi maantienreunaa että kaupungin viherrakentamista. Vaikka ne eivät pysty kaappaamaan kaikkea suoraa valumaa, on niiden kaappaama mikromuovin määrä varsin mittava, sillä suurin osa mikromuoveista kulkeutuu pintavalunnan mukana tien varsille.

GSI:n kolme mikromuovin poistoon sopivaa toimintaperiaatetta, suodatus, laskeutus ja biotransformaatio, mahdollistavat sen soveltamisen hyvinkin erilaisiin tarpeisiin esimerkiksi kaupunkirakentamisessa. Periaatteista tehokkain on suodatus, sillä sen poistotehokkuus on parhaimmillaan lähes 90 % (Bodus et al. 2024). Biotransformaatiollakin on kuitenkin potentiaalia kasvattaa poistotehokkuutta, sillä biotekniikka kehittyy alati. GSI:ssä on kuitenkin huomioitava, että koska altaat ovat osa ympäröivää luontoa, ovat ne myös osa joidenkin eliöiden elinympäristöä ja voivat siten aiheuttaa vaaraa ekosysteemille. Lisäksi GSI vaatii säännöllisiä toimenpiteitä toimiakseen halutulla tehokkuudella.

Konkreettiset suojat, jotka estävät mikromuovien leviämistä lähiympäristöön, ovat varmasti toimivia tietyissä tilanteissa, joissa mikromuovin leviäminen halutaan välttää lähes kokonaan, mutta yleisesti niiden käyttö voi olla hankalaa ainakaan yhtä isolla volyyymilla kuin GSI:n käyttö. Kuitenkin joillakin tietyillä alueilla suojat voivat toimia hyvin yhteistyössä GSI:n kanssa ja varmistaa, että lähes kaikki syntyneet mikromuovit päätyvät niiden pinnoille tai viereiseen hulevesialtaaseen (Wang et al. 2024b).

Huleveden käsittely erillään jätevedestä vähentäisi käsiteltävän jäteveden määrää, etenkin jos jäteveden muutkin mikromuovin lähteet saadaan minimoitua. Erillään käsittely kuitenkin vaatii laajoja hulevesiverkostoja ja laitteita tai tekniikoita, joilla mikromuovit saadaan poistettua hulevedestä. Yksi lupaava jätevedenpuhdistustekniikka on membraanireaktori, jonka mikromuovin poistotehokkuus on jopa 78,1–99,9 % (Bodzek et al. 2024). Mikäli luonnonmukaisen hulevesialtaan sijoittaminen tien vierelle ei ole mahdollista, voisi veden johtaa toisaalle hulevesialtaaseen, jossa olisi käytössä GSI. Ensisijaista olisi kuitenkin käsitellä hulevesi suoraan syntypaikalla.

EU:n direktiivi jätevesien mikropollutanttien poistosta velvoittaa jätevedenpuhdistamoita poistamaan mikromuoveja jätevedestä (Eurooppa-neuvosto 2024). Tämä näkyy erityisesti niissä kaupungeissa, joissa on vielä käytössä sekaviemärit, jotka kuljettavat myös hulevedet jätevedenpuhdistamoille. Sekaviemäreitä ei kuitenkaan enää rakenneta ja ne ovat jäämässä historiaan, minkä vuoksi tämä ei varsinaisesti ole tulevaisuuden ratkaisu.

Yhteenvetona voisi tulkita, että renkaiden materiaalin ja ajoympäristön optimoinnin jälkeen paras tapa hallita liikenneperäisiä mikromuoveja on GSI, jossa poistotehokkuus on korkea ja tekniikka luonnonmukainen. Mikäli paikan päällä käsittely ei ole mahdollista, on membraanireaktorin hyödyntäminen huleveden erilliskäsittelyssä tai jätevedenkäsittelyssä tehokkain tapa erotella mikromuovi hulevedestä.

4. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli selvittää, mitkä seikat vaikuttavat auton renkaiden kulumiseen eli niistä syntyvien mikromuovien määrään ja voisiko niissä käytettyjä materiaaleja vaihtaa biohajoaviin ja ympäristöystävällisempiin vaihtoehtoihin. Toinen tavoite oli kartoittaa ratkaisuja, joilla mikromuovien kulkeutumista voitaisiin hallita. Yleisenä tavoitteena oli koota tietoa erilaisista tutkimuksista ja niiden nykytilanteesta ja pohtia tutkittujen menetelmien vahvuuksia ja heikkouksia kokonaiskuvan hahmottamiseksi.

Auton renkaiden kulumishiukkasten syntymiseen vaikuttavat lukuisat seikat kuten vuodenaika, renkaan tyyppi sekä tien kunto ja tyyppi. Optimoimalla ajo-olosuhteet ympäristön asettamissa rajoissa, voidaan mikromuovien määrää hillitä. Tämä kirjallisuuskatsaus rajattiin kuitenkin koskemaan ainoastaan renkaita ja tietä. Tien kohdalla merkittävää on sen kunto, sillä huonokuntoinen tie kuluttaa rengasta enemmän kuin hyväkuntoinen. Tietyyppillekin huomattiin selkeä yhteys mikromuovin syntymisen määrään. Kaikkein paras tietyyppi mikromuovien hillinnän kannalta ovat moottoritiet, joten niitä tulisi suosia auto liikenteessä. Maantiet puolestaan aiheuttivat eniten mikromuovipäästöjä ja kaupunkiajo sijoittui aiempien väliin. Kaupunkiajoa on kuitenkin mahdollista vähentää merkittävästi lisäämällä julkista liikennettä ja kevyen liikenteen ratkaisuja. Lisäksi kaupungin liikenteen sujuvuuteen voidaan vaikuttaa älykkäillä liikennejärjestelmillä, joissa liikennevirtoja ennakoidaan.

Kirjallisuuskatsauksen myötä selvisi, että auton renkaiden materiaalina on mahdollista käyttää kierrätysmateriaalia sekä korvata kumia biohajoavilla vaihtoehdoilla. Tutkimus kierrätysmateriaalien käytöstä auton renkaissa on jo melko pitkällä, mutta biohajoavien materiaalien kohdalla tutkimus on vasta alkutekijöissään. Mikäli autoihin saataisiin isolla volyymilla käyttöön renkaita, joissa olisi käytetty biohajoavaa materiaalia synteettisen/luonnonkumin sijaan, voisi syntyvien mikromuovien määrä olla huomattavasti pienempi nykytilanteeseen verrattuna. Tutkimuksen lisääntyessä tämä näkemys saattaa olla täysin mahdollinen. Yksi esimerkki biohajoavasta materiaalista on koivunkuorijätteenä valmistettu uusiutuva materiaali.

Koska liikenteestä aiheutuvien mikromuovien syntymistä ei ainakaan vielä ole mahdollista täysin estää, on niiden leviämisen hallintaan tärkeää panostaa. GSI on jo nyt käytössä oleva hulevesienhallintamenetelmä, jota käytetään kestävässä kaupunkisuunnittelussa esimerkiksi tulvien estämiseksi. GSI voisi tutkimusten mukaan kuitenkin toimia ensimmäisenä puolustuslinjana mikromuoveille, sillä GSI:llä on suuri lievennyspotentiaali niiden käsittelyyn. GSI:n perustoimintaperiaate on suoran valuman kaappaaminen,

tässä tapauksessa tieltä ja käsitellä se esimerkiksi suodatuksen, laskeutuksen tai biotransformaation avulla. Suodatus on näistä tehokkain, sillä se poistaa lähes 90 % mikromuoveista ja sen teho riippuu GSI-rakenteen maaperästä. Tukkeutumisen estämiseksi maaperä tulee kuitenkin vaihtaa säännöllisesti.

Muita mahdollisia hallintakeinoja voisivat olla konkreettiset esteet, jotka estäisivät mikromuovien roiskumisen läheiseen vesistöön ja jätevedenpuhdistuksen tai hulevesien erilliskäsittelyn kehittäminen niin, että mikromuovien poistotehokkuus paranisi. Tässä työssä vertailtiin näitä sekä aiemmin esitettyjä ratkaisumenetelmiä autoliikenteen mikromuovipäästöjen hallitsemiseksi ja lopputuloksesta tuli tiivis ja kattava kirjallisuuskatsaus autoliikenneperäisistä mikromuoveista ja niiden hallitsemisesta. Työ kokoaa pohtien yhteen tietoa ja konkretiaa useista eri tutkimuksista.

Mikromuovien syntymisen estäminen ja hallitseminen ovat siis mahdollisia useilla eri keinoilla ja menetelmillä. Ongelma on ajankohtainen ja tutkimukset renkaiden materiaaleista, kulumisesta sekä kulumishiukkasten hallinnasta ovat vasta työpöydällä. Pienetkin parannukset vähentävät vesistöjen mikromuovikuormaa ja parantavat niiden vedenlaatua. Tulevaisuudessa liikenteen aiheuttamien mikromuovien osuus kaikista primäärisistä mikromuoveista tulee varmasti vähenemään huomattavasti, mikäli tutkimus edistyy yhtä tehokkaasti kuin viime vuosina.

LÄHTEET

Abhishek Kumar A., Quanyin T. & Jinhiu L. 2020. Biotechnological Potential for Microplastic Waste. *Trends in Biotechnology (Regular Ed.)*, vol. 38, no. 11. pp. 119-699.

Bank M.S., 2021. *Microplastic in the Environment*. Springer International Publishing AG.

Bodus B., O'Malley K., Dieter G., Gunawardana C. & McDonald W., 2024. Review of emerging contaminants in green stormwater infrastructure: Antibiotic resistance genes, microplastics, tire wear particles, PFAS, and temperature. *The Science of the Total Environment* Vol. 906.

Bodzek M., Pohl A. & Rosik-Dulewska C., 2024 *Microplastics in Wastewater Treatment Plants: Characteristics, Occurrence and Removal Technologies*. *Water (Basel)*, vol. 16, no. 24, pp. 35-74.

Burghardt T.E. & Pashkevich A., 2023. Road Markings and Microplastics – A Critical Literature Review. *Transportation Research. Part D, Transport and Environment*, vol. 119. pp. 103-740.

Comi A. & Antonio P., 2024. Assessing Potential Sustainability Benefits of Micromobility: A New Data Driven Approach. *European Transport Research Review*, vol. 16, no. 1, pp. 19–20.

Crawford C.B. & Quinn B., 2016. *Microplastic Pollutants*. Elsevier Science & Technology.

Dris R., Gasperi J., Saad M., Mirande C. & Tassin B., 2016. Synthetic Fibers in Atmospheric Fallout: A Source of Microplastics in the Environment? *Marine Pollution Bulletin*, vol. 104, no. 1–2. pp. 290–93.

Euroopan parlamentti, 2018a. Mikromuovit: lähteet, haitat ja EU:n ratkaisut. Nettisivu. Saatavissa: <https://www.europarl.europa.eu/topics/fi/article/20181116STO19217/mikromuovit-lahteet-haitat-ja-eu-n-ratkaisut>. (Viitattu 27.11.2024)

Euroopan parlamentti, 2018b. Merten muovijäte: taustatietoa, haittavaikutuksia ja uudet säännöt. Nettisivu. Saatavissa: <https://www.europarl.europa.eu/topics/fi/article/20181005STO15110/merten-muovijate-taustatietoa-haittavaikutuksia-ja-uudet-saannot> (Viitattu 11.12.2024)

Euroopan parlamentti, 2018c. Muovijäte ja kierrätys EU:ssa. Nettisivu. Saatavissa: <https://www.europarl.europa.eu/topics/fi/article/20181212STO21610/muovijate-ja-kierratys-eu-ssa> (Viitattu 11.12.2024)

Eurooppa-neuvosto, 2024. Nettisivu. Saatavissa: <https://www.consilium.europa.eu/fi/press/press-releases/2024/11/05/urban-wastewater-council-adopts-new-rules-for-more-efficient-treatment/>. (Viitattu 3.12.2024)

Gouin T., 2022. Dietary and Inhalation Exposure to Nano- and Microplastic Particles and Potential Implications for Human Health. 1st ed.

Huber M., Archodoulaki V.-M., Pomakhina E., Pukánszky B., Zinöcker E. & Gahleitner M., 2022. Environmental Degradation and Formation of Secondary Microplastics from Packaging Material: A Polypropylene Film Case Study. *Polymer Degradation and Stability*, vol. 195. pp. 109-794.

Jiang, C.Y., Hu X.-M. & Chen W.-N., 2021. An Urban Traffic Signal Control System Based on Traffic Flow Prediction. 2021 13th International Conference on Advanced Computational Intelligence (*ICACI*), IEEE, pp. 259–65.

Liikenneturva, 2024. Auton renkaiden vaihtovinkit. Nettisivu. Saatavissa: <https://www.liikenneturva.fi/liikenteessa/auton-renkaiden-vaihtovinkit/#49c70ad4>. (Viitattu 5.12.2024)

Mayer P.M., Moran K.D., Miller E.L., Brander S.M., Harper S., Garcia-Jaramillo M., Carrasco-Navarro V., Ho K.T., Burgess R.M., Thornton Hampton L.M., Graned E.F.,

McCauley M., McIntyre J.K., Kolodziej E.P., Hu X., Williams A.J., Beckingham B.A., Jackson M.E., Sanders-Smith R.D., Fender C.L., King G.A., Bollman M., Kaushal S.S., Cunningham B.E., Hutton S.J., Lang J., Goss H.V., Siddiqui S., Sutton R., Lin D. & Mendez M., 2024. Where the Rubber Meets the Road: Emerging Environmental Impacts of Tire Wear Particles and Their Chemical Cocktails. *The Science of the Total Environment*, vol. 927. pp. 171-153.

Mitchell C.J. & Anand D.J., 2024. Mitigating Tire Wear Particles and Tire Additive Chemicals in Stormwater with Permeable Pavements. *The Science of the Total Environment*, vol. 908, pp. 168236–168236.

Myszka R., Enfrin M. & Giustozzi F., 2023. Microplastics in Road Dust: A Practical Guide for Identification and Characterisation. *Chemosphere (Oxford)*, vol. 315. pp. 137757–137757.

Needelman, B.A., Kleinman P.J.A., Strock J.S. & Allen A.L., 2007. Improved Management of Agricultural Drainage Ditches for Water Quality Protection: An Overview. *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 62, no. 4, pp. 171–78.

Nokian renkaat, 2024a. Millaiset urasyvyydet on uusissa renkaissa? Nettisivu. Saatavissa: <https://www.nokianrenkaat.fi/asiakaspalvelu/renkaiden-vaihto-ja-huolto/renkaiden-ika/millaiset-urasyvyydet-on-uusissa-renkaissa/#2df0e83b>. (Viitattu 5.12.2024)

Nokian renkaat, 2024b. Nokian renkaat on allekirjoittanut kehittämissyhteistyösopimuksen, jonka tavoitteena on tuoda koivunkuorijätteestä valmistettu uusiutuva materiaali renkaiisiin. Nettisivu. Saatavissa: https://yritys.nokianrenkaat.fi/uutiset-ja-media/uutinen/nokian-renkaat-on-allekirjoittanut-kehitysyhteistyosopimuksen-jonka-tavoitteena-on-tuoda-koivunkuorijatteesta-valmistettu-uusiutuva-materiaali-renkaiisiin/?utm_source=chatgpt.com#2922170f. (Viitattu 9.1.2024)

Panko J.M., Chu J., Kreider M.L. & Unice K.M., 2013. Measurement of Airborne Concentrations of Tire and Road Wear Particles in Urban and Rural Areas of France, Japan, and the United States. *Atmospheric Environment (1994)*, vol. 72, pp. 192–99.

Picó Y. & Damià B., 2019. Analysis and Prevention of Microplastics Pollution in Water: Current Perspectives and Future Directions. *ACS Omega*, vol. 4, no. 4.: pp. 670–919.

Polukarova M., Hjort M. & Gustafsson M., 2024. Comprehensive Approach to National Tire Wear Emissions: Challenges and Implications. *The Science of the Total Environment*, vol. 924. pp. 171-391.

Rengasmarket, 2024. Kierrätetyistä muovipulloista raaka-ainetta Continentalin renkaiisiin. Nettisivu. Saatavissa: https://rengasmarket.fi/muovipulloista-raaka-ainetta-renkaiisiin/?utm_source=chatgpt.com. (Viitattu 9.1.2025)

Schell T., Hurley R., Buenaventura N.T., Mauri P.V., Nizzetto L., Rico A. & Vighi M., 2022. Fate of Microplastics in Agricultural Soils Amended with Sewage Sludge: Is Surface Water Runoff a Relevant Environmental Pathway? *Environmental Pollution (1987)*, vol. 293. pp. 118-520.

Scopetani C., Martelliini T. & Campos D., 2022. Microplastics in Aquatic Environments Occurrence. Distribution and Effects. MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

Singh R. & Sharma N.R., 2023. *Microplastic Pollution: Causes, Effects and Control*. Bentham Science Publishers.

Sun J., Dai X., Wang Q., van Loosdrecht M.C.M., Ni B-J., 2019. Microplastics in Wastewater Treatment Plants: Detection, Occurrence and Removal. *Water Research (Oxford)*, vol. 152. pp. 21–3.

Terveyden ja hyvinvoinnin laitos (THL), 2024. Ympäristön mikromuovit. Nettisivu. Saatavissa: <https://thl.fi/aiheet/ymparistoterveys/ymparistomyrkyt/ympariston-mikromuovit>. (Viitattu 10.12.2024)

United nations, 2017. 'Turn the tide on plastic' urges UN, as microplastics in the seas now outnumber stars in our galaxy. Nettisivu. Saatavissa:

<https://news.un.org/en/story/2017/02/552052-turn-tide-plastic-urges-un-microplastics-seas-now-outnumber-stars-our-galaxy>. (Viitattu 27.11.2024)

Wang C., Song J., Nunes L.M., Zhao H., Wang P. Liang Z., Arp H.P.H., Li G. & Xing B., 2024a. Global Microplastic Fiber Pollution from Domestic Laundry. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 477. pp. 135-290.

Wang Y., Li X., Yang H., Pu Q., He W. & Li X., 2024b. A Review of Tire Wear Particles: Occurrence, Adverse Effects, and Control Strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 283, pp. 116-782.

Waterandwastewater, 2024. Nettisivu. Saatavissa: <https://www.waterandwastewater.com/what-are-the-5-stages-of-wastewater-treatment/> (Viitattu 10.12.2024)

Ympäristöministeriö. Nettisivu. Saatavissa: <https://ym.fi/kertakayttomuovien-kulutuksen-rajoittaminen-lainsaadannolla> (Viitattu 3.12.2024)

Ziajahromi S., Drapper D., Hornbuckle A., Rintoul L. & Leusch F.D.L, 2020. Microplastic Pollution in a Stormwater Floating Treatment Wetland: Detection of Tyre Particles in Sediment. *The Science of the Total Environment*, vol. 713. pp. 136-356.