

TARTU ÜLIKOOL
ÖKOLOOGIA JA MAATEADUSTE INSTITUUT
ZOOLOOGIA OSAKOND
LOOMAÖKOLOOGIA ÕPPETOOL

Hennessy-Elizabeth Dubrov

MIKROPLAST ÕKOSÜSTEEMIDE SISESTE
PROTSESSIDE MÕJUTAJANA

Bakalaureusetöö

Juhendajad: Randel Kreitsberg,
Tuul Sepp

TARTU 2023

Infoleht

Mikroplast ökosüsteemide siseste protsesside mõjutajana

Keskkond on globaalselt mõjutatud inimtegevusest ja ühe negatiivse inimõjuna on üha enam keskkonnateaduste fookuses mereprügi ja mikroplastiga seotud probleemid. Sellegipoolest pole piisavalt uuritud mikroplasti mõju ulatust organismidele ja selle olemust. Käesolev bakalaureusetöö annab ülevaate tehtud uuringutest, mis hõlmavad mikroplasti mõju ökosüsteemidele ja liikidele ning selle levikut üle troofiliste tasemete ja ka koosmõjule teiste keskkonnamuutustega. Mikroplasti mõjud ulatuvad troofilisest tasemest välja, selle sattumisel organismi võib muutuda liigi käitumine, sigimine, toitumine ja liikidevaheline konkurents. Samuti on mikroplasti mõjud ökosüsteemide lõikes erinevad ning esinevad koosmõjud ka teiste inimtekkeliste keskkonnateguritega. Mõned organismid on suutnud kohastuda mikroplasti reostusega, kuid seda esineb harva.

Märksõnad: mikroplast, ökosüsteemid, troofiline tase, mõju, kohastumused, inimtekkelised keskkonnamuutused

Microplastic influence on processes within ecosystems

The environment is globally affected by human activities, and as one of the negative anthropogenic impacts, environmental sciences have increased focus on problems related to marine litter and microplastics. Nevertheless, the extent and nature of the impact of microplastics on organisms has not been sufficiently studied. This bachelor's thesis provides an overview of the research conducted, which includes the impact of microplastics on ecosystems and species, its transfer across trophic levels, as well as its interaction with other environmental changes. The effects of microplastic extend beyond the trophic level, and after entering the organism, it can alter behavior, reproduction, nutrition and competition between species. In addition, the effects of microplastics differ between ecosystems, and interactions with other anthropogenic environmental factors also occur. Some organisms have been able to adapt to microplastic pollution, but it is rare.

Keywords: microplastic, ecosystems, trophic level, impact, adaptations, anthropogenic environmental changes

SISUKORD

1. Sissejuhatus	4
2. Mikroplasti mõjud troofiliste tasemete kaupa	7
3. Mikroplasti mõju organismi elutegevusele	10
3.1 Mikroplasti mõju käitumisele	10
3.2 Mikroplasti mõju toitumisele	11
3.3 Mikroplasti mõju sigimisele	12
3.4 Mikroplasti mõju liikidevahelisele konkurentsile	13
4. Mikroplasti mõju ökosüsteemidele.....	14
4.1 Mikroplasti mõju mereökosüsteemile	14
4.2 Mikroplasti mõju maismaa ökosüsteemidele	16
5. Liikide kohastumused mikroplasti reostusega.....	19
5.1 Evolutsioonilised kohastumused	19
5.2 Lühiajalised kohanemisstrateegiad.....	20
6. Mikroplasti reostuse koosmõju teiste keskkonnamuutustega.....	21
6.1 Temperatuuri tõus.....	21
6.2 Korallide hävimine	22
6.3 Patogeenide kiirem levik	23
7. Arutelu	25
8. Edasised uurimisvaldkonnad	28
Kokkuvõte	30
Summary.....	32
Tänuavaldus.....	34
Kasutatud kirjandus	35
Lihtlitsents	47

1. Sissejuhatus

Keskkond on globaalselt mõjutatud inimtegevusest ja ühe negatiivse inimmõjuna on üha enam keskkonnateaduste fookuses mereprügi ja mikroplastiga seotud probleemid. Kuigi teadmised mikroplasti mõjust ökosüsteemidele on suurenenud, ei ole ka praeguseks tehtud uuringud piisavad, et mõista mikroplasti mõju ja olemust (Environment, U. N., 2017). Mere plastireostus neljakordistub 2050. aastaks, kui alates 2020. aastast edasi selle tootmine jätkub samal määral nagu praegu (Lebreton *et al.*, 2019). See tõstab mikroplasti koguse meredes üle ökoloogilise ohuläve (Everaert *et al.*, 2020). Mikroplasti puhul on kokkuleppeliseks ökoloogiliseks ohuläveks $1,21 \cdot 10^5$ tk/m³ kohta, mille ületamisel tekib potentsiaalne kahju ökosüsteemidele (Everaert *et al.*, 2020). Mikroplasti mõju on vajalik uurida, kuna tehtud uuringud ei ole piisavad selgitamiseks mikroplasti negatiivseid mõjusid nii keskkonnale, looduses elavatele organismidele ja lõpuks ka inimesele.

Plasti sattumiseks keskkonda on erinevaid võimalusi, kõige tavapärasemalt räägitakse primaarsest ja sekundaarsest mikroplastist. Primaarne mikroplast on toodetud spetsiaalselt väikestes mõõtudes ning seda kasutatakse meigitoodetes, hooldustoodetes ja mujal (Surendran *et al.*, 2023). Primaarne mikroplast satub keskkonda peamiselt läbi reovee äravoolusüsteemide (Surendran *et al.*, 2023). Sekundaarne mikroplast tekib plasttoodete degradeerumisel keskkonnas, mida kiirendavad tuul, vesi, UV-kiirgus ning muud abiootilised ja/või inimmõjud (Surendran *et al.*, 2023). Need satuvad keskkonda läbi jäätmete transpordi või prügilatest tuule ja veega (Surendran *et al.*, 2023). Plasti vastupidavuse tõttu võib see laguneda mikroplastiks pikka aega, merre võib see sattuda ka rannikuäärse inimtegevuse tõttu (Egger *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2022).

Plasti ei ole võimalik meredest eemaldada, kui see on sinna sattunud (Environment, U.N., 2017). See laguneb järjest pisemateks tükkideks ja muutub mikroplastiks ning seejärel nanoplastiks, mis läbib organisme ka rakutasandil (Environment, U.N., 2017). Mikroplastiks kutsutakse kokkuleppeliselt plastitükke mis on väiksemad kui 5 mm (Collignon, 2014), nanoplast on aga väiksem kui 1000 nm (Gigault, 2018). Selliste suuruste puhul akumuleerub mikroplast kiiresti organismidesse ja levib üle troofiliste tasemete, kuni jõuab lõpuks ka inimese organismi (Tekman, *et al.*, 2022). Mikroplasti reostus võib koosineda koos muude inimtekkeliste negatiivsete mõjudega, nagu ülepüük ja eutrofeerumine, mis ohustavad juba niigi ohus olevaid liike, nagu munkhülged (*Phocidae sp.*) ja kašelotid (*Physeter macrocephalus*) Vahemeres (Tekman, *et al.*, 2022).

Plastireostuse negatiivset mõju tervisele on näidatud paljudel liikidel ning paljud tähtsad mereökosüsteemid, nagu korallrifid ja mangroovid, on samuti plasti reostusest ohustatud (Tekman, *et al.*, 2022). Mitmes maailma paigas nagu Vahemeri, Ida-Hiina, Kollane meri ja Arktiline merejää, on täheldatud mikroplasti kogust $1,21 \cdot 10^5$ tk/m³ kohta – see on piir, mida ületades on suur tõenäosus ökoloogiliste riskide tekkeks (Everaert *et al.*, 2020). Näiteks võib mikroplast suurendada organismide suremust, vähendada sigimist ja muuta käitumist ning nende mõjude läbi muutub populatsioonide dünaamika (Walkinshaw *et al.*, 2020).

Mikroplasti mõju maismaakooslustele on võrreldes mereökosüsteemidega vähem uuritud (Surendran *et al.*, 2023). Mikroplasti omadustest lähtuvalt suurendab plastireostus maismaakooslustes „ökoloogilise üllatuse“ tekke tõenäosust: kuna mikroplast on väga vastupidav, see võib reageerida abiootilise keskkonnaga, võib mõjutada maismaa kooslusi nii otse kui ka kaudselt ning võib reageerida teiste saasteainetega (Baho *et al.*, 2021). Ökoloogilise üllatuse all mõeldakse ökosüsteemi toimimise drastilist kõrvalekallet ennustustatust ning tavaliselt omab see suuri negatiivseid tagajärgi ökosüsteemile (Christensen *et al.*, 2006; Filbee-dexter *et al.*, 2017). Samuti on mikroplasti põllumaale akumulereerumist palju uuritud, kuid ei teata piisavalt mikroplasti mõjust mulla ökosüsteemidele (Boots *et al.*, 2019).

Mõned organismid suudavad kohaneda mikroplasti suure kogusega nii maismaal kui meres (Amaral-Zettler, *et al.*, 2020). Meres kutsutakse sellist mikroobset mikroplastist elupaika „plastisfäär“ (Amaral-Zettler, *et al.*, 2020). Plastisfääris levivad suuremas osas mikroskoopilised organismid, kuid isegi sellise väikese elupaiga muudatuse tagajärjeks võivad olla tervete ökosüsteemide ja koosluste struktuuri muutused. (Amaral-Zettler *et al.*, 2020).

Vähe on uuritud mikroplasti mõju läbi troofiliste tasemete, kriitilistele ökoloogilistele protsessidele ja koosmõju antropogeensete stressoritega (Baho, *et al.*, 2021). Seetõttu on alljärgneva töö eesmärk koguda teadmisi mikroplasti mõjudest ökosüsteemidele, neid kokkuvõtvalt kajastada ja analüüsida. Detailsemalt uuritakse mikroplasti mõju ökosüsteemides toimuvatele protsessidele, mis on seotud muutustega organismide kohastumuses ja konkurentsivõimes. Plastireostuse mõjusid analüüsitakse troofiliste tasemete lõikes ja koosmõjus teiste keskkonnamuutustega. Uurimistöo hüpoteesideks on:

- 1) Mikroplasti mõju erineb liigiti ja see põhjustab muutusi kooslustes.
- 2) Mikroplastil on koosmõju teiste inimtekkeliste keskkonnamuutustega.

- 3) Mikroplasti mõju tugevus sõltub ökosüsteemist
- 4) Mikroplasti mõju kooslusele sõltub koosluse liigirikkusest

Selles töö raames teada saadud informatsioon mikroplasti mõjudest ökosüsteemidele on sisendiks ICES-i (International Council for the Exploration of the Sea) WGBEC (Working Group on Biological Effect of Contaminants) töögrupi 2025. aasta aruandele. Lähteülesandeks: „*Review and evaluate both direct and indirect environmental effects of natural and synthetic particles on marine biota*“ (Koostada ülevaade ja hinnata looduslike ja sünteetiliste osakeste otseseid ja kaudseid keskkonnamõjusid).

2. Mikroplasti mõjud troofiliste tasemete kaupa

Mikroplasti osakeste sattumine ühte organismi või selle organismi troofilisele tasemele ei piira mikroplasti levikut (näiteks: Farrell & Nelson, 2013; Araújo & Malafaia, 2020). Mitmed uuringud tõdevad, et mikroplasti mõjud ulatuvad ühest organismist palju kaugemale ja jõuavad ka teistele troofilistele tasemetele (näiteks: Farrell & Nelson, 2013; Araújo & Malafaia, 2020). Farrelli ja Nelsoni (2013) katse oli üks esimesi, tõestamaks mikroplasti kandumist üle troofiliste tasemete. Katses kandus mikroplast söödavalt rannakarbilt (*Mytilus edulis*) tavalise rannakrabi (*Carcinus maenas*) organismi läbi söömise (Farrell & Nelson, 2013). Katses vaadeldi mikroplasti kogust rannakrabi organismis 21 päeva jooksul (Farrell & Nelson, 2013). Selle ajaga kadus mikroplasti kogus organismist peaaegu täielikult, kuid mikroplasti leiti ka seedenäärmest, sigimikust ja lõpustest (Farrell & Nelson, 2013). Kudedes akumulereuval mikroplastil on palju suurem risk tekitada terviseprobleeme organismis (Avio *et al.*, 2015). Sarnaseid tulemusi mikroplasti levimisest erinevates kudedes, vereringes ja lõpustes on leitud veel krabide (Watts *et al.*, 2014), karpide (Browne *et al.*, 2008; von Moos *et al.*, 2012) ja kalade (Avio *et al.*, 2015; Lu *et al.*, 2016) puhul. Seega ulatuvad mikroplasti mõjud kaugemale ühe troofilise taseme piiridest ning võivad akumulereuda erinevates kudedes, tekitades sellega organismidel terviserikkeid.

Mikroplasti ülekandumisel troofilistes tasemetes võib jõuda see ühest ökosüsteemist teise, näiteks mereökosüsteemilt maismaale (Araújo & Malafaia, 2020). Araújo ja Malafaia (2020) leidsid enda eksperimendis, et mikroplast kandub üle mitme troofilise taseme, kui kõrgemal troofilisel tasemel olev kiskja (siinkohal koduhiir (*Mus musculus*)) sööb madalama troofilise taseme kiskjat (*tambatinga* kala (♀ *Colossoma Macropomum* x ♂ *Piaractus Brachypomus*)) ning see kala on söönud toiduks konnakulleseid (*Physalaemus cuvieri*), kes viibisid mikroplastiga reostunud vees. Mikroplast säilitab seejuures ka neurotoksilise efekti, mille tõestuseks on käitumise erinevus normaalsest, siinkohal ärevuse tõus ja kiskja vältimise oskuse vähenemine hiirtel (Araújo & Malafaia, 2020). D'Souza, jt (2020) leidsid mikroplasti vabalt elavate vesipappide (*Cinclus cinclus*) organismist. Vesipapid on sobivad mikroplasti kõrgema troofilise taseme mõjude jälgimisel, kuna toituvad suurtes kogustes mikroplasti sisaldavatest veeselgrootutest (Windsor *et al.*, 2019). Huerta Lwanga jt (2017) uuringus leiti, et kodukanades (*Gallus gallus domesticus*) akumulereub mikroplast märgatavalt. Mõõtes mikroplasti kogust mullas ning vihmausside ja kanade ekskrementide, leidis seda kõige rohkem kanade ekskrementides, seega mikroplast siinjuhul

biomagnifitseerub (akumuleerub järk-järguliselt kõrgemate troofiliste tasemete suunas) (Huerta Lwanga *et al.*, 2017). Tuleb mainida, et see uuring viidi läbi looduslikes tingimustes, kus kanad liikusid koduaedades vabalt ringi (Huerta Lwanga *et al.*, 2017). Seetõttu võib suurem mikroplasti kogus tuleneda kanade otsesest makro- või mikroplasti ärasöömise (Huerta Lwanga *et al.*, 2017). Mikroplasti ülekandumine nii troofiliste tasemete kui ökosüsteemide lõikes tekitab igas organismis negatiivseid kõrvalnähte, on ka leitud, et mikroplasti ülekandumine ei vähenda selle ohtlikkust ja mõju ulatust (Araújo & Malafaia, 2020).

Mõned uuringud toovad välja, et mikroplast ei biomagnifitseeru, seega peaks madalama troofilise taseme organismis olema kõige suurem mikroplasti kogus (Adriaens *et al.*, 2007; Walkinshaw *et al.*, 2020). Selle põhjuseks võib olla mikroplasti omadus väljuda organismi kehast kiiremini kui see jõuab järgmise troofilise tasemeni läbi esimese kokkupuutunud organismi ärasöömise (Walkinshaw. *et al.*, 2020). Teisena avaldab mõju erinevate troofiliste tasemete ja ka liigivaheline toitumisstrateegiate erinevus (Walkinshaw. *et al.*, 2020). Filtreerijatest leitakse kõige suuremas koguses plasti, kuna toitumine toimub pidevalt vett läbi filtreerides (de Sá *et al.*, 2018; Walkinshaw. *et al.*, 2020). Madalamate troofiliste tasemete haavatavus ei välista riski kõrgemate tasemete organismidele, kuna mikroplast võib organismis akumulereuda soolestikus, lõpustes ja muudes kudedes ning säilitada toksilisust (Walkinshaw. *et al.*, 2020).

Mikroplast võib tekitada oma suuruse tõttu organismis suurt kahju, isegi selle väljutamisel ei lagune mikroplast lõplikult veel pikka aega, vaid laguneb väiksemateks tükkideks, mis suudavad läbida organismi rakke (Environment, U.N., 2017). Arvestades mikroplasti reostuse ulatust, peame vaatlema ka võimalikke erinevusi organismide kohastumistes mikroplasti reostusega. Mõned troofilised tasemed tulevad halvemini toime mikroplasti negatiivsete mõjudega. Lotka-Volterra mudeli järgi on kiskjad saakloomadest mikroplasti mõjule haavatavamad (Huang *et al.*, 2020). See tuleneb kiskjate sõltumisest saakloomade populatsiooni suurusest, kui saagi arvukus langeb, on ka kiskjatel raskem toime tulla (Huang *et al.*, 2020). On leitud ka nanoplasti eristuvat mõju kiskjatele võrreldes saakloomadega, nanoplast akumulereub tippkiskjates, mis omakorda põhjustab muutusi käitumises ja metabolismis (Cedervall, *et al.*, 2012). Kiskjate suurema haavatavuse hüpoteesi toetab ka Zhao jt (2016) uuring, milles leiti 17 erineva linnu seedetraktis plastijääke, millest 90% moodustas mikroplast. Katse piirkonnas leidub mikroplasti suuremas koguses, seega reostatud aladel on ka kõrgema troofilise taseme organismid ohus

(Zhao *et al.*, 2016). Teised uuringud räägivad vastu eelnevale väitele ja toovad välja madalamates troofilistes tasemetes leitava mikroplasti koguse, mis on kordades suurem kui kõrgematel tasemetel (Walkinshaw. *et al.*, 2020). Arvestades madalama troofilise taseme organismide kehasuursi, on suurem mikroplasti kogus ka suuremaks riskiteguriks neile, mitte kõrgematele tasemetele (Walkinshaw. *et al.*, 2020). Lisaks jõuab mikroplast läbida madalama taseme organismi seedetrakti enne, kui jõuab kiskja toidulauale (Walkinshaw. *et al.*, 2020). Paljud bentilised organismid nagu molluskid on enda toitumistüübi tõttu mikroplasti reostusele haavatavamad, kuna nad filtreerivad aktiivselt merepõhja settinud anorgaanilist ja orgaanilist ainet ning seetõttu võib mikroplast nende kehas akumulereuda (de Sá *et al.*, 2018). Sellest lähtuvalt on madalama troofilise taseme organismid suurema riski all mikroplasti mõjudest ning nende populatsioonide vähenemine võib mõjutada ka meie toiduohutust (Walkinshaw. *et al.*, 2020).

3. Mikroplasti mõju organismi elutegevusele

3.1 Mikroplasti mõju käitumisele

Mikroplasti muudest mõjudest lähtuvalt (toitumise, kehasuuruse, sigimise jm muutumine) muutub tihti ka vastava organismi käitumine (näiteks: Chen *et al.*, 2017; McCormick *et al.*, 2020). Näiteks tekitab nano- ja mikroplasti akumulatsioon sebrakala (*Danio rerio*) vastse organismi oksüdatiivset stressi ja kehasuuruse vähenemist, mis omakorda põhjustas hüpoaktiivsust (Chen *et al.*, 2017). 2020. aastal sama uurija tehtud eksperiment kajastas vastupidiseid tulemusi, kus mikroplasti akumulatsioon sebrakala (*D. rerio*) seedetraktis ja lõpustes põhjustas kalal hüperaktiivsust, mis võis tuleneda östrogeeni taseme tõusust (Chen *et al.*, 2020). Söödava südakarbi (*Cerastoderma edule*) toitumine Läänemere merekarbi vastsetest (*Macoma balthica*) vähenes märgatavalt (30%) peale vastsetele mikroplastiga saastunud zooplanktonite sisse söötmist (Van Colen *et al.*, 2020). Söödav südakarp on bentiline filtreerija ning toitumine sõltub vastsete ujumisest karbi lähedale (Van Colen *et al.*, 2020). Peale mikroplasti ärasöömist kahjustas Läänemere merekarbi vastsete ujumisvõimekus, mille järel sai südakarp vähem süüa (Van Colen *et al.*, 2020). Seega põhjustas mikroplast kas otse või kaudselt organismide käitumise muutumist.

Organismi käitumise muutumine võib olla põhjustatud ka muude stressorite kombineerumisel mikroplasti reostusega (McCormick *et al.*, 2020). Ühe suurema eksperimendi käigus uuriti korallriffide läheduses elavate kalade käitumist mikroplastiga kokkupuutel (McCormick *et al.*, 2020). Uuriti surnud ja elavate korallide läheduses elutsevate kalade käitumist (McCormick *et al.*, 2020). Surnud korallide juures elavad kalad suundusid tihti ohutust elupaigast kaugemale toitu otsima, mis omakorda viis suurema suremuseni (McCormick *et al.*, 2020). Ühele grupile kaladest söödeti sisse ka mikroplasti, mille tulemusena antud kalad käitusid veel riskantsemalt ning suremus suurenes surnud korallidega koosmõjul peaaegu 100%-ni (McCormick *et al.*, 2020). Surmasaamise tõenäosust suurendav käitumine on järjekordne mikroplasti kaudsem mõju.

Mikroplasti mõju organismi käitumisele võib esineda ka ainult kindlates situatsioonides (Seuront, 2018). Näiteks harilik ranniklane (*Littorina littorea*) kasutab kiskjate (antud uurimuses tavalise rannakrabi (*Carcinus maenas*)) äratundmiseks kemosensoorseid signaale, et õige ajal põgeneda (Seuront, 2018). Mikroplastiga kokkupuutel reostatud vees väheneb teo võime kiskjaid märgata ning seetõttu suureneb ka

teo suuremus (Seuront, 2018). Reostatud vesi raskendab organismide toimetulekut, mis omakorda suurendab suremust.

Mikroplasti füüsilised mõjud võivad samuti organismi käitumist muuta (Rehse *et al.*, 2016; De Felice *et al.*, 2019). Mikroplastiga (1-100 μm 12.5-400 mg L^{-1}) 96h kokkupuutes olevale zooplanktonile (*Daphnia magna*) põhjustas see immobilisatsiooni, mis võib kiskjate juuresolekul olla letaalne (Rehse *et al.*, 2016). Selle uurimuse juures peab täheldama, et antud eksperimentaalsed kogused ei pruugi olla leitavad loomulikes tingimustes (Rehse *et al.*, 2016). On leitud ka vastanduvaid tulemusi *D. magna* liikuvuses, kus mikroplasti sisse söötmise puhul oli zooplankton palju aktiivsem kui tavatingimustes (De Felice *et al.*, 2019). Sellegipoolest leiavad mõlemad uurimused, et käitumuslikud muutused *D. magna*l on liigile riskiks.

3.2 Mikroplasti mõju toitumisele

Mikroplasti sattumine organismi toitu mõjutab nii organismi talitlust, käitumist kui ka toitumist. Mõnede liikide puhul on märgatud käitumuslikku kohanemist mikroplasti söömise vältimiseks (Cole *et al.*, 2015; Sussarellu *et al.*, 2016). Aerjalalise *Calanus helgolandicus* toitumine vähenes märgatavalt peale mikroplasti ärasöömist (Cole *et al.*, 2015). Kõrvalmõjuna hakkasid aerjalalised toituma ainult kindla suurusega vetikatest (11.6–14.8 μm - mikromeeter), mis tõenäoliselt aitas neil vähendada sissesöödava mikroplasti kogust, mis oli antud katses 20 μm suurune (Cole *et al.*, 2015). Selline valivus vetikate osas võib aja jooksul omakorda põhjustada muutusi vetikakooslustes. Vaikse ookeani austri (*Magallana gigas*) toitumiskäitumine muutus peale mikroplasti ärasöömist (Sussarellu *et al.*, 2016). Mikrovetikatest toitumine ja seedimise efektiivsus suurenes märgatavalt, mille põhjuseks võib olla kiire kohanemine energia saamise suurendamiseks. (Sussarellu *et al.*, 2016) Organismid suudavad mingil määral kohaneda mikroplasti söömisega kas selle vältimise või toitumiseefektiivsuse suurendamisega.

Maismaal on uuritud mikroplasti söömise mõju harilikule vihmaussile (*Lumbricus terrestris*; Huerta Lwanga *et al.*, 2016). Hariliku vihmaussi (*L. terrestris*) puhul on väikestes kogustes mikroplasti ärasöömisel vähesed mõjud, kuna vihmaussi seedesüsteem sisaldab paljusid ensüüme ja mikrofloorat, mis aitavad mikroplasti lagundada (Huerta Lwanga *et al.*, 2016). Suuremates kogustes (üle 28%) ja pikaajalisel mikroplasti

söömisel (60 päeva) oli näha kehakaalu vähenemist, seega mikroplasti lagundamine ei aidanud (Huerta Lwanga *et al.*, 2016). Kehakaalu vähenemine selles katses oli seotud mikroplasti vähese toitainete sisaldusega, mis pani vihmausse seda suuremas koguses sööma, kuigi toitaineid juurde ei lisandunud, vaid mikroplast lihtsalt väljutati (Huerta Lwanga *et al.*, 2016). Suuremates kogustes mikroplasti söömine oli paljudele vihmaussidele letaalne, mis võib omakorda põhjustada probleeme ökosüsteemidele, kuna vihmaussid on mulla ökosüsteemides tähtsad ja paljudele loomadele toiduks (Huerta Lwanga *et al.*, 2016).

3.3 Mikroplasti mõju sigimisele

Pidev kokkupuude mikroplastiga ei pea olema tingimata surmav, kuid mitmed uurimused on näidanud, et mikroplast vähendab organismi energiavaru, kasvu, viljakust ja paljunemisedukust (Galloway *et al.*, 2017). Aerjalalise *Calanus helgolandicus* munade suurus ja koorumise edukus vähenes, mis on seotud energia ja kehamassi vähenemisega peale mikroplasti ärasöömist (Cole *et al.*, 2015). Vaikse ookeani austri (*Magallana gigas*) sigimisedukus vähenes nii saagikuse kui järglaste arengutasandil vastavalt 41% ja 18% peale mikroplasti ärasöömist, mis oli vähendanud austrite energiavaru (Sussarellu *et al.*, 2016). Vastandina autorite hüpoteesile suurenes koorikloomaa *Daphnia magna* järglaste arv märgatavalt peale mikroplasti söömist 21. päeva jooksul, suurustes 0.125, 1.25 ja 12.5 µg/mL (De Felice *et al.*, 2019). Rõngussi *Enchytraeus crypticus* paljunemisedukus vähenes märgatavalt peale erineva suurusega mikroplasti tükikeste ärasöömist (Lahive *et al.*, 2019). Suurema negatiivse mõju tekitasid väiksemad (13–18 µm) mikroplasti tükid, mida söödi tõenäoliselt suuremates kogustes (Lahive *et al.*, 2019). Kala medaka *Oryzias melastigma* järglaste arv ja vastsete suurus vähenes peale pikaajast kokkupuudet mikroplastiga (Wang *et al.*, 2021). Katses eksponeeriti kaladele terve elutsükli jooksul 2, 20 ja 200 µg/L koguses mikroplasti osakesi (Wang *et al.*, 2021). Lisaks paljunemise vähenemisele muutusid isendid väiksemaks nii kehasuuruse kui kaalu osas (Wang *et al.*, 2021). Pikaajasel mikroplastiga kokkupuutel hakkasid emased kiiremini suguküpseks saama, mis võis olla kiire kohanemine järglaste arvu suurendamiseks (Wang *et al.*, 2021). Kuigi eelnevates uurimustes mikroplast suuremust eriti ei suurendanud, on järglaste vähenemine populatsiooni lõikes samuti ohtlik ja võib suurendada väljasuremisohu.

Energiavaru vähenemine organismidel on seotud mikroplasti söömisega (Walkinshaw *et al.*, 2020). Mikroplast on toitainetevaene ning organismi toidu hulka

sattudes peab vastav organism rohkem energiat kulutama, et energiarikast toitu leida (Walkinshaw *et al.*, 2020). Vähene energiavaru omakorda piirab organismi paljunemisvõimekust ning sellega kaasneb populatsiooni suuruse vähenemine (Walkinshaw *et al.*, 2020). Need individuaalsed ja populatsioonisiseseid mõjud võivad omakorda mõjutada koosluste ja ökosüsteemide vahelist dünaamikat, suurema muutuse korral avaldab see negatiivset mõju ka inimeste toiduohutusele (Galloway *et al.*, 2017).

3.4 Mikroplasti mõju liikidevahelisele konkurentsile

Mikroplasti sattumisel organismi võib ka erinevate lähedaste liikide toimetulek suuresti erineda (Rani-Borges *et al.*, 2022). Mõnel juhul suureneb liigi suremus või väheneb liikumisvõime (Rani-Borges *et al.*, 2022). Katse kirpvähiliste *Gammarus fasciatus* ja *Gammarus lacustris* 'ega näitas toimetuleku erinevust kahe liigi vahel (Rani-Borges *et al.*, 2022). Katses eksponeeriti kirpvähid suures (2 mg/L) ja väikeses (2 µg/L) koguses mikroplasti tükikestele 7 ja 14 päeva jooksul ning vaadeldi muutusi suremuses, liikumises ja oksüdatiivse stressi näitajates (Rani-Borges *et al.*, 2022). Suurem suremus ka väiksema eksponeerimisaja korral oli *G. lacustris* 'el (Rani-Borges *et al.*, 2022). Autorite hinnangul suureneb kirpvähiliste suremus pikema eksponeerimisaja korral ja suuremate mikroplasti kontsentratsioonide juures (Rani-Borges *et al.*, 2022). Suuremat mõju liikumisele avaldas mikroplast *G. fasciatus* 'ele, kelle üldine aktiivsus on samuti *G. lacustris* 'e omast suurem (Rani-Borges *et al.*, 2022). Väiksema aktiivsuse korral võivad liigi ellujäämise šansid samuti langeda (Rani-Borges *et al.*, 2022). Oksüdatiivset stressi põhjustas nii madalas kui suures kontsentratsioonis mikroplasti söömine rohkem *G. lacustris* 'es (Rani-Borges *et al.*, 2022). Mikroplasti reostus tekitab mõlema kirpvähilise puhul suuri muutusi kohanemises, mis võib ka edasiselt mõjutada ökosüsteemide toimimist (Rani-Borges *et al.*, 2022).

4. Mikroplasti mõju ökosüsteemidele

4.1 Mikroplasti mõju mereökosüsteemile

Muutused liigi bioloogias ja liikidevahelistes suhetes võivad mõjutada ka suuremaid ökosüsteemi funktsioneerimisega seotud protsesse. Tihti mainitakse rohkem veekeskkonda, kui tegeletakse mikroplasti reostuse probleemiga. Paljud uuringud on leidnud, et mikroplast jõuab veekeskkonnas igasse maailmajakku ning seda on leitud ka kõige sügavamast süvikust ehk Mariaani süvikust 10 898 m sügavuselt (Chiba *et al.*, 2018). Iga-aastaselt satub ookeani 4.8-12.7 tonni plasti (Lebreton *et al.*, 2019), ülemaailmselt on ookeanide veepinnalt leitud kokku 6300 plastitükki km² kohta (Bohdan, 2022). Veeorganismidele avaldab mikroplast suuremat mõju, kuna neist suurem osa filtreerib vett toidu kättesaamiseks või hingamiseks, mistõttu satub mikroplast organismi mitu korda kiiremini ja suuremas koguses (Li *et al.*, 2023). Mikroplasti söömine võib põhjustada ummistusi organismide soolestikus ning ka toksiliste ainete lekkimist organismi (Gall & Thompson, 2015). Toksiliste ainete lekkel mikroplastist bioakumuleerusid need Jaapani riisikala (*Oryzias latipes*) organismis, tekitades sellega maksakahjustusi- (nekroos) ja haigusi (kasvaja), lisaks sellele tõusis kala stressitase (Rochman *et al.*, 2013). Samuti on meres leitatavat plasti seostatud liigirikkuse vähenemisega (Gall & Thompson, 2015) ja võimaliku negatiivse mõjuga inimeste tervisele (Thompson *et al.*, 2009). Gall ja Thompson (2015) leidsid, et vähemalt 630 meres elavat liiki puutub kokku plastireostusega (10% sellest mikroplast) vees, neist 17% on Rahvusvahelise Looduskaitseliidu (IUCN) punases nimekirjas ohustatud või ohulähedased. Seega koos antropogeensete stressoritega võib (mikro)plasti reostus mõjutada ohustatud liikide populatsioone, troofilisi interaktsioone ja kooslusi (Gall & Thompson, 2015).

Vahemeri on üks kõige rohkem mikroplasti reostusest mõjutatud aladest (Cózar *et al.*, 2015). Vahemeres Gabesi lahes tehtud uurimuses leiti vee pinnalt $3.1 \pm 2 \times 10^5$ tükki/km² kevadel ja $7.8 \pm 8 \times 10^4$ tükki/km² sügisel (Ben Ismail *et al.*, 2022). Gabesi laht on rikka bioloogilise kooslusega magevee- ja mereveeline ökosüsteem, milles on antropogeenne mõju aina suurenenud (Ben Ismail *et al.*, 2022). Muudes Vahemere piirkondades pole mikroplasti reostus nii ulatuslik, seega on Gabesi laht tundlikum reostuse mõjudele (Ben Ismail *et al.*, 2022). Suurtes kogustes mikroplasti on leitud ka Kagu-Aasia vetest (0.13–11000 tk/L; Curren *et al.*, 2021). Kõige suuremates kogustes mikroplasti leidub rannikualadelt ja estuaarides (Wang *et al.*, 2022; Jiang *et al.*, 2022), Hiina rannikualadelt on

mikroplasti kogused ulatunud 20–7900 tk-ni/kg kohta (Jiang *et al.*, 2022). Tõenäoliselt on peamiseks põhjuseks suurem inimtegevus rannikualadel, kus reostus satub inimtegevuse tõttu kogemata või kavatsetult merre või ookeani (Egger *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2022). Estuaarides leitav suur mikroplasti kogus on seotud jõe voolust tingitud setete edasikandmisega (Jiang *et al.*, 2022).

Veel koguneb ookeanides mikroplasti suuremates kogustes merepõhja, mis mõjutab seal elutsevaid bentilisi organisme (Cole *et al.*, 2011). Uurimustest ilmneb, et merepõhjast kogutud mikroplasti kogused varieeruvad, sõltuvalt asukohast. Sellegipoolest on merepõhja pindmistes kihtides leitud hulganisti mikroplasti erinevates maailma paikades (Laglbauer *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2015). Bentilistes organismides leitud mikroplasti kogused olid setetes olevatega pöördvõrdelises seoses, seega sügavuse suurenemisel leiti organismides mikroplasti rohkem (Wang, *et al.*, 2019).

Mikroplasti reostus jõuab ka järvedesse ja jõgedesse (Wang *et al.*, 2022). Mikroplasti reostus on jõudnud magevetesse igal maailma kontinendil (Wang *et al.*, 2022). Kõige suuremates kogustes mikroplasti on leitud magevete hulgast Jangtse jõest ja Taihu järvest Hiinas (Yao *et al.*, 2020), vastavalt 4137.3 ± 2461.5 n/m³ (Zhao *et al.*, 2014) ja $0.01\text{--}6.8 \times 10^6$ tk/km² kohta (Su *et al.*, 2016). Mikroplasti on avastatud isegi põhjaveest, mis suurendab riski inimese tervisele (Wang *et al.*, 2022). Uuringutulemused näitavad, et suurem osa magevee organismidest neelavad endasse mikroplasti, näiteks koorikloom *D. magna*, aerjalgne *Gammarus pulex*, vööuss *Lumbriculus variegatus* (Imhof *et al.*, 2013), pisimudil (*Pomatoschistus microps*; Oliveira *et al.*, 2013), erinevad sägalised (*Cathorops*; Possatto *et al.*, 2011), jaapani riisikala (*Oryzias latipes*; Rochman *et al.*, 2013) ja veel paljud teised liigid. Mikroplasti söömine avaldab mõju organismi käitumisele (McCormick *et al.*, 2020 jt), paljunemisele, viljakusele (Galloway *et al.*, 2017 jt), toitumisele (Sussarellu *et al.*, 2016 jt) ja veel paljudele ellujäämiseks vajalikele omadustele. Leitud mikroplasti kogused magevetes näitavad mikroplasti leviku laialdast ulatust.

Mikroplastil võib mereökosüsteemides olla ka laialdasem mõju abiootilistele teguritele (Eerkes-Medrano *et al.*, 2015). Eerkes-Medrano jt (2015) sõnul võib mikroplasti akumulatsioon muuta meres valguse läbitavust ja setete iseloomu, abiootiliste tegurite mõjutamine omakorda muudab bentiliste ja pelaagiliste organismide käitumist ja lõpuks kogu ökosüsteemi toimimist. Abiootiliste mõjude esinemine võib tulevikus veelgi suurened, kuna mikroplast laguneb vees aeglasemalt kui maismaal kuna vesi piirab UV-kiirgusest tingitud mikroplasti lagunemist (Barnes *et al.*, 2009). Mikroplasti koguste suurenemisel

mere setetes 6.34% väheneb liivaussi *Arenicola marina* poolt setete ümbertöötlemine kuni 132 m² aastas (Wright *et al.*, 2013). Sarnased mõjud bentilistele organismidele võivad esineda ka magevetes (Eerkes-Medrano *et al.*, 2015). Mikroplasti liikumisel üle troofiliste tasemete võib alates bentiliste organismide käitumise mõjutamisest avalduda mõju ka teistele mere- ja magevee kooslustele (Eerkes-Medrano *et al.*, 2015).

Mereökosüsteemide reostamisel satub mikroplast üle troofiliste tasemete ka maismaa ökosüsteemidesse (Polis *et al.*, 1997 jt). Suuremad veeloomad nagu hülged söövad kalu (McMahon *et al.*, 1999), kes on omakorda mikroplasti söönud, hülged aga võivad sattuda jääkarudele saagiks. Maapealsetest organismidest saavad mereökosüsteemidest toitu putukad, kahepaiksed, roomajad ja linnud (Polis *et al.*, 1997). Mikroplasti leidub suuremates kontsentratsioonides just rannikualadel (Andrady, 2011), kust paljud linnud endale toitu otsivad (Polis *et al.*, 1997). Kalad nagu mudillased (*Gobiidae*) ja India makrell (*Rastrelliger kanagurta*) on toiduks paljudele lindudele, vastavalt tiirlastele (*Sternidae*), kajakatele (*Larus*) ning põhja-tormilinnule (*Procellariidae*), samuti ka inimestele (Vikas Madhav *et al.*, 2020). Teades, et need kalad võivad erineval moel endale mikroplasti sisse süüa, saab see liikuda mööda troofilist taset ka maismaa organismideni (Oliveira *et al.*, 2013; Karami *et al.*, 2017), erinevaid uuringuid sellisest toiduahelaga edasi liikuvast mikroplastist on tehtud väga paljude eri liikidega, peamiselt kala-linnu interaktsioonidest (Vikas Madhav *et al.*, 2020). Seetõttu on vajalik ära hoida mikroplasti sattumine mereökosüsteemidesse, kust see võib tagasi maismaale sattuda juba organismides talletudes.

4.2 Mikroplasti mõju maismaa ökosüsteemidele

Mikroplast võib maismaa ökosüsteemidesse sattuda mitmeti. Tavapäraselt räägitakse primaarsest ja sekundaarsest mikroplastist, mis tekivad inimtegevuse tagajärjel (Surendran *et al.*, 2023). Sekundaarne mikroplast satub keskkonda näiteks autorehvide kulumisest (0.81 kg/aastas *per capita*; Kole *et al.*, 2017), reoveega, plastikpakendite lagunemisest, prügilate nõrgveest ja atmosfäärist välja sadenedes (Surendran *et al.*, 2023). Reoveega satub mulda kõige suuremas koguses mikroplasti võrreldes muude viisidega, tervelt 80-90% plastiosakestest satub keskkonda põllumajandustegevuse, riiete tootmise või muul viisil reovee tekkega (Surendran *et al.*, 2023). Reovette satub ka pesu pesemisest tekkinud mikrofiibrid, mis oma suuruselt klaasifitseeruvad samuti mikroplasti alla, mikrofiibreid leiti

erinevatest riikidest 124–308 mg iga pestud kg pesu kohta (De Falco *et al.*, 2019). Mikrofiibrid toimivad ka kui edasikandjad haigustekitavatele organismidele (Surendran *et al.*, 2023). Põllumajanduses satub kõige rohkem mikroplasti mulda läbi keemiliste väetiste (Surendran *et al.*, 2023). Põllumajanduses kasutatav plastikmultš mõjutab mulla biofüüsikalisi omadusi, nagu orgaanilist materjali, poorsust ja mullaorganismide kooslusi (Surendran *et al.*, 2023). Mulla pindmistes kihtides (0-10 cm) on peale 30. aastast multšimist keskmiselt leitud 8885 mikroplasti tk/kg kohta, sügavamates kihtides (80-100 cm) 2899 tk/kg kohta (Li *et al.*, 2022). Sügavas mullas laguneb mikroplast väga aeglaselt vähese hapniku, UV-kiirguse ja madala temperatuuri tõttu, mistõttu koguneb aja möödudes mulda väga suures koguses (mikro)plasti (Duis & Coors, 2016). Mullas olevad mikro- ja makroorganismid lagundavad sinna sattunud plasti, mis esiteks muudab plastitükid veelgi väiksemaks (nanoplast) ning avaldab negatiivset mõju neid söönud organismidele (Surendran *et al.*, 2023).

Maismaal olevast mikroplasti reostusest on kokku vähem uurimusi kui veekeskkonna reostusest (Surendran *et al.*, 2023). 2004.-2019. aastal mikroplasti teemal tehtud uurimustest olid ainult 5% seotud maismaa ökosüsteemidega (Qi *et al.*, 2020). Sellegipoolest on leitud, et aastane plasti sattumine maismaa keskkonda on merekeskkonnast 4-23 korda suurem (Horton *et al.*, 2017). Vaatamata vähestele uurimustele on siiski paljud maismaaorganismid mõjutatud mikroplasti olemasolust mullas, näiteks harilik vihmauss (*Lumbricus terrestris*), kes elab ja toitub mullas ning võib suurema mikroplasti koguse ärasöömisel surra (Huerta Lwanga *et al.*, 2016). Maismaal nagu ka veekeskkonnas võib mikroplast erinevatel troofilistel tasemetel üle kanduda, nagu see juhtus kanadega, kes koduaias vihmausse sõid, ning kelle eksrementides leiti mitu korda suurem mikroplasti kogus kui seal mullas olevatel vihmaussidel (Huerta Lwanga *et al.*, 2017). Mitmetes teistes mullaorganismides on samuti mikroplasti leitud, nagu hooghännalistes *Folsomia candida* ja *Proisotoma minuta* (Maaß *et al.*, 2017), vihmaussis (*Eisenia fetida*) (Wang *et al.*, 2019), bakterites (He *et al.*, 2018) ja veel mitmetes vihmaussi liikides (Wang *et al.*, 2019). Peamiselt on uurimused siiski keskendunud mullaorganismidele, kes on looduses tavapärased, seetõttu on maismaal olevast mikroplasti reostuse ulatusest vähem teada ning uurimusi peaks teostama rohkem erinevatel liikidel.

Plasti lagunemisel mikroplastiks võivad erinevad keemilised lisandid lekkida ökosüsteemi ning kuna need on suuresti toksilised ja reaktiivsed, tekitavad mitmeid probleeme nii organismidele kui ka mulla struktuurile (Surendran *et al.*, 2023). Plasti

lagunemisel satuvad erinevad toksilised ained, nagu näiteks kloriid, põhjavette, mille saastumisel on suur risk nii ökosüsteemile kui ka inimestele, kes seda tarbivad (Surendran *et al.*, 2023). Lisandid nagu bisfenool (BPA) ja ftalaadid häirivad nii selgroogsete kui ka selgrootute hormoonitalitlust (Surendran *et al.*, 2023). Lisandite ja toksiliste kemikaalide sattumisel põhjavette on nende eemaldamine kordades raskem ennetamisest ning toksilisus ohtlik nii loomadele kui inimestele (Surendran *et al.*, 2023).

Mikroplasti reostus mullas mõjutab ka taimi (Dong *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020). Paljudes uurimustes on vaadeldud mikroplasti mõjusid kultuurtaimedele (Dong *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020). Näiteks riisil (*Oryza sativa*) pärssis mikroplast juurte ja seemnete kasvu ning fotosünteesi, pidurdades tervikuna taime kasvamist (Dong *et al.*, 2020). Maisil (*Zea mays* L.) vähenes peale pikaajalist mikroplasti kokkupuudet biomass ja klorofüllki kogus lehtedes, mulla pH ja fütotoksilisus tõusis (Wang *et al.*, 2020). Taimede kasvuks on vajalikud mullas elutsevad mikroorganismid, kui nende elutsükkel katkeb mikroplasti reostuse tõttu, langeb ka mulla kvaliteet, mille järel hävivad ka taimed (Khalid *et al.*, 2020). Mikroplasti levik mullas ja maismaal on aeglasem kui meres, kuid sellegipoolest on mõjud sama hävitavad, ühe troofilise taseme mõjutamisel satuvad ohtu kõik teised tasemed.

5. Liikide kohastumused mikroplasti reostusega

5.1 Evolutsioonilised kohastumused

Mikroplasti reostusel on suurel hulgal negatiivseid mõjusid nii maismaa- kui mereorganismide tervisele, käitumisele, paljunemisele jne. Sellegipoolest suudavad kiirema põlvkondade vaheldumisega organismid kohaneda või isegi evolutsioneeruda mikroplasti reostusega toimetulekuks (Amaral-Zettler, *et al.*, 2020; Khosrovyan *et al.*, 2022 jt). Üks tuntumaid evolutsioonilisi muudatusi (mikro)plasti reostuse tõttu on mikroorganismide populatsioonide kogunemine plastile meres, mida nimetatakse plastisfääriks (Amaral-Zettler, *et al.*, 2020). Mõned plasti söövad taksonid nagu *Ralstonia* ja *Rhodococcus* on palju tihedamalt leitavad just plastisfäärides (Yin *et al.*, 2022). Plastisfäär on eriliseks ökoloogiliseks niššiks nendele mikroobidele, seega plasti levimine meres muudab mikroobide koosluste struktuuri (Yin *et al.*, 2022). Negatiivse aspektina peab välja tooma, et kuigi plastisfääris on leitavad spetsiifilise elupaiga eelistusega taksonid, on sealne liigirikkus mitu korda väiksem loomulikust veekeskkonnast (Yin *et al.*, 2022).

Üks esimesi surusääsklaste peal tehtud mikroplastist tingitud genoomimuutusi kajastav uurimus vaatles arlekiin-kärpse (*Chironomus riparius*) genoomi muudatusi ja kohanemist mikroplasti reostusega seitsme põlvkonna vältel (Khosrovyan *et al.*, 2022). Esimese paari põlvkonna jooksul vähenes vastsete ellujäämus märgatavalt, kuid kolme põlvkonna jooksul taastus normaalsele tasemele (Khosrovyan *et al.*, 2022). Genoomi tasemel leiti mitmeid alleelisageduse muudatusi, mis olid tingitud mikroplastist tulenevast oksüdatiivsest stressist (Khosrovyan *et al.*, 2022).

On leitud, et mikroplasti lagundava ensüümi kogus korreleerub ookeani sügavusega, mis ei ole tingitud vaid taksonoomilisest kooslustest, vaid on spetsiifiline kohastumus mikroplasti reostuse vastu (Zrimec *et al.*, 2021). Kõige rohkem leiti mikroplasti lagundavat ensüümi alfabroteobakterist (*Alphaproteobacteria*) ja gammaproteobakterist (*Gammaproteobacteria*), kes pärinevad kõige mitmekesisemast ja arvukamast hõimkonnast (*Proteobacteria*) kõigi 56 liigi seast (Zrimec *et al.*, 2021). Maismaa organismidest leiti võrdlemisi rohkem mikroplasti lagundavaid ensüüme (11 906: 18 119; Zrimec *et al.*, 2021). Näiteks India jahuliblika (*Plodia interpunctella*) vastsetel, jahumardikal (*Tenebrio molitoril*) ja vahakoil (*Galleria mellonellal*) on kujunenud mikroplasti lagundav mikrobioom, mis võib tuleneda pikaajalisest kokkupuutest plastiga reostatud keskkonnas

(Zrimec *et al.*, 2021). Veel enam korreleerub ensüümi tase nii maismaal kui meres leitava mikroplasti kogusega, mis võib olla märk organismide kohastumisest mikroplasti reostusega (Zrimec *et al.*, 2021). Väheste evolutsiooniliste muudatuste uuringute olemasolu näitab, et seda ala pole piisavalt uuritud ning nõuab suuremat süvenemist, kajastamaks organismide toimetulekut mikroplastiga pikas perspektiivis.

5.2 Lühiajalised kohanemisstrateegiad

Paljudel organismidel on evolutsiooniliste muudatuste asemel vaadeldud lühiajalisi kohanemisstrateegiaid mikroplastiga toimetulekuks (Seuront, 2018; Aminot *et al.*, 2020 jt). Ühes uuringus vaadeldi mikroplastist leostuvate toksiliste ainete mõju rannakarpide käitumisele ja kohanemisele (Seuront, 2018). Pruunkarbil (*Perna perna*) ja vahemere rannakarbil (*Mytilus galloprovincialis*) käivitas mikroplasti toksilise nõrgvee reostus merevees vastupanu strateegia, mis avaldus neile büssuste suurema produktsioonina (Seuront, 2018). Kahel teisel liigil, söödaval rannakarbil (*Mytilus edulis*) ja mustal rannakarbil (*Choromytilus meridionalis*), käivitas reostus vastupidavuse strateegia, mis avaldus suuremas liikuvuses ning agregatsioonis toksilises vees (Seuront, 2018). Ka korallid on suutnud lühiajaliselt kohaneda liigse toksilise nõrgvee vältimiseks (Aminot *et al.*, 2020). Korallid tunnevad ära vees oleva toksilise aine ning sulgevad enne selle nendeni jõudmist polüübid, kuid sellega väheneb ka nende toitumine, fotosünteesimine ja hapnikuvahetus (Aminot *et al.*, 2020). Kuldkaladele (*Carassius auratus*) mikroplasti fiibreid sisse söötes (100 ja 1000 tükki/L) suurenes nendes mukoosete rakkude sekretoorne võimekus vastavalt 30% ja 62.9%, mis suurendab autorite arvates kalade toimetulekut liigse mikroplasti söömisega, kuna peatselt pärast mikroplasti ärasöömist köhisid kalad need limaga segatult välja (Liang *et al.*, 2023). Mõnede organismide pikaajased kohastumused aitavad praegu suureneva mikroplasti reostuse tõttu selle söömise vastu võidelda (Kumkar *et al.*, 2021). Näiteks mudahüpiku (*Oxudercinae*) filtreerimistüüpi toitumise ja unikaalse suu anatoomia tõttu ei sattunud 74% uuritutest kaladest suuremaid mikroplasti tükke soolestikku (Kumkar *et al.*, 2021). Mitmed organismid suudavad juba varem kujunenud unikaalsete kohastumuste tõttu paremini hakkama saada mikroplasti reostusega, kuid selliseid juhtumeid on siiski vähe või neid pole piisavalt uuritud.

6. Mikroplasti reostuse koosmõju teiste keskkonnamuutustega

Mitmed uuringud kinnitavad hüpoteesi, et mikroplasti reostus mõjub koos teiste inimtekkeliste keskkonnaprobleemidega ökosüsteemidele hullemini kui üksikult. Arvestades juba pikalt eksisteerinud keskkonnaprobleeme nagu kliimamuutused, patogeenide levik ja inimeste põhjustatud muutused ökosüsteemides, võib lisaks neile mikroplasti tekitatud kahju viia mitmed liigid ohustatuse äärel. Koos mõjuvad erinevad ökosüsteemi muutused paljudele kooslustele negatiivselt ning lõpuks jõuavad need mõjud ka inimesteni.

6.1 Temperatuuri tõus

Inimtegevuse tõttu põhjustatud kliimamuutused on ohuks ökosüsteemidele ja ka inimestele ekstreemsete ilmastikuolude, liustike sulamise, meretaseme tõusu ja paljude muude liigirikkust mõjutavate tegurite tõttu. Mikroplasti omaduste ja laialdase reostuse koosmõjul võib kliima soojeneda veelgi kiiremini nii globaalselt kui lokaalselt. (Mikro)plasti degradeerumist seostatakse mitmete kasvuhoonegaaside emissiooniga, nagu CO₂, metaan ja etüleen, mis toimub nii maismaal kui meres (Royer *et al.*, 2018). Lumistel aladel seostatakse mikroplasti lume albeedo vähendamisega, mis soodustab kiiremat lume sulamist, mis omakorda kiirendab ümbritseva keskkonna kiiremat soojenemist (Evangelidou *et al.*, 2020). Mikroplast mõjutab mulla mikrokliimat, kuna absorbeerib päikesekiirgust, tõstes mulla temperatuuri (Warren *et al.*, 2018). Kiired temperatuurimuutused vähendavad organismide liigirikkust, kuna spetsiifilisema niššiga loomad ja taimed ei tule ekstreemsetes tingimustes toime (Warren *et al.*, 2018). Kliimamuutused põhjustavad omakorda ränded, kus nii loomad kui taimed püüavad leida endale sobivaid keskkonnatingimusi, kuid on võimatus, et selliseid tingimusi tulevikus enam ei eksisteeri või nendeni ei jõuta (Warren *et al.*, 2018). Kuigi leidub mitmeid uuringuid, mis näitavad kuidas mikroplasti suurendab temperatuuri tõusu, ei saa teha kindlaid järeldusi mikroplasti mõjust kliimamuutuste kiirendamisele. Kasvuhoonegaaside koguse suurenemine ja albeedo vähendamine ei pruugi olla globaalselt piisavalt mõjusad.

Lokaalsed temperatuuri muutused võivad sellegipoolest mõjuda seal kasvavatele taimedele. Jahedamatel aladel on kõrgem mulla temperatuur taimedele kasulik, kuid niigi soojematel aladel võib see suurendada vee arusutumist, ja seeläbi taime veepuudust (Khalid

et al., 2020). Uuringutega on leitud, et mikroplasti olemasolu mullas vähendab põldudel saaki ja taime kasvu, seda eriti kuumemates vööndites (Díaz-Pérez & Batal, 2002).

Mikroplasti reostus meres mõjutab negatiivselt veeorganismide CO₂ omastamist ja hapniku juurdetootmist (Kvale *et al.*, 2021). Pea pool maakera hapnikust tuleb ookeanidest (NOAA, n.d.), ning sealne peamine hapniku tootja on fütoplankton (Sharma *et al.*, 2023). Mikroplasti reostuse tõttu väheneb planktoni elujõulisus nii paljunemise kui liikuvuse muutuste tõttu (Kvale *et al.*, 2021 jt). Uurimused järeldavad, et sellistes tingimustes väheneb ookeanide hapnikuvaru pidevalt ja aina kiiremas tempos (Kvale *et al.*, 2021). Suurema CO₂ sisalduse tõttu muutuvad ookeanid ka palju happelisemaks (Sharma *et al.*, 2023) ja seetõttu vähem elukõlblikuks. Ookeanide hapestumine põhjustab austrite, krabide, homaaride, krevettide ja korallrifi väliskeleti ja muude mineraalide lahustumist, kuna liigne CO₂ lahustab CaCO₃, mis on skeleti põhikoostisosaks (NOAA, n.d.; Sulpis *et al.*, 2018). Happelisem vesi põhjustab ka kahjulike vetikate (*Alexandrium fundyense*, *Vicicitus globosus*) laialdasemat õitsemist ja nende poolt toksiliste ainete suuremat produktsiooni (NCCOS, 2014; Riebesell *et al.*, 2018). Vähema CO₂ omastamise tõttu nii füto- kui zooplanktoni poolt (Sharma *et al.*, 2023) võivad nii ookeanid kui ka lõpuks kogu maakera soojeneda kliimamuutustega koosmõjul veelgi kiiremas tempos ning hapestuvad ookeanid tekitavad veelgi ökosüsteemi probleeme.

6.2 Korallide hävimine

Korallide hävimine on kiirenenud kliimamuutuste tõttu, soojem ja happelisem vesi tapab korallides elutsevad vetikad, kelle kaudu saavad korallid mitmeid toitaineid (Axworthy & Padilla-Gamiño, 2019). Vetikateta surevad peagi ka korallid, muutudes värvuselt valgeks - toimub korallide pleekimine (Axworthy & Padilla-Gamiño, 2019). Ilma toitaineteta peavad korallid zooplanktoni saamiseks suuremas koguses vett filtreerima ning kuna mikroplast oma kujult ja suuruselt meenutab toitu, satub seda suuremas koguses korallidesse (Axworthy & Padilla-Gamiño, 2019). Veel enam, mikroplasti sarnasus päris toidule vähendab korallide toitumist tervikuna ja tekitab "täiskõhutunde", mis omakorda suurendab suremust ja vähendab korallide kasvu (Rotjan *et al.*, 2019). Mikroplast korallide soole õõnsuses võib tekitada ummistusi ja sisemisi vigastusi ning mikroplastist vabanemine võtab korallidelt väärtuslikku energiat, mis muul juhul kuluks kasvamisele ja paljunemisele

(Rotjan *et al.*, 2019). Mikroplastist nõrguvad toksilised ained ja ka need, mis on mikroplasti imendunud veest, võivad jõuda korallideni (Aminot *et al.*, 2020). Tihti suudavad korallid ohu ära tunda ning sulgeda polüübid, kuid sellega vähendavad nad samuti toitumist, fotosünteesi ja hapnikuvahetust (Aminot *et al.*, 2020). Kui aga toksilised ained korallini jõuavad, vähendab see nende kasvu, paljunemist ja elujõulisust (Aminot *et al.*, 2020). Seega niigi ohustatud ja ülimalt väärtuslik elupaik nagu korallriff võib kliimamuutuste ja mikroplasti reostusega koosmõjul hävineda veelgi kiiremini. Kemikaalide levik ulatub korallidelt ka teistele organismidele, kandub üle mitme troofilise taseme ning võib viia väljasuremisohu mitmed korallrifidest sõltuvad veeorganismid või kahjustada nende tervist.

6.3 Patogeenide kiirem levik

Mikroplasti levikul maismaa- ja veekeskkonnas võivad olla lisaks korallide hävimisele ja temperatuuri tõusule ka muud tagajärjed. Näiteks seostatakse mikroplasti reostust patogeenide levitamisega (Feng *et al.*, 2020; Gkoutselis *et al.*, 2021). Kõige kiiremini levivad patogeenid (mikro)plasti saartel, mida kutsutakse plastisfääriks (Feng *et al.*, 2020). Kuna ainult kindlad mikroobide liigid suudavad mikroplasti pinnal elutseda ja toituda, võib see tekitada probleeme, kui nendeks liikideks on ohtlikud bakterid (Feng *et al.*, 2020). Näiteks on leitud vees oleva mikroplasti pinnalt *Vibrionaceae*, *Rhodobacteraceae* ja *Flavobacteraceae* sugukonna baktereid, keda seostatakse korallide kudede kahjustusega, ning *Vibrio* perekonna baktereid seostatakse korallide pleekimisega (Feng *et al.*, 2020). Lisaks leiti mikroplasti pinnalt *Pseudomonas*'e perekonna baktereid, kes on võimelised tekitama infektsioone nii loomadel kui inimestel, ning *Vibrio cholerae* bakterit, kes põhjustab koolerat (Feng *et al.*, 2020). Veel leiti mikroplastilt mitmeid *Bacillus*'e baktereid ja streptokokke, keda seostatakse hulgaliste haiguste põhjustamises, sealhulgas meningiit (ajukelme põletik), pneumoonia (kopsupõletik) ja silma sidekesta põletik (*pink eye*; Feng *et al.*, 2020).

Samamoodi on ka maismaa plastisfäärides leitud erinevaid organisme, mille hulgas leidub ka kahjulikke patogeene (Gkoutselis *et al.*, 2021). Plastisfäärid on mitmete seenorganismidele sobivaks ökoloogiliseks nišiks ning need moodustavad plastisfääris olulise patogeenide mükobioomi (Gkoutselis *et al.*, 2021). Samas võib see olla ka sobivaks kunstlikuks mikroelupaigaks oportunistlikele inimeste patogeenidele (Gkoutselis *et al.*, 2021). Sellistes elupaikades on leitud patogeenseid seeni nagu *Cryptococcus*, mis võib

põhjustada inimestel meningiiti, ning *Phoma* perekonna seeneliike, mille hulgas on põhiliselt taimepatogeensed liigid, kuid haruldastel juhtudel võib inimestel tekkida *Phaeohyphomycosis*, mis tekitab nahal tsüste (Gkoutselis *et al.*, 2021). Arvestades mikropasti levikut nii mullas (tänu vihmaussidele jt) kui vees, peab arvestama mikroplasti potentsiaalse ohuga inimese tervisele. Eespool loetletud bakterid ja seened on ainult üksikud näited sellest, milliseid patogeene võib leida mikroplasti pinnal, ning tulevased uurimused leiavad tõenäoliselt veel potentsiaalseid haigusetekitajaid, mis levivad laialdasemalt mikroplasti reostuse tõttu.

7. Arutelu

Mikroplasti mõjud kooslustele sõltuvad selle kandumisest ühelt liigilt teisele. Mitmete uurimustega on tõestatud, et mikroplast saab levida ühelt troofiliselt tasemelt teisele toiduahela kaudu (Farrell & Nelson, 2013; Araújo & Malafaia, 2020 jt). Seega ulatuvad mikroplasti mõjud kaugemale ühe troofilise taseme piiridest. Muutused kooslustes esinevad peamiselt siis, kui madalamal troofilisel tasemel olevad liigid kahjustuvad mikroplasti tõttu. Kahjustused võivad väljenduda sigimise vähenemises, käitumise muutumises, stressitaseme tõus, toitumisstrateegiate halvenemises ja ka suremuse suurenemises. Arvestades kahjulike mõjusid madalamatele troofilistele tasemetele (ja ka liikidele individuaalselt), võivad katkeda toiduahelad, mistõttu kiskjad ei leia piisavalt toitu või söövad läbi saagi ka endale mikroplasti sisse. Mõnede uuringute kohaselt mikroplast biomagnifitseerub, tekitades suuremat kahju kiskjatele, teised uuringud aga väidavad, et see nii ei ole ning madalama astme liigid kannatavad rohkem nende toitumisstrateegiate (filtreerijad; de Sá *et al.*, 2018) või mikroplasti väljutamise tõttu (Walkinshaw. *et al.*, 2020), enne kui see jõuab teistele liikidele üle kanduda. Arvestades madalama troofilise taseme organismide kehasuursusi, on suurem mikroplasti kogus ka suuremaks riskiteguriks neile, mitte kõrgematele tasemetele.

Paljude uurimuste puhul vaadeldi tavapäraseid liike nii maismaal kui meres, seega on raske kindlaks teha, kas liigirikamad kooslused tulevad paremini toime mikroplasti reostusega. Vähe esines ka uurimusi, mis keskendusid mikroplasti mõjudele mitme liigi puhul korraga ja sellest tulenevalt nendevahelisele koosluste muudatustele. Tehtud uuringute puhul ilmnes, et mikroplastiga toimetulekul on tähtsal kohal kiiresti arenevad kohanemismehhanismid või evolutsioonilised muudatused organismis, mis vähendavad söödud mikroplasti kogust, aitavad sellest vabaneda (Zrimec *et al.*, 2021; Liang *et al.*, 2023), vähendavad stressi või isegi lasevad mikroplastist toituda (Khosrovyan *et al.*, 2022; Yin *et al.*, 2022). Liigirikastes kooslustes oleks tõenäoliselt väiksem mikroplastist tulenev negatiivne mõju, kui ühe liigi populatsiooni vähenemisel oleks teine liik kiskjatele jätkuvalt toiduks, seega toiduahel liiga järsult ei katkeks. Praegustest uurimustest ei saa kindlalt seda siiski järeldada.

Mikroplast võib koosineda ja põhjustada suuremat negatiivset mõju koos teiste keskkonnamuutustega. Mikroplasti omaduste ja laialdase reostuse koosmõjul võib kliima soojeneda veelgi kiiremini nii globaalselt kui lokaalselt. Mikroplasti reostusest tulenevalt

väheneb fütoplanktoni elujõulisus (Kvale *et al.*, 2021), mis kaudselt vähendab ookeani CO₂ omastamist ja hapniku tootmist, potentsiaalselt kiirendades sellega kliimamuutusi ja muutes ookeanid happelisemaks (Sharma *et al.*, 2023), mis on omakorda kahjulik seal elavatele organismidele. Kliimamuutused ja mikroplast kiirendavad korallide suremist, kuna mikroplast rikub korallide toitumissüsteemi ja kahjustab sooleõõnsust (Rotjan *et al.*, 2019; Aminot *et al.*, 2020). Mikroplasti pinnalt on leitud mitmeid nii loomadele kui inimestele kahjulikke baktereid maismaal ja vees, kes tänu mikroplastile levivad kiiremini ja suuremas ulatuses (Feng *et al.*, 2020; Gkoutselis *et al.*, 2021). Arvestades mikroplasti levimist nii mullas (tänu vihmaussidele jt) kui vees, peab arvestama mikroplasti potentsiaalse ohuga inimese tervisele. Tulevased uurimused leiavad tõenäoliselt veel haigusetkitajaid, mis levivad laialdasemalt mikroplasti reostuse tõttu. Arvestades juba pikalt eksisteerinud keskkonnaprobleeme nagu kliimamuutused, patogeenide levik ja inimeste põhjustatud muutused ökosüsteemides, võib lisaks neile mikroplasti tekitatud kahju viia mitmed liigid ohustatuse äärele.

Mikroplasti negatiivsed mõjud ulatuvad nii maismaa- kui mereökosüsteemideni. Maismaa ökosüsteemidesse satub mikroplast peamiselt inimtegevusega, kas põllumajanduse, jäätmekäitluse, reovee või muuga. Mereökosüsteemidesse satub mikroplast peamiselt rannikualase inimtegevuse kaudu. Praktiliselt kõik inimtegevused, kus kasutatakse plasti, panustavad ka mikroplasti sattumisele keskkonda. Mikroplasti mõjudest on rohkem avaldatud artikleid mereökosüsteemide kohta, seega ka potentsiaalset mõju ulatust ja levikut on raske võrrelda. Paljud uurimused siiski viitavad tõenäosusele, et mereökosüsteemidele mõjub mikroplasti reostus rohkem, kuna sealsed organismid peavad toidu kättesaamiseks ja hingamiseks vett aktiivselt filtreerima, ning sealne mikroplast satub organismidesse seetõttu kiiremini (Li *et al.*, 2023). Mereökosüsteemides on leitud, et mikroplast on kokku puutunud ka ohustatud liikide nimekirjas olevate liikidega (Gall & Thompson, 2015), mis suurendab muret antud liikide tuleviku suhtes. Vastandvalt on ka väidetud, et maismaa ökosüsteemides ja eriti mullas on mikroplastil samuti negatiivsed mõjud ning kuna sealsed organismid töötlevad mikroplasti pidevalt, laguneb see veelgi väiksemaks (nanoplast) ja satub ka nende soolestikku (Surendran *et al.*, 2023). Veel on leitud, et tegelikult satub maismaa ökosüsteemidesse mikroplasti 4-23 korda suuremates kogustes (Horton *et al.*, 2017), kuigi mõjudest on teada vähe piiratud hulga uurimuste tõttu. Mikroplasti levik mullas ja maismaal on aeglasem kui meres, kuid sellegipoolest on leitud mõjude levimist üle troofiliste tasemete ja mõnedel organismidel ka suremuse suurenemist

(Huerta Lwanga *et al.*, 2016). Maismaa mikroplasti mõjude uuringud võiksid vaadelda mullaväliseid organisme ja kooslusi, kuna praeguseks on suurem osa neist keskendunud just esimesele. Arvestada tuleb mõjude uurimisel ka sellega, et mikroplast kandub üle troofiliste tasemetete. Sattudes maismaalt merre, võib see liikuda organismides ka tagasi maale ning see ring võib jätkuda mitme põlvkonna vältel.

Mikroplasti mõjud on nii kaudselt kui otseselt organismidele piisavalt ohtlikud, et selle sattumist keskkonda tuleks vältida. Raske on defineerida liigivahelisi erinevusi kohastumises ja toimetulekus, kuna selliseid uurimusi on vähe tehtud. Positiivne on see, et paljud liigid on näidanud võimet toime tulla mikroplastiga, ja tõenäoliselt kohastumused paranevad ka tulevikus. Sellegipoolest on ka paljusid liike, kelle jaoks on mikroplast liiga ohtlik ja surmav, enne kui sellega toime tullakse, eriti väiksematel liikidel nagu näiteks koorikloomad ja plankton. Mikroplasti mõjud ulatuvad kaugemale organismist endast, mõjutades ka abiootilisi tegureid ja terveid ökosüsteeme, seetõttu ei tasuks loota organismide toimetuleku suurenemisele, vaid peaks vähendama reostust tervikuna.

8. Edasised uurimisvaldkonnad

Viimastel aastakümnetel on teadlased teinud suuri edusamme mikroplasti mõjude ja leviku uurimises. Sellegipoolest tuleb pidevalt välja uusi uurimissuundi või puudusi tehtud uuringutes, mida peaks rohkem arendama. Selle uurimistöö kirjutamisel kajastus väga vähene teaduskirjandus mikroplasti mõjust evolutsioonilistele muutustele ja kohanemisstrateegiate kujunemisele. Väheseid uurimusi leidub ka mikroplasti mõjudest Maa poolustel asuvates magevetes (Citterich *et al.*, 2023). Arktistel aladel leiduva mikroplasti reostuse mõjusid on uuritud vähe ning selliseid uurimusi peaks rohkem teostama, et teada saada, kuidas mõjutab mikroplast sealset jää sulamist, mikroobide populatsiooni muutusi ja kuidas see mõjub suurematele organismidele (Citterich *et al.*, 2023). Mikroplasti mõjusid mangroovidele on samuti vähe uuritud, kuigi need on tähtsad elupaigad ja need kaitsevad rannikualasid erosiooni eest (Seeruttun *et al.*, 2023). Ka mikroplasti mõjudest merepõhjas on tehtud väheseid uurimusi, kuna seda on raske teostada ja tulemustest õigeid järeldusi teha (Ladewig *et al.*, 2023). Sellegipoolest oleks vaja uurida mikroplasti mõjusid igas ökosüsteemis. Vähe leidis uurimusi maapealsete ökosüsteemide mõjutatusest mikroplasti reostuse tõttu. Suurem osa uurimusi on keskendunud mikroorganismidele ja mullas leiduvale mikroplastile, kuid vähe on teada mikroplasti levikust üle troofiliste tasemete näiteks imetajatele ning edasisest mõjust nende organismile. Ka mereökosüsteemide uurimused keskenduvad mikroorganismidele ja kaladele, kuid suuremate ökosüsteemide ja populatsioonide vaheliste muutuste jälgimiseks tuleb saavutada teamised ka suuremate organismide kohta.

Mikroplasti mõju laialdasemaks kaardistamiseks on vajalik õige lähenemine ja teadlaste koostöö. Sageli kasutatakse laboritingimustes mikroplasti mõjude määramiseks plastikhelmeid, mis erinevad loomulikus keskkonnas leiduvast mikroplastis selle kuju ja koostise poolest (Citterich *et al.*, 2023). Paremate andmete saamiseks tuleks saavutada võimalikult elulähedane keskkond ka laboritingimustes mõjude määratlemiseks (Citterich *et al.*, 2023). Hiljutised uurimused rõhutavad ka vajadust rahvusvahelise koostöö suurendamiseks, et paremini kaardistada mikroplasti mõjusid globaalselt (Wu *et al.*, 2023). Mikroplasti reostuse mõjude vähendamiseks on vajalik välja töötada strateegiaid ja tehnoloogiat, et eemaldada mikroplasti merest ja maismaalt (Zhou *et al.*, 2023). Selleks peab esimesena määrama võimalikult täpselt mikroplasti definitsiooni, et analüüsid ja tulemused ühtiksid (Zhou *et al.*, 2023). Viimasena peaksid tehnoloogiad olema võimalikult

laiaulatuslikud, mis võimaldaksid tuvastada ja seejärel eemaldada mikroplasti jõgedest, järvedest ja merest (Zhou *et al.*, 2023).

Kõige keerulisemaks mikroplasti mõju omaduseks on selle dünaamilisus ja selle mõju uurimine ökosüsteemide dünaamilisuse tõttu. Paljud uuringud kajastavad mikroplasti mõju üksikorganismil ja sageli ainult selle eluajal ja vähem põlvkondade lõikes. Vajalik on eelnevalt mainitud rahvusvaheline koostöö, et jõuda ka keerukamate protsesside analüüsini, millest lähtuvalt saavutatakse uued teadmised mikroplasti mõjudest nii ökosüsteemidele, populatsioonidele kui ka evolutsioonilises lõikes.

Kokkuvõte

Tänapäeval on maailmas kiire eluviisi tõttu loodusesse sattuv prügikogus aina suurenenud, see satub nii maismaa- kui mereökosüsteemidesse. Aja möödudes see prügi, eelkõige plast, laguneb väiksemateks tükkideks ehk mikroplastiks, mis võib avaldada mõju antud keskkonnas elavatele organismidele. Kuigi teadmised mikroplasti mõjust ökosüsteemidele on suurenenud, ei ole ka praeguseks tehtud uuringud piisavad, et mõista mikroplasti mõju ja olemust (Environment, U. N., 2017). Mikroplasti mõju on vajalik uurida, kuna tehtud uuringud ei ole piisavad selgitamiseks mikroplasti negatiivseid mõjusid nii keskkonnale, looduses elavatele organismidele ja lõpuks ka inimesele.

Väiksemate suuruste puhul akumulereb mikroplast kiiresti organismi ja levib üle troofiliste tasemete, kuni jõuab lõpuks ka inimeseni (Tekman, *et al.*, 2022). Mikroplasti sattumisel organismi võib see suurendada organismide suremust, vähendada sigimist ja muuta käitumist ning nende mõjude läbi muutub populatsioonide dünaamika (Walkinshaw *et al.*, 2020). Mikroplasti mõjud erinevad ökosüsteemide omadustest lähtuvalt. Mikroplasti mõjudest mereökosüsteemidele on uurimusi kordades rohkem, mistõttu kajastatakse laiemalt mikroplasti suuremat mõju just mereorganismidele. On viidatud sellele, et veeorganismidesse satub mikroplasti rohkem, kuna nad peavad toitumiseks ja hingamiseks vett aktiivselt filtreerima (Li *et al.*, 2023). Vastanduvalt on maismaa ökosüsteeme käsitlevad uurimused välja toonud, et tegelikult satub sinna mikroplasti 4-23 korda suuremas koguses (Horton *et al.*, 2017), kuigi mõjudest organismidele pole piisavalt uurimusi tehtud.

Paljud organismid on suutnud kohaneda suurema mikroplasti kogusega keskkonnas, kas selle söömist vältides (Cole *et al.*, 2015 jt), seda kiiremini väljutades (Liang *et al.*, 2023) või seda isegi efektiivsemalt seedides (Sussarellu *et al.*, 2016 jt). On ka leitud, et mitmed kooslused on kontsentreerunud (mikro)plasti pinnale, seda kutsutakse plastisfääriks (Amaral-Zettler, *et al.*, 2020). Plastisfääridel levivad mitmed haigustekitajad ning liigirikkus on nendel üsna väike (Feng *et al.*, 2020; Yin *et al.*, 2022). Mikroplasti reostus tekitab organismides suurt stressi, kuna nad peavad seda vältima ning selle sissesöömisel väheneb nende energiavaru (Walkinshaw *et al.*, 2020). Sellele lisanduvad ka teised inimtekkelised keskkonnamõjud, millega mikroplasti reostus võib koosineda ja negatiivsed mõjud suurenda. Mikroplasti omadustest lähtuvalt võib see suurendada temperatuuri nii lokaalselt kui globaalselt, potentsiaalselt panustades kliimamuutuste kiirenemisele (Royer *et al.*, 2018 jt). Samuti võib see kiirendada korallriffide väljasuremist,

kuna niigi kliimamuutustest räsituna mõjub ka mikroplasti söömine korallile negatiivselt (Rotjan *et al.*, 2019 jt).

Antud töö eesmärgiks oli koguda teadmisi mikroplasti mõjudest ökosüsteemidele, neid kokkuvõtvalt kajastada ja analüüsida. Selles töö raames teada saadud informatsioon on sisendiks ICES-i (International Council for the Exploration of the Sea) WGBEC (Working Group on Biological Effect of Contaminants) töögrupi 2025. aasta aruandele.

Microplastic influence on processes within ecosystems

Summary

Today, due to the fast paced life in the world, an increasing amount of waste ends up in nature, it gets into both terrestrial and marine ecosystems. Over time the waste, especially plastic, breaks down into smaller pieces, or microplastics, which can have an impact on organisms living in the given environment. Although knowledge about the impact of microplastics on ecosystems has increased, the research done so far is not enough to understand the impact and nature of microplastics (Environment, U.N., 2017). It is necessary to study the effects of microplastics, as the research done is not sufficient to explain the negative effects of microplastics on the environment, on organisms, and ultimately on humans.

At smaller sizes, microplastic quickly accumulates in the body and spreads across trophic levels until it eventually reaches humans (Tekman, *et al.*, 2022). When microplastics enter an organism, it can increase its mortality, reduce reproduction and change behavior, and through these effects, population dynamics change (Walkinshaw *et al.*, 2020). The effects of microplastics differ based on the characteristics of ecosystems. There are significantly more studies on the effects of microplastics on marine ecosystems, which is why the greater impact of microplastics on marine organisms is widely reported. It has been suggested that more microplastics enter aquatic organisms because they have to actively filter water to feed and breathe (Li *et al.*, 2023). In contrast, research on terrestrial ecosystems has shown that 4-23 times higher amounts of microplastic end up there (Horton *et al.*, 2017), although not enough research has been done on the effects on organisms.

Many organisms have been able to adapt to a larger amount of microplastics in the environment, either by avoiding ingestion (Cole *et al.*, 2015), faster excretion (Liang *et al.*, 2023) or even digesting it more efficiently (Sussarellu *et al.*, 2016). It has also been found that several communities are concentrated on the surface of (micro)plastic, which is called the plastisphere (Amaral-Zettler *et al.*, 2020). Several pathogens spread on plastispheres and the species richness there is quite low (Feng *et al.*, 2020; Yin *et al.*, 2022). Microplastic pollution causes a lot of stress in organisms because they have to avoid it and when they ingest it, their energy reserve decreases (Walkinshaw *et al.*, 2020). Added to this are other anthropogenic environmental impacts, with which microplastic pollution can add up and the

negative effects increase. Based on the properties of microplastics, it can increase the temperature both locally and globally, thereby potentially contributing to the acceleration of climate change (Royer *et al.*, 2018). It can also accelerate the extinction of coral reefs, which are already damaged by climate change, and in addition with ingesting microplastics, can have more negative effect on the coral (Rotjan *et al.*, 2019).

The aim of this work was to collect knowledge about the effects of microplastics on ecosystems, and to summarize and analyze them. The information learned in this work is the input for the ICES (International Council for the Exploration of the Sea) WGBEC (Working Group on Biological Effect of Contaminants) working groups report in 2025.

Tänuavaldus

Suured tänuavaldused minu juhendajatele Randel Kreitsbergile ja Tuul Sepale, kes aitasid kaasa minu töö ülesehitusele, sisule ja vormistamisele. Sain neilt igal teemal abi kui enda teadmistest jäi puudu. Soovin tänada ka Vete-Mari Kuningat, kellela ma ei oleks osanud leida endale nii suurepäraseid juhendajaid ning oleksin tupikusse jäänud. Samuti tänan Tiiu Seppa, kes töö lõpusirgel veel viimaste lihvidega kaasa aitas ning Andreas Korjut, kes aitas veenduda töö loetavuses ka erialavälise isiku jaoks.

Kasutatud kirjandus

- Adriaens, P., Gruden, C., & McCormick, M. L. (2007). Biogeochemistry of Halogenated Hydrocarbons. *Treatise on Geochemistry*, 1–35. <https://doi.org/10.1016/B0-08043751-6/09162-3>
- Amaral-Zettler, L. A., Zettler, E. R., & Mincer, T. J. (2020). Ecology of the plastisphere. *Nature Reviews. Microbiology*, 18, 139–151. <https://doi.org/10.1038/s41579-0190308-0>
- Aminot, Y., Lanctôt, C., Bednarz, V., Robson, W. J., Taylor, A., Ferrier-Pagès, C., Metian, M., & Tolosa, I. (2020). Leaching of flame-retardants from polystyrene debris: Bioaccumulation and potential effects on coral. *Marine Pollution Bulletin*, 151, 110862. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110862>
- Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 62, 1596–1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>
- Araújo, A., & Malafaia, G. (2020). Microplastic ingestion induces behavioral disorders in mice: A preliminary study on the trophic transfer effects via tadpoles and fish. *Journal of Hazardous Materials*, 401, 123263. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123263>
- Avio, C. G., Gorbi, S., Milan, M., Benedetti, M., Fattorini, D., d’Errico, G., Pauletto, M., Bargelloni, L., & Regoli, F. (2015). Pollutants bioavailability and toxicological risk from microplastics to marine mussels. *Environmental Pollution*, 198, 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.12.021>
- Axworthy, J. B., & Padilla-Gamiño, J. L. (2019). Microplastics ingestion and heterotrophy in thermally stressed corals. *Scientific Reports*, 9, Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54698-7>
- Baho, D. L., Bundschuh, M., & Futter, M. N. (2021). Microplastics in terrestrial ecosystems: Moving beyond the state of the art to minimize the risk of ecological surprise. *Global Change Biology*, 27, 3969–3986. <https://doi.org/10.1111/gcb.15724>
- Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society: Biological Sciences*, 364, 1985–1998. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

- Ben Ismail, S., Costa, E., Jaziri, H., Morgana, S., Boukthir, M., Ben Ismail, M. A., Minetti, R., Montarsolo, A., Narizzano, R., Sammari, C., Faimali, M., & Garaventa, F. (2022). Evolution of the Distribution and Dynamic of Microplastic in Water and Biota: A Study Case From the Gulf of Gabes (Southern Mediterranean Sea). *Frontiers in Marine Science*, 9. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2022.786026>
- Bohdan, K. (2022). Estimating global marine surface microplastic abundance: Systematic literature review. *Science of The Total Environment*, 832, 155064. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155064>
- Boots, B., Russell, C. W., & Green, D. S. (2019). Effects of Microplastics in Soil Ecosystems: Above and Below Ground. *Environmental Science & Technology*, 53, 11496–11506. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03304>
- Browne, M. A., Dissanayake, A., Galloway, T. S., Lowe, D. M., & Thompson, R. C. (2008). *Environmental Science & Technology*, 42, 5026–5031. <https://doi.org/10.1021/es800249a>
- Chen, Q., Gundlach, M., Yang, S., Jiang, J., Velki, M., Yin, D., & Hollert, H. (2017). Quantitative investigation of the mechanisms of microplastics and nanoplastics toward zebrafish larvae locomotor activity. *Science of The Total Environment*, 584–585, 1022–1031. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.156>
- Collignon, A., Hecq, J.-H., Galgani, F., Collard, F., & Goffart, A. (2014). Annual variation in neustonic micro- and meso-plastic particles and zooplankton in the Bay of Calvi (Mediterranean–Corsica). *Marine Pollution Bulletin*, 79, 293–298. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.11.023>
- Chen, Q., Lackmann, C., Wang, W., Seiler, T.-B., Hollert, H., & Shi, H. (2020). Microplastics Lead to Hyperactive Swimming Behaviour in Adult Zebrafish. *Aquatic Toxicology*, 224, 105521. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2020.105521>
- Chiba, S., Saito, H., Fletcher, R., Yogi, T., Kayo, M., Miyagi, S., Ogido, M., & Fujikura, K. (2018). Human footprint in the abyss: 30 year records of deep-sea plastic debris. *Marine Policy*, 96, 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.03.022>
- Christensen, M. R., Graham, M. D., Vinebrooke, R. D., Findlay, D. L., Paterson, M. J., & Turner, M. A. (2006). Multiple anthropogenic stressors cause ecological surprises in boreal lakes. *Global Change Biology*, 12, 2316–2322.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01257.x>

- Citterich, F., Lo Giudice, A., & Azzaro, M. (2023). A plastic world: A review of microplastic pollution in the freshwaters of the Earth's poles. *Science of The Total Environment*, 869, 161847. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161847>
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 62, 2588–2597. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>
- Curren, E., Kuwahara, S. C., Yoshida, T., & Leong, S. C. Y. (2021). Marine microplastics in the ASEAN region: A review of the current state of knowledge. *Environmental Pollution*, 288, 117776. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117776>.
- De Falco, F., Di Pace, E., Cocca, M., & Avella, M. (2019). The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution. *Scientific Reports*, 9, Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43023-x>
- De Felice, B., Sabatini, V., Antenucci, S., Gattoni, G., Santo, N., Bacchetta, R., Ortenzi, M. A., & Parolini, M. (2019). Polystyrene microplastics ingestion induced behavioral effects to the cladoceran *Daphnia magna*. *Chemosphere*, 231, 423–431. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.115>
- de Sá, L. C., Oliveira, M., Ribeiro, F., Rocha, T. L., & Futter, M. N. (2018). Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: What do we know and where should we focus our efforts in the future? *Science of The Total Environment*, 645, 1029–1039. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.207>
- Díaz-Pérez, J. C., & Batal, K. D. (2002). Colored Plastic Film Mulches Affect Tomato Growth and Yield Via Changes in Root-zone Temperature. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 127, 127–135. <https://doi.org/10.21273/JASHS.127.1.127>
- Dong, Y., Gao, M., Song, Z., & Qiu, W. (2020). Microplastic particles increase arsenic toxicity to rice seedlings. *Environmental Pollution*, 259, 113892. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113892>
- D'Souza, J. M., Windsor, F. M., Santillo, D., & Ormerod, S. J. (2020). Food web transfer of plastics to an apex riverine predator. *Global Change Biology*, 26, 3846–3857. <https://doi.org/10.1111/gcb.15139>
- Duis, K., & Coors, A. (2016). Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: Sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects.

- Environmental Sciences Europe*, 28, 2. <https://doi.org/10.1186/s12302-015-0069-y>
- Eerkes-Medrano, D., Thompson, R. C., & Aldridge, D. C. (2015). Microplastics in freshwater systems: A review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs. *Water Research*, 75, 63–82. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.012>
- Egger, M., Nijhof, R., Quiros, L., Leone, G., Royer, S.-J., McWhirter, A. C., Kantakov, G. A., Radchenko, V. I., Pakhomov, E. A., Hunt, B. P. V., & Lebreton, L. (2020). A spatially variable scarcity of floating microplastics in the eastern North Pacific Ocean. *Environmental Research Letters*, 15, 114056. <https://doi.org/10.1088/17489326/abbb4f>
- Evangelidou, N., Grythe, H., Klimont, Z., Heyes, C., Eckhardt, S., Lopez-Aparicio, S., & Stohl, A. (2020). Atmospheric transport is a major pathway of microplastics to remote regions. *Nature Communications*, 11, Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17201-9>
- Everaert, G., De Rijcke, M., Lonneville, B., Janssen, C. R., Backhaus, T., Mees, J., van Sebille, E., Koelmans, A. A., Catarino, A. I., & Vandegehuchte, M. B. (2020). Risks of floating microplastic in the global ocean. *Environmental Pollution*, 267, 115499. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115499>
- Feng, L., He, L., Jiang, S., Chen, J., Zhou, C., Qian, Z.-J., Hong, P., Sun, S., & Li, C. (2020). Investigating the composition and distribution of microplastics surface biofilms in coral areas. *Chemosphere*, 252, 126565. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126565>
- Filbee-dexter, K., Pittman, J., Sauer, H., Alexander, S., Symons, C., & Burke, M. (2017). Ecological surprise: Concept, synthesis, and social dimensions. *Ecosphere*, 8. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2005>
- Gall, S. C., & Thompson, R. C. (2015). The impact of debris on marine life. *Marine Pollution Bulletin*, 92, 170–179. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.12.041>
- Galloway, T. S., Cole, M., & Lewis, C. (2017). Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. *Nature Ecology & Evolution*, 1, Article 5. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0116>
- Gigault, J., Halle, A. ter, Baudrimont, M., Pascal, P.-Y., Gauffre, F., Phi, T.-L., El Hadri, H., Grassl, B., & Reynaud, S. (2018). Current opinion: What is a nanoplastic? *Environmental Pollution*, 235, 1030–1034.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024><https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.11.023>

- Gkoutselis, G., Rohrbach, S., Harjes, J., Obst, M., Brachmann, A., Horn, M. A., & Rambold, G. (2021). Microplastics accumulate fungal pathogens in terrestrial ecosystems. *Scientific Reports, 11, Article 1*. <https://doi.org/10.1038/s41598-02192405-7>
- He, L., Wu, D., Rong, H., Li, M., Tong, M., & Kim, H. (2018). Influence of Nano- and Microplastic Particles on the Transport and Deposition Behaviors of Bacteria in Quartz Sand. *Environmental Science & Technology, 52*, 11555–11563. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01673>
- Horton, A. A., Walton, A., Spurgeon, D. J., Lahive, E., & Svendsen, C. (2017). Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Science of The Total Environment, 586*, 127–141. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190>
- Huang, Q., Lin, Y., Zhong, Q., Ma, F., & Zhang, Y. (2020). The Impact of Microplastic Particles on Population Dynamics of Predator and Prey: Implication of the Lotka-Volterra Model. *Scientific Reports, 10, Article 1*. <https://doi.org/10.1038/s41598020-61414-3>
- Huerta Lwanga, E., Gertsen, H., Gooren, H., Peters, P., Salánki, T., van der Ploeg, M., Besseling, E., Koelmans, A. A., & Geissen, V. (2016). Microplastics in the Terrestrial Ecosystem: Implications for *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta, Lumbricidae). *Environmental Science & Technology, 50*, 2685–2691. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05478>
- Huerta Lwanga, E., Mendoza Vega, J., Ku Quej, V., Chi, J. de los A., Sanchez del Cid, L., Chi, C., Escalona Segura, G., Gertsen, H., Salánki, T., van der Ploeg, M., Koelmans, A. A., & Geissen, V. (2017). Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain. *Scientific Reports, 7, Article 1*. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14588-2>
- Imhof, H. K., Ivleva, N. P., Schmid, J., Niessner, R., & Laforsch, C. (2013). Contamination of beach sediments of a subalpine lake with microplastic particles. *Current Biology, 23*, R867–R868. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.09.001>

- Jiang, Y., Yang, F., Hassan Kazmi, S. S. U., Zhao, Y., Chen, M., & Wang, J. (2022). A review of microplastic pollution in seawater, sediments and organisms of the Chinese coastal and marginal seas. *Chemosphere*, 286, 131677.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131677>
- Karami, A., Golieskardi, A., Ho, Y. B., Larat, V., & Salamatinia, B. (2017). Microplastics in eviscerated flesh and excised organs of dried fish. *Scientific Reports*, 7, Article 1.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-05828-6>
- Khalid, N., Aqeel, M., & Noman, A. (2020). Microplastics could be a threat to plants in terrestrial systems directly or indirectly. *Environmental Pollution*, 267, 115653.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115653>
- Khosrovyan, A., Doria, H. B., Kahru, A., & Pfenninger, M. (2022). Polyamide microplastic exposure elicits rapid, strong and genome-wide evolutionary response in the freshwater non-biting midge *Chironomus riparius*. *Chemosphere*, 299, 134452. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134452>
- Kim, I.-S., Chae, D.-H., Kim, S.-K., Choi, S., & Woo, S.-B. (2015). Factors Influencing the Spatial Variation of Microplastics on High-Tidal Coastal Beaches in Korea. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 69, 299–309.
<https://doi.org/10.1007/s00244-015-0155-6>
- Kole, P. J., Löhr, A. J., Van Belleghem, F. G. A. J., & Ragas, A. M. J. (2017). Wear and Tear of Tyres: A Stealthy Source of Microplastics in the Environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14, Article 10. <https://doi.org/10.3390/ijerph14101265>
- Kumkar, P., Gosavi, S. M., Verma, C. R., Pise, M., & Kalous, L. (2021). Big eyes can't see microplastics: Feeding selectivity and eco-morphological adaptations in oral cavity affect microplastic uptake in mud-dwelling amphibious mudskipper fish. *Science of The Total Environment*, 786, 147445.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147445>
- Kvale, K., Prowe, A. E. F., Chien, C.-T., Landolfi, A., & Oschlies, A. (2021). Zooplankton grazing of microplastic can accelerate global loss of ocean oxygen. *Nature Communications*, 12, Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22554-w>
- Ladewig, S. M., Coco, G., Hope, J. A., Vieillard, A. M., & Thrush, S. F. (2023). Realworld impacts of microplastic pollution on seafloor ecosystem function. *Science of The Total Environment*, 858, 160114.

- <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160114>
- Laglbauer, B. J. L., Franco-Santos, R. M., Andreu-Cazenave, M., Brunelli, L., Papadatou, M., Palatinus, A., Grego, M., & Deprez, T. (2014). Macrodebris and microplastics from beaches in Slovenia. *Marine Pollution Bulletin*, *89*, 356–366.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.09.036>
- Lahive, E., Walton, A., Horton, A. A., Spurgeon, D. J., & Svendsen, C. (2019). Microplastic particles reduce reproduction in the terrestrial worm *Enchytraeus crypticus* in a soil exposure. *Environmental Pollution*, *255*, 113174.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113174>
- Lebreton, L., Egger, M., & Slat, B. (2019). A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean. *Scientific Reports*, *9*, 12922.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-49413-5>
- Li, S., Ding, F., Flury, M., Wang, Z., Xu, L., Li, S., Jones, D. L., & Wang, J. (2022). Macro- and microplastic accumulation in soil after 32 years of plastic film mulching. *Environmental Pollution*, *300*, 118945.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118945>
- Li, X., Chen, Y., Zhang, S., Dong, Y., Pang, Q., Lynch, I., Xie, C., Guo, Z., & Zhang, P. (2023). From marine to freshwater environment: A review of the ecotoxicological effects of microplastics. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *251*, 114564.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114564>
- Liang, W., Li, B., Jong, M.-C., Ma, C., Zuo, C., Chen, Q., & Shi, H. (2023). Processoriented impacts of microplastic fibers on behavior and histology of fish. *Journal of Hazardous Materials*, *448*, 130856.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130856>
- Lu, Y., Zhang, Y., Deng, Y., Jiang, W., Zhao, Y., Geng, J., Ding, L., & Ren, H. (2016). Uptake and Accumulation of Polystyrene Microplastics in Zebrafish (*Danio rerio*) and Toxic Effects in Liver. *Environmental Science & Technology*, *50*, 4054–4060.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00183>
- Maaß, S., Daphi, D., Lehmann, A., & Rillig, M. C. (2017). Transport of microplastics by two collembolan species. *Environmental Pollution*, *225*, 456–459.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.03.009>
- McCormick, M. I., Chivers, D. P., Ferrari, M. C. O., Blandford, M. I., Nanninga, G. B., Richardson, C., Fakan, E. P., Vamvounis, G., Gulizia, A. M., & Allan, B. J. M.

- (2020). Microplastic exposure interacts with habitat degradation to affect behaviour and survival of juvenile fish in the field. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 287, 20201947. <https://doi.org/10.1098/rspb.2020.1947>
- McMahon, C. R., Holley, D., & Robinson, S. (1999). The diet of itinerant male Hooker's sea lions, *Phocarctos hookeri*, at sub-Antarctic Macquarie Island. *Wildlife Research*, 26, 839–846. <https://doi.org/10.1071/wr98079>
- Oliveira, M., Ribeiro, A., Hylland, K., & Guilhermino, L. (2013). Single and combined effects of microplastics and pyrene on juveniles (0+ group) of the common goby *Pomatoschistus microps* (Teleostei, Gobiidae). *Ecological Indicators*, 34, 641–647. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.06.019>
- Polis, G. A., Anderson, W. B., & Holt, R. D. (1997). Toward an Integration of Landscape and Food Web Ecology: The Dynamics of Spatially Subsidized Food Webs. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 28, 289–316. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.28.1.289>
- Possatto, F. E., Barletta, M., Costa, M. F., Ivar do Sul, J. A., & Dantas, D. V. (2011). Plastic debris ingestion by marine catfish: An unexpected fisheries impact. *Marine Pollution Bulletin*, 62, 1098–1102. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.01.036>
- Qi, R., Jones, D. L., Li, Z., Liu, Q., & Yan, C. (2020). Behavior of microplastics and plastic film residues in the soil environment: A critical review. *Science of The Total Environment*, 703, 134722. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134722>
- Rani-Borges, B., Meitern, R., Teesalu, P., Raudna-Kristoffersen, M., Kreitsberg, R., Heinlaan, M., Tuvikene, A., & Ivask, A. (2022). Effects of environmentally relevant concentrations of microplastics on amphipods. *Chemosphere*, 309, 136599. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136599>
- Rehse, S., Kloas, W., & Zarfl, C. (2016). Short-term exposure with high concentrations of pristine microplastic particles leads to immobilisation of *Daphnia magna*. *Chemosphere*, 153, 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.02.133>
- Riebesell, U., Aberle-Malzahn, N., Achterberg, E. P., Algueró-Muñiz, M., Alvarez Fernandez, S., Arístegui, J., Bach, L. T., Boersma, M., Boxhammer, T., Guan, W., Haunost, M., Horn, H. G., Löscher, C. R., Ludwig, A., Spisla, C., Sswat, M., Stange, P., & Taucher, J. (2018). Toxic algal bloom induced by ocean acidification disrupts the pelagic food web. *Nature Climate Change*, 8, Article 12. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0344-1>

- Rochman, C. M., Hoh, E., Kurobe, T., & Teh, S. J. (2013). Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress. *Scientific Reports*, *3*, Article 1. <https://doi.org/10.1038/srep03263>
- Rotjan, R. D., Sharp, K. H., Gauthier, A. E., Yelton, R., Lopez, E. M. B., Carilli, J., Kagan, J. C., & Urban-Rich, J. (2019). Patterns, dynamics and consequences of microplastic ingestion by the temperate coral, *Astrangia poculata*. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *286*, 20190726. <https://doi.org/10.1098/rspb.2019.0726>
- Royer, S.-J., Ferrón, S., Wilson, S. T., & Karl, D. M. (2018). Production of methane and ethylene from plastic in the environment. *PLOS ONE*, *13*, e0200574. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200574>
- Seeruttun, L. D., Raghbor, P., & Appadoo, C. (2023). Mangrove and microplastic pollution: A case study from a small island (Mauritius). *Regional Studies in Marine Science*, *62*, 102906. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.102906>
- Seuront, L. (2018). Microplastic leachates impair behavioural vigilance and predator avoidance in a temperate intertidal gastropod. *Biology Letters*, *14*, 20180453. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2018.0453>
- Sharma, S., Sharma, V., & Chatterjee, S. (2023). Contribution of plastic and microplastic to global climate change and their conjoining impacts on the environment—A review. *Science of The Total Environment*, *875*, 162627. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162627>
- Su, L., Xue, Y., Li, L., Yang, D., Kolandhasamy, P., Li, D., & Shi, H. (2016). Microplastics in Taihu Lake, China. *Environmental Pollution*, *216*, 711–719. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.06.036>
- Sulpis, O., Boudreau, B. P., Mucci, A., Jenkins, C., Trossman, D. S., Arbic, B. K., & Key, R. M. (2018). Current CaCO₃ dissolution at the seafloor caused by anthropogenic CO₂. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *115*, 11700–11705. <https://doi.org/10.1073/pnas.1804250115>
- Surendran, U., Jayakumar, M., Raja, P., Gopinath, G., & Chellam, P. V. (2023). Microplastics in terrestrial ecosystem: Sources and migration in soil environment. *Chemosphere*, *318*, 137946. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137946>
- Sussarellu, R., Suquet, M., Thomas, Y., Lambert, C., Fabioux, C., Pernet, M. E. J., Le

- Goïc, N., Quillien, V., Mingant, C., Epelboin, Y., Corporeau, C., Guyomarch, J., Robbens, J., Paul-Pont, I., Soudant, P., & Huvet, A. (2016). Oyster reproduction is affected by exposure to polystyrene microplastics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *113*, 2430–2435. <https://doi.org/10.1073/pnas.1519019113>
- Zhao, S., Zhu, L., & Li, D. (2016). Microscopic anthropogenic litter in terrestrial birds from Shanghai, China: Not only plastics but also natural fibers. *Science of The Total Environment*, *550*, 1110–1115. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.112>
- Zhao, S., Zhu, L., Wang, T., & Li, D. (2014). Suspended microplastics in the surface water of the Yangtze Estuary System, China: First observations on occurrence, distribution. *Marine Pollution Bulletin*, *86*, 562–568. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.06.032>
- Zhou, Y., Ashokkumar, V., Amobonye, A., Bhattacharjee, G., Sirohi, R., Singh, V., Flora, G., Kumar, V., Pillai, S., Zhang, Z., & Awasthi, M. K. (2023). Current research trends on cosmetic microplastic pollution and its impacts on the ecosystem: A review. *Environmental Pollution*, *320*, 121106. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121106>
- Zrimec, J., Kokina, M., Jonasson, S., Zorrilla, F., & Zelezniak, A. (2021). PlasticDegrading Potential across the Global Microbiome Correlates with Recent Pollution Trends. *mBio*, *12*, e02155-21. <https://doi.org/10.1128/mBio.02155-21>
- Tekman, M. B., Walther, B. A., Peter, C., Gutow, L & Bergmann, M. (2022). Impacts of plastic pollution in the oceans on marine species, biodiversity and ecosystems. *WWF*, 1–221. doi: 10.5281/zenodo.5898684
- Van Colen, C., Vanhove, B., Diem, A., & Moens, T. (2020). Does microplastic ingestion by zooplankton affect predator-prey interactions? An experimental study on larviphagy. *Environmental Pollution*, *256*, 113479. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113479>
- Vikas Madhav, N., Gopinath, K. P., Krishnan, A., Rajendran, N., & Krishnan, A. (2020). A critical review on various trophic transfer routes of microplastics in the context of the Indian coastal ecosystem. *Watershed Ecology and the Environment*, *2*, 25–41. <https://doi.org/10.1016/j.wsee.2020.08.001>
- von Moos, N., Burkhardt-Holm, P., & Köhler, A. (2012). Uptake and Effects of

- Microplastics on Cells and Tissue of the Blue Mussel *Mytilus edulis* L. after an Experimental Exposure. *Environmental Science & Technology*, *46*, 11327–11335. <https://doi.org/10.1021/es302332w>
- Walkinshaw, C., Lindeque, P. K., Thompson, R., Tolhurst, T., & Cole, M. (2020). Microplastics and seafood: Lower trophic organisms at highest risk of contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *190*, 110066. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110066>
- Wang, F., Zhang, X., Zhang, S., Zhang, S., & Sun, Y. (2020). Interactions of microplastics and cadmium on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in an agricultural soil. *Chemosphere*, *254*, 126791. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126791>
- Wang, J., Coffin, S., Sun, C., Schlenk, D., & Gan, J. (2019). Negligible effects of microplastics on animal fitness and HOC bioaccumulation in earthworm *Eisenia fetida* in soil. *Environmental Pollution*, *249*, 776–784. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.102>
- Wang, J., Liu, Q., Zhang, C., Wang, Y., Yang, F., Zhao, Y., & Jiang, Y. (2022). Microplastics shift macrobenthic community structures near a coastal nuclear power plant under construction in North East China. *Journal of Hazardous Materials*, *437*, 129335. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129335>
- Wang, J., Zheng, M., Lu, L., Li, X., Zhang, Z., & Ru, S. (2021). Adaptation of life-history traits and trade-offs in marine medaka (*Oryzias melastigma*) after whole life-cycle exposure to polystyrene microplastics. *Journal of Hazardous Materials*, *414*, 125537. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125537>
- Wang, J., Wang, M., Ru, S., & Liu, X. (2019). High levels of microplastic pollution in the sediments and benthic organisms of the South Yellow Sea, China. *Science of The Total Environment*, *651*, 1661–1669. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.007>
- Wang, Y., Zhou, B., Chen, H., Yuan, R., & Wang, F. (2022). Distribution, biological effects and biofilms of microplastics in freshwater systems—A review. *Chemosphere*, *299*, 134370. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134370>
- Warren, R., Price, J., VanDerWal, J., Cornelius, S., Sohl, H. (2018). The implications of the United Nations Paris Agreement on Climate Change for Globally Significant

- Biodiversity Areas. *Climatic Change*, 147, 395–409.
<https://doi.org/10.1007/s10584-0182158-6>
- Watts, A. J. R., Lewis, C., Goodhead, R. M., Beckett, S. J., Moger, J., Tyler, C. R., & Galloway, T. S. (2014). Uptake and Retention of Microplastics by the Shore Crab *Carcinus maenas*. *Environmental Science & Technology*, 48, 8823–8830.
<https://doi.org/10.1021/es501090e>
- Windsor, F. M., Tilley, R. M., Tyler, C. R., & Ormerod, S. J. (2019). Microplastic ingestion by riverine macroinvertebrates. *Science of The Total Environment*, 646, 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.271>
- Wright, S. L., Rowe, D., Thompson, R. C., & Galloway, T. S. (2013). Microplastic ingestion decreases energy reserves in marine worms. *Current Biology*, 23, R1031–R1033. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.10.068>
- Wu, H., Hou, J., & Wang, X. (2023). A review of microplastic pollution in aquaculture: Sources, effects, removal strategies and prospects. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 252, 114567. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114567>
- Yao, L., Hui, L., Yang, Z., Chen, X., & Xiao, A. (2020). Freshwater microplastics pollution: Detecting and visualizing emerging trends based on Citespace II. *Chemosphere*, 245, 125627. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125627>

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Hennessy-Elizabeth Dubrov,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose “Mikroplast ökosüsteemide siseste protsesside mõjutajana”, mille juhendajad on Randel Kreitsberg ja Tuul Sepp, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Hennessy-Elizabeth Dubrov

17.05.2023